

MATEMATICAMENTE.IT

GERARDO TROIANO GLORIA ROCCI

FISICA PER LA SCUOLA SUPERIORE

EQUILIBRIO MECCANICA
TERMOLOGIA ONDE
ELETTROMAGNETISMO
QUANTI RELATIVITA'

SECONDA EDIZIONE
CREATIVE COMMONS BY SA

ISBN 9788896354421

FISICA PER LA SCUOLA SUPERIORE - SECONDA EDIZIONE

Matematicamente.it

Gerardo Troiano Gloria Rocci

**FISICA PER LA SCUOLA SUPERIORE
S E C O N D A E D I Z I O N E**

**equilibrio – meccanica – termologia – onde
elettromagnetismo – quanti – relatività**

© Matematicamente.it - aprile 2019 seconda edizione
www.matematicamente.it - info@matematicamente.it

ISBN 9788896354421

Questo libro è rilasciato con licenza
Creative Commons BY-SA
Attribuzione – Condividi allo stesso modo 3.0
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>

ha collaborato: Antonio Bernardo

Immagine di copertina

Creata dal sito <http://www.canva.com/>

Icona per esperienze di laboratorio: <https://it.freepik.com/foto-vettori-gratuito/affari>

Icona video lezioni: <http://www.youtube.com>

QR-Code generati: <https://qrcode.tec-it.com/it>

Alcune immagini sono state prese da alcuni siti internet in una prima stesura per un uso personale del libro, non sempre è stato possibile rintracciare la provenienza delle immagini; i proprietari delle immagini, o di altri contenuti, che ritengono di non essere stati citati correttamente sono pregati di mettersi in contatto con l'autore <mailto:gerardo.troiano@istruzione.it> o con l'editore per gli interventi che si riterranno necessari; si fa presente che questo libro non ha scopo di lucro.

*Ulteriori risorse multimediali sono disponibili sul canale youtube **Gerardo Troiano**.*

a Leonardo e le sue innumerevoli scoperte che vive nel mondo dei colori con gli occhi di bimbo.

G.T.

Premessa

In questa seconda edizione sono stati corretti alcuni refusi, ed apportati piccoli ampliamenti teorici nei diversi capitoli. Il volume è comunque in continua evoluzione e presto verrà ampliato ulteriormente soprattutto nella parte dei problemi proposti e svolti.

A supporto di questo testo, numerose video lezioni presenti sul canale YouTube personale (<https://www.youtube.com/user/gerardotroiano1>), molte delle quali registrate direttamente in classe con gli alunni, mentre nella playlist “Problemi svolti FISICA” numerosi problemi affrontati in classe, svolti e commentati.

Gia la prima edizione è stata di enorme aiuto nel progettare la Didattica, permettendo di sperimentare con successo la metodologia Flipped Classroom (Classe Capovolta) potendo fornire materiale in formato digitale, affiancandolo alle video lezioni, in modo da consentire di acquisire gran parte degli contenuti teorici in piena autonomia e liberando così tempo per una didattica collaborativa, partecipata, inclusiva, in cui i discenti sono protagonisti del percorso di insegnamento-apprendimento che prescinde dalla mera trasmissione di contenuti epistemologici della disciplina.

Per alunni con Disturbi Specifici dell’Apprendimento (DSA) il volume si presta particolarmente bene, disponendo di molte video lezioni che consentono di poter vedere ed ascoltare gli argomenti di volta in volta affrontati in modo da superare quelle difficoltà e consentire un apprendimento attivo ed efficace.

La Fisica è di suo una disciplina che non si può apprendere senza sperimentare, sia in laboratorio che in modo teorico con i ragionamenti logici, deduttivi, induttivi e filosofici che hanno portato le grandi menti ad ipotizzare teorie come quella Quantistica e della Relatività, inizialmente viste come bizzarre, non intuitive e non supportate dal rigore sperimentale, ma poi col tempo divenute base irrinunciabile di fare Fisica nei tempi odierni. A corredo del volume, numerose applet proposte di esperimenti virtuali, in modo da meglio comprendere gli argomenti di studio e, seppur virtualmente, toccarli con mano.

La Natura è scritta con leggi matematiche e le regole che la compongono sono la Fisica. All’uomo spetta il compito di interpretarle, di capirle.

Aprile, 2019

gli autori

INFORMAZIONI SUL TESTO

RIQUADRO INFORMATIVO


Nelle sezioni di lato, si potranno trovare sezioni colorate in cui ci saranno curiosità, approfondimenti, chiarimenti vari. Cerca di leggerle sempre potrai focalizzare meglio alcuni concetti. Ad esempio, potrà apparire un riquadro di questo tipo

Senza la notazione scientifica sarebbe assurdo pensare di riportare numeri piccolissimi (0,00000000145) o numeri grandissimi (2'457'847'854'598'745 8) in un'espressione ed eseguire calcoli in questo modo. L'errore di calcolo sarebbe quasi certo!



quando nel paragrafo è presente questo logo, vi è un video su un quesito proposto in una delle simulazioni proposte dal Ministero. Anche per questi video è disponibile il QR-Code.

VIDEOLEZIONI

L'argomento per cui è disponibile una **video lezione**, è contrassegnata con il simbolo  posto di fianco al titolo del paragrafo.

Cliccando una sola volta sull'immagine, si accederà direttamente al video proposto.



Per la versione **cartacea** del libro, basterà inquadrare il **QR-code** presente di fianco al paragrafo, con una delle applicazioni gratuite presenti nello Store del proprio smartphone, per accedere al contenuto. Si potrà così vedere direttamente la video lezione proposta.

ESPERIENZE DI LABORATORIO

La presenza dell'icona di fianco in una determinata pagina, indica che è suggerita una attività laboratoriale, con applet proposte liberamente sul sito <https://phet.colorado.edu/it/simulations/category/by-level/high-school>. Cliccando sull'icona si accede alla risorsa.



Laboratorio xx
Descrizione

Per segnalare errori, refusi o proposte di aggiunta di nuovi argomenti, scrivere a gerardo.troiano@istruzione.it

INDICE

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Introduzione alla fisica | 1 |
| 1.1 | Introduzione alla Fisica | 2 |
| 1.2 | Metodo scientifico sperimentale | 2 |
| 1.3 | Grandezze fisiche fondamentali | 3 |
| 1.4 | Grandezze fisiche derivate | 5 |
| 1.5 | Aree e Volumi di figure geometriche note | 5 |
| 1.6 | Densità di massa | 6 |
| 1.7 | Misure | 7 |
| 1.8 | Strumenti di misura | 7 |
| 1.9 | Errori di misura | 7 |
| 1.10 | C.L.I.L. project | 8 |
| 1.11 | Sensibilità di uno strumento | 10 |
| 1.12 | Precisione di uno strumento | 11 |
| 1.13 | Portata o fondo scala | 11 |
| 1.14 | Errore assoluto | 11 |
| 1.15 | Valore medio | 11 |
| 1.16 | Errore relativo | 11 |
| 1.17 | Misura diretta e indiretta | 12 |
| 1.18 | Criteri di arrotondamento | 13 |
| 1.19 | Cifre significative | 13 |
| 1.20 | Notazione scientifica | 13 |
| 1.21 | Richiamo di matematica sulle potenze | 14 |
| 1.22 | Rappresentazione dei dati | 15 |
| 1.23 | Leggi di proporzionalità | 15 |
| 1.24 | Relazione di laboratorio di fisica | 17 |
| 1.25 | Il metodo per impostare e risolvere i problemi di fisica | 20 |
| 1.26 | Riassumendo e glossario dei termini incontrati | 23 |
| 1.27 | Problemi proposti | 25 |
| 1.28 | In laboratorio | 29 |
| 1.29 | Approfondimento: Galileo Galilei | 30 |
| 2. | Le Forze | 32 |
| 2.1 | Le forze | 33 |
| 2.2 | Forze di contatto e forze a distanza | 33 |
| 2.3 | Vincoli e Reazioni vincolari | 33 |
| 2.4 | Unità di misura di una forza | 33 |
| 2.5 | Introduzione ai vettori | 34 |
| 2.6 | Composizione di vettori | 35 |
| 2.7 | Prodotto di un vettore per uno scalare | 37 |
| 2.8 | Prodotto scalare di due vettori | 38 |
| 2.9 | Prodotto vettoriale di due vettori | 38 |
| 2.10 | La Forza Elastica | 39 |
| 2.11 | Le forze d'attrito | 40 |
| 2.12 | C.L.I.L. project | 41 |
| 2.13 | Forza peso e massa | 43 |
| 2.14 | Relazione tra peso e massa | 43 |
| 2.15 | La forza peso sugli altri corpi celesti | 44 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.16 | <i>Richiami di Goniometria e di Trigonometria</i> | 44 |
| 2.17 | <i>Relazione fondamentale della goniometria</i> | 45 |
| 2.18 | <i>Tangente e cotangente goniometrica</i> | 46 |
| 2.19 | <i>Trigonometria</i> | 47 |
| 2.20 | <i>Formule Goniometriche</i> | 49 |
| 2.21 | <i>Punto materiale e corpo rigido</i> | 49 |
| 2.22 | <i>Scomposizione di una forza</i> | 50 |
| 2.23 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 51 |
| 2.24 | <i>Problemi proposti</i> | 52 |
| 2.25 | <i>In laboratorio</i> | 53 |
| 2.26 | <i>Approfondimento: Le forze fondamentali</i> | 54 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3. | <i>L'equilibrio</i> | 59 |
| 3.1 | <i>Equilibrio di un corpo sul piano orizzontale</i> | 60 |
| 3.2 | <i>Momento di una forza rispetto a un punto</i> | 61 |
| 3.3 | <i>Momento di una coppia di forze</i> | 62 |
| 3.4 | <i>Esempio di momento di una forza</i> | 63 |
| 3.5 | <i>Equilibrio del corpo rigido</i> | 63 |
| 3.6 | <i>Confronto tra corpo rigido e punto materiale</i> | 64 |
| 3.7 | <i>Il baricentro</i> | 65 |
| 3.8 | <i>Le macchine semplici</i> | 65 |
| 3.9 | <i>Le Leve</i> | 66 |
| 3.10 | <i>La Carrucola</i> | 67 |
| 3.11 | <i>La pressione</i> | 68 |
| 3.12 | <i>La pressione del sangue</i> | 69 |
| 3.13 | <i>I fluidi</i> | 69 |
| 3.14 | <i>Esperienza di Pascal</i> | 70 |
| 3.15 | <i>Principio di Pascal</i> | 70 |
| 3.16 | <i>Peso specifico di un corpo</i> | 70 |
| 3.17 | <i>Il torchio idraulico</i> | 70 |
| 3.18 | <i>La legge di Stevin</i> | 71 |
| 3.19 | <i>Pressione idrostatica</i> | 72 |
| 3.20 | <i>Paradosso idrostatico</i> | 73 |
| 3.21 | <i>Principio dei vasi comunicanti</i> | 73 |
| 3.22 | <i>Capillarità</i> | 73 |
| 3.23 | <i>Vasi comunicanti con liquidi diversi</i> | 73 |
| 3.24 | <i>C.L.I.L. project</i> | 75 |
| 3.25 | <i>Principio di Archimede</i> | 76 |
| 3.26 | <i>Corpo immerso in un liquido</i> | 77 |
| 3.27 | <i>Corpo immerso nell'atmosfera (o in un altro gas)</i> | 78 |
| 3.28 | <i>Pressione atmosferica e sua misura</i> | 78 |
| 3.29 | <i>Manometri e Barometri</i> | 79 |
| 3.30 | <i>Viscosità di un fluido</i> | 79 |
| 3.31 | <i>Fluido ideale</i> | 80 |
| 3.32 | <i>Concetto di "tubo di flusso"</i> | 80 |
| 3.33 | <i>Legge di Bernoulli</i> | 81 |
| 3.34 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 83 |
| 3.35 | <i>Problemi proposti</i> | 84 |
| 3.36 | <i>In laboratorio</i> | 88 |
| 3.37 | <i>Approfondimento: Archimede da Siracusa</i> | 89 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4. | <i>Il movimento: Cinematica e Dinamica</i> | 92 |
| 4.1 | <i>Sistemi di riferimento</i> | 93 |
| 4.2 | <i>Sistemi di riferimento bidimensionali</i> | 93 |
| 4.3 | <i>Traiettoria</i> | 94 |
| 4.4 | <i>Concetto di velocità</i> | 95 |
| 4.5 | <i>Moto relativo</i> | 95 |
| 4.6 | <i>Velocità media</i> | 97 |
| 4.7 | <i>Cenni sul concetto di limite e derivata di una funzione</i> | 98 |
| 4.8 | <i>Velocità istantanea</i> | 98 |
| 4.9 | <i>Legge oraria del moto</i> | 99 |
| 4.10 | <i>Moto rettilineo uniforme e sua legge oraria</i> | 99 |
| 4.11 | <i>Vettore spostamento e velocità</i> | 101 |
| 4.12 | <i>Accelerazione media e istantanea</i> | 101 |
| 4.13 | <i>Moto rettilineo uniformemente accelerato</i> | 102 |
| 4.14 | <i>L'accelerazione di gravità</i> | 103 |
| 4.15 | <i>Accelerazione e sicurezza</i> | 104 |
| 4.16 | <i>C.L.I.L. project</i> | 105 |
| 4.17 | <i>Moto circolare uniforme</i> | 106 |
| 4.18 | <i>La velocità tangenziale</i> | 107 |
| 4.19 | <i>Velocità angolare</i> | 107 |
| 4.20 | <i>Accelerazione centripeta</i> | 108 |
| 4.21 | <i>Accelerazione tangenziale</i> | 108 |
| 4.22 | <i>Moto armonico</i> | 108 |
| 4.23 | <i>Il pendolo semplice</i> | 109 |
| 4.24 | <i>Moto di un corpo lanciato orizzontalmente</i> | 111 |
| 4.25 | <i>Moto di un corpo lanciato verticalmente</i> | 112 |
| 4.26 | <i>Moto di un corpo lanciato in obliquo</i> | 112 |
| 4.27 | <i>Moto generato da una molla</i> | 113 |
| 4.28 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 115 |
| 4.29 | <i>Attrito viscoso del mezzo</i> | 115 |
| 4.30 | <i>Forze di attrito volvente</i> | 116 |
| 4.31 | <i>Problemi proposti</i> | 118 |
| 4.32 | <i>In laboratorio</i> | 121 |
| 4.33 | <i>Approfondimento: Facebook e la fisica</i> | 122 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5. | <i>Forze e moto: Principi della Dinamica</i> | 123 |
| 5.1 | <i>Le cause del moto</i> | 124 |
| 5.2 | <i>I sistemi di riferimento</i> | 124 |
| 5.3 | <i>Primo principio della dinamica o d'inerzia</i> | 125 |
| 5.4 | <i>Secondo principio della dinamica o di Newton</i> | 127 |
| 5.5 | <i>Massa inerziale e massa gravitazionale</i> | 128 |
| 5.6 | <i>Equivalenza tra massa inerziale e gravitazionale</i> | 129 |
| 5.7 | <i>Terzo principio della dinamica</i> | 130 |
| 5.8 | <i>La gravitazione universale</i> | 131 |
| 5.9 | <i>C.L.I.L. project</i> | 133 |
| 5.10 | <i>Accelerazione gravità su un pianeta</i> | 134 |
| 5.11 | <i>Le leggi di Keplero</i> | 135 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.12 | <i>Moto di un satellite intorno alla Terra</i> | 137 |
| 5.13 | <i>Campo gravitazionale</i> | 140 |
| 5.14 | <i>Sistemi di riferimento non inerziali</i> | 142 |
| 5.15 | <i>Inerzia e forze apparenti</i> | 142 |
| 5.16 | <i>Forza apparente in un ascensore</i> | 144 |
| 5.17 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 145 |
| 5.18 | <i>Problemi proposti</i> | 147 |
| 5.19 | <i>In laboratorio</i> | 148 |
| 5.20 | <i>Approfondimento: Keplero e le sue leggi</i> | 149 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6. | <i>Lavoro ed Energia, energia e leggi di conservazione</i> | 156 |
| 6.1 | <i>Quantità di moto e impulso</i> | 157 |
| 6.2 | <i>Teorema dell'impulso</i> | 158 |
| 6.3 | <i>Sistema isolato</i> | 159 |
| 6.4 | <i>Principio di conservazione della quantità di moto</i> | 159 |
| 6.5 | <i>Il lavoro</i> | 165 |
| 6.6 | <i>C.L.I.L. project</i> | 167 |
| 6.7 | <i>Il lavoro di una forza non costante</i> | 168 |
| 6.8 | <i>La potenza</i> | 169 |
| 6.9 | <i>L'energia</i> | 170 |
| 6.10 | <i>Energia cinetica</i> | 170 |
| 6.11 | <i>Teorema dell'energia cinetica</i> | 170 |
| 6.12 | <i>Energia potenziale gravitazionale</i> | 171 |
| 6.13 | <i>Forza conservativa</i> | 171 |
| 6.14 | <i>Energia potenziale elastica</i> | 172 |
| 6.15 | <i>Energia meccanica</i> | 173 |
| 6.16 | <i>Principio di conservazione dell'energia meccanica</i> | 173 |
| 6.17 | <i>Principio di conservazione con forze non conservative</i> | 174 |
| 6.18 | <i>Macchine e loro rendimento</i> | 175 |
| 6.19 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 176 |
| 6.20 | <i>Problemi proposti</i> | 177 |
| 6.21 | <i>In laboratorio</i> | 179 |
| 6.22 | <i>Approfondimento: Le fonti rinnovabili d'energia</i> | 180 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7. | <i>Temperatura e calore</i> | 181 |
| 7.1 | <i>Temperatura e calore</i> | 182 |
| 7.2 | <i>Unità di misura del calore</i> | 182 |
| 7.3 | <i>La materia</i> | 183 |
| 7.4 | <i>Termometro</i> | 184 |
| 7.5 | <i>Definizione operativa di temperatura</i> | 185 |
| 7.6 | <i>Scale termiche</i> | 185 |
| 7.7 | <i>Conversioni tra scale termiche</i> | 186 |
| 7.8 | <i>Dilatazione termica</i> | 187 |
| 7.9 | <i>L'anomalia dell'acqua</i> | 191 |
| 7.10 | <i>La dilatazione dei gas</i> | 192 |
| 7.11 | <i>CLIL project</i> | 193 |
| 7.12 | <i>Calore specifico</i> | 194 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.13 | Capacità termica di un corpo | 196 |
| 7.14 | Legge fondamentale della calorimetria | 196 |
| 7.15 | Temperatura di equilibrio | 197 |
| 7.16 | Il calorimetro | 199 |
| 7.17 | Equivalenza tra lavoro e calore | 200 |
| 7.18 | Potere calorifico | 201 |
| 7.19 | I passaggi di stato | 202 |
| 7.20 | Calore latente | 203 |
| 7.21 | Trasmissione del calore | 204 |
| 7.22 | La conservazione di calore | 206 |
| 7.23 | La dissipazione di calore | 207 |
| 7.24 | Il freecooling | 207 |
| 7.25 | Esempio di trasmissione forzata del calore | 207 |
| 7.26 | Esempio di trasmissione naturale del calore | 207 |
| 7.27 | Riassumendo e glossario dei termini incontrati | 208 |
| 7.28 | Problemi proposti | 210 |
| 7.29 | In laboratorio | 214 |
| 7.30 | Approfondimento: la scala Fahrenheit | 215 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8. | Trasformazioni termodinamiche | 216 |
| 8.1 | Sistemi termodinamici | 217 |
| 8.2 | I gas | 219 |
| 8.3 | Calore specifico molare | 222 |
| 8.4 | Equilibrio termodinamico | 224 |
| 8.5 | La legge di Boyle e Mariotte | 224 |
| 8.6 | La legge di Avogadro | 225 |
| 8.7 | Notazione sulle temperature Celsius e Kelvin | 225 |
| 8.8 | Prima legge di Gay-Lussac o di Charles | 226 |
| 8.9 | Seconda legge di Gay-Lussac | 227 |
| 8.10 | Gas ideale o gas perfetto | 228 |
| 8.11 | Equazione di stato dei gas perfetti | 228 |
| 8.12 | C.L.I.L. Project | 230 |
| 8.13 | Teoria cinetica dei gas | 231 |
| 8.14 | Pressione in un gas perfetto | 232 |
| 8.15 | Energia interna di un gas perfetto | 233 |
| 8.16 | Bernoulli e la teoria cinetica dei gas | 233 |
| 8.17 | Trasformazioni adiabatiche | 233 |
| 8.18 | Cicli termodinamici | 235 |
| 8.19 | Macchina termodinamica | 235 |
| 8.20 | Il motore a scoppio e il ciclo Otto | 236 |
| 8.21 | Il rendimento di una macchina termica | 237 |
| 8.22 | Ciclo di Carnot | 237 |
| 8.23 | Teorema di Carnot | 239 |
| 8.24 | Il ciclo frigorifero | 239 |
| 8.25 | Il principio zero della termodinamica | 241 |
| 8.26 | Il primo principio della termodinamica | 242 |
| 8.27 | Secondo principio della termodinamica | 242 |
| 8.28 | Entropia | 244 |
| 8.29 | Riassumendo e glossario dei termini incontrati | 249 |
| 8.30 | Problemi proposti | 251 |

| | | |
|------|--|-----|
| 8.31 | <i>In laboratorio</i> | 252 |
| 8.32 | <i>Approfondimento: William Thomson Kelvin</i> | 253 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9. | <i>Le onde</i> | 254 |
| 9.1 | <i>Cos'è un'onda</i> | 255 |
| 9.2 | <i>Il suono</i> | 259 |
| 9.3 | <i>Caratteristiche di un suono semplice</i> | 260 |
| 9.4 | <i>C.L.I.L. Project</i> | 264 |
| 9.3 | <i>Effetto Doppler</i> | 266 |
| 9.4 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 269 |
| 9.5 | <i>Problemi proposti</i> | 270 |
| 9.6 | <i>Approfondimento: I terremoti</i> | 273 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 10. | <i>Luce e ottica</i> | 276 |
| 10.1 | <i>La natura della luce: onda o particella?</i> | 277 |
| 10.2 | <i>La propagazione della luce</i> | 278 |
| 10.3 | <i>La velocità della luce</i> | 280 |
| 10.4 | <i>corpi trasparenti, opachi e traslucidi</i> | 281 |
| 10.5 | <i>La riflessione della luce</i> | 281 |
| 10.6 | <i>Principio di Fermat</i> | 282 |
| 10.7 | <i>Principio di Huygens-Fresnel</i> | 282 |
| 10.8 | <i>La rifrazione della luce</i> | 283 |
| 10.9 | <i>Indice di rifrazione</i> | 284 |
| 10.10 | <i>Legge di Snell-Cartesio</i> | 284 |
| 10.11 | <i>La dispersione della luce: i colori</i> | 285 |
| 10.12 | <i>La diffrazione della luce</i> | 286 |
| 10.13 | <i>L'interferenza</i> | 287 |
| 10.14 | <i>Le lenti</i> | 289 |
| 10.15 | <i>Formazione delle immagini</i> | 291 |
| 10.16 | <i>Aberrazioni ottiche</i> | 292 |
| 10.17 | <i>Gli strumenti ottici</i> | 293 |
| 10.18 | <i>Difetti della vista</i> | 294 |
| 10.19 | <i>CLIL Project</i> | 295 |
| 10.20 | <i>Defects of vision</i> | 295 |
| 10.21 | <i>Illusioni ottiche</i> | 296 |
| 10.22 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 297 |
| 10.23 | <i>Problemi proposti</i> | 298 |
| 10.24 | <i>In laboratorio</i> | 301 |
| 10.25 | <i>Approfondimento: Il telescopio spaziale</i> | 302 |

| | | |
|------------|---------------------------------------|-----|
| 11. | <i>Elettrostatica</i> | 304 |
| 11.1 | <i>Elettrizzazione</i> | 305 |
| 11.2 | <i>Conduttori e isolanti</i> | 307 |
| 11.3 | <i>Elettroscopio</i> | 307 |
| 11.4 | <i>Legge di Coulomb</i> | 308 |
| 11.5 | <i>Dipolo elettrico</i> | 309 |
| 11.6 | <i>I materiali dielettrici</i> | 310 |
| 11.7 | <i>Legge di Coulomb generalizzata</i> | 310 |
| 11.8 | <i>Concetto di campo</i> | 310 |
| 11.9 | <i>Flusso di un vettore</i> | 314 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 11.10 | <i>Energia potenziale elettrica</i> | 319 |
| 11.11 | <i>Il potenziale elettrico</i> | 319 |
| 11.12 | <i>Teorema di Gauss</i> | 316 |
| 11.13 | <i>Gabbia di Faraday</i> | 317 |
| 11.14 | <i>Applicazioni della gabbia di Faraday</i> | 318 |
| 11.15 | <i>CLIL project</i> | 321 |
| 11.16 | <i>Distribuzione di cariche su un conduttore</i> | 322 |
| 11.17 | <i>Densità superficiale di carica</i> | 322 |
| 11.18 | <i>Campo elettrico generato da un filo carico</i> | 323 |
| 11.19 | <i>Campo elettrico generato da una distribuzione sferica di cariche</i> | 325 |
| 11.20 | <i>I condensatori</i> | 326 |
| 11.21 | <i>La capacità elettrica</i> | 327 |
| 11.22 | <i>Tipi di condensatori</i> | 328 |
| 11.23 | <i>La polarizzazione di un dielettrico</i> | 329 |
| 11.24 | <i>Energia accumulata nei condensatori</i> | 331 |
| 11.25 | <i>Sistemi di condensatori</i> | 332 |
| 11.26 | <i>Moto di una carica in un campo elettrico uniforme</i> | 335 |
| 11.27 | <i>Riassumendo e glossario dei termini incontrati</i> | 337 |
| 11.28 | <i>Problemi proposti</i> | 339 |
| 11.29 | <i>In laboratorio</i> | 345 |
| 11.30 | <i>Approfondimento: Charles Augustin de Coulomb</i> | 347 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 12. | <i>La corrente elettrica</i> | 349 |
| 12.1 | <i>La corrente elettrica</i> | 350 |
| 12.2 | <i>Intensità della corrente elettrica</i> | 353 |
| 12.3 | <i>Il circuito elettrico</i> | 354 |
| 12.4 | <i>Amperometro e Voltmetro</i> | 354 |
| 12.5 | <i>Il generatore di tensione</i> | 355 |
| 12.6 | <i>La resistenza elettrica</i> | 357 |
| 12.7 | <i>Prima legge di Ohm</i> | 358 |
| 12.8 | <i>CLIL project</i> | 359 |
| 12.9 | <i>Seconda legge di Ohm</i> | 362 |
| 12.10 | <i>Resistività e temperatura</i> | 362 |
| 12.11 | <i>I superconduttori</i> | 363 |
| 12.12 | <i>Forza elettromotrice (f.e.m.)</i> | 365 |
| 12.13 | <i>Energia e potenza della corrente elettrica</i> | 366 |
| 12.14 | <i>Energia elettrica</i> | 367 |
| 12.15 | <i>Potenza elettrica</i> | 368 |
| 12.16 | <i>Effetto Joule</i> | 369 |
| 12.17 | <i>Definizioni di ramo, nodo e maglia</i> | 371 |
| 12.18 | <i>Leggi di Kirchhoff</i> | 371 |
| 12.19 | <i>Resistenze in serie e in parallelo</i> | 374 |
| 12.20 | <i>Circuiti RC</i> | 379 |
| 12.21 | <i>Elettrolisi</i> | 382 |
| 12.22 | <i>La pila di Volta</i> | 383 |
| 12.23 | <i>Disputa Galvani-Volta</i> | 385 |
| 12.24 | <i>Corrente elettrica nei gas</i> | 386 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 12.25 | Conduzione elettrica nel vuoto | 386 |
| 12.26 | I semiconduttori | 387 |
| 12.27 | Circuiti integrati e chip | 392 |
| 12.28 | Riassumendo e glossario dei termini incontrati | 394 |
| 12.29 | Problemi proposti | 395 |
| 12.30 | In laboratorio | 399 |
| 12.31 | Approfondimento: Georg Simon Ohm | 400 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 13. | Il magnetismo e le interazioni con l'elettricità | 404 |
| 13.1 | Fenomeni magnetici | 405 |
| 13.2 | Il campo magnetico | 407 |
| 13.3 | Campo magnetico terrestre | 408 |
| 13.4 | C.L.I.L. project | 410 |
| 13.5 | Esperienza di Oersted | 412 |
| 13.6 | Esperienza di Faraday | 413 |
| 13.7 | Esperienza di Ampère tra corrente e corrente | 413 |
| 13.8 | Circuitazione di campo magnetico. | 414 |
| 13.9 | Legge di Ampere | 414 |
| 13.10 | Legge di Biot-Savart | 415 |
| 13.11 | Campo magnetico nel centro di una spira circolare | 417 |
| 13.12 | Campo magnetico in un solenoide | 417 |
| 13.13 | Ciclo di isteresi magnetica | 419 |
| 13.14 | Applicazioni: Elettrocalamita | 421 |
| 13.15 | Dipolo magnetico | 421 |
| 13.16 | L'origine del magnetismo e ipotesi di Ampère | 423 |
| 13.17 | Dominio di Weiss | 424 |
| 13.18 | Il moto di una carica elettrica in un campo | 425 |
| 13.19 | Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente | 428 |
| 13.20 | Il motore elettrico a corrente continua | 429 |
| 13.21 | Il galvanometro | 431 |
| 13.22 | Riassumendo e glossario dei termini incontrati | 433 |
| 13.23 | Problemi proposti | 434 |
| 13.24 | In laboratorio | 438 |
| 13.25 | Andrè Marie Ampère | 439 |

| | | |
|------------|------------------------------------|------------|
| 14. | L'elettromagnetismo | 441 |
| 14.1 | Correnti indotte | 442 |
| 14.2 | Il flusso dell'induzione magnetica | 444 |
| 14.3 | Induttanza | 447 |
| 14.4 | Autoinduzione | 447 |
| 14.5 | Corrente alternata | 449 |
| 14.6 | L'alternatore e la dinamo | 451 |
| 14.7 | Energia elettrica | 453 |
| 14.8 | C.L.I.L. project | 454 |
| 14.9 | Il circuito resistenza induttanza | 455 |
| 14.10 | Impedenza e reattanza | 458 |
| 14.11 | Onde elettromagnetiche | 459 |
| 14.12 | La natura della luce | 462 |

- 14.13 *Le equazioni di Maxwell sull'elettromagnetismo* 463
14.14 *Riassumendo e glossario dei termini incontrati* 468
14.15 *Problemi proposti* 469
14.16 *Michael Faraday* 471

- 15. *La fisica moderna* 473**
15.1 *La crisi della fisica classica* 474
15.2 *La radiazione di corpo nero* 476
15.3 *L'effetto fotoelettrico* 478
15.4 *CLIL project* 480
15.5 *Nascita della Meccanica Quantistica - L'Effetto Compton* 481
15.6 *La meccanica quantistica* 482
15.7 *Il Paradosso del Gatto di Schrödinger* 483
15.8 *La lunghezza d'onda di una particella* 484
15.9 *Il principio di indeterminazione di Heisenberg* 486
15.10 *Il Principio di Complementarietà di Bohr* 487
15.11 *L'Effetto Tunnel* 488
15.12 *Forze nucleari* 490
15.13 *Struttura atomica* 491
15.14 *La radioattività* 495
15.15 *Le forze fondamentali in natura* 496
15.16 *Le particelle elementari: leptoni e quark* 497
15.17 *L'unificazione delle forze: Teoria del tutto* 503
15.18 *Il Bosone di Higgs* 504
15.19 *Gli acceleratori di particelle* 505
15.20 *Teoria della relatività di Einstein* 506
15.21 *Trasformazioni di Lorentz* 512
15.22 *I buchi neri* 515
15.23 *Riassumendo e glossario dei termini incontrati* 518
15.24 *Problemi proposti* 519
15.25 *Albert Einstein* 523

16 *Matematica e Fisica* 525

- Indice analitico* 537
Sitografia bibliografica, indice delle figure 546
Laboratori proposti 541
Videografia 562
Contributi 563

1. Introduzione alla fisica

Prerequisiti

Saper eseguire le comuni operazioni in \mathbb{R} , saper riconoscere le figure geometriche più comuni e le loro caratteristiche (aree e volumi)

Sapere

Conoscere il metodo scientifico, il significato di grandezza, dell'uso degli strumenti di misura, gli errori e loro tipi, caratteristiche degli strumenti, errori assoluto e relativo, conoscere i criteri di arrotondamento, il significato di cifre significative, della notazione scientifica, sapere come si rappresentano i dati.

Saper fare

Saper distinguere tra grandezze fondamentali e derivate, saper utilizzare i più comuni strumenti di misura, saper ridurre gli errori nella misura sia scegliendo adeguatamente gli strumenti che utilizzandoli per evitare i comuni errori accidentali. Saper scegliere i giusti strumenti in base alle grandezze da misurare, con particolare riguardo alla loro portata e sensibilità. Saper trattare con i dati, sapere eseguire arrotondamenti e portare i dati in notazione scientifica laddove richiesto. Sapere riconoscere un qualunque tipo di proporzionalità. Saper redigere una relazione di laboratorio. Saper affrontare, in linee generali, un problema.



1.1 Introduzione alla Fisica

La fisica è la scienza della natura nel senso più ampio. Scopo della fisica è lo studio dei fenomeni naturali, ossia di tutti gli eventi che possano essere descritti ovvero quantificati attraverso grandezze fisiche opportune, al fine di stabilire *principi* e *leggi* che regolano le interazioni tra le grandezze stesse e rendano conto delle loro reciproche variazioni. Quest'obiettivo è talvolta raggiunto attraverso la fornitura di uno schema semplificato, o modello, del fenomeno descritto. L'insieme di principi e leggi fisiche relative ad una certa classe di fenomeni osservati definiscono una teoria fisica deduttiva, coerente e relativamente *auto consistente*, costruita tipicamente a partire dall'induzione sperimentale.



1.2 Metodo scientifico sperimentale

Il **metodo scientifico** è la modalità tipica con cui la scienza procede per raggiungere una conoscenza della realtà *oggettiva, affidabile, verificabile e condivisibile*. Esso consiste, da una parte, nella raccolta di evidenza empirica e misurabile attraverso l'osservazione e l'esperimento; dall'altra, nella formulazione di ipotesi e teorie da sottoporre nuovamente al vaglio dell'esperimento.

Esso è stato applicato e codificato da **Galileo Galilei** nella prima metà del XVII secolo. Precedentemente l'indagine della natura consisteva nell'adozione di teorie che spiegassero i fenomeni naturali senza che fosse necessaria una verifica sperimentale delle teorie stesse che venivano considerate vere in base al principio di autorità.

Il metodo sperimentale moderno richiede, invece, che le teorie fisiche debbano fondarsi sull'osservazione dei fenomeni naturali, debbano essere formulate come relazioni matematiche e che debbano essere messe alla prova tramite esperimenti:

« [...] sempre se ne sta su conclusioni naturali, attenenti a i moti celesti, trattate con astronomiche e geometriche dimostrazioni, fondate prima sopra sensate esperienze ed accuratissime osservazioni. [...]. Stante, dunque, ciò, mi par che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie »

(Galileo Galilei, Lettera a madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana)

Il percorso seguito per arrivare alla stesura di una legge scientifica (e in particolare di una legge fisica) a partire dall'osservazione di un fenomeno si articola nei seguenti passi, ripetuti ciclicamente:

1. **Osservazione di un fenomeno fisico.** Un fenomeno fisico è un qualsiasi evento in cui siano coinvolte delle grandezze fisiche, ossia delle proprietà di un corpo che siano misurabili.
2. **Elaborazione di un'ipotesi esplicativa e formulazione di una previsione da verificare che segua l'ipotesi elaborata.** L'ipote-

PICCOLI ANEDDOTI

“la Matematica e la Fisica sono pieni di numeri, di formule...”

Niente di più sbagliato!

La Matematica e la Fisica sono pieni di **ragionamenti**, a volte intuitivi a volte complicati. Quei numeri, quelle formule non sono altro che gli strumenti per concretizzare quei ragionamenti! E' vero questo libro è pieno di formule, ma l'importante non è impararle a memoria, ma comprenderle! Solo così si entra nella mente dei geni che le hanno pensate, rese celebri per la prima volta.

si viene solitamente formulata semplificando la situazione reale in modo tale da individuare delle relazioni tra le grandezze semplici da verificare, queste sono di solito indicate con l'espressione *condizioni ideali* (un esempio, nel caso dell'esperimento del piano inclinato è l'assunzione che la forza di attrito sia trascurabile).

3. **Esecuzione di un esperimento.** L'esperimento consiste nella ripetizione in condizioni controllate di osservazioni di un fenomeno fisico e nell'esecuzione di misure delle grandezze coinvolte nel fenomeno stesso.
4. **Analisi e interpretazione dei risultati** (conferma o smentita dell'ipotesi iniziale).

Nel caso in cui l'ipotesi venga confermata la relazione che essa descrive diviene una legge fisica.

Considerazione importante: una legge fisica rimane valida finché non venga dimostrato il contrario, ovvero venga confutata con esperimenti che ne dimostrino la inesattezza circa il caso generale da esso descritta. Questo è uno dei dogmi fondamentali delle scienze in generale che apre la possibilità ad ulteriori aggiustamenti alle teorie fisiche al momento accreditate, ponendo l'attenzione sulla **ripetibilità** degli esperimenti. Non potrà, infatti, essere accettata una teoria fisica qualora gli esperimenti condotti da chi ha ipotizzato quelle leggi non possano esseri ripetibili anche in altri luoghi, diversi da quelli in cui i fisici hanno condotto i loro esperimenti. Per avere un'idea di questo, basti pensare al fatto che le leggi di relatività dei moti, descritti da Galilei, sono rimasti indiscussi per circa quattrocento anni, fino a quando, un noto scienziato del XX secolo, Albert Einstein, li mette in discussione. Piuttosto che dimostrarne la falsità avviene un vero e proprio ampliamento delle leggi relativistiche, dimostrando che le leggi di Galilei di invarianza delle masse e dei tempi rimangono valide a patto che i moti avvengano con velocità molto inferiori della velocità della luce, che è di circa 300.000 km/s .

1.3 Grandezze fisiche fondamentali

Nella seconda edizione del *Vocabolario Internazionale di Metrologia* (anche noto come VIM3 del 1993) una grandezza era definita come "**la proprietà misurabile di un fenomeno, corpo o sostanza, che può essere distinta qualitativamente e determinata quantitativamente**"; nell'edizione del *VIM 3*, pertanto, la misurazione non può essere applicata alle proprietà nominali, le quali non possono pertanto essere definite "grandezze". Nella definizione di "grandezza" del *VIM 3* il termine "riferimento" può essere una unità di misura, una procedura di misura, o un materiale di riferimento, o una loro combinazione. Sebbene in base a questa definizione, il concetto di "grandezza" coincida con quello di "grandezza fisica scalare", può essere considerato "grandezza" anche un vettore le cui componenti siano grandezze. Il

YouTube



concetto di grandezza, inoltre, può essere specificato progressivamente in vari livelli di concetti specifici.

Nel Sistema internazionale di unità di misura (detto anche **SI**), adottato per legge in Italia dal 1976 ed obbligatorio negli atti pubblici, le grandezze si dividono in 7 **grandezze base** e numerose **grandezze derivate** dalle precedenti.

In questo caso, è possibile scegliere la proprietà di un particolare sistema ed eleggerla a *unità di misura* per quella grandezza fisica. Fissata l'unità di misura, la quantità di tale grandezza per un qualsiasi altro sistema potrà dunque essere univocamente specificata da un *valore numerico* ottenuto dal rapporto con la proprietà scelta come campione di riferimento. Le grandezze fisiche fondamentali sono sette, e sono misurate nel Sistema internazionale in:

| Grandezza fisica | Simbolo della grandezza fisica | Simbolo dimensionale | Nome dell'unità SI | Simbolo dell'unità SI |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| lunghezza | $l, x, r, ..$ | L | metro | m |
| massa | m | M | chilogrammo | kg |
| tempo | t | T | secondo | s |
| corrente elettrica | I, i | I | ampere | A |
| temperatura termodinamica | T | Θ | kelvin | K |
| quantità di sostanza | n | N | mole | mol |
| intensità luminosa | I_v | J | candela | cd |

Da considerare che a volte grandezze omogenee, cioè grandezze dello stesso tipo, possono essere espresse con unità di misura diverse tra di loro. Possono essere adoperati multipli o sottomultipli della stessa grandezza in base alle dimensioni trattate.

Potrebbe quindi essere necessario utilizzare multipli o sottomultipli di grandezze fondamentali, così come riportati nella seguente tabella:

| Multipli e sottomultipli nel Sistema Internazionale | | | |
|--|----------|---------|-----------------------------------|
| fattore di moltiplicazione | prefisso | simbolo | valore |
| 10^{24} | yotta | Y | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 10^{21} | zetta | Z | 1 000 000 000 000 000 000 000 |
| 10^{18} | exa | E | 1 000 000 000 000 000 000 |

| | | | |
|------------|-------|-------|-----------------------------------|
| 10^{15} | peta | P | 1 000 000 000 000 000 |
| 10^{12} | tera | T | 1 000 000 000 000 |
| 10^9 | giga | G | 1 000 000 000 |
| 10^6 | mega | M | 1 000 000 |
| 10^3 | chilo | k | 1 000 |
| 10^2 | etto | h | 100 |
| 10^1 | deca | da | 10 |
| 10^{-1} | deci | d | 0.1 |
| 10^{-2} | centi | c | 0.01 |
| 10^{-3} | milli | m | 0.001 |
| 10^{-6} | micro | μ | 0.000 001 |
| 10^{-9} | nano | n | 0.000 000 001 |
| 10^{-12} | pico | p | 0.000 000 000 001 |
| 10^{-15} | femto | f | 0.000 000 000 000 001 |
| 10^{-18} | atto | a | 0.000 000 000 000 000 001 |
| 10^{-21} | zepto | z | 0.000 000 000 000 000 000 001 |
| 10^{-24} | yocto | y | 0.000 000 000 000 000 000 000 001 |

1.4 Grandezze fisiche derivate

Per grandezza fisica derivata intendiamo qualunque grandezza che non è direttamente indicata nel sistema internazionale delle misure. Ad esempio tratteremo di grandezze quali le velocità, le accelerazioni, le forze,... che sono grandezze direttamente esprimibili rispetto a grandezze fondamentali quali le masse, le lunghezze, i tempi.

1.5 Aree e Volumi di figure geometriche note

Il concetto di grandezza derivata è parimenti esprimibile in matematica, dove ad esempio l'area di una figura regolare è esprimibile attraverso il prodotto di grandezze fondamentali e misurabili quali gli spigoli (i lati) della stessa figura - $l \times l$ per il quadrato, $b \times h$ per il rettangolo, $\frac{b \times h}{2}$ per il triangolo- e così via per le altre figure geometriche piane regolari) analogamente per il calcolo dei volumi di figure solide:

$$\text{Cubo: } V = d^3 \quad \text{Cilindro } V = \frac{\pi d^2}{4} h \quad \text{Sfera } V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (1)$$

$$\text{Parallelepipedo } V = a \times b \times c \quad \text{Cono } V = \frac{\pi r^2}{3} h \quad (2)$$

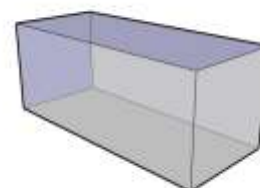
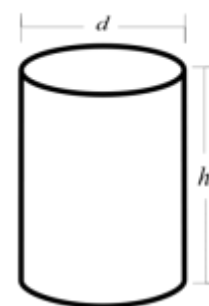
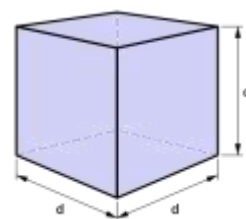
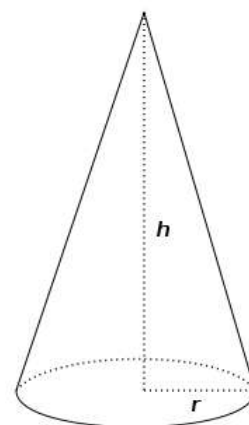


Figura 1 Figure geometriche solide



1.6 Densità di massa

La densità (chiamata più correttamente massa volumica o massa specifica) di un corpo (spesso indicata dal simbolo ρ o anche δ) è definita come il rapporto tra la massa di un corpo ed il suo volume.

Se m è la massa e V il volume si ha dunque:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Nel Sistema Internazionale la densità si misura in kg/m^3 ; nel sistema CGS in g/cm^3 .

Nella figura affianco è evidente che se sui due piatti di una bilancia mettiamo da una parte del ferro e dall'altro lo stesso volume di materiale fatto in plastica, il piatto contenente il ferro tenderà a scendere, indicando una maggiore massa, anche a parità di volume occupato.

La densità quindi tiene conto della quantità di materia che un corpo ha quando è fatto di una certa sostanza.



Figura 2 bilancia

| Densità di alcuni solidi (a 0°C di temperatura e alla pressione di 1 atm) | |
|--|-----------------------------------|
| Nome | Densità (g/cm³) |
| Alluminio | 2.70 |
| Argento | 10.49 |
| Cemento | 2.7-3.0 |
| Ferro | 7.96 |
| Ghiaccio | 0.92 |
| Legno (densità media) | 0.75 |
| Legno di cedro | 0.31-0.49 |
| Legno d'ebano | 0.98 |
| Legno d'olmo | 0.54-0.60 |
| Legno di pino bianco | 0.35-0.50 |
| Legno di quercia | 0.6-0.9 |
| Nichel | 8.8 |
| Oro | 19.3 |
| Ottone | 8.44-9.70 |
| Mercurio | 17.6 |

| | |
|----------------------|-----------|
| Piombo | 11.3 |
| Platino | 21.37 |
| Rame | 8.96 |
| Sughero | 0.22-0.26 |
| Terra (valor medio*) | 5.52 |
| Tungsteno | 19.3 |

1.7 Misure

Abbiamo prima definito le grandezze fisiche necessarie a descrivere i fenomeni e le loro unità di misura. Ora diventa necessario procedere alla misurazione delle stesse per riuscire ad ottenere una analisi quantitativa e non solo qualitativa dei fenomeni osservati. Possiamo così definire la **misura** come quel processo che permette di conoscere una caratteristica di un determinato oggetto (ad esempio la lunghezza o la massa o un tempo trascorso) dal punto di vista **quantitativo**, tramite un'unità di misura, cioè una grandezza standard che, presa N volte, associ un valore univoco alla caratteristica da misurare.

Quindi alla fine di una misurazione dovremo sempre aver quantificato quella grandezza. Non può esserci misurazione valida se non viene restituito un valore misurato della grandezza osservata.

1.8 Strumenti di misura

I classici strumenti utilizzati per misurare le grandezze fisiche fondamentali sono costituiti dai misuratori di lunghezza (un righello è un misuratore di lunghezza), i misuratori di masse (le bilance) i misuratori di tempo (cronometri), i misuratori di velocità (il tachimetro dell'automobile), i misuratori di forza (il dinamometro a molla), i misuratori di temperatura (termometro) e così via. Per ogni grandezza che misurare vengono ideati strumenti atti allo scopo.

1.9 Errori di misura

In ogni procedimento di misura di una grandezza fisica, si ottiene una misura inevitabilmente accompagnata da un'**incertezza** o **errore** sul valore misurato. Una caratteristica fondamentale degli errori che influenzano le misure di grandezze fisiche è la sua **ineliminabilità**, ossia una misura può essere ripetuta molte volte o eseguita con procedimenti o strumenti migliori, ma in ogni caso l'errore sarà sempre presente. L'incertezza fa parte della natura stessa dei procedimenti di misura. In un esperimento, infatti, non è mai possibile eliminare un gran numero di fenomeni fisici che possono causare dei disturbi alla misurazione. Una misura può quindi fornire solamente una **stima** del *valore vero* di una grandezza coinvolta in un fenomeno fisico.

Le incertezze o **errori** che influenzano una misura sono solitamente suddivise a seconda delle loro caratteristiche in:

YouTube

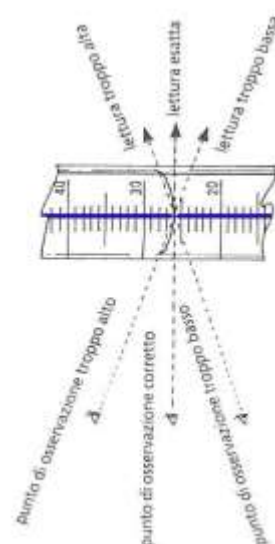


Figura 3 Lettura del calibro

- *errori casuali*. Quando la loro influenza sulla misura è completamente imprevedibile e indipendente dalle condizioni in cui si svolge la misura stessa. Questi errori influenzano la misura in modo casuale, ossia conducono alcune volte ad una sovrastima del valore della grandezza misurata, altre volte ad una sottostima.
- *errori sistematici*. Gli errori sistematici influenzano una misura sempre in uno stesso senso, ossia conducono sempre a una sovrastima o ad una sottostima del valore vero. Sorgenti comuni di errori sistematici sono gli errori di **taratura** di uno strumento e gli errori nel procedimento di misura.

Contrariamente agli errori casuali, gli errori sistematici possono essere eliminati anche se la loro individuazione è difficile, infatti è possibile osservare l'effetto di incertezze sistematiche solo conoscendo a priori il valore vero della grandezza che si intende misurare o confrontando i risultati di misure svolte con strumenti e procedimenti diversi.

Un altro esempio relativo alla lettura di strumenti analogici è l'**errore di parallasse**, dovuto ad un cattivo posizionamento dell'operatore rispetto allo strumento, solitamente riscontrabile con strumenti a lancetta o comunque dovuto ad un errore di posizionamento dell'osservatore.

1.10 C.L.I.L. PROJECT

Measures

We first defined the physical quantities needed to describe the phenomena and their units of measurement. Now it becomes necessary to measure them to be able to obtain a qualitative and quantitative analysis not only of the observed phenomena. We can thus define the measurement process that allows us to know the quality of a given object (eg the length or mass or an elapsed time) from the quantitative point of view, using a unit of measurement (see page 3), which is a standard size which, taken N times, associating a unique value to the quality to be measured.

So at the end of a measurement we always have quantified that magnitude. There can be no valid measurement if it does not return a value measured by the observed.

Measuring tools

The classic instruments used to measure the fundamental physical quantities are formed by the meters in length (a ruler is a meter in length), the meters of the masses (the scales) measuring the time (chronometers), the measuring speed (the speedometer of 'automobile), the force meters (the spring dynamometer), the temperature gauges (thermometer) and so on for many other variables which we want to proceed to measuring instruments are designed for the purpose.

Measurement errors

In each measurement procedure of a physical quantity, the measure is inevitably accompanied by an **uncertainty** or **error** in the measured

value. A fundamental characteristic of the errors that affect the measurements of physical quantities is its non-eliminable, ie a measurement can be repeated many times or performed with processes or tools best, but in any case the error will always be present. The uncertainty is part of the nature of the measurement procedures. In an experiment, in fact, it is never possible to eliminate a large number of physical phenomena that can cause disturbances to the measurement, by changing the conditions in which the experiment takes place. A measure can therefore provide only an **estimate** of the true value of a magnitude involved in a physical phenomenon.

Uncertainties or **errors** that affect a measure are usually divided according to their characteristics in:

- **Random** errors. When their influence on the measurement is completely unpredictable and independent of the conditions in which it performs the same extent. These errors affect the extent randomly, ie some times lead to an overestimation of the value of the measured quantity, other times to an underestimation.
- **Systematic** errors. The systematic errors affect a measure always in the same sense, that always lead to an overestimate or an underestimate of the true value. Common sources of systematic errors can be: errors of calibration of an instrument or errors in the measurement procedure.

In contrast to random errors, systematic errors can be eliminated even if their detection is difficult, in fact it is possible to observe the effect of systematic uncertainties only cone-go down a priori the true value of the quantity being measured or comparing the results of measurements carried out with different tools and processes. Another example of how to read analog instruments is given by the **error of parallax**, due to poor positioning of the operator with respect to the instrument, usually found with tools in hand or in any case due to a positioning error of the observer.

• Esempio 1

Una navetta spaziale orbita intorno alla Terra a un'altitudine di 300km. Quanto vale questa distanza (a) in miglia e (b) in millimetri?

Caso (a): Si utilizza il fattore di conversione metro-miglio, $1\text{miglio} = 1,609\text{km}$, per cui si ha $300\text{Km} = \frac{300\text{Km}}{1,609\text{Km}} = 186,45\text{miglia}$

Caso (b): Attraverso la ben nota equivalenza, $1\text{Km} = 10^6\text{mm}$, si ottiene, nella notazione scientifica

$$300\text{Km} = 300 \cdot 10^6\text{mm} = 3 \cdot 10^2 \cdot 10^6\text{mm} = 3 \cdot 10^8\text{mm}$$

• Esempio 2

Il micrometro ($10^{-6}\text{m} = 1\mu\text{m}$) è spesso chiamato micron. (a) Quanti micron fanno 1.0 km? (b) Quale frazione di un centimetro è uguale a $1\mu\text{m}$? (c) Quanti micron ci sono in 1.0 yd (yard)?

Caso (a): Essendo $1m = 10^6 \mu m$ e $1Km = 10^3 m$, si avrà che $1km = 10^3 \cdot 10^6 \mu m = 1,0 \cdot 10^9 \mu m$

Caso (b): Essendo $1m = 10^6 \mu m$ e $1cm = 10^{-2} m$, si avrà $1\mu m = 10^{-4} cm$

Caso (c): Essendo $1yd = 0.9144m$ e $1m = 10^6 \mu m$, si avrà $1yd = 0.9144 \cdot 10^6 \mu m$.

• **Esempio 3**

Una unità di misura usata per i terreni agricoli è l'ettaro, definito come $10.000m^2 = 10^4 m^2$. Una miniera di carbone a cielo aperto consuma ogni anno 75 ettari di terra, per una profondità di 26m. Qual è il volume di terra corrispondente in chilometri cubi ?

Soluzione: Il volume di un solido retto con due basi parallele è sempre dato dal prodotto dell'area della base per la sua altezza. Ciò consente di pensare ad una superficie di base di forma qualunque. L'area di base è pari a $75ettari \cdot 10^4 m^2$. Segue che $V = A_b \cdot h$ (area di base per altezza), quindi $V = 75 \cdot 10^4 m^2 \cdot 26m = 1,95 \cdot 10^7 m^3$; ma $1Km^3 = 10^9 m^3$, pertanto $V = 1,95 \cdot 10^{-2} km^3$.

• **Esempio 4**

Un'unità astronomica (UA) è la distanza media della Terra dal Sole, pari a circa $1,50 \cdot 10^8 km$. La velocità della luce, indicata con c , è di circa $3 \cdot 10^8 m/s$. Esprimere la velocità della luce in unità astronomiche al minuto.

Soluzione: Il valore cercato è ottenibile con le opportune operazioni. Tenuto conto che $1UA = 1,5 \cdot 10^3 \cdot 10^8 m$ ricavando $10^8 m = \frac{1UA}{1,5 \cdot 10^3}$ e che $1s = \frac{1}{60} min$ sostituendo avremo che la velocità della luce espressa in UA/min sarà:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = \frac{3 \cdot 1UA}{10^3 \cdot 1,5} \cdot \frac{60}{min} = 120 \cdot 10^{-3} UA/min = 0,12UA/min$$



Figura 4 Sensibilità di uno strumento



1.11 Sensibilità di uno strumento

La sensibilità di uno strumento è il minimo valore di una grandezza fisica che può essere apprezzato dallo strumento. Quindi una variazione del valore della grandezza di una quantità inferiore ad s non comporta alcuna variazione del valore misurato dallo strumento

1.12 Precisione di uno strumento

Possiamo definire la precisione dello strumento l'accuratezza con cui è noto il valore misurato dallo strumento; esso dipende in generale dalle caratteristiche costruttive dello strumento (per es., dalla precisione con cui sono noti i valori dei suoi componenti) e ci consente di stabilirne l'affidabilità di una misura.

1.13 Portata o fondo scala

La portata di uno strumento è il valore massimo che lo strumento è in grado di misurare; oltre questo valore non può essere effettuata alcuna misura valida.

Nella figura affianco, la portata della bilancia è di 5kg. Se mettessimo su di essa una massa maggiore della sua portata lo strumento darebbe una misura errata o rischierebbe di rompersi.

1.14 Errore assoluto

Possiamo definire come errore assoluto la differenza tra il valore misurato ed il valore esatto, ovvero

$$E_a = E_{mis} - E_{es} \quad (4)$$

dove E_a è l'errore assoluto, E_{mis} il valore misurato e E_{es} il valore esatto della grandezza considerata.

Possiamo quindi dire che il valore assoluto quantifica di quanto ci stiamo discostando rispetto al valore esatto.

1.15 Valore medio

Quando vogliamo misurare una grandezza è necessario ripetere più volte la misura, semmai cambiando osservatore o lo strumento utilizzato per accertarci della bontà delle misure effettuate. In tal caso è utile considerare il valor medio tra le misure effettuate perché verosimilmente sarà il valore che maggiormente si avvicinerà al valore esatto della grandezza.

Dette x_1, x_2, \dots, x_n le n misurazioni effettuate, diremo valor medio, il valore ottenuto dalla media aritmetica dei singoli valori, ovvero:

$$x_m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

1.16 Errore relativo

L'**errore relativo** di una misura è definito come il rapporto tra l'errore assoluto e il valore esatto della grandezza. Generalmente assumiamo come valore esatto della grandezza quello ottenuto dal valor medio della serie di misure effettuate ($E_{es} \approx x_m$), ovvero:

$$E_r = \frac{E_a}{x_m} \quad (6)$$

dove E_r = errore relativo, E_a = errore assoluto, x_m = valore medio

YouTube



Spesso è utile esprimere l'errore relativo in forma percentuale in modo da avere idea di quanto possa aver inciso l'errore rispetto alla grandezza reale. Avremo quindi:

$$E_{r\%} = \frac{E_a}{x_m} \cdot 100\% \quad \text{ovvero} \quad E_{r\%} = E_r \cdot 100\% \quad (7)$$

• **Esempio 5**

Misurando una sbarra, di lunghezza esatta pari a 36cm, con un righello otteniamo una misura pari a 35,8cm. Trovare l'errore assoluto, l'errore relativo e l'errore relativo percentuale.

In questo esempio $E_{es} = 36\text{cm}$ mentre $E_{mis} = 35,8\text{cm}$. Ne possiamo facilmente ricavare usando la formula (4) l'errore assoluto:

$$E_a = E_{mis} - E_{es} = (35,8 - 36)\text{cm} = 0,2\text{cm} .$$

L'errore relativo, usando la formula (6), è

$$E_r = \frac{E_a}{E_{es}} = \frac{0,2\text{cm}}{36\text{cm}} = 0,00556$$

L'errore percentuale dalla formula (7) è

$$E_{r\%} = E_r \cdot 100\% = 0,00556 \cdot 100\% = 0,55\%$$

Come possiamo notare in questo esempio è stato commesso un errore di circa mezzo punto percentuale, che è un errore accettabile rispetto ad un eventuale errore che superi il punto percentuale.

Possiamo così dedurre che l'errore relativo ci dà un'idea di come possa aver influito l'errore commesso (errore assoluto) rispetto alla misura esatta.

1.17 Misura diretta ed indiretta

La misura **diretta** è il metodo nel quale il valore della grandezza è ottenuta confrontando la grandezza di interesse, con un'altra della stessa specie, scelta come campione e rappresentante l'unità di misura (o un multiplo di essa). Un semplice esempio di questa metodologia, è quella usata per la misura di una lunghezza con un righello graduato: il righello (che rappresenta la grandezza di riferimento) viene accostato all'oggetto da misurare, confrontando la lunghezza di quest'ultimo (il misurando) con la scala graduata del righello, si ricava la misura.

La **misura indiretta** è il metodo nel quale la misura è ottenuta leggendo una o più grandezze legate funzionalmente al valore del misurando, ma non omogenee alla grandezza d'interesse. Per poter utilizzare questo metodo è necessario conoscere preventivamente le relazioni che legano tra loro queste grandezze.

Alcuni esempi di misura con il metodo indiretto:

- misura della superficie di un tavolo o del volume di un corpo di forma regolare;
- misura della pressione tramite la misura dell'altezza di una colonna di liquido (es. barometro a mercurio);

- misura della temperatura tramite l'altezza del liquido in un termometro a mercurio.

1.18 Criteri di arrotondamento

Quando effettuiamo misure ed andiamo a calcolare, ad esempio, l'errore relativo essendoci una divisione da fare, potrebbe accadere che vi siano molte cifre dopo la virgola, quindi siamo costretti a procedere ad un arrotondamento.

Dovendo procedere, ad esempio, ad un arrotondamento alla quarta cifra decimale decideremo di **approssimare per difetto** se essa è 0, 1, 2, 3, 4. Mentre andremo ad **approssimare per eccesso** se essa è 5, 6, 7, 8, 9. Se avessimo quindi il valore 0,006324532 come risultato di una operazione, sarebbe opportuno approssimare per difetto, scrivendo 0,006 poichè la quarta cifra è 3. Nel caso in cui il numero dovesse essere 0,006678, avremmo potuto approssimare per eccesso scrivendolo come 0,007.

1.19 Cifre significative

Possiamo definire le cifre significative di un numero come il minimo numero di cifre necessarie ad esprimere un dato valore senza comprometterne la precisione. Il conteggio delle cifre significative si fa con queste regole:

- tutti i valori non nulli rappresentano cifre significative.
- gli zeri compresi tra cifre non nulle sono cifre significative.
- (es. gli zeri in questo numero sono significativi 4506002)
- gli zeri che precedono la prima cifra significativa non sono cifre significative. (es. 0,003 ha una sola cifra significativa)
- gli zeri finali sono significativi solo se presente la virgola (es. in 13900 gli zeri non sono significativi, ma in 13900,0 tutti gli zeri sono significativi)

1.20 Notazione scientifica

Quando scriviamo i risultati di un problema, spesso capita che i numeri che stiamo trattando sono o molto piccoli, con molti zeri prima di una cifra significativa oppure molto grandi, rendendo anche difficile indicarli quando superano le unità solitamente adoperate (miliardi,...). Si è reso quindi opportuno scrivere i numeri con una notazione che fosse condivisa da tutti. Si è giunti così alla decisione di adoperare la notazione scientifica per indicare i numeri molto grandi o molto piccoli.

Qualunque sia il numero da portare in notazione scientifica è necessario tenere in mente che una volta trasformato avrà la seguente forma:

$$a, b \cdot 10^k \quad (8)$$

(ad esempio: $2,3 \cdot 10^5$) dove a è la parte intera, b la parte decimale e k l'esponente cui dobbiamo elevare la base 10.

Le regole da seguire per portare il numero in notazione scientifica sono le seguenti:

YouTube



Senza la notazione scientifica sarebbe assurdo pensare di riportare numeri piccolissimi (0,00000000145) o numeri grandissimi (2'457'847'854'598'745 8) in un'espressione ed eseguire calcoli in questo modo. L'errore di calcolo sarebbe quasi certo!

- la parte intera **a** deve essere sempre un numero compreso tra 1 e 9 (mai 0)
- **k** è l'esponente che troviamo in base a quante cifre dobbiamo spostarci verso destra (**k** negativo) o verso sinistra (**k** positivo) per arrivare alla forma (8) prima indicata.

Vediamo qualche esempio.

Supponiamo di voler scrivere in notazione scientifica il numero 0,0023 .

La parte *a,b* sarà sicuramente formata dal numero 2,3 . Per portare la virgola da dove si trova fino a destra del 2, dobbiamo muoverci verso destra di tre posizioni, quindi otterremo:

$$0,0023 = 2,3 \cdot 10^{-3} \quad \text{essendo per l'appunto } k = -3$$

Vediamo un altro esempio. Portiamo in notazione scientifica il numero 1246.

Possiamo vederlo come fosse 1246,0 dovendo portare la virgola da dopo il 6 a dopo l'1, quindi di 3 posizioni verso sinistra, **k** sarà +3. Avremo così:

$$1246 = 1,246 \cdot 10^3$$

È ormai evidente che con questo metodo ogni numero può essere portato in notazione scientifica. Quindi anche se abbiamo un numero già espresso come potenza di 10, ma non in notazione scientifica, può essere facilmente portato in questa forma.

Ad esempio il numero $0,3 \cdot 10^{-5}$ può essere portato in notazione scientifica, spostandoci di una posizione verso destra (quindi **k**=-1),

$$3,0 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-1} = 3,0 \cdot 10^{-6} \quad (*)$$

L'algebra del biennio è uno strumento essenziale per la Fisica. Se si hanno difficoltà nel "maneggiare" le potenze ad esempio sarà difficile saper far quadrare i conti quando si dovranno semplificare i termini di una espressione in cui esse appaiono.

1.21 Richiamo di matematica sulle potenze

Definizioni

$$a^n = a \cdot a \cdot \dots \cdot a \quad n \text{ volte}$$

$$a^0 = 1$$

$$a^{-1} = \frac{1}{a} \quad (9)$$

Proprietà

$$(a^n)^m = a^{nm} \quad \text{potenza di potenza}$$

$$\frac{a^n}{a^m} = a^{n-m} \quad \text{rapporto tra potenze}$$

Definizione

$$a^{\frac{n}{m}} = \sqrt[m]{a^n} \quad \text{esponente frazionario}$$

1.22 Rappresentazione dei dati

L'indagine quantitativa di un fenomeno naturale si realizza sempre attraverso la misura delle grandezze fisiche che lo caratterizzano; la comprensione del fenomeno richiede spesso di individuare una correlazione, un legame o una dipendenza funzionale fra di esse. Questa indagine può essere utilmente condotta dapprima esplicitando i valori ottenuti, raccolti in una tabella e successivamente utilizzando metodologie grafiche finalizzate alla rappresentazione delle relazioni fra due o più grandezze fisiche.

La rappresentazione **tabulare** rappresenta quindi un primo metodo per rappresentare dei dati. Ad esempio se volessimo rappresentare la velocità istantanea di un corpo in movimento al passare del tempo, potremmo trovarci con una tabella del tipo:

| velocità/ tempo | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | v_M velocità me- dia |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|
| v_1 | 3,6 | 3,7 | 3,9 | 3,5 | 3,4 | 3,2 | 3,55 |
| v_2 | 2,8 | 2,9 | 2,7 | 2,9 | 3,1 | 3,0 | 2,9 |
| v_3 | 7,5 | 7,9 | 7,5 | 7,7 | 7,6 | 7,4 | 7,6 |
| v_4 | 8,9 | 9,2 | 9,0 | 9,1 | 8,9 | 8,8 | 8,98333 |

Un altro modo per rappresentare gli stessi dati, è quello grafico; esso mette in evidenza l'andamento dei valori piuttosto che il loro valore esatto.

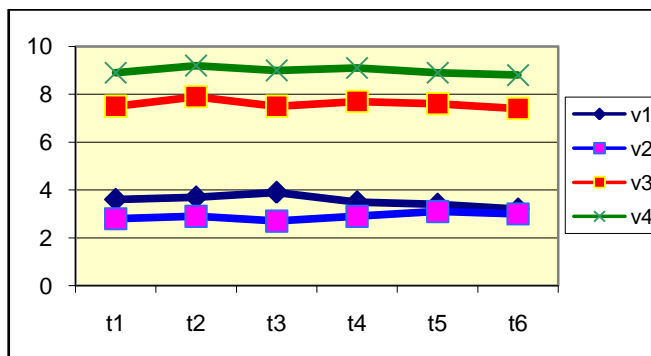


Figura 5 Rappresentazione grafica dei dati

1.23 Leggi di proporzionalità

In natura, può esistere una relazione tra due grandezze fisiche qualsiasi.

Esempi sono la massa e il peso, la temperatura e la pressione o il volume di un gas, oppure il campo elettrico in un punto e la carica elettrica nei punti circostanti.

Le relazioni in natura possono essere qualsiasi, ovvero avere carattere funzionale.

Le relazioni di proporzionalità più semplici sono quella diretta, quadratica o inversa.

Se una grandezza la cui misura y varia linearmente al variare di un'altra grandezza di misura x (ossia in modo che se x raddoppia, triplica,

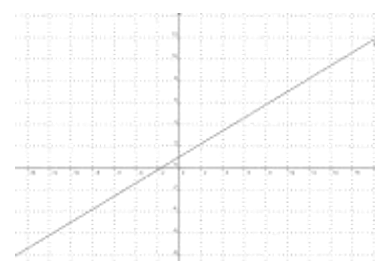


Figura 6 Rappresentazione grafica della proporzionalità lineare

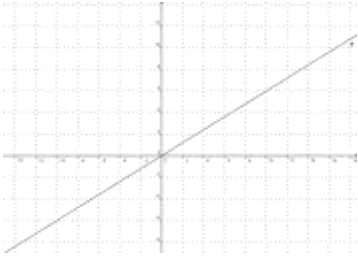


Figura 7 Rappresentazione grafica della proporzionalità diretta

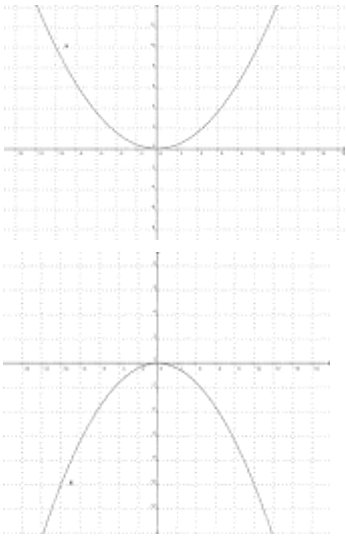


Figura 8 Proporzionalità quadratica

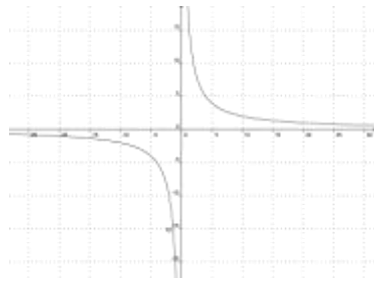


Figura 9 Proporzionalità inversa

etc.. anche y raddoppia, triplica, etc.) diciamo che y è espressa in funzione di x da una legge di proporzionalità diretta.

La relazione matematica che lega grandezze così espresse è del tipo:

$$y = ax + b \quad (10)$$

quello di fianco ne è una rappresentazione grafica

Se il rapporto tra queste due misure è costante, l'equazione con cui la si esprime è

$$y = k \cdot x \quad (11)$$

che graficamente rappresenta una retta passante per l'origine, di pendenza k.

Se una grandezza la cui misura y varia al variare di un'altra grandezza di misura x in modo che $x = 2, 3, 4, \dots$, implica $y = 4k, 9k, 16k, \dots$, con k costante, diciamo che la y è espressa in funzione di x da una legge di proporzionalità diretta alla seconda potenza. Tale legge è espressa dall'equazione:

$$y = k \cdot x^2 \quad (12)$$

che graficamente rappresenta una parabola con vertice nell'origine e concavità verso l'alto, se $k > 0$,

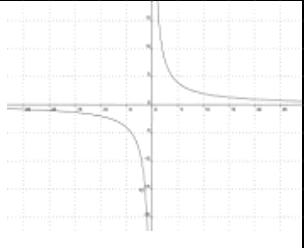
Se una grandezza la cui misura y varia al variare di un'altra grandezza di misura x in modo che il prodotto tra esse assuma sempre lo stesso valore k, diciamo che la y è espressa in funzione di x da una legge di proporzionalità inversa. L'equazione che descrive tale legge è:

$$x \cdot y = k \quad \text{ovvero} \quad y = \frac{k}{x} \quad (13)$$

che graficamente corrisponde ad un'iperbole equilatera avente per asintoti gli assi x e y.

Riassumendo le diverse situazioni che possiamo avere:

| Proporzionalità | Curva | Relazione | Grafico |
|-----------------|----------|-------------------|---------|
| Lineare | Retta | $y = ax + b$ | |
| Quadratica | Parabola | $y = k \cdot x^2$ | |

| | | | |
|---------|----------|-------------------|--|
| Inversa | Iperbole | $y = \frac{k}{x}$ |  |
|---------|----------|-------------------|--|

1.24 Relazione di laboratorio di fisica

Uno dei momenti strettamente legati allo svolgimento di esperienze di laboratorio, è quello in cui va redatta la **relazione di laboratorio**. Il metodo scientifico utilizzato per osservare e documentare un fenomeno fisico è alla base delle esercitazioni di laboratorio che ci si accinge a documentare.

Il metodo scientifico richiama:

la scelta delle grandezze da osservare e la loro comprensione;
 la realizzazione dell'esperimento con la scelta delle grandezze da osservare;
 l'individuazione degli strumenti di misura e le modalità di misura;
 la raccolta dei dati e la loro elaborazione necessaria a gestire le informazioni;
 la formulazione di un modello matematico e di una legge fisica
 la verifica della legge fisica e l'individuazione dei limiti di validità della stessa;
 la rappresentazione dei processi e dei fenomeni attraverso modelli.
 Il carattere scientifico di una relazione di laboratorio costituirà quindi la base per eseguire l'esercitazione e documentarla in modo efficace.

GUIDA ALLA REDAZIONE

I contenuti delle relazioni tecniche devono seguire la regola delle **quattro C**:

CHIARI, COMPRENSIBILI, CONCISI E CORRETTI

La relazione deve essere presentata in forma schematica, prevedendo la suddivisione del testo in sezioni o paragrafi.

Evitare affermazioni del tipo "...grande ...", "... troppo piccolo..." in quanto manca il termine di confronto.

La forma dovrebbe essere **impersonale** ad eccezione delle conclusioni (si deve preferire la forma "si è utilizzato un voltmetro per misurare la tensione tra i punti A e B" piuttosto che "abbiamo utilizzato un voltmetro per misurare la tensione tra i punti A e B").

La descrizione dovrebbe essere il più possibile **oggettiva** (i pareri personali sono da evitare e devono comparire solo nella conclusione dei risultati ottenuti).

- prima di iniziare a redigere la relazione di laboratorio è necessario;
- studiare l'esperienza avendo chiaro lo scopo;
- preparare una scaletta dettagliata delle azioni che si vogliono svolgere;

YouTube



- preparare un foglio con tabelle predisposte a prendere nota dei dati rilevati durante l'esperienza di laboratorio;
- eseguire l'esperienza di laboratorio;
- scrivere una bozza della relazione e correggerla;
- scrivere la relazione e correggerla;
- completare la relazione con elaborati grafici e tabelle elaborati eventualmente con l'ausilio di software.

Laboratorio di **FISICA** - ESPERIENZA N°

Cognome e Nome _____ Classe _____

Gruppo (*se si lavora in gruppo indicare il nome del gruppo*)

Attività svolta il: ____/____/____ Relazione consegnata il:
____/____/____

RELAZIONE DI LABORATORIO

1) TITOLO

Il titolo di una relazione deve indicare in modo molto sintetico, ma esauriente, (in non più di una decina di parole) l'argomento trattato. Molto spesso la ricerca bibliografica si effettua attraverso la lettura del titolo ed è quindi importante renderlo il più significativo possibile affinché l'argomento risulti di interesse anche per i motori di ricerca.

2) ELENCO STRUMENTI, APPARECCHIATURE E DISPOSITIVI

Deve riportare il nome delle apparecchiature, dei componenti e degli strumenti utilizzati (specificare in tal caso la sensibilità, ossia la minima variazione di grandezza da esso misurabile e la portata dello strumento), anche sotto forma di tabella. Tutti i materiali richiamati dovranno essere menzionati nella descrizione della prova.

3) SCHEMI e/o DISEGNI

Devono essere riportati gli schemi di montaggio, elettrici o topografici atti a rappresentare le prove con evidenziati i collegamenti e le indicazioni necessarie ad ottenere una perfetta corrispondenza tra i due schemi.

4.1) DIAGRAMMI

Riportano la rappresentazione grafica quando i dati rilevati si riferiscono ad una coppia di grandezze variabili legate tra di loro. Devono essere incluse l'intestazione del diagramma, le grandezze rappresentate sugli assi e le loro unità di misura. Se necessario si possono importare fogli elettronici od immagini.

4.2) FIGURE

Eventuali figure possono chiarire l'esecuzione delle prove.

5) RICHIAMI TEORICI (Matematici e Fisici)

Una relazione di laboratorio è un racconto circa l'esperienza compiuta. In essa devono esserci tutte le indicazioni per far capire, anche a chi la leggesse e non fosse stato presente all'esperimento, quanto avvenuto e le implicazioni che l'esperienza comporta.

Quando si redige una relazione bisogna quindi sempre porsi da questo punto di vista. Se anche una sola parte fosse deficitaria, la comprensione dell'esperienza svolta sarebbe in parte inficiata.

La descrizione del modello matematico e fisico di riferimento per la prova va esposto sinteticamente con le formule (indicate con numeri consecutivi indicati fra parentesi tonde in corrispondenza del margine destro del foglio) ed i riferimenti alle unità di misura del sistema SI. Si possono presentare anche i dati in forma grafica e/o tabellare anche per rendere possibile il confronto con un'esposizione analoga dedotta dai risultati sperimentali.

6) DESCRIZIONE DELLA PROVA (Procedura Sperimentale)

Viene presentata la ragione della prova o della ricerca e viene descritta l'esperienza svolta in laboratorio, relazionando ogni singolo passo ed analizzando e commentando i risultati ottenuti, in modo che le singole fasi siano logicamente interconnesse tra di loro.

Vengono riportati di seguito i punti da documentare:

a) **Obiettivi.** Rappresentano il motivo per cui viene effettuata la prova; per ciascun obiettivo devono essere evidenziati i passi che si vogliono effettuare o ciò che si vuole determinare.

b) **Descrizione delle apparecchiature.** Tale paragrafo riporta le modalità con le quali le apparecchiature vengono utilizzate e sono collegate tra di loro (fare riferimento ai manuali d'uso delle apparecchiature). Tale descrizione può essere riportata nel paragrafo "Descrizione delle procedure" qualora si ritenga che le apparecchiature non debbano essere descritte separatamente dallo svolgimento della prova.

c) **Descrizione delle procedure.** Tale paragrafo illustra passo-passo le modalità di svolgimento della prova. Si farà riferimento agli schemi, alle tabelle, ai diagrammi e alle figure.

d) e) **Verifica** - La verifica è richiesta qualora si renda necessario confrontare i risultati sperimentali con i valori di specifica iniziali. In tal caso vengono riportati sia i valori di specifica iniziali sia la procedura necessaria a verificarli.

7) TABELLE

Riportano i dati, riportati possibilmente in una tabella, oggetto delle misure effettuate evidenziando in chiaro le grandezze e relative unità di misura.

8) ELABORAZIONE DEI DATI

Se vi sono calcoli da effettuare, vanno inseriti in questa sezione. I risultati calcolati possono anche essere riportati in tabella.

9. CONCLUSIONI ED ANALISI DEI RISULTATI

Le conclusioni sono importantissime per il docente, supervisore o manager che voglia comprendere l'argomento trattato ed i risultati.

Le conclusioni rispondono alle domande:

- Che cosa si conosce dopo l'esperienza o ricerca?
- Perché è stato fatto il lavoro?
- Come è stato fatto?

Devono anche fornire le conclusioni del lavoro, con eventuali risultati quantitativi.

Le conclusioni si redigono, quindi, sulla base:

- dei commenti ed osservazioni dedotti dai risultati ottenuti;
- della compatibilità dei risultati rispetto al modello teorico;

- della valutazione dello scostamento dei dati ottenuti (valori, grafici, relazioni tra grandezze, ...) rispetto alle specifiche (formule, ipotesi, grafici, ...) iniziali;
- degli aspetti innovativi emersi dalle prove.

9.1) Analisi e sintesi dei risultati. I risultati si riportano possibilmente in forma grafica e/o tabellare unitamente, quando possibile, ai dati teorici per poterne effettuare il confronto. Oltre alle tabelle e ai diagrammi si valuti se presentare anche delle figure. Nell'analizzare e sintetizzare i risultati attenzione va posta alle cifre significative, alle unità di misura e quando necessario utilizzare la notazione scientifica.

1.25 Il metodo per impostare e risolvere i problemi di fisica

(non è il metodo scientifico delle sperimentazioni)

In matematica, come in fisica, è il modo di ragionare a fare la differenza. Non serve quasi a nulla imparare a memoria molte formule, è necessario conoscerne pochissime. Queste però vanno analizzate con attenzione, vanno capite. Col tempo e l'impegno si diventa in grado di ottenere tutte le altre formule senza doverle imparare a memoria. Questa capacità si acquisisce lentamente e con fatica, in compenso offre soddisfazioni e possibilità che vanno ben oltre il campo della matematica e della fisica.

Prima di affrontare un problema dobbiamo sempre chiederci che cosa stiamo facendo, quali sono i nostri strumenti. Per affrontare un problema di fisica dobbiamo quindi chiederci prima di tutto "**che cosa è la fisica?**"

E' la scienza che studia le **relazioni quantitative** tra le **grandezze naturali misurabili**.

Come si affronta quindi un problema di fisica?

Bisogna **identificare prima di tutto le grandezze misurabili** (quali e quante sono) e le **relazioni quantitative** fra queste grandezze.

Fatto questo si rappresenta il problema, magari suddiviso in sottoproblemi più semplici.

Come si rappresenta un problema?

Di solito si sceglie di fare un **grafico bidimensionale** (si utilizza il piano cartesiano). A tale scopo bisogna **identificare due variabili** (una sarà rappresentata sull'asse delle ascisse, una su quella delle ordinate). Vanno scelti **origine, direzione, verso e unità di misura**.

Scelto il sistema di riferimento si riscrive il sistema di equazioni opportunamente semplificato, a patto che il sistema di riferimento sia stato scelto con criterio.

Come si risolve il problema?

Risolvendo il sistema di equazioni.

Quando vanno inseriti i valori numerici nelle equazioni?

Dopo la risoluzione algebrica. In caso contrario si rischiano approssimazioni e la mancata possibilità di molte semplificazioni algebriche. "Tutto qui?"

NO, ottenuti i risultati bisogna valutare la loro ragionevolezza, magari confrontandoli coi risultati attesi. Il confronto va fatto su tre livelli: piano grafico, piano algebrico, piano fisico. Il confronto deve essere almeno qualitativo e valutare segno e ordine di grandezza!

Come si sceglie il sistema di riferimento?

Non esiste una regola, esiste il buon senso, esistono delle convenzioni piuttosto furbe. Se ad esempio decidiamo di iniziare a misurare il tempo dall'inizio dell'esperimento (e non dal giorno del nostro ultimo compleanno), la variabile t_i diventa uguale a 0 e la variabile t_f può essere più semplicemente chiamata t ; decidiamo di fissare l'origine delle posizioni nel luogo in cui si trova inizialmente l'oggetto di cui studiamo il moto, la variabile s_i diventa uguale a 0 e la variabile s_f può essere più semplicemente chiamata s .

Tra queste formule qualcuna va imparata a memoria?

Sì e no. Facendo esercizio vi accorgete che alcuni problemi sono più frequenti di altri e quindi tenderete a ricordarne le formule risolutive per non perdervi ogni volta in una montagna di conti.

A questo punto, e soltanto a questo punto, dopo la risoluzione algebrica, noti i dati e individuate le variabili richieste, è possibile sostituire i valori (alle variabili note) e goderci i risultati.

Analisi dimensionale

Un aspetto cruciale durante lo svolgimento di un problema è quello legato a svolgere correttamente l'analisi dimensionale. Di cosa si tratta?

Quando abbiamo una formula, una qualsiasi, essa esprime sicuramente delle grandezze derivate da grandezze fondamentali, quindi in qualche modo risultando la combinazione algebrica di alcune di esse. Bisogna fare attenzione nei calcoli che le dimensioni delle grandezze che stiamo calcolando siano quelle giuste.

Facciamo un esempio:

Se in un problema ci chiede di trovare la forza cui è soggetto un corpo e sappiamo che il corpo ha massa $m=300g$ e subisce una accelerazione di $a = 3m/s^2$, ricordandoci che la forza si esprime in Newton ed

un Newton è pari a $1N = \frac{1Kg \cdot m}{s^2}$

(1Kg per un metro fratto secondo quadro). Se lasciamo la massa del corpo in grammi senza portarla in Kg il risultato che verrà fuori sarà sicuramente errato.

Altra situazione

Nel calcolare lo spazio percorso da un corpo, facciamo finta di ricordare la formula in modo errato (questo può accadere soprattutto durante le verifiche scritte!) e ci ricordiamo che lo spazio percorso nel moto rettilineo uniforme vale $s = v^2 \cdot t$ (velocità al quadrato per il tempo).

Supponiamo che la velocità sia $v = 3m/s$ ed il tempo $t = 27s$.

Se eseguiamo i calcoli e l'analisi dimensionale otterremo:

$s = v^2 \cdot t = (3m/s)^2 \cdot 27s = \frac{9m^2}{s^2} 27s = 243 \frac{m^2}{s}$ che dimensionalmente non rappresenta certo uno spazio.

Eseguendo quindi l'analisi dimensionale, in questo caso, possiamo renderci conto del fatto che la formula sicuramente era errata.

Attenzione però!!!

Se la formula che crediamo di ricordare è dimensionalmente corretta ma differisce solo per una costante siamo nei guai. Se ad esempio avessimo ricordato anziché la formula di prima quest'altra $s = \frac{1}{2} v \cdot t$.

L'analisi dimensionale avrebbe restituito una coerenza dimensionale seppur con una formula e quindi un risultato errati!

Quindi è vero che le formule non serve impararle a memoria (facendo i problemi a casa si evitano talune disattenzioni) ma bisogna in ogni caso stare attenti durante i calcoli senza dare per scontato che le dimensioni del risultato siano quelle che ci aspettiamo.

Ricordate in particolar modo alcuni punti essenziali:

- non dovete ricordare a memoria molte equazioni risolventi,
- ricordate invece e comprendete a fondo il sistema di equazioni che modella la situazione generica,
- scegliete con intelligenza il sistema di riferimento in modo da semplificare il sistema di equazioni,
- fate un bel disegno e desumete da lì quanto più possibile (dovrete comunque giustificare tutto, ma almeno saprete cosa aspettarvi come risultato),
- scrivete o pronunciate una breve conclusione sulla ragionevolezza (o non ragionevolezza) dei risultati ottenuti; molto meglio affermare che il proprio risultato non è quanto ci si aspettava che fare finta di niente e dare l'idea di non aver capito nulla

1.26 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Abbiamo introdotto lo studio della **Fisica**, chiarendo che la stessa si occupa dei fenomeni naturali sotto l'aspetto della quiete, dei moti, delle forze, degli aspetti termici ed elettromagnetici.

Si può parlare della Fisica come una scienza, da Galileo che introdusse il **metodo scientifico**, che consiste nello studiare i fenomeni fisici seguendo un ordine ben preciso: Osservazione, Ipotesi, Esperimento di verifica, analisi dei risultati che se confermati portano alla legge. Per studiare quindi un qualunque fenomeno abbiamo bisogno di capire quali sono le **grandezze** in gioco, tra quelle **fondamentali** e quelle **derivate**.

Abbiamo introdotto il concetto di **densità di massa**, che quantifica in qualche modo la quantità di materia che è presente in un corpo.

Per studiare il fenomeno non solo sotto l'aspetto qualitativo ma anche sotto quello quantitativo è necessario eseguire delle **misure**, attraverso degli **strumenti di misura**. Ma è necessario fare attenzione perché ogni misurazione

nasconde un errore, piccolo o grande che sia. Tocca a noi decidere gli strumenti giusti, ma anche evitare **errori casuali** o **sistemati**, che in qualche modo inficerebbero sui risultati attesi. La necessità quindi di utilizzare strumenti più **sensibili**, laddove è richiesta una maggiore **precisione**, con un'adeguata **portata**.

L'**errore** può essere **assoluto**, cioè esattamente quant'è l'errore commesso, oppure **relativo**, che in qualche modo contestualizza l'errore dicendoci se esso è accettabile o meno.

Avendo a che fare con numeri, si rende necessario stabilire dei **criteri di arrotondamento** laddove il numero abbia diverse cifre decimali ed anche introdurre una unica rappresentazione degli stessi, in modo da uniformare i risultati, ovvero con l'uso della **notazione scientifica**.

Quegli stessi dati è opportuno, dopo averli raccolti, **rappresentarli** in modo opportuno ad esempio utilizzando la forma **tabulare** o quella **grafica**, a seconda se si voglia osservare l'aspetto quantitativo o quello qualitativo.

Proprio con i grafici, è stato opportuno richiamare alcuni concetti riguardo i grafici più noti, tra cui le **rette**, le **parabole** e le **iperboli**, corrispondenti ciascuno ad un tipo di **proporzionalità**.

Infine, in questo capitolo, abbiamo voluto chiarire

alcuni aspetti importanti su come si debba redigere una **relazione** riguardante una esperienza **di laboratorio** e su come vadano **affrontati i problemi di fisica**, onde evitare che seppur a conoscenza della parte teorica si trovi difficoltà a gestire il problema in tutti i suoi aspetti.

1.27 Problemi proposti

La rappresentazione dei dati

1) Rappresenta sul piano cartesiano il grafico delle seguenti funzioni

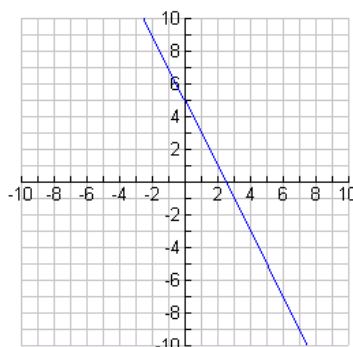
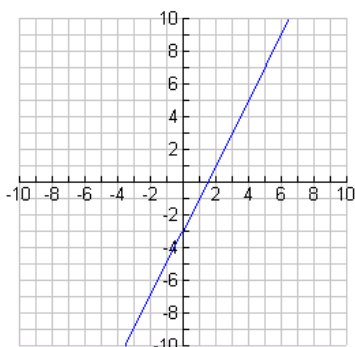
lineari: $2x - y = 0$; $x - \frac{3}{2}y = 0$ e $-x + 2y = 0$

2) La seguente tabella fornisce alcuni punti del piano: come è possibile dire se stanno o non stanno su una retta? La dipendenza tra x ed y è lineare?

| x | y |
|-----|-----|
| -2 | 5 |
| -1 | 7 |
| 0 | 9 |
| 1 | 11 |
| 2 | 13 |
| 3 | 15 |
| 4 | 17 |

3) Determina la formula della funzione lineare il cui grafico passi per coppia di punti: A(3; -1/3), B(2; -3)

4) Determina la formula della funzione lineare che rappresenta i seguenti grafici

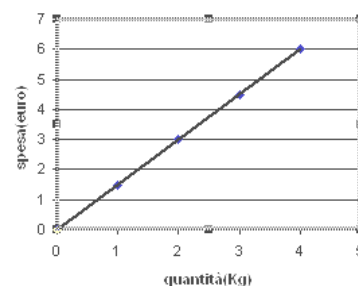


5) Disegna le rette $y = 3$; $y = 0$; ed $x = 5$

6) Spiega il significato di proporzionalità diretta alla prima potenza (o *dipendenza lineare* o *correlazione lineare*) tra due grandezze. Fai due esempi facendo riferimento a grandezze fisiche di uso corrente.

7) Osservando questo grafico completa la seguente tabella

| | | | | |
|---------------|--|--|--|--|
| Quantità (Kg) | | | | |
| Spesa (euro) | | | | |

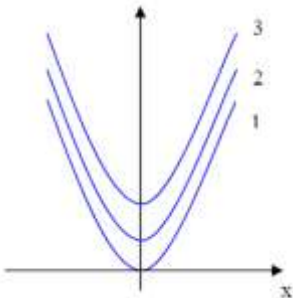


Indicando con s la spesa e con q la quantità, scrivi la relazione (formula) matematica considerando la spesa come variabile dipendente. Indica il tipo di proporzionalità, spiegando il ragionamento che hai fatto per rispondere. Indica il tipo di proporzionalità, spiegando il ragionamento che hai fatto per rispondere.

- 8) Rappresenta sul piano cartesiano il grafico delle seguente funzione lineare: $3x_2 - y = 0$
- 9) La seguente tabella fornisce alcuni punti del piano: disegna la curva che li unisce? La dipendenza tra x ed y è lineare di primo grado? La proporzionalità tra x ed y è diretta alla seconda potenza (**proporzionalità quadratica**)? Qual è la relazione matematica tra x ed y ?

| x | y |
|-----|-------|
| -2 | 5 |
| -1 | 2 |
| 0 | 1 |
| 1 | 2 |
| 2 | 5 |
| 3 | 10 |
| 4 | |

- 10) La relazione $y = k \cdot x^2$ è come quella che c'è tra l'area del cerchio ed il suo raggio? Sul piano cartesiano l'area in funzione del raggio risulterà una funzione quadratica?



- 11) In riferimento ai grafici riportati in figura, quali sono le tue considerazioni?

Se per il grafico della curva 1, la relazione matematica è $y = 3 \cdot x^2$, quale potrebbe essere la relazione matematica dei grafici 2 e 3?

- 12) Dati i valori riportati in tabella disegna la curva che esprime la velocità in funzione del tempo. Puoi fare qualche ulteriore considerazione?

| Tempo (s) | Accelerazione (m/s^2) | Velocità (m/s) |
|-----------|---------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 1 |
| 2 | 2 | 4 |
| 3 | 2 | 9 |
| 4 | 2 | 16 |

Notazioni – Multipli - Sottomultipli

- 13) La frase “30 minuti equivale a 0,30 ore” è una frase errata? Perché?
- 14) Conta 1 euro al giorno. Quanti giorni occorrono per contare 1 milione di euro?
- 15) Scrivi in notazione scientifica i seguenti numeri: 0,000024; 86400; 1; 0,00000000001; 134.545,33
- 16) Stima la tua età in secondi ed esprimi il risultato in notazione scientifica.
- 17) Stima il tuo peso in grammi ed esprimi il risultato in notazione scientifica.
- 18) Un cm² di un circuito integrato contiene 1 milione di transistor. Qual è la superficie occupata da ogni singolo transistor?
- 19) Quali delle seguenti relazioni è corretta?
 $1 \text{ g/cm}^3 \Leftrightarrow 1000 \text{ kg/m}^3 \quad 10^{-3} \text{ kg/m}^3 \quad 10 \text{ kg/m}^3$
 $1 \text{ kg/m}^3 \Leftrightarrow 10 \text{ g/cm}^3 \quad 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \quad 1000 \text{ g/cm}^3$
- 20) Nei tessuti dei pesci del mare Adriatico sono state trovate tracce di Hg nelle proporzioni di 4 parti/milione. Quindi in 1 kg di carne sono presenti:
 4mg 4 g 4 ng 4 μg
- 21) La velocità della luce è circa $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Nel Sistema Internazionale si può esprimere, usando multipli e sottomultipli delle unità fondamentali come:
 30 cm/ns 0,3 cm/ns 30 m/μs 3 m/μs
- 22) Un virus è lungo circa 10^{-8} m . Tale lunghezza può esprimersi come:
 1 mm 1 μm 10 nm 10 μm
 ricordando che il simbolo *n*, sta per *nano*.
- 23) Vi sono circa $7,5 \cdot 10^{12}$ cellule nell’organismo umano ed il diametro medio di ciascuna cellula è circa 10 μm. Quanto sarebbe lunga la catena formata dalle cellule disposte in linea l’una accanto all’altra?
 $75 \cdot 10^6 \text{ km}$ $75 \cdot 10^6 \text{ m}$ $7,5 \cdot 10^6 \text{ m}$ $0,75 \cdot 10^6 \text{ km}$
- 24) Lo spessore di un foglio di carta misura 80 μm. Quanti fogli bisogna appoggiare l’uno sopra l’altro per ottenere uno spessore complessivo di 2,20 cm.?
- 25) Fai uso delle notazioni esponenziali per completare le equivalenze (es.: 1 mm = 10^{-3} m)
- | | | |
|----------------|--|--|
| 1 m = mm | 1 m = mm ² | 1 m = mm ³ |
| 1 cm = m | 1 cm ² = m ² | 1 cm ³ = m ³ |
| 1 mm = m | 1 mm ² = m ² | 1 mm ³ = m ³ |
| 1 m = cm | 1 m ² = cm ² | 1 m ³ = cm ³ |

Grandezze omogenee –Arrotondamenti -Cifre significative

- 26) Indica quali sono le operazioni permesse e calcola il risultato.
 $0,2 \text{ dL} + 1,4 \text{ dL} = \dots\dots\dots 0,4 \text{ kg} + 700 \text{ g} = \dots\dots\dots$
 $21,2 \text{ m}^3 : 7,2 \text{ m}^2 = \dots\dots\dots 23 \text{ m} : 0,45 \text{ s} = \dots\dots\dots$
 $12,4 \text{ kg} + 76,1 \text{ m}^3 = \dots\dots\dots 500 \text{ kg} : 0,5 \text{ m}^3 = \dots\dots\dots$
- 27) Arrotonda alla seconda cifra decimale i seguenti numeri
1,899 120,034
8,765 0,999
- 29) Stabilisci il numero di cifre significative dei seguenti numeri
580,12 0,037 10,0220
5,76 1,040 1,04
- 30) Associa al valore di ogni grandezza lo strumento con cui è stata misurata e di cui è riportata la sensibilità
- | valore grandezza | sensibilità strumento di misura |
|------------------|---------------------------------|
| 3,44 m | 1 μm |
| 0,34 mm | 1 cm |
| 5,977 mm | 0,01mm |
- 31) La misurazione del volume e della massa di un oggetto ha fornito rispettivamente i valori $V = 2,40 \text{ cm}^3$ e $m = 7,5 \text{ g}$. L'oggetto ha una densità pari a:
 $3,125 \text{ g/cm}^3$ $3,13 \text{ g/cm}^3$ $3,1 \text{ g/cm}^3$ $3,2 \text{ g/cm}^3$
- 32) Fra le seguenti misure, quali sono state scritte correttamente?
 $l = 32 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ $t = 80 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$ $c = 80 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
- 33) Adottando per la somma e la differenza il criterio di arrotondare in modo che il risultato abbia un numero di cifre decimali pari al numero (*addendo, minuendo, sottraendo*) che ne ha di meno, calcola:
 $0.1435 + 1.27 + 3.3 + 2.7122 = \dots\dots\dots$
- 34) Sommare le seguenti lunghezze: $l_1 = 2,844 \text{ cm}$ e $l_2 = 1,12 \text{ cm}$
- 35) In un'operazione di moltiplicazione, divisione, o elevazione a potenza ed estrazione di radice si deve mantenere lo stesso numero di cifre significative di quante sono contenute nella quantità che ha la minor precisione di quelle tra cui si opera. Calcola:
 $1,348 \cdot 2,02 \cdot 0,353 = \dots\dots\dots$
- 36) Calcolare la velocità di un carrello che percorre 0,75 m in 2,42 secondi
- 37) Calcolare l'area di un rettangolo di lati $l_1 = 7,58 \text{ cm}$ e $l_2 = 12,65 \text{ cm}$
- 38) Dire a quanti chilogrammi corrispondono 540 grammi

Valore Medio – Errori – Propagazione degli errori

39) Calcolare l'errore % delle seguenti misure: (3.1 ± 0.2) m (6 ± 0.4) s

40) Prendiamo in considerazione le seguenti due misure:

lunghezza di una strada: $L_s = (35,42 \pm 0,01)$ Km

spessore di una moneta: $S_m = (0,2 \pm 0,1)$ cm

Quale risulta la più accurata?

41) Metti in ordine le seguenti misure di lunghezze dalla più precisa alla meno precisa.

- a. $(1,345 \pm 0,120)$ m b. (984 ± 2) km
 c. $(0,027 \pm 0,003)$ cm d. (8900 ± 10) mm

42) La resistenza di un conduttore (l'unità di misura è l' Ω e si legge ohm) misurata da tre studenti ha dato i seguenti risultati: $17,10\Omega$, $16,99\Omega$ e $17,08\Omega$. Calcola la migliore stima per l'esito della misura (*valore medio*) e l'errore assoluto della misura effettuata dagli studenti.

43) Data la serie di misure 6,20; 6,22; 5,98; 6,20; 6,20, in metri, il risultato corretto della misura è:

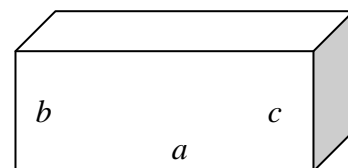
- $(6,16 \pm 0,02)$ m $(6,16 \pm 0,01)$ m $(6,16 \pm 0,12)$ m

44) Nove misure diverse della larghezza della cattedra forniscono la seguente serie di risultati: 1.21m, 1.23m, 1.20m, 1.20m, 1.19m, 1.24m, 1.22m, 1.21m, 1.21m. Si determinino il valore medio, l'errore assoluto, l'errore relativo e si riporti il risultato della misura con il corretto numero di cifre significative.

45) Si supponga che una misura, dei lati, di un banco fornisca i seguenti valori: **lato a** = $(75,0 \pm 0,1)$ cm e **lato b** = $(50,6 \pm 0,1)$ cm. Calcola il perimetro e l'area del banco.

46) Supponiamo di aver effettuato le misure di due pesi e di aver ottenuto come risultato $p_1 = (21.3 \pm 0.4)$ g e $p_2 = (19.61 \pm 0.06)$ g. Usando le regole di propagazione degli errori si calcolino $p_1 + p_2$, $p_1 - p_2$, $p_1 \cdot p_2$, $p_1 : p_2$, con il corretto numero di cifre significative.

47) Siano dati i lati di un parallelepipedo, $a = (28,9 \pm 0,1)$ cm, $b = (14,5 \pm 0,1)$ cm, $c = (9,0 \pm 0,1)$ cm. Valutare il volume ed il suo errore assoluto.



1.28 In laboratorio

Strumenti di misura, precisione, portata, sensibilità

1) conoscenza con gli usuali strumenti di misura

Misure dirette ed indirette

2) Misurare l'altezza della nostra scuola senza poter effettuare misure dirette della stessa.

Proporzionalità diretta

3) Verifica della proporzionalità diretta tra il volume e l'altezza di una colonna d'acqua, utilizzando acqua ed un cilindro graduato;

Densità e massa

4) Individuare la densità di un corpo, noti massa e volume;

1.29 Approfondimento: Galileo Galilei

« La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto. »

(Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, Cap. VI)

Galileo Galilei, ritratto di Justus Sustermans

Galileo Galilei (Pisa, 15 febbraio 1564) è stato un fisico, filosofo, astronomo e matematico italiano, considerato il padre della scienza moderna.

Il suo nome è associato ad importanti contributi in dinamica e in astronomia - fra cui il perfezionamento del telescopio, che gli permise importanti osservazioni astronomiche - e all'introduzione del metodo scientifico (detto spesso *metodo galileiano* o *metodo scientifico sperimentale*). Di primaria importanza furono il suo ruolo nella rivoluzione astronomica e il suo sostegno al sistema eliocentrico e alla teoria copernicana.

Sospettato di eresia e accusato di voler sovvertire la filosofia naturale aristotelica e le Sacre Scritture, Galileo fu processato e condannato dal Sant'Uffizio, nonché costretto, il 22 giugno 1633, all'abiura delle sue concezioni astronomiche e al confino nella propria villa di Arcetri. Questo processo è stato annullato 359 anni dopo, il 31 ottobre 1992, dal cardinale Poupard che scrive che la condanna del 1633 fu ingiusta e arretrata, per un'indebita commistione di teologia e cosmologia pseudo-scientifica e da Papa Giovanni Paolo II, nel suo discorso ai partecipanti alla sessione plenaria della Pontificia Accademia delle scienze.

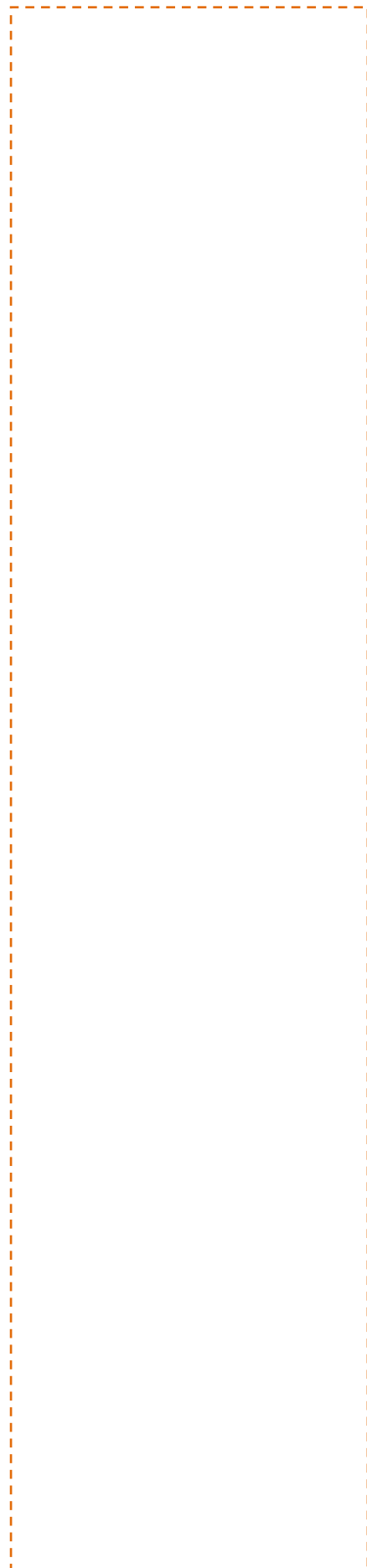
La fondamentale importanza che la figura di Galileo riveste riguarda il suo ruolo nel recupero del **metodo scientifico** sviluppato in epoca ellenistica e successivamente quasi dimenticato, grazie al suo attento studio di alcune opere scientifiche, in particolare quelle di Archimede.

La sua importanza per la rinascita della scienza in generale e della fisica in particolare è riferibile alle scoperte che fece per mezzo di esperimenti, quali, ad esempio, il principio di relatività, la scoperta delle quattro lune principali di Giove, dette appunto satelliti galileiani (Io, Europa, Ganimede e Callisto), il principio di inerzia e che la velocità di caduta dei gravi è la stessa per tutti i corpi, indipendentemente dalla massa o dal materiale.

Galileo si interessò inoltre del problema della misura della velocità della luce: egli intuì infatti che questa non poteva essere infinita, ma i suoi tentativi per misurarla furono infruttuosi.



Figura 10 Galileo Galilei (15 febbraio 1564 - 8 gennaio 1642)



2. Le Forze

Prerequisiti

Saper eseguire una misura e come scriverne i risultati. Utilizzare il sistema di assi cartesiani

Sapere

Conoscere il significato di forza agenti su un corpo in modo diretto o indiretto, in presenza di vincoli. Conoscere le operazioni formali con le forze, conoscere il significato di vettore e come rappresentarlo. saper distinguere dai diversi tipi di forza. Sapere la differenza tra massa e peso di un corpo e il comportamento di quest'ultima sugli altri pianeti, conoscere le basilari proprietà della goniometria e della trigonometria. Conoscere il significato di punto materiale e di corpo rigido.

Saper fare

Saper riconoscere e quantificare le diverse forze, distinguendole in base alla loro natura. Saper utilizzare un dinamometro, saper operare con i vettori quando vengono composti tra di loro. Saper calcolare il peso di un corpo distinguendolo dalla sua massa. Saper calcolare il peso di un corpo su un altro pianeta. Saper utilizzare le formule di proiezioni sugli assi di una forza attraverso la trigonometria. Saper stabilire, in base al problema, quando è utile rappresentare il corpo come punto materiale o quando è necessario vederlo come corpo rigido.

2.1 Le forze

Da un punto di vista puramente meccanico il concetto primitivo di forza è insito nello sforzo muscolare che si compie ogni qualvolta vogliamo spingere, tirare, impedire il moto, deformare un corpo. Così, per esempio, quando si alza un bilanciere, quando si spinge una cassa sopra un pavimento, si applica una forza; un ciclista esercita una forza sui pedali per far muovere la bicicletta. Un'automobile si muove sotto la spinta della forza sviluppata dal motore; un razzo si muove sotto l'azione di una forza che si sviluppa in seguito alla combustione dei gas.

In generale una forza applicata a un corpo, libero di muoversi, lo mette in movimento; diciamo per questo che le forze producono effetti dinamici.

Un altro effetto della forza è ad esempio la deformazione di una molla. In questo caso diciamo che la forza è in grado di deformare il corpo momentaneamente, cioè finché agisce la forza. Le forze possono anche arrestare il movimento di un corpo, come avviene, per esempio, quando si preme sul pedale dei freni di un'automobile in movimento. Se il corpo al quale è applicata la forza non è libero di muoversi, ma, come si suol dire, è vincolato, la forza produce in generale una deformazione sia del corpo che del vincolo.

2.2 Forze di contatto e forze a distanza

Le forze si possono suddividere in forze di contatto e forze a distanza: per le prime si intendono quelle forze che agiscono tra due corpi quando essi si toccano (es: la forza del vento); per le altre invece quelle che agiscono tra due corpi a distanza (es: forza di gravità).

2.3 Vincoli e Reazioni vincolari

Esistono corpi che possono muoversi nelle tre direzioni dello spazio, altri, come un treno sui binari, che sono invece vincolati a stare su una superficie o su una linea. Posando un oggetto su un tavolo, il tavolo si deforma, sia pur impercettibilmente, per contrastare il peso dell'oggetto. Poiché l'oggetto rimane fermo, la forza vincolare sarà pari al peso dell'oggetto e sarà perciò tanto maggiore quanto maggiore è il peso dell'oggetto. Un **vincolo** è qualsiasi condizione che limita il moto di un corpo o lo mantiene in stato di equilibrio. In meccanica, essendo solo le forze capaci di modificare lo stato di quiete o di moto di un sistema, l'azione dei vincoli si esplica attraverso un insieme di forze dette **forze vincolari** o **reazioni vincolari** che agiscono sui punti del sistema, limitandone il moto.

2.4 Unità di misura di una forza

Il **newton** (simbolo: **N**) è un'unità di misura della forza; fa parte delle unità di misura derivate del Sistema internazionale di unità di misura. Il newton prende il nome da Isaac Newton come riconoscimento per il suo lavoro nella meccanica classica. Venne adottato dalla *Conférence générale des poids et mesures* (conferenza generale dei pesi e delle misure) nel 1960. Viene definita come la quantità di forza necessaria

YouTube



Figura 11 la sollevatrice di pesi, Jennifer Lombardo



Figura 12 esempi di forze muscolari



Figura 13 Dinamometro



Seppur viste in contesti diversi (meccanica, termodinamica, Eletticità, magnetismo,...) le Forze assumono un aspetto essenziale nello studio dei diversi fenomeni. **Le forze muovono l'Universo!**

per imprimere ad un chilogrammo di massa una accelerazione di un metro al secondo quadrato. Le sue dimensioni in termini di unità base SI sono:

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

Il dinamometro (dal greco dynamis "forza" e metron "misura") è lo strumento utilizzato per la misurazione della forza. La sua struttura è molto semplice poiché è costituito da una molla con una scala graduata.

YouTube



2.5 Introduzione ai vettori

Se dovessimo esprimere la quantificazione di talune grandezze è sufficiente indicare un valore, ovvero uno scalare, come ad esempio se dobbiamo indicare la massa di un corpo o la larghezza di una porta.

L'esperienza quotidiana ci insegna però che quando abbiamo a che fare con le forze non è più sufficiente esprimere un valore numerico per indicare cosa accada al corpo soggetto ad una forza, ma si rende necessario definire altri aspetti per meglio definire l'eventuale moto.

Ciò che può aiutarci a descrivere cosa accade è il concetto di vettore.

Un vettore è un elemento geometrico rappresentato da un segmento orientato, munito cioè di una freccia in una delle sue estremità, e caratterizzato da **quattro** elementi:

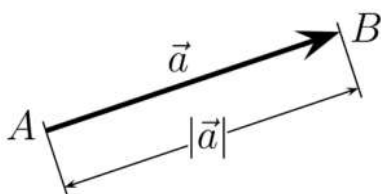


Figura 14 Rappresentazione di un vettore

- **modulo:** rappresenta la lunghezza del vettore (indicata da un valore e un'unità di misura);
- **direzione:** è individuata dal fascio di rette parallele alla retta su cui giace il vettore; quindi non solo la retta su cui agisce ma anche le rette ad essa parallela;
- **verso:** il verso è descritto dalla punta del vettore stesso, rappresentato da un segmento orientato;
- **punto di applicazione:** il punto antecedente a tutti gli altri, ossia il punto iniziale.

I vettori vengono indicati nel seguente modo: \vec{a}

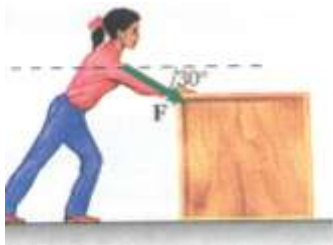


Figura 15 Esempio di forza obliqua

e chiamato vettore \vec{a} , mentre l'indicazione della lettera senza la freccia è per indicare il suo modulo: a oppure $|\vec{a}|$. Se abbiamo necessità di descriverne anche direzione e verso allora dobbiamo rappresentarlo in forma grafica con una freccia orientata

Nella figura una donna sta spingendo una cassa con una forza \vec{F} che ha un modulo F che forma con la direzione di spostamento un angolo di 30° .

Discuteremo in seguito quale componente della forza effettivamente contribuisce al moto

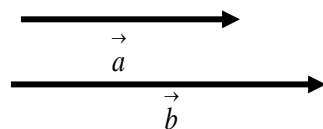
2.6 Composizione di vettori

Appare evidente che, nei fenomeni che ci troveremo a studiare, molte volte dovremo affrontare problemi in cui su un corpo agiscono più forze (più vettori) quindi si rende necessario chiarire come tali composizioni avvengano nei diversi casi.

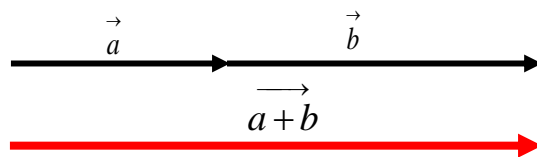
1° caso: vettori collineari e concordi (stesso verso)

in questa situazione avremo a che fare con vettori che hanno stessa direzione e stesso verso. La somma dei due vettori, sarà rappresentato dal vettore risultante, che avrà stessa direzione e stesso verso di entrambi e come modulo la somma dei moduli.

Avremo quindi:



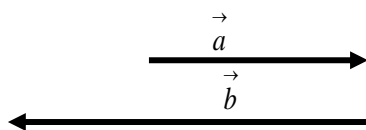
il vettore somma sarà indicato come $\vec{a+b}$ e rappresentato come:



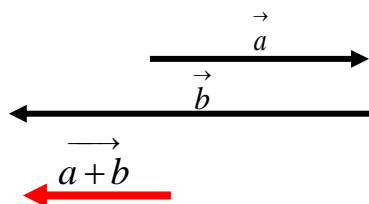
2° caso: vettori collineari e discordi (verso opposto)

in questa situazione avremo a che fare con vettori che hanno stessa direzione ma verso opposto. La somma dei due vettori, sarà rappresentato dal vettore risultante (indicato in rosso), che avrà stessa direzione, verso del vettore con modulo maggiore e modulo la differenza tra i moduli ($b-a$).

Avremo quindi:



il vettore somma sarà indicato come $\vec{a+b}$ (è sempre una somma algebrica) e rappresentato come:



3° caso: vettori ortogonali tra di loro

in questo caso i vettori formano, tra di loro, un angolo di 90° , come rappresentati in figura:



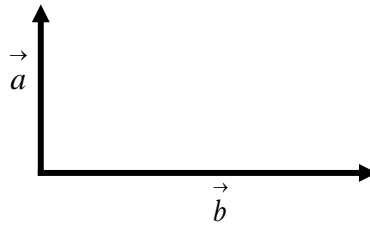
Figura 16 Calcolatrice scientifica

Non si possono fare i problemi di Fisica senza dotarsi di una calcolatrice scientifica! Se non ne possiedi una, comprala! Costa pochi euro. Molti calcoli è bene risolverli a mente o cercare di apportare delle semplificazioni, prima di doverla usare.

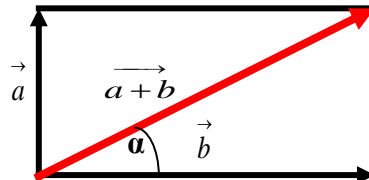
Se i numeri sono però troppo grandi o troppo piccoli diventa essenziale usarla, riportando un certo numero di cifre significative.

RICORDA:

l'approssimazione, alla seconda o terza cifra decimale, è bene farla sui risultati finali e non in quelli iniziali o intermedi. Se approssimi molto già dall'inizio, rischi di propagare l'errore di approssimazione di tanto, se quei risultati parziali vanno, ad esempio, moltiplicati con numeri grandi.



il vettore somma $\vec{a} + \vec{b}$ sarà rappresentato dal vettore che ha come modulo la diagonale del rettangolo formato dai due vettori:



e il modulo del vettore $\vec{a} + \vec{b}$, che indichiamo con \vec{c} avrà valore:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

mentre l'angolo α formato tra il vettore \vec{b} e il vettore \vec{c} risultante sarà dato dalla relazione trigonometrica:

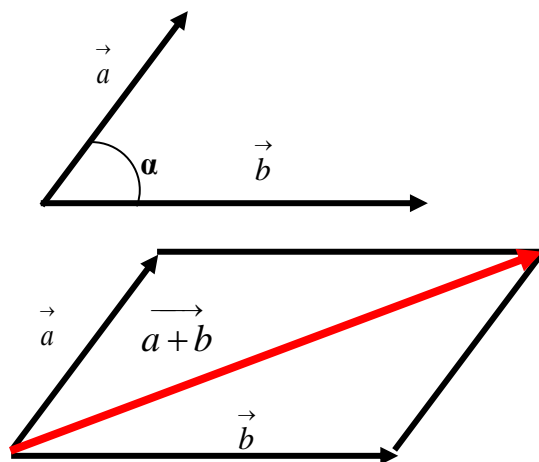
$$\alpha = \arctg \frac{a}{b}$$

dove per ora basti sapere che il calcolo immediato dell'arcotangente è effettuato attraverso la calcolatrice scientifica con il tasto **tan** preceduto dal tasto **2ndF** (seconda funzione) che attiva la funzione arcotangente.

Un richiamo goniometrico e trigonometrico sarà oggetto di una successiva lezione del presente libro.

4° caso: vettori che formano un angolo α tra di loro

La **somma** di due vettori **a** e **b** è definita come il vettore **a + b**, diagonale del **parallelogramma** formato dai vettori **a** e **b**



Conoscendo i moduli dei due vettori e l'angolo α formato dai due vettori, sfruttando il *teorema del coseno* (richiamo di trigonometria), la somma $\vec{a} + \vec{b}$ è data da:

$$|\vec{a} + \vec{b}| = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\pi - \alpha)}$$

• Esempio 1

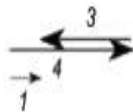
Si considerino due spostamenti, uno di modulo 3m e un altro di modulo 4m. Si mostri in che modo si possono combinare i vettori spostamento per ottenere uno spostamento risultante di modulo 7m, 1m, 5m.

Soluzione: Affrontando la somma di vettori, cioè la ricerca della risultante, dal punto di vista grafico, si possono presentare i seguenti casi:

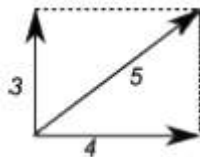
a) i due vettori sono paralleli e concordi (stesso verso): la somma è il vettore che ha la stessa direzione e lo stesso verso dei due vettori e modulo uguale alla somma dei due moduli;



b) i due vettori sono paralleli e discordi (verso opposto): la somma è il vettore che ha la stessa direzione dei due vettori il verso è quello del vettore col modulo maggiore e il cui modulo è dato dalla differenza dei due moduli

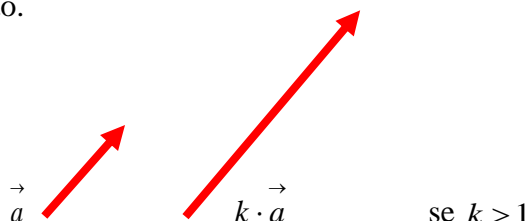


c) i due vettori non sono paralleli, ma hanno in comune la coda (cioè il punto opposto alla freccia): la risultante è il vettore che rappresenta la diagonale del parallelogramma che ha i due vettori dati come lati consecutivi



2.7 Prodotto di un vettore per uno scalare

- Il prodotto di un vettore \vec{a} per uno scalare k è un vettore che ha la stessa direzione di \vec{a} , verso positivo se k è positivo e negativo se k è negativo ma modulo uguale a $|k| \cdot |\vec{a}|$.
- Se $|k| > 1$ il vettore viene dilatato, se $0 < |k| < 1$ il vettore viene contratto.

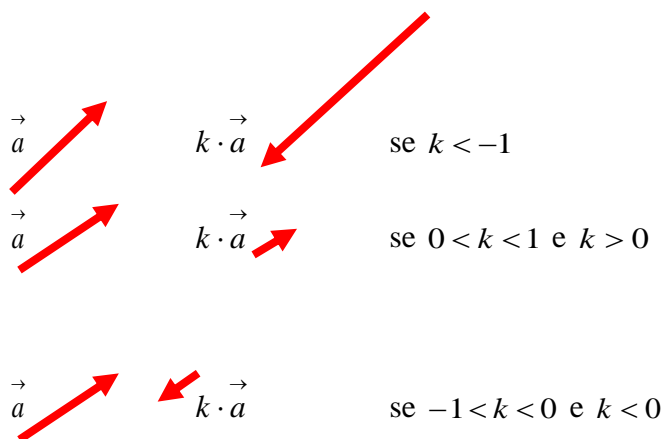


Laboratorio 1
Somma di vettori

Saper sommare vettori non collineari e non perpendicolari è essenziale! In Fisica ti troverai sempre a dover sommare vettori (velocità, forze, accelerazioni, Campi elettrici, magnetici,...) e senza questa conoscenza approfondita rischi di non risolvere il problema.

I richiami di trigonometria del paragrafo 2.19 saranno essenziali per saper scomporre un vettore lungo gli assi cartesiani e di lì procedere alla loro somma.

mentre sarà di verso opposto quando:



2.8 Prodotto scalare di due vettori

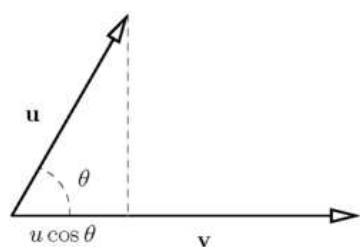


Figura 17 Prodotto scalare tra due vettori

Il **prodotto scalare**, o prodotto interno, tra due vettori \mathbf{u} e \mathbf{v} è uno scalare, definito nel modo seguente:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = uv \cos \vartheta$$

ove ϑ è l'angolo formato dai due vettori.

Il prodotto scalare **non** è una legge di composizione interna (cioè il risultato non è ancora un vettore), perché associa a due vettori uno scalare, come invece sarà per il prodotto vettoriale.

Il prodotto scalare è nullo se almeno uno dei due vettori è il vettore nullo, oppure se essi sono tra loro perpendicolari ($\vartheta = 90^\circ$)

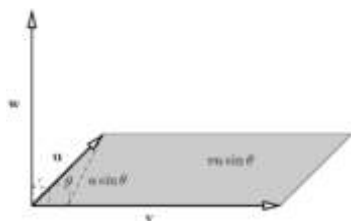


Figura 18 Prodotto vettoriale

2.9 Prodotto vettoriale di due vettori

Si dice **prodotto vettoriale**, o prodotto esterno, dei vettori \mathbf{v} e \mathbf{u} il vettore libero \mathbf{w} avente la direzione della retta perpendicolare al piano individuato da \mathbf{v} e \mathbf{u} , il verso quello di una persona che percorre l'angolo θ tra \mathbf{v} e \mathbf{u} in senso antiorario. Per il verso si utilizza anche la *regola della mano destra*; disponendo pollice, indice e medio perpendicolari tra loro, se il pollice indica la direzione di \mathbf{v} e l'indice la direzione di \mathbf{u} , allora il medio indica la direzione di \mathbf{w} (si veda la figura qui sopra). In maniera equivalente si può affermare che il verso di \mathbf{w} è tale che la terna $(\mathbf{v}, \mathbf{u}, \mathbf{w})$ sia una **terna levogira**. il modulo di \mathbf{w} è definito dalla formula:

$$|\mathbf{v} \times \mathbf{u}| = u \cdot v \cdot \sin \vartheta \quad \text{regola della mano destra}$$

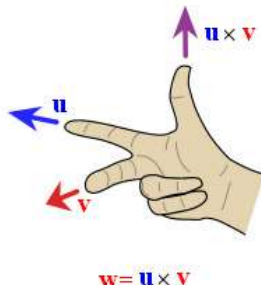


Figura 19 Regola della mano destra per il prodotto vettoriale

• Esempio 2

Un vettore spostamento r sul piano xoy è lungo 15m e orientato come in figura.

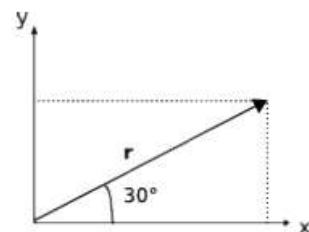
Determina le componenti x e y del vettore.

Soluzione: In questo caso il calcolo delle componenti può essere eseguito semplicemente ricordando che il triangolo avente come cateti le componenti e come ipotenusa, il vettore, è la metà di un triangolo equilatero, il cui lato è lungo quanto il modulo del vettore r . Pertanto la componente verticale $r_y = 15 : 2 = 7,5m$, mentre la componente orizzontale

è l'altezza di questo triangolo, per cui $r_x = \frac{15m\sqrt{3}}{2} = 13m$.

Sarebbe stato possibile scomporre il problema ricordando le formule trigonometriche, ove:

$$r_x = r \cdot \cos 30^\circ = r \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ e } r_y = r \cdot \sin 30^\circ = r \cdot \frac{1}{2}$$



2.10 La Forza Elastica

Per corpi elastici intendiamo quei corpi che sottoposti ad una sollecitazione tramite una forza, una volta deformatosi, finita l'azione della forza, ritornano nelle condizioni iniziali.

La **forza elastica** è quella forza che si evidenzia ogni volta che noi proviamo a sollecitare un corpo elastico tentando di allungarlo, comprimerlo o deformarlo.

In tal caso il corpo reagisce con una forza interna che si oppone alla nostra sollecitazione, che vale:

$$F_{elastica} = -k \cdot \Delta S \quad \text{Legge di Hooke} \quad (1)$$

dove $F_{elastica}$ è la forza elastica, k è il coefficiente elastico della molla, misurata in N/m e ΔS è l'allungamento della molla rispetto alla posizione iniziale, il segno meno sta ad indicare che la forza si oppone alla sollecitazione, cioè la forza elastica è una **forza di richiamo**.

YouTube

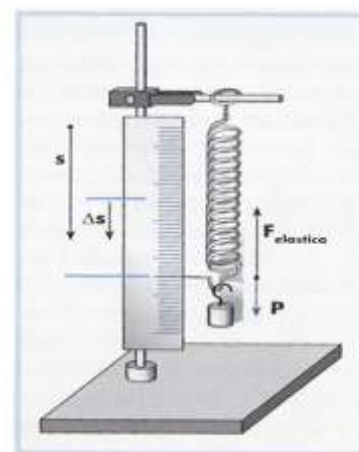


Figura 20 Esempio di allungamento di una molla

YouTube



Figura 21 Forze d'attrito



Laboratorio 2 Attrito

RICORDA

Attrito statico: quando il corpo parte da FERMO;

Attrito Dinamico: quando il corpo è già in MOVIMENTO.

Quello statico è sempre maggiore di quello dinamico a parità di situazioni.

2.11 Le forze d'attrito

La forza d'attrito è una forza che nasce ogni volta che un corpo si muove, o cerca di muoversi, a contatto con un altro corpo. L'attrito può essere dannoso o utile. E' **dannoso**, e perciò si cerca di limitarlo, quando si vuol far muovere un corpo: le forme aerodinamiche sono studiate per ridurre l'attrito, come pure la lubrificazione di organi di macchine). Invece, quando vogliamo **fermare** o rallentare un corpo, sfruttiamo proprio l'effetto dell'attrito (i freni delle macchine, il paracadute). Inoltre, senza l'attrito non potremmo camminare, almeno nel modo in cui siamo abituati (le suole delle nostre scarpe scivolerebbero sul terreno e noi resteremmo sempre fermi nello stesso punto).

La forza d'attrito si oppone al movimento del corpo, quindi ha sempre la stessa direzione del movimento (o del tentativo di movimento) del corpo e verso opposto.

L'attrito si divide in:

- Attrito statico: è quello che bisogna vincere per far muovere l'oggetto quando è ancora fermo (es. quando si vuole mettere in moto un'auto)
- Attrito dinamico: a sua volta può distinguersi in:
 - Attrito radente: si ha quando un corpo si muove, o cerca di muoversi, traslando (strisciando) su una superficie.
 - Attrito volvente: si ha quando un corpo si muove rotolando su una superficie.
 - Attrito viscoso: quando un corpo solido si muove in un fluido (un che si muove nell'aria, un in acqua).

L'attrito dipende da:

- La **natura chimica** delle superfici a contatto (cioè i materiali di cui sono costituite).
- Lo **stato fisico** delle superfici a contatto (lisce o ruvide, asciutte o bagnate o lubrificate...).
- La **forza premente** (determina la profondità dei micro-incastri responsabili dell'attrito).

Il Coefficiente di attrito radente μ è un numero puro, il cui valore dipende dalla natura chimica e dallo stato fisico delle superfici a contatto

$$F_a = \mu \cdot F_p \quad (2)$$

dove F_p è la **forza premente** cioè la forza che agisce normale o verticale alla superficie di contatto, mentre F_a è la **forza d'attrito** cioè la forza che si oppone al movimento del corpo. Sul piano orizzontale la forza premente coincide con la forza peso, in assenza di altre forze. Se

invece viene applicata una forza in direzione diversa da quella del moto, la componente perpendicolare di tale forza, andrà a ridurre la forza premente risultando:

$$F_p = F_g - F_{\perp}$$

dove F_{\perp} rappresenta la componente perpendicolare al piano di appoggio della forza F eventualmente applicata al corpo, che forma un angolo α con lo stesso piano ed F_g la forza peso del corpo stesso.

Di seguito sono rappresentati alcuni coefficienti di attrito statico e dinamico, dove sono indicati sempre due tipi di materiali, poiché l'attrito dipende da entrambi. Lo stesso oggetto ha un attrito diverso se si trova su una superficie fatta di un certo materiale o di un'altro.

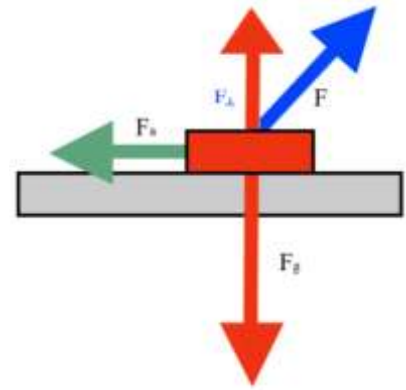


Figura 22 Forza premente legata all'attrito

2.12 C.L.I.L. PROJECT

The frictional forces

The frictional force is a force that arises whenever a body moves, or attempts to move, in contact with another body. The friction can be **harmful** or helpful. And harmful, and so we try to limit it, when you want to move a body: the aerodynamic shapes are designed to reduce friction, as well as the lubrication of machines). Instead, when we want **to stop** or slow down a body, we use just the effect of friction (brakes of the machines, the parachute). Moreover, we could not walk without friction, at least in the way we are used to (the soles of our shoes would slip on the ground we would be and we always stop at the same point).

The friction force opposes the movement of the body, so it has always the same direction of the movement (or attempted movement) of the body and towards the opposite.

The friction is divided into:

Static friction: it is **what we must overcome to move the object when it is standing still** (eg when you want to set in motion a car)

Dynamic friction: **can in turn be divided into:**

Sliding friction: when **a body moves, or tries to move**, translating (crawling) **on a surface.**

Rolling **friction:** when **a body moves rolling on a surface.**

Viscous friction: **when a solid body moves in a fluid** (a that moves **the air, a in water**)

The friction depends on:

- The **chemical nature** of the surfaces in contact (ie, the materials of which they are made).
- The **physical state** of the contact surfaces (smooth or rough, wet or dry or lubricated ...).
- The **pressing force** (determines the depth of micro-grooves responsible for attrition).



The coefficient of sliding friction μ is a pure number, whose value depends on the chemical nature and the physical state of the surfaces in contact

$$F_a = \mu \cdot F_p \quad (2)$$

where F_p is the pressing force that is the force that acts normal or vertical to the contact surface, while F_a it is the force of friction that is the force that opposes the movement of the body. Below are presented some coefficients of static and dynamic friction, where stated are always two types of materials, since the friction is dependent on both. The same object has a different friction if it is on a surface made of a certain material or another.

| Alcuni valori del coefficiente di attrito radente | | |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Superfici | μ_s (statico) | μ_d (dinamico) |
| Legno - legno | 0,50 | 0,30 |
| Acciaio - acciaio | 0,78 | 0,42 |
| Acciaio - acciaio lubrificato | 0,11 | 0,05 |
| Acciaio - alluminio | 0,61 | 0,47 |
| Acciaio - ottone | 0,51 | 0,44 |
| Acciaio - teflon | 0,04 | 0,04 |
| Acciaio - ghiaccio | 0,027 | 0,014 |
| Acciaio - aria | 0,001 | 0,001 |
| Acciaio - piombo | 0,90 | n.d. |
| Acciaio - ghisa | 0,40 | n.d. |
| Acciaio - grafite | 0,10 | n.d. |
| Acciaio - plexiglas | 0,80 | n.d. |
| Acciaio - polistirene | 0,50 | n.d. |
| Rame - acciaio | 1,05 | 0,29 |
| Rame - vetro | 0,68 | 0,53 |
| Gomma - asfalto (asciutto) | 1,0 | 0,8 |
| Gomma - asfalto (bagnato) | 0,7 | 0,6 |
| | | |

N.B. i coefficienti di attrito sono adimensionali, cioè non hanno alcuna unità di misura.

2.13 Forza peso e massa

Colloquialmente è frequente usare indistintamente le parole **peso** e **massa**, ma questi termini non sono equivalenti dal punto di vista fisico.

In fisica si distinguono forza peso e massa in quanto grandezze sostanzialmente diverse: mentre la massa di un corpo è una sua proprietà *intrinseca*, indipendente dalla sua posizione nello spazio e da ogni altra grandezza fisica, il peso è l'effetto prodotto su tale massa dalla presenza di un campo gravitazionale. Ne risulta che la massa di un corpo è costante, mentre il suo peso varia a seconda del luogo in cui viene misurato. Sulla Luna, un uomo pesa meno che sulla Terra: sui due corpi celesti, una bilancia a torsione o a molla restituirà quindi valori diversi, in quanto si basa sulla misurazione della forza peso; una bilancia a contrappeso, invece, restituirà lo stesso valore, in quanto si basa sul confronto di masse (ciò vuol dire che anche su pianeti diversi uno stesso corpo mantiene la sua massa, mentre la forza peso varia in base all'accelerazione di gravità).

La **forza peso** (o più semplicemente **peso**) agente su un corpo è la forza che il campo gravitazionale esercita su una massa verso il centro della Terra. La forza peso è stata definita da Isaac Newton nel libro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* del 1687, definendo la legge di gravitazione universale. Come ogni altra forza, nel Sistema Internazionale la forza peso si misura in newton (N).

2.14 Relazione tra peso e massa

Il vettore forza Peso indicata solitamente con la lettera \vec{P} , è direttamente proporzionale alla massa del corpo che la subisce con fattore di proporzionalità g , detto anche accelerazione gravitazionale, che varia da pianeta a pianeta. Sulla Terra mediamente vale $9,81 \frac{N}{Kg}$ (Newton su chilogrammo).

Avremo quindi, scrivendo il modulo di \vec{P} :

$$P = m \cdot g \quad (3)$$

Pur essendo una forza, spesso la forza peso viene semplicemente indicata con la lettera **P** e non come vettore \vec{P} , questo è dovuto al fatto che tale vettore, sul corpo celeste su cui agisce, nel nostro caso la Terra, è comunque diretto sempre in modo radiale (come fosse un raggio) e verso quello entrante. In poche parole direzione e verso in ogni punto intorno alla Terra è sempre lo stesso e non può variare.

YouTube



Figura 19 le masse indicate sul lato destro sono quelle percepite se stessi alle distanze indicate sul lato sinistro.



Laboratorio 3 Gravità e orbite

2.15 La forza peso sugli altri corpi celesti

Nella tabella seguente sono riportati i rapporti tra l'accelerazione di gravità g sulla Terra e altri corpi celesti.

| Corpo celeste | Rispetto alla Terra | $\frac{N}{Kg}$ |
|---------------|---------------------|----------------|
| Sole | 27,90 | 274,1 |
| Mercurio | 0,3770 | 3,703 |
| Venere | 0,9032 | 8,872 |
| Terra | 1 (per definizione) | 9,81 |
| Luna | 0,1655 | 1,625 |
| Marte | 0,3895 | 3,728 |
| Giove | 2,640 | 25,93 |
| Saturno | 1,139 | 11,19 |
| Urano | 0,917 | 9,01 |
| Nettuno | 1,148 | 11,28 |

È evidente, dalle considerazioni anzi fatte sulla forza peso, che per gli esseri viventi molti dei pianeti indicati sopra sarebbero invivibili anche ci fosse atmosfera sulla loro superficie. Questo è dovuto al fatto che l'enorme forza peso esercitata sui corpi da quel pianeta renderebbe difficilissimo il movimento se non impossibile. Ad esempio su Giove vi è una gravità che è circa tre volte quella della Terra. Un essere umano che volesse fare una "passeggiata" sopra di esso, avrebbe una percezione della propria massa tre volte di quella effettiva. Sarebbe come se una persona di massa 70Kg fosse costretta a trascinare su di sé un corpo di massa 210Kg.

2.16 Richiami di Goniometria e di Trigonometria

Coseno e seno goniometrici

Dato un sistema di assi cartesiani xOy , costruiamo una circonferenza di raggio 1 avente centro coincidente con l'origine degli assi. Dall'origine 0 facciamo partire la semiretta che intercetta la circonferenza nel punto A. Dal punto A tracciamo il segmento parallelo



Figura 23 Direzione della forza gravitazionale di tipo radiale e diretta sempre verso il centro della Terra

Massa e Peso non le confondere!

Ricorda che la massa è sempre la stessa in ogni sistema, mentre il peso cambia da pianeta a pianeta. Inoltre la Massa è una **caratteristica intrinseca** di un corpo e si misura in Kg, mentre il **Peso** è una **forza** e si misura in Newton.

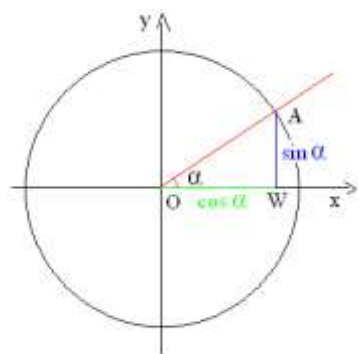


Figura 24 Funzioni goniometriche



Laboratorio 4 Funzioni goniometriche



all'asse delle ordinate y . Questo intercetta l'asse delle ascisse x nel punto W .

Il triangolo goniometrico (quello di lato $OA=1$) così formato è un triangolo rettangolo (per costruzione) retto nel punto W , mentre α rappresenta l'angolo formato dalla semiretta OA e l'asse x .

Si definisce **coseno** goniometrico dell'angolo α , indicato con $\cos \alpha$, il rapporto tra il segmento OW e il segmento OA , ovvero:

$$\cos \alpha = \frac{\overline{OW}}{\overline{OA}} \quad (4)$$

Ma risultando che $\overline{OA} = 1$, si ottiene:

$$\cos \alpha = \overline{OW} \quad (5)$$

In maniera analoga possiamo definire il **seno** goniometrico dell'angolo α , indicato con $\sin \alpha$, il rapporto tra il segmento AW e il segmento OA , ovvero:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{AW}}{\overline{OA}} \quad (6)$$

e risultando anche in questo caso $\overline{OA} = 1$, si ottiene:

$$\sin \alpha = \overline{AW} \quad (7)$$

2.17 Relazione fondamentale della goniometria

Tenuto conto che il triangolo OAW per costruzione è un triangolo rettangolo, vale anche per esso il Teorema di Pitagora che recita:

Teorema di Pitagora

La somma dei quadrati costruiti sui cateti è equivalente al quadrato costruito sull'ipotenusa.

Traducendo il Teorema di Pitagora in forma algebrica, e non in forma geometrica, possiamo scrivere che:

$$a^2 + c^2 = b^2$$

dove a e c sono rispettivamente i cateti e b l'ipotenusa.

Se riscriviamo il Teorema di Pitagora per il nostro triangolo goniometrico – come in figura a pag. 56 – otteniamo:

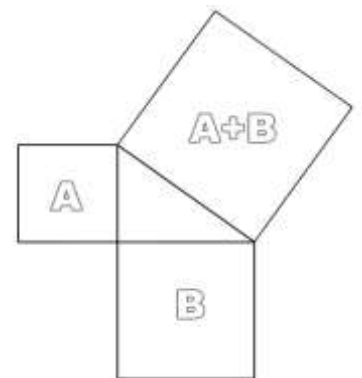
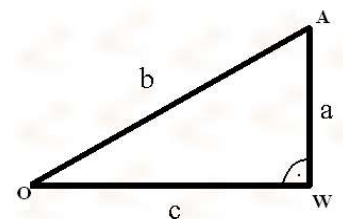


Figura 25 Teorema di Pitagora con le aree

$$\cos^2 \alpha + \operatorname{sen}^2 \alpha = 1 \quad (8)$$

che prende il nome di **relazione fondamentale della goniometria**

2.18 Tangente e cotangente goniometrica

Si definisce **tangente** goniometrica dell'angolo α , indicato con $\operatorname{tg} \alpha$, il rapporto tra il segmento *seno* e il *coseno* dell'angolo α , ovvero

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} \quad (9)$$

rappresentata geometricamente come in figura.

In analogia, si definisce **cotangente** goniometrica dell'angolo α , indicato con $\operatorname{ctg} \alpha$, il rapporto tra il segmento *coseno* e il *seno* dell'angolo α , ovvero

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\operatorname{sen} \alpha} \quad (10)$$

La tangente è rappresentata, nella figura affianco, con un segmento **blu**, mentre la cotangente con un segmento **verde**.

Al fine di rendere agevole l'utilizzo delle suddette funzioni goniometriche, anche senza la calcolatrice scientifica, viene di seguito riportata una tabella contenente i valori delle quattro funzioni goniometriche principali, seno, coseno, tangente e cotangente per gli angoli più noti, espressi sia in radianti che in gradi, dove basti tener conto che π radianti corrispondono a 180° .

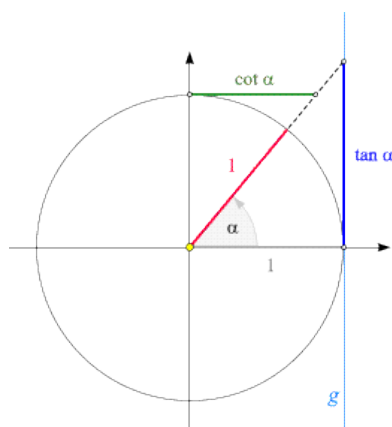


Figura 26 Tangente e cotangente goniometriche

| Angolo | | Seno | Coseno | Tangente | Cotangente |
|------------------|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Radiani | Gradi | | | | |
| 0 | 0° | 0 | 1 | 0 | ∞ |
| $\frac{\pi}{6}$ | 30° | $\frac{1}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{\sqrt{3}}{3}$ | $\sqrt{3}$ |
| $\frac{\pi}{4}$ | 45° | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | $\frac{\sqrt{2}}{2}$ | 1 | 1 |
| $\frac{\pi}{3}$ | 60° | $\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\sqrt{3}$ | $\frac{\sqrt{3}}{3}$ |
| $\frac{\pi}{2}$ | 90° | 1 | 0 | ∞ | 0 |
| π | 180° | 0 | -1 | 0 | ∞ |
| $\frac{3\pi}{2}$ | 270° | -1 | 0 | ∞ | 0 |
| 2π | 360° | 0 | 1 | 0 | ∞ |

Figura 27 alcuni valori noti delle funzioni goniometriche principali

2.19 Trigonometria

La goniometria, come appena visto, si occupa solo di triangoli aventi ipotenusa unitaria. Ma i vettori con cui ci troveremo a trattare non sempre saranno unitari, quindi si rende necessario un ampliamento dapprima ai triangoli rettangoli avente ipotenusa qualunque e successivamente estendendo i concetti goniometrici anche ai triangoli qualunque.

La **Trigonometria** può essere così definita come l'applicazione di concetti goniometrici a qualsiasi triangolo. Se osserviamo i due triangoli rettangoli in figura, **APH** e **ABC**, utilizzando il terzo criterio di similitudine dei triangoli (sono simili i triangolo che hanno rispettivamente congruenti i tre angoli), appare piuttosto semplice dimostrare che i due triangoli sono simili (*hanno in comune l'angolo α , l'angolo retto in H e in C e di conseguenza il terzo angolo*).

Un teorema della matematica afferma che *se due triangoli sono simili è possibile scrivere una qualsiasi proporzione che legni lati corrispondenti*.

Possiamo così scrivere la proporzione:

$$\overline{BC} : \overline{AC} = \overline{PH} : \overline{AH} \quad (11)$$

sostituendo per ciascuno i valori assunti, otteniamo:

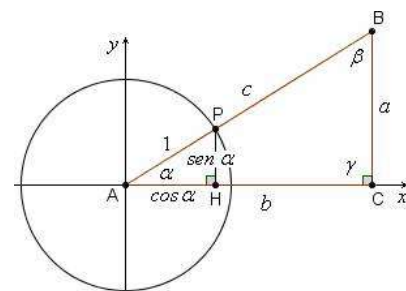


Figura 28 Dalla Goniometria alla Trigonometria

$$a : b = \operatorname{sen} \alpha : \cos \alpha$$

da cui otteniamo la relazione:

$$\frac{a}{b} = \operatorname{tg} \alpha$$

da cui ricavando a si ottiene:

$$a = b \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (12)$$

Se invece al posto della proporzione (11) scrivessimo questa:

$$\overline{BC} : \overline{AB} = \overline{PH} : \overline{AP} \quad (13)$$

sostituendo come fatto prima, otterremo:

$$a : c = \operatorname{sen} \alpha : 1$$

da cui si ricava:

$$a = c \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (14)$$

In maniera analoga, cambiando ovviamente proporzione, otteniamo la relazione:

$$b = c \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

Le formule (14) e (15) ci torneranno molto utili per scomporre una forza (o qualunque altro vettore) lungo le sue componenti ortogonali.

Senza avere la pretesa di dare indicazioni esaustive sull'argomento, per completezza di ragionamento vengono comunque di seguito rappresentate alcune tra le formule goniometriche più in uso in matematica, anche se nel nostro percorso saranno poco utilizzate:

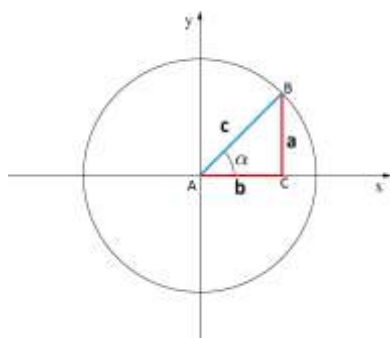


Figura 29 triangolo rettangolo con raggio qualunque

Le formule (14) e (15) che trovi affianco sono importantissime.

Permettono di scomporre un qualunque vettore lungo gli assi cartesiani noti l'angolo che formano con il semiasse positivo delle ascisse (α) ed il modulo del vettore (c)

2.20 Formule Goniometriche

| ADDIZIONE E SOTTRAZIONE | |
|--|--|
| $\text{sen}(\alpha + \beta) = \text{sen } \alpha \cos \beta + \text{sen } \beta \cos \alpha$ | $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \text{sen } \alpha \text{sen } \beta$ |
| $\text{sen}(\alpha - \beta) = \text{sen } \alpha \cos \beta - \text{sen } \beta \cos \alpha$ | $\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cos \beta + \text{sen } \alpha \text{sen } \beta$ |
| $\text{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\text{tg } \alpha + \text{tg } \beta}{1 - \text{tg } \alpha \text{tg } \beta}$ | $\text{cotg}(\alpha + \beta) = \frac{\text{cotg } \alpha \text{cotg } \beta - 1}{\text{cotg } \alpha + \text{cotg } \beta}$ |
| $\text{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\text{tg } \alpha - \text{tg } \beta}{1 + \text{tg } \alpha \text{tg } \beta}$ | $\text{cotg}(\alpha - \beta) = \frac{\text{cotg } \alpha \text{cotg } \beta + 1}{\text{cotg } \beta - \text{cotg } \alpha}$ |
| DUPLICAZIONE | |
| $\text{sen } 2\alpha = 2 \text{sen } \alpha \cos \alpha$ | $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \text{sen}^2 \alpha$ |
| $\text{sen } \alpha = 2 \text{sen } \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}$ | $\cos \alpha = \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}$ |
| | $\cos 2\alpha = 1 - 2 \text{sen}^2 \alpha$ |
| | $\cos \alpha = 1 - 2 \text{sen}^2 \frac{\alpha}{2}$ |
| | $\cos 2\alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1$ |
| | $\cos \alpha = 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} - 1$ |
| $\text{tg } 2\alpha = \frac{2 \text{tg } \alpha}{1 - \text{tg}^2 \alpha}$ | $\text{cotg } 2\alpha = \frac{\text{cotg}^2 \alpha - 1}{2 \text{cotg } \alpha}$ |
| BISEZIONE | |
| $\text{sen } \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}$ | $\text{sen}^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$ |
| $\cos \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}}$ | $\cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$ |
| $\text{tg } \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{1 + \cos \alpha}} = \pm \frac{\text{sen } \alpha}{1 + \cos \alpha} = \pm \frac{1 - \cos \alpha}{\text{sen } \alpha}$ | $\text{cotg } \frac{\alpha}{2} = \pm \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}} = \pm \frac{\text{sen } \alpha}{1 - \cos \alpha} = \pm \frac{1 + \cos \alpha}{\text{sen } \alpha}$ |
| PARAMETRICHE | |
| $\text{sen } \alpha = \frac{2t}{1+t^2}$ | $t = \text{tg } \frac{\alpha}{2}$ |
| $\cos \alpha = \frac{1-t^2}{1+t^2}$ | $t = \text{tg } \frac{\alpha}{2}$ |
| con $\alpha \neq \pi + 2\pi k$ | con $\alpha \neq \pi + 2\pi k$ |
| $\text{tg } \alpha = \frac{2t}{1-t^2}$ | $t = \text{tg } \frac{\alpha}{2}$ |
| $\text{cotg } \alpha = \frac{1-t^2}{2t}$ | $t = \text{tg } \frac{\alpha}{2}$ |
| con $\alpha \neq \pi + 2\pi k$ e $\alpha \neq \frac{\pi}{2} + \pi k$ | con $\alpha \neq \pi + \pi k$ |

Figura 30 Importanti formule goniometriche e trigonometriche

2.21 Punto materiale e corpo rigido

Si definisce **punto materiale** un corpo le cui dimensioni siano trascurabili rispetto al fenomeno in studio.

Ad esempio un oggetto può essere considerato un punto materiale in un problema di meccanica, come se tutta la sua massa fosse concentrata nel suo baricentro.

In generale un punto materiale è solamente caratterizzato dalle tre coordinate spaziali, dalle relative velocità e dalla sua massa.

Quelle indicate in questa pagina rappresentano un condensato delle formule goniometriche e trigonometriche che si usano in Matematica per risolvere equazioni e disequazioni goniometriche.

Non è necessaria per la Fisica che le conosca a memoria, ma è importante sapere che ci sono ed all'occorrenza ritrovarle per poterle applicare.

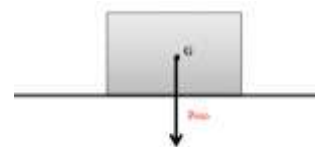


Figura 31 Rappresentazione del punto materiale

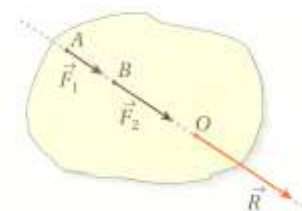


Figura 32 Corpo rigido

Parliamo di corpo rigido, quando è essenziale tener conto della forma dell'oggetto per meglio studiarne il fenomeno fisico. Se ad esempio un'automobile urta con un'altra, non possiamo vederla come punto materiale, ma è necessario vederla come corpo rigido per stabilire l'esatta dinamica dell'urto.

L'utilità del concetto di punto materiale sta nel poter *associare* al corpo un punto geometrico e quindi poter operare nello spazio cartesiano con i metodi della geometria analitica.

Ciò significa che la schematizzazione di un corpo come punto materiale equivale a *trascurare l'esistenza dei suoi gradi di libertà interni*: un punto materiale non può immagazzinare energia ruotando su se stesso, scaldandosi o comprimendosi elasticamente. Tutti questi fenomeni, infatti, per essere descritti necessitano di una *modellizzazione* del corpo più dettagliata: sempre rifacendoci ad un esempio concreto un pianeta può essere trattato come **corpo rigido**, ovvero un oggetto materiale le cui parti sono soggette al *vincolo di rigidità*, ossia è un corpo rappresentato secondo le proprie forme e non come un semplice punto.

2.22 Scomposizione di una forza

Data una forza F_1 che forma con il semiasse positivo x delle ascisse un angolo α , possiamo scomporre la stessa sugli assi cartesiani, potendo così individuare i componenti F_x ed F_y , ricavati utilizzando le formule (14) e (15) di questo capitolo, otteniamo:

$$\begin{aligned} F_x &= F_1 \cdot \cos \alpha \\ F_y &= F_1 \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (16)$$

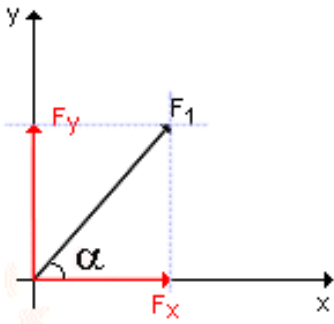


Figura 33 Scomposizione di una forza lungo gli assi cartesiani

2.23 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Abbiamo imparato il significato di **forza** come entità in grado di produrre deformazioni, distinguendole tra quelle di **contatto** e quelle che agiscono a distanza. Per poter meglio studiare i problemi proposti ci siamo resi conto che le sole grandezze scalari non erano in grado di rappresentare i diversi fenomeni, quindi è stato necessario introdurre il concetto di **vettore**, per far sì che una forza avesse non solo un **modulo** ma anche una **direzione** e un **verso**. Abbiamo così imparato a **comporre due vettori** nelle diverse situazioni, introducendo anche le operazioni **scalari** e **vettoriali** tra vettori. Abbiamo poi imparato a distinguere tra **massa** e **peso** di un corpo, tenuto conto che la prima è

una delle grandezze fondamentali, l'altra rappresenta una vera e propria forza, quindi sostanzialmente diversa dalla prima. Abbiamo visto gli effetti di **forze gravitazionali** anche su altri pianeti. È stato necessario richiamare i concetti fondamentali di **goniometria** e **trigonometria**, necessari per **scomporre una forza** lungo un sistema di assi cartesiani. Abbiamo imparato a distinguere nonché interpretare in modo corretto i concetti di **punto materiale** e di **corpo rigido**. Il primo visto sotto l'aspetto di un corpo assimilato al suo **centro di massa**, l'altro dove il corpo assume una forma estesa, non puntiforme, per poterne studiare successivamente i moti.

2.24 Problemi proposti

Forze

- 1) Si considerino due spostamenti, uno di modulo 3m e un altro di modulo 4m. Si mostri in che modo si possono combinare i vettori spostamento per ottenere uno spostamento risultante di modulo 7m, 1m, 5m.
- 2) Sul punto P agiscono due forze F_1 e F_2 di modulo 6 N e 8 N fra loro perpendicolari.
 1. Rappresenta graficamente la situazione e calcola il modulo del vettore somma e disegnalolo.
 2. Disegna il vettore F rappresentativo della forza che occorre applicare in P affinché vi sia equilibrio

Attriti

- 3) E' data la seguente tabella di coefficienti d'attrito statico:

| Superfici a contatto | Gomma – asfalto asciutto | Gomma - asfalto bagnato |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Coefficiente d'attrito statico | 0,8 | 0,5 |
| Coefficiente d'attrito dinamico | 0,6 | 0,4 |

Se l'automobile ha una massa $M = 1000$ kg, calcolare la forza d'attrito statico e dinamico nel caso in cui si muova su asfalto asciutto e poi bagnato.

- 4) Un parallelepipedo di legno di 2 kg è appoggiato sul banco (coefficiente di attrito statico = 0,4).
 1. Se lo spingi in orizzontale applicando una forza $F = 5$ N, il parallelepipedo comincia a muoversi strisciando sul banco?
 2. Per quale valore della forza esso comincia a muoversi?
- 5) Hai a disposizione dei cubi di legno uguali di massa 0,4 kg che si trovano su un piano d'acciaio.
 - a. Sapendo che $\mu_s = 0,5$, qual è la forza necessaria da applicare in orizzontale affinché uno dei cubi cominci a muoversi strisciando?
 - b. Qual è la forza necessaria per spostare due cubi posti uno sull'altro in verticale?
- 6) Un corpo ha una massa $M = 5$ kg ed è appoggiato su un piano orizzontale il quale esercita una forza di attrito statica $F_{as} = 40$ N.
 1. Calcolare il coefficiente di attrito statico.

2. Se applichiamo una forza $F = 50 \text{ N}$, che forma un angolo $\alpha = 30^\circ$ con il piano orizzontale, il corpo si muoverà oppure no?
- 7) Due corpi di massa $m_1 = 5 \text{ Kg}$, $m_2 = 3,5 \text{ Kg}$ poggiano su un piano orizzontale liscio e sono collegati da una sbarra di massa $m = 0,5 \text{ kg}$. Al corpo di massa m_1 è applicata una forza orizzontale $F = 9 \text{ N}$. Si trovino le forze che si scambiano i vari elementi.
- 8) Due molle di qualità diversa sono lunghe 10 cm , ma appendendo a ciascuna la stessa massa, la prima si allunga di 20 cm l'altra fino a 18 cm . calcola il rapporto tra le costanti delle due molle $\frac{k_1}{k_2}$.
- 9) una molla è lunga 14 cm se si aggancia una massa di 20 g . se si aggancia una massa di 50 g la molla si allunga fino a 17 cm . Calcola:
- la lunghezza iniziale della molla;
 - la sua costante k ;
 - la massa che si deve agganciare per raddoppiare la sua lunghezza;
 - la forza con cui deve essere tirate per avere un allungamento di 3 cm .
- 10) un corpo di massa sconosciuta è appeso ad una molla di costante elastica $k = 250 \text{ N/m}$. la molla si allunga di 10 cm . Determina la massa del corpo. Di quanto si allungherebbe la molla se la massa appesa fosse doppia? E Determina gli allungamenti della molla se l'esperimento fosse eseguito sulla Luna.
- 11) Un lampadario di massa $3,0 \text{ kg}$ è appeso a un'asta orizzontale collegata al soffitto da due molle identiche agganciate alle sue estremità. Ciascuna delle molle si allunga di $5,0 \text{ cm}$ rispetto alla condizione di equilibrio. Qual è la costante elastica delle molle se la massa dell'asta è trascurabile?
- 12) Su Marte la costante della forza peso vale $g = 3,74 \text{ N/kg}$. Quanto pesa una confezione di zucchero da 1 kg ?
- 13) On the Moon, the force weight is 6 times smaller than on the Earth. How much is the value of g on the Moon?
- 14) Un pianeta sconosciuto esercita su una massa di $0,20 \text{ kg}$ una forza peso di $1,1 \text{ N}$. Quanto vale la costante di proporzionalità tra peso e massa sul pianeta?

2.25 In laboratorio

Forze Elastiche

- 5) Verifica sperimentale della legge di Hooke, utilizzando una o più molle appese con masse diverse;

2.26 Approfondimento: Le forze fondamentali

Quattro forze possono descrivere l'enorme varietà dei fenomeni nell'universo: le due forze nucleari, rispettivamente debole e forte, la forza elettromagnetica e quella di gravità; queste sono le forze fondamentali della natura.

L'elemento centrale di tutta la nostra attenzione è la seconda legge di Newton, secondo la quale l'accelerazione è prodotta da una forza che agisce su una massa. Ma a parte l'equazione, noi non abbiamo idea del significato di forza o massa.

La legge non ha molto senso, a meno che non si conosca il significato di forza e massa.

Comunque, abbiamo fatto dei progressi perché abbiamo scoperto che tutti i corpi cadono alla stessa velocità.

Ma allora di che si tratta? Abbiamo introdotto un'altra teoria, quella della legge di gravità. Questa legge è la descrizione chiara ed esplicita di una forza particolare.

Tutti i progressi fatti non sono derivati soltanto alla seconda legge di Newton, ma dall'introduzione della forza di gravità, in questa legge. A questo punto è logico porsi una domanda: quali sono le altre forze esistenti, quali sono le forze fondamentali della natura?

Ed è proprio questo che cercheremo di scoprire oggi.

Presso l'Istituto californiano di Pasadena, nei laboratori di radiazione Kellogg, gli scienziati esplorano l'interno degli atomi. Studiano il cuore delle stelle e con gli acceleratori dell'Istituto osservano le forze fondamentali della natura.

La scienza e la tecnica avanzano per mezzo di salti di quanti. Tuttavia anche nell'era spaziale le equazioni di Newton non possono essere trascurate.

In questo caso, per esempio, la forza uguale alla massa per l'accelerazione, è una formula corretta. Infatti, F uguale MA , è il principio base dell'acceleratore.

Una macchina che il padre della meccanica non avrebbe mai potuto immaginare.

Coloro che hanno proseguito le ricerche di Newton hanno intuito un altro principio operante in natura. Ogni pezzetto di materia, ogni cosa, dalla punta estrema della più lontana galassia fino al nucleo di un atomo, è soggetta alle quattro forze fondamentali.

Le forze nucleari

Nel nostro mondo così complesso ci sono molte forze diverse. Nonostante ciò, gli scienziati hanno cercato di ridurle ad una sola, o almeno a poche.

Nel cuore dell'atomo, coesistono due forze fondamentali. Una terza, la gravità, non conosce frontiere. E la quarta, l'elettricità, tiene insieme tutta la materia.

Le forze fondamentali nel nucleo atomico sono due: una forza nucleare forte e una debole. La prima lega protoni e neutroni ai nuclei, ed è

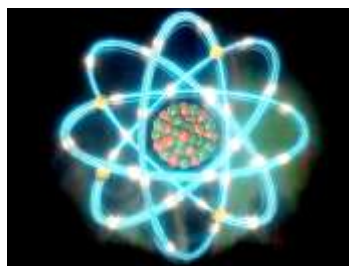


Figura 34 rappresentazione dell'atomo con la nube elettronica

tanto potente da riuscire a dominare la repulsione naturale dei protoni. Questa energia può essere liberata durante le reazioni nucleari.

Indirettamente la forza nucleare forte, dà fuoco sia all'interno del Sole che alle altre stelle. Nonostante sia così potente è molto piccola, tanto che bisogna mettere 12 zeri dopo la virgola decimale per esprimere il suo valore numerico come frazione di un centimetro.

La forza debole, la seconda forza fondamentale in natura, ha degli effetti tutt'altro che deboli. Nonostante siano poco evidenti, sono anche molto efficaci. Questa forza si manifesta nella morte violenta delle stelle solide o nella disintegrazione degli isotopi radioattivi, cosa che in alchimia permette di trasformare l'uranio in piombo.

Gli scienziati scoprono sempre più come le forze nucleari colleghino il passato, il presente e il futuro dell'universo. Nonostante si sia giunti a conoscere molte cose riguardanti le forze nucleari, queste restano sempre qualcosa di misterioso. Situate all'interno del nucleo, nascoste all'occhio del comune osservatore, rimangono uno dei segreti più profondi della natura.

La forza di gravità

Le altre due forze fondamentali, ugualmente straordinarie e incredibilmente potenti, non sembrano essere altrettanto nascoste. In natura possono essere osservate anche nell'ambiente domestico. La più familiare è la forza di gravità.

Anche in una normale cucina economica questa forza accelera la massa. La sua storia è più antica di quella dell'uovo e della gallina. Ma prima che Newton enunciassse la sua legge, non si conosceva bene questa forza di gravità che faceva cadere gli oggetti; e inoltre non si immaginava che questa forza facesse cadere la luna, né che fosse una forza fondamentale nell'universo.

Si tratta di una forza fondamentale che allo stesso tempo attrae. Come forza di attrazione può essere descritta in termini accessibili a chiunque.

La forza di gravità influenza ogni cosa situata al di sotto della Luna. Ogni persona e ogni oggetto, e la sua enorme influenza si estende a tutto l'universo.

Newton, grazie alla sua legge sulla gravitazione universale, riuscì a spiegare il 'come' della gravità nell'universo. Come attira gli oggetti verso la Terra, e contemporaneamente perché alcuni oggetti si trovano nei cieli e non cadono. Newton ha spiegato la gravità in termini di forza.

Anche se questa forza è misurata da un'unità chiamata "Newton", bisogna dare a Cesare quel che è di Cesare; quindi non dobbiamo dimenticare un inglese che ha avuto un grande merito per il progresso scientifico. Si tratta di Henry Cavendish, il quale riuscì a pesare la Terra. Inoltre egli isolò un gas, oggi universalmente conosciuto come idrogeno.

Cavendish aveva un grande talento, ma non era ambizioso. La maggior parte del suo lavoro fu pubblicato solo un secolo dopo la sua morte. Nel 1798 pesò la Terra misurando la costante della legge di Newton, sulla gravitazione universale.

*La forza di gravità è per molti versi "sconosciuta". E' vero ci sembra di sapere tutto della gravità, ma in realtà sappiamo come si manifesta, ne sappiamo predire gli effetti nei moti, ma l'unica cosa che ancora non sappiamo è: **perché?***

Perché i pianeti, le Stelle come il nostro Sole, attraggano i corpi a se è ad oggi un mistero. Molte le teorie ipotizzate, ma nessuna mai confermata finora.

Un giorno, forse, qualcuno riuscirà a spiegarlo e a Stoccolma dovranno consegnargli l'ambito premio!



Figura 35 Fulmine che colpisce un traliccio di alta tensione

a forza è data dalla massa per l'accelerazione ed è espressa in chilogrammi per metri al secondo al quadrato, o "Newton".

Cavendish già conosceva, basandosi sulla legge di gravità di Newton e sull'accelerazione dei gravi, qual'era la massa della Terra moltiplicata per G . Per isolare la massa dalla gravità, doveva misurare il valore di G . Poteva farlo determinando la forza tra due masse conosciute situate ad una distanza nota. Questo calcolo doveva essere molto preciso, perché la forza gravitazionale tra due masse di grandezza normale è estremamente piccola.

La forza elettromagnetica

La quarta forza fondamentale è la forza elettromagnetica. Questa sembra il paradosso delle forze, perché l'elettricità in alcuni casi è spaventosa per la sua enorme potenza; in altri è qualcosa di molto comune. Considerando il suo lato positivo, l'elettricità è comune come il pane. Rievoca immagini a volte mortali, a volte mitiche; tutte in qualche modo tipiche della cultura occidentale.

Nessuna immagine è più rappresentativa di quella di un uomo di Philadelphia: Benjamin Franklin, che è riuscito a domare l'elettricità con un aquilone. I risultati da lui ottenuti sono ineguagliati. Egli si è distinto come scrittore e redattore, inventore, uomo politico, direttore di un ufficio postale, e statista; come filosofo, ed è stato l'ingegno e la saggezza della sua epoca.

Perché quest'uomo è rimasto fino ad oggi così popolare? Perché Benjamin Franklin è stato il primo, e più importante scienziato della giovane America.

Durante i suoi studi sugli effetti dell'elettricità, Franklin ebbe l'intuizione che l'elettricità fosse una sorta di fluido; un fluido elettrico presente in ogni corpo. Ma la sua non era ancora una considerazione ben definita. Secondo Franklin, se il corpo possedeva troppo fluido era carico positivamente di elettricità; al contrario un corpo con poco fluido doveva essere carico negativamente.

I termini usati da Franklin, come ad esempio 'carica positiva', sono fondamentali nel vocabolario dell'elettricità. Ma l'importanza della forza elettromagnetica oltrepassa queste riflessioni. Fondamentalmente, l'elettricità è la forza tra cariche positive e cariche negative che tiene unite tutte le cose dell'universo, dalle più insignificanti sino all'essere umano. Perché allora gli uomini non si rendono conto della presenza di cariche nei loro corpi? Perché quando le persone si stringono la mano, non si 'frigono' reciprocamente? Perché in ogni oggetto le cariche positive e quelle negative si bilanciano perfettamente. La materia è tutta neutra, formata da cariche positive e negative, elettricamente bilanciate.

Determinazione della forza elettrica

Il nucleo dell'atomo è costituito da protoni positivi, rappresentati in rosso, e neutroni - bianchi - che non hanno carica. Gli elettroni, negativi, orbitano intorno al nucleo.

La forza elettrica è uguale alla costante K con E moltiplicata per il prodotto delle cariche Q , diviso per il quadrato della loro distanza. La formula per determinare la forza elettrica è molto simile a quella della forza di gravità. La forza gravitazionale trattiene nove pianeti in orbita intorno al Sole. La forza è data dalla costante $-G$, moltiplicata per il prodotto delle masse, diviso il quadrato della loro distanza.

La natura della massa e della carica resta tuttora sconosciuta, ma ovviamente la massa è in relazione con la gravità, mentre la carica con l'elettricità.

Poiché la massa è sempre positiva, è sempre attratta dalla forza di gravità. Mentre la carica può essere sia positiva che negativa. Una carica positiva e una negativa si attraggono; invece due cariche dello stesso segno si respingono.

È possibile una teoria unificata?

Come la loro formula indica simbolicamente, la gravità e l'elettricità sono così simili che un atomo, con un piccolo riassetto, diventa simile ad un piccolo sistema solare. Quando gli scienziati hanno scoperto che due delle quattro forze fondamentali erano così simili, si sono posti una domanda molto logica: è possibile che ci sia un'unica forza in grado di spiegare da sola la natura di tutte le cose dell'universo? Così iniziò il viaggio verso una teoria unificata.

Durante gli ultimi vent'anni della sua vita, Albert Einstein fece delle ricerche in questa direzione. Egli non raggiunse mai il suo scopo e la ricerca continua tuttora, e visti i risultati ottenuti, ci sono buone speranze per il futuro.

Alcuni frammenti, trovati tra i detriti di una collisione nucleare, fanno pensare ad un legame estremamente profondo tra la forza elettrica e la forza nucleare debole. Comunque, al di là del regno della ricerca scientifica, il mondo dell'esperienza comune continua ad essere governato dalle forze di gravità e dell'elettricità.

La gravità è la forza che fa cadere alcuni oggetti e ne trattiene altri. Per esempio, è questa la forza che mantiene la Luna in orbita intorno alla Terra e i pianeti intorno al Sole, invece di lasciarli vagare nello spazio.

Come la gravità mantiene i pianeti nella loro orbita, così l'elettricità trattiene gli atomi e le molecole nei liquidi e nei solidi che formano ogni oggetto; dagli organismi più complessi alla più comune saliera.

Anche se la materia è elettricamente neutra, gli atomi al suo interno possono avere una carica sia positiva che negativa.

Il sale ci illustra come queste cariche possono tenere unita la materia. I cristalli di sale sono uniti dalla forza elettrica tra il sodio positivo e gli ioni di cloro negativi.

Le forme della forza elettrica

L'elettricità nelle sue forme più svariate, è una forza fondamentale che genera vita costantemente. Per esempio, il movimento a molla di un oggetto metallico, è un vero e proprio processo elettrico. Gli ioni del

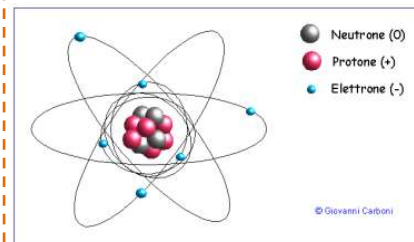


Figura 36 Struttura dell'atomo

metallo, che hanno una carica positiva, sono tenuti insieme dagli elettroni che hanno carica negativa.

Un'altra forma della forza elettrica è l'attrito. Quando due oggetti vengono a contatto, le loro cariche - positive e negative - interagiscono e le loro superfici sono unite anche se solo temporaneamente.

Una terza forma della forza elettrica è la viscosità, che determina la velocità del flusso. Per esempio, ogni recipiente contiene un fluido con una viscosità specifica, diversa dagli altri. Maggiore è la viscosità, minore sarà la velocità degli oggetti al suo interno.

Come l'azione di una molla metallica, così anche la viscosità è il risultato delle cariche elettriche degli atomi. Mentre gli oggetti si spostano verso il basso, le molecole di liquido scrono attorno ad essi, a causa della forza elettrica tra di loro.

3. L'equilibrio

Prerequisiti

La definizione di forza e la sua quantificazione fisica. Massa e peso. La legge di Hooke. I volumi dei solidi regolari. Prodotto di una forza per uno scalare. La definizione di punto materiale e di corpo rigido.

Sapere

Piano inclinato con e senza attrito. Concettosi momento di una forza. Momento di una coppia di forze. L'equilibrio del punto materiale e del corpo rigido. Le macchine semplici: le leve. La definizione di pressione e sue applicazioni. Il principio di pascal per il fluidi. Il peso specifico di un corpo. La legge di Stevin. Sapere che esiste la pressione idrostatica. Conoscere i principi dei vasi comunicanti e il principio di Archimede. Conoscere gli strumenti per misurare la pressione. La legge dei moti nei fluidi

Saper fare

saper operare sul piano inclinato con e senza attrito. Saper distinguere tra il momento di una forza e quello di una coppia. Saper individuare le forze in gioco nell'equilibrio di un corpo. Saper riconoscere i diversi generi di leve ed individuare anche nella pratica. Saper calcolare la pressione cui è soggetto un corpo ad una certa profondità. Saper misurare la pressione idrostatica. Saper riconoscere se un corpo è in grado di galleggiare o meno. Saper prevedere l'andamento di un fluido lungo una condotta obliqua.

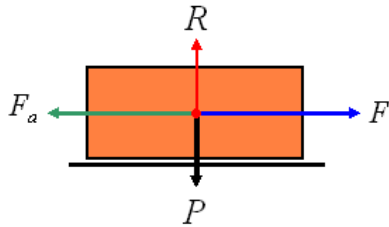


Figura 37 Equilibrio delle forze su un piano orizzontale

RICORDA

Quando senti parlare di equilibrio, sta a significare che quel corpo o quel sistema è fermo!

Nel linguaggio comune l'equilibrista riesce a camminare su una fune senza cadere. Per la Fisica quello non è equilibrio, ma un semplice moto.

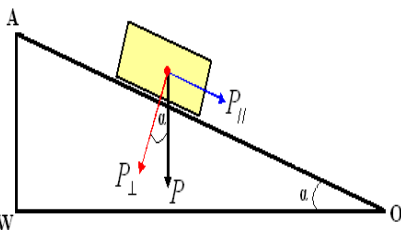


Figura 38 Forza peso scomposta su un piano inclinato

3.1 Equilibrio di un corpo sul piano orizzontale

Un corpo è in equilibrio quando è in quiete e vi rimane nel tempo. Determinare le condizioni di equilibrio di un corpo è problema importante, che può diventare complesso: un ponte deve essere in equilibrio anche se è attraversato da migliaia di vetture, un grattacielo deve resistere alle scosse sismiche.

Per un punto materiale l'unica condizione che deve essere soddisfatta affinché esso resti fermo è che la somma, o risultante, delle forze sia nulla.

Nel caso rappresentato in figura, il corpo è soggetto ad una forza esterna F, alla forza peso P e alla forza di attrito statico Fa, oltre che alla reazione vincolare R.

Per ottenere l'equilibrio (cioè il corpo rimane fermo) devono verificarsi le seguenti condizioni:

Fa = F e P = R (1)

ma ricordando, dalla (2) del capitolo 2 che Fa = mu * Fp ed essendo Fp in questo caso coincidente con la forza peso P, otteniamo:

Fa = mu * mg (2)

Piano inclinato

Quello del piano inclinato è uno dei classici problemi della fisica in cui, in presenza di attrito, è possibile studiarne l'equilibrio.

Un corpo appoggiato su un piano che forma un angolo alpha con il piano orizzontale. Si può facilmente dimostrare, per via geometrica, che l'angolo formato tra il vettore P e P_perp è lo stesso alpha.

Anche in assenza di altre forze, il corpo è soggetto almeno alla forza peso P che però, per via dell'inclinazione dell'angolo, viene scomposta in due componenti:

P_perp e P_parallel.

La prima, P_perp tende a comprimere il corpo sul piano inclinato, permettendogli di rimanervi appoggiato, la seconda, P_parallel, è quella che tende a far scendere il corpo.

Osservando attentamente la figura precedente, possiamo notare che l'angolo formato tra il piano inclinato e l'orizzontale coincide con l'angolo formato tra la forza peso P e la sua componente perpendicolare P_perp. Utilizzando le formule trigonometriche (15) e (14) otteniamo:

$$P_{\perp} = P \cos \alpha \quad \text{e} \quad P_{\parallel} = P \sin \alpha$$

da cui tenuto conto della (2) otteniamo:

$$P_{\perp} = mg \cos \alpha \quad \text{e} \quad P_{\parallel} = mg \sin \alpha \quad (3)$$

Qualora fossero invece noti gli spigoli \overline{OW} e \overline{AW} è possibile ricavare l'angolo α dalla relazione (12):

$$\alpha = \arctg \frac{AW}{OW} \quad (4)$$

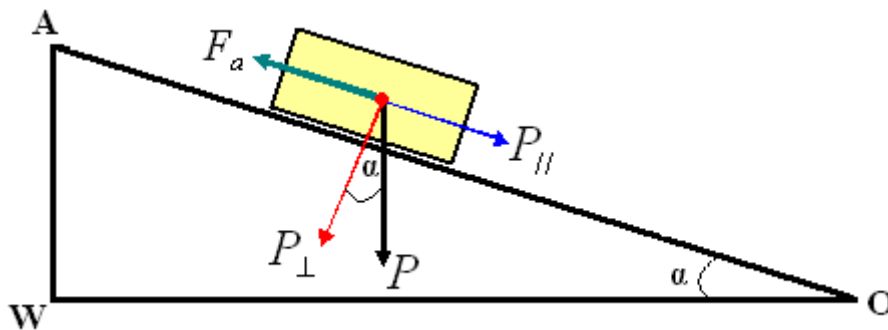


Figura 39 Piano inclinato con attrito

L'attrito statico F_a , invece, tende ad opporsi al moto, cercando di mantenere fermo il corpo stesso – **equilibrio**- almeno fino a quando è soddisfatta la relazione:

$$F_a \geq P_{\parallel} \quad (5)$$

Per completare la quantificazione delle diverse forze in gioco, è utile richiamare la formula (2) di questo capitolo che ci consente di calcolare la forza di attrito statico, ove, essendo F_p , la forza premente, coincidente con P_{\perp} , otteniamo:

$$F_a = \mu \cdot P_{\perp} = \mu \cdot mg \cos \alpha \quad (6)$$

3.2 Momento di una forza rispetto a un punto

Per introdurre il concetto di momento M di una forza rispetto ad un punto P , bisogna introdurre il concetto di braccio (b) della forza, inteso come la distanza della forza da un punto P :

YouTube



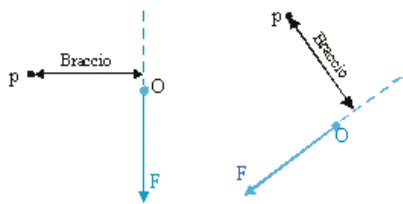


Figura 40 Momento di una forza

Il momento è quindi il prodotto dell'intensità della forza per il braccio:

$$M = b \times F \quad (7)$$

Il cui modulo risulta: $M = b \cdot F \cdot \sin \alpha$

Quando consideriamo un angolo di 90° , otteniamo: $M = b \cdot F$, da cui possiamo ricavare:

$$F = \frac{M}{b} \Rightarrow b = \frac{M}{F}$$

Forza e braccio sono inversamente proporzionali, perciò più lungo è il braccio meno intensa sarà la forza da applicare per avere lo stesso momento.

L'unità di misura del momento è il Newton per metro ($N \cdot m$), essendo il prodotto di una forza per una distanza.

L'effetto del momento è di produrre una rotazione attorno al punto di riferimento. Per convenzione, il momento si definisce positivo se la rotazione si compie in senso orario; negativo se la rotazione si compie in senso antiorario.

E' SEMPLICE

Un corpo o un sistema ha un Momento, dovuto ad una o più forze, se c'è **rotazione**. Se non ruota, il Momento è nullo o più semplicemente zero.

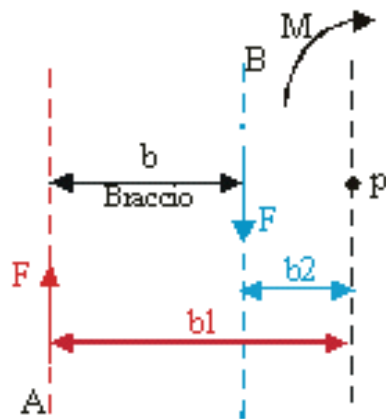


Figura 41 Momento di una coppia di forze

3.3 Momento di una coppia di forze

Un sistema di forze formato da due forze di uguale intensità ma di verso contrario, costituisce una coppia di forze. Il braccio di una coppia di forze corrisponde alla distanza fra le linee di azione delle forze.

Risultando il braccio $b = b_1 - b_2$ il momento della forza che agisce lungo la retta A:

$$M_{(a)} = F \times b_1 \text{ (positivo);}$$

Momento della forza che agisce lungo la retta B:

$$M_{(b)} = F \times b_2 \text{ (negativo);}$$

Momento della coppia rispetto al punto P:

$$M = F \times b_1 - F \times b_2 = F \times (b_1 - b_2) = F \times b$$

$$\text{(positivo).} \quad (8)$$

Il momento di una coppia di forze è il prodotto dell'intensità di una delle due forze per il braccio.

3.4 Esempio di momento di una forza

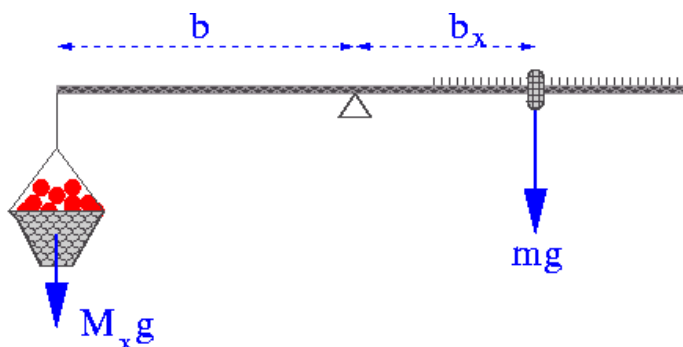


Figura 42 Esempio di momento di una forza - Bilancia

La bilancia a due bracci è uno dei tanti esempi in cui si manifesta il momento di una coppia di forze. Forse vi sarà capitato di vederla usare da anziani contadini al mercato...

Questo dispositivo è composto da due bracci separati da un fulcro centrale F: su un braccio a distanza fissa, b , si trova un cestello su cui disporre la merce, sull'altro c'è un pesetto di massa m la cui distanza dal fulcro b_x , può variare.

Come avviene la determinazione del **peso della merce**?

La bilancia è ferma quando il momento torcente delle due forze-peso, quello del peso di massa M_x della merce a distanza b dal fulcro e quello del peso di massa m , a distanza b_x dal fulcro sono uguali per intensità e direzione e opposti in verso, cioè:

$$bM_x g = b_x mg \quad \text{da cui} \quad M_x = \frac{b_x}{b} m \quad (9)$$

agendo quindi sul braccio b_x il fruttivendolo ha la possibilità di effettuare pesate anche grandi, potendo aumentare o diminuire il suo valore finché non si ottenga l'equilibrio e solo a quel punto leggere, sulla scala graduata, il valore della pesata.

3.5 Equilibrio del corpo rigido

un corpo rigido può essere soggetto a due tipi di moti: traslatorio e rotatorio.

Nella figura il corpo riceve una spinta data da una forza F ed inizia a traslare spostandosi dalla posizione A alla posizione B senza ruotare.

In questo altro caso, il corpo, soggetto alla forza F , inizia a ruotare lungo il suo asse assumendo la posizione B, occupando una diversa posizione nello spazio, non più allineata a quella di partenza:

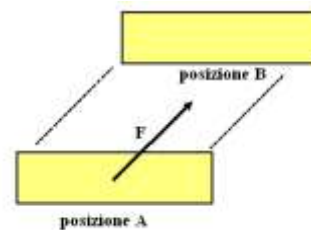


Figura 43 Traslazione corpo rigido

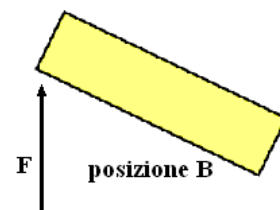


Figura 44 Rotazione corpo rigido

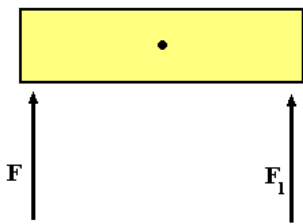


Figura 45 Coppia di forze che non producono momento

FAI ATTENZIONE

Non confondere queste due rappresentazioni: **punto materiale** e **corpo rigido**. Quando si affronta un problema di fisica non possiamo scegliere se usare una o l'altra tipologia. Siamo obbligati ad usare quella appropriata.

Se abbiamo, ad esempio, un corpo in caduta libera, vedere quel corpo come punto materiale è appropriato. Se quello stesso corpo, un istante dopo urta altri corpi e si mette a ruotare, siamo obbligati, da questo momento in poi, a vederlo come corpo rigido!

Se ci sono rotazioni di corpi, è sempre un corpo rigido!

Per ottenere l'equilibrio nel primo caso è necessario contrastare la forza F con un'altra posta sulla stessa retta di F , di uguale intensità e di verso opposto.

Per ottenere l'equilibrio nel secondo caso, supposto che il corpo sia vincolato nel suo centro, bisognerà applicare dal lato opposto una forza di pari modulo, direzione e verso in modo che sia nullo il momento risultante:

$$\sum_i M_i = 0 \tag{10}$$

dove il simbolo \sum_i indica la *sommatoria* (o somma), mentre gli M_i sono i singoli momenti delle forze agenti sul corpo rigido.

3.6 Confronto tra corpo rigido e punto materiale

Di seguito è rappresentato un confronto tra le due diverse schematizzazioni (o modelli) di punto materiale e di corpo rigido, facendo rilevare le differenze circa il tipo di moto prodotto e le condizioni di equilibrio in entrambi i casi.

| | Punto materiale | Corpo rigido |
|--------------------------|--|--|
| Definizione | Qualsiasi oggetto le cui dimensioni siano considerate piccole rispetto allo spazio circostante, o meglio, per il tipo di problema da trattare sono considerate non importanti. | Corpo che non si deforma qualunque sia l'intensità delle forze applicate. È di fatto un corpo che viene studiato secondo la sua forma reale. |
| Tipo di moto | Descrive una linea nel piano in cui agisca la forza | <ul style="list-style-type: none"> • Traslatorio I punti del corpo, muovendosi, descrivono traiettorie parallele • Rotatorio I punti del corpo, muovendosi, descrivono traiettorie circolari |
| Condizione di equilibrio | Se la risultante delle forze è nulla: $\sum_i F_i = 0$ | la risultante delle forze , rispetto alla traslazione, è nulla: $\sum_i F_i = 0$ la risultante dei momenti , rispetto alla rotazione, è nulla: $\sum_i M_i = 0$ |

Osservazione

È evidente che la scelta di utilizzare il modello di punto materiale o di corpo rigido dipendono in maniera decisiva dal tipo di problema da studiare. Qualora per schematizzare il problema sia sufficiente rappresentare il corpo come punto materiale, allora basterà utilizzare il modello di punto materiale. Laddove invece risulti necessario apprezzare anche la struttura bi o tri-dimensionale del corpo, si abbandonerà il modello di punto materiale per adottare quello di corpo rigido, potendo così studiare anche le eventuali rotazioni intorno ad un vincolo o a un suo asse.

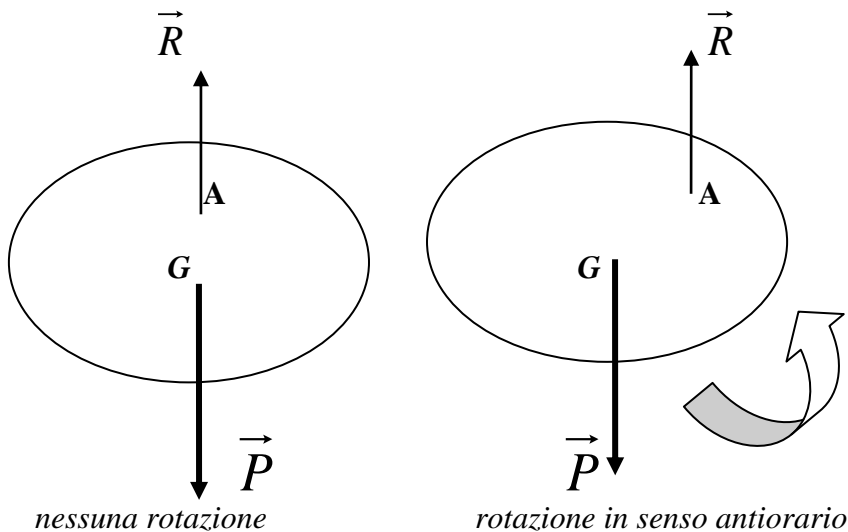
3.7 Il baricentro

Un corpo può essere visto come costituito da porzioni infinitesime ciascuna delle quali è soggetta alla forza peso. Il peso complessivo può proprio considerarsi applicato nel baricentro del corpo, come se ivi si fosse concentrata tutta la sua massa.

Dunque il **baricentro**, o *centro di gravità*, del corpo è il punto di applicazione della forza peso.

Nel caso particolare in cui il corpo possieda una simmetria, il centro di gravità coincide proprio con il centro di simmetria.

Se si sospende un corpo rigido ad un suo punto qualsiasi **A**, il baricentro si colloca proprio lungo la verticale per **A**. Se così non fosse, il corpo sarebbe soggetto a due forze (peso e reazione vincolare) opposte ma non aventi la stessa retta d'azione e la coppia che ne deriverebbe procurerebbe rotazione.



3.8 Le macchine semplici

Dal punto di vista statico, una macchina è un dispositivo che consente di equilibrare una forza (**resistente**) per mezzo di un'altra forza (**motrice**).

Una **macchina semplice** è chiamata così perché non si può scomporre in macchine ancora più elementari. Dal punto di vista storico, rappresentano le tecnologie più antiche per applicare una forza maggiore della sola forza muscolare, attraverso il principio del guadagno meccanico.

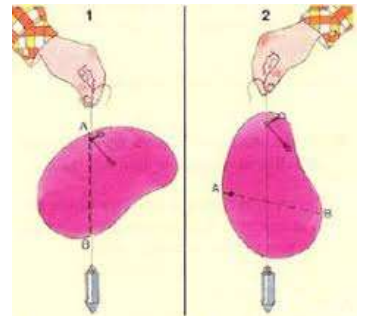


Figura 46 Baricentro di un corpo



Laboratorio 5 Le Leve

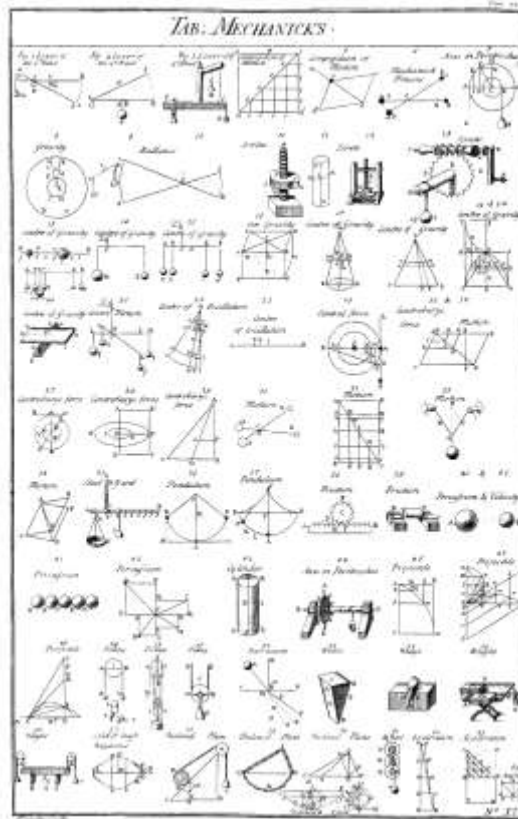
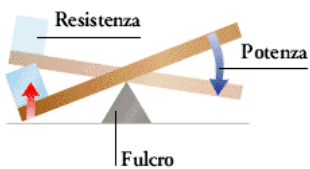


Figura 47 Tavola delle macchine semplici



Sono considerate macchine semplici la **fune**, le **leve**, il **cuneo**, il **piano inclinato**, la **vite**, le **carrucole**, il **corpo girevole intorno ad un asse**. Ci occuperemo in questo paragrafo delle leve e delle carrucole

Il rapporto tra l'intensità della forza resistente F_r e quello della forza motrice F_m necessaria per l'equilibrio viene detto **vantaggio meccanico** di una macchina e si esprime con la formula:

$$V = \frac{F_r}{F_m} \quad (11)$$

3.9 Le leve



Le leve sono macchine semplici che consentono di svolgere lavoro con minore energia.

Composte da una sbarra appoggiata su un **fulcro**, si distinguono in tre classi, a seconda della posizione di resistenza, potenza e fulcro.

Il piede di porco che si usa per sollevare oggetti pesanti è una leva semplice, ma le leve sono impiegate anche in macchine complesse. La potenza è amplificata se il suo punto di applicazione è più lontano dal fulcro del punto di applicazione della resistenza.

Le leve sono classificate in base alla posizione relativa di **resistenza**, **potenza** e **fulcro**.

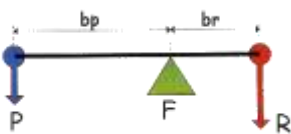


Figura 48 Leva di primo genere

Nelle leve di **primo genere** (le pinze) il fulcro sta tra resistenza e potenza e può essere vantaggiosa, svantaggiosa o indifferente in base alla posizione del fulcro.

Nelle leve di **secondo genere** (lo schiaccianoci) la resistenza sta tra potenza e fulcro. È una leva sempre vantaggiosa.

In quelle di **terzo genere** (la molletta per lo zucchero) la potenza viene applicata tra fulcro e resistenza. È una leva che non amplifica la potenza, ma il movimento. È una leva sempre vantaggiosa.

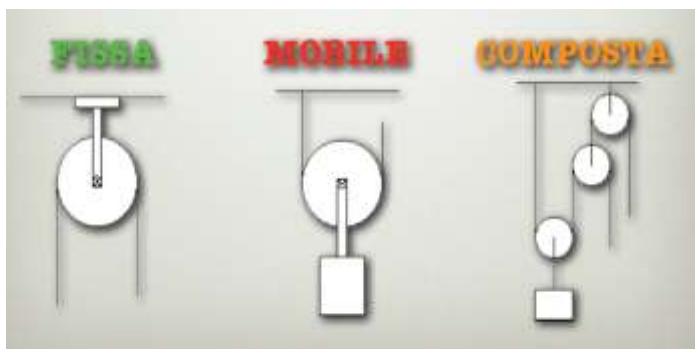
Riassumendo

Per le leve distinguiamo 3 casi:

- A) se $b_p > b_r$ il vantaggio è superiore a 1, la leva è vantaggiosa;
- B) se $b_p < b_r$ il vantaggio è inferiore a 1, la leva è svantaggiosa;
- C) se $b_p = b_r$ il vantaggio è uguale a 1, la leva è indifferente.

3.10 La carrucola

In meccanica una **carrucola** o **puleggia** è una macchina semplice per sollevare pesi. È una ruota girevole attorno ad un per-



no (asse) fissato ad

Figura 51 Carrucola - diversi tipi

una staffa e munita di una **scanalatura** entro cui scorre un organo flessibile di trasmissione, come una fune, una cinghia, ecc. Scopo della carrucola (FISSA) è modificare la linea di azione di una forza. Possiamo distinguere tre tipologie di carrucole: Fissa, mobile e composta.

Permette di esercitare lo sforzo muscolare per sollevare un peso nel verso in cui ci riesce più facile, (cioè dall'alto verso il basso) e soprattutto ci consente di direzionare la linea di azione della forza nel modo a noi più comodo.

L'azione della carrucola **fissa** può essere rappresentata come una leva di 1° genere, in cui il perno centrale della carrucola raffigura il fulcro **f** e le estremità laterali sono rispettivamente la forza resistente F_r e la forza motrice F_m .

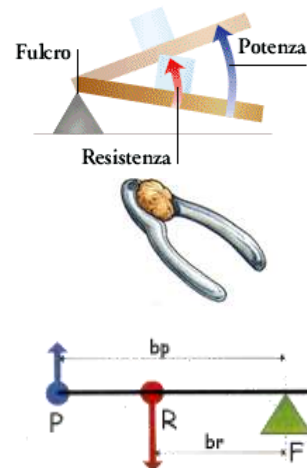


Figura 49 Leve di secondo genere

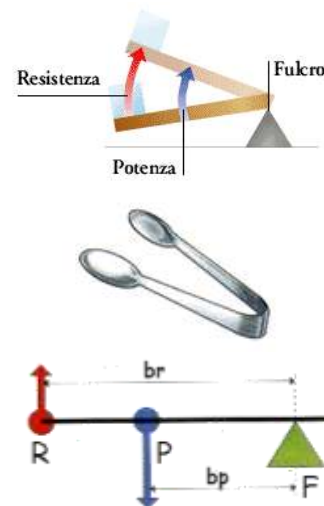


Figura 50 Leve di terzo genere

FRASI CELEBRI

Secondo la tradizione Archimede di Siracusa, matematico e inventore greco, un giorno avrebbe detto: **“Datemi una leva e solleverò il mondo”**.

La celebre frase fu conosciuta in seguito alla scoperta dell'uso delle leve per sollevare gli oggetti ed è stata poi tramandata - nelle loro opere - dai filosofi e matematici Pappo di Alessandria e Simplicio.

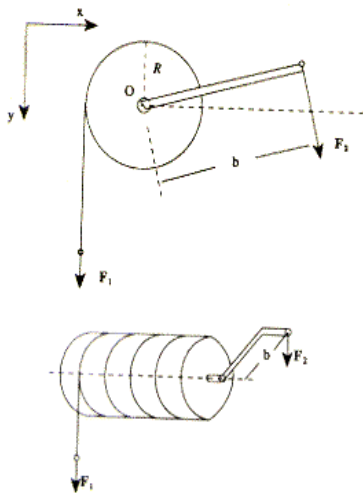
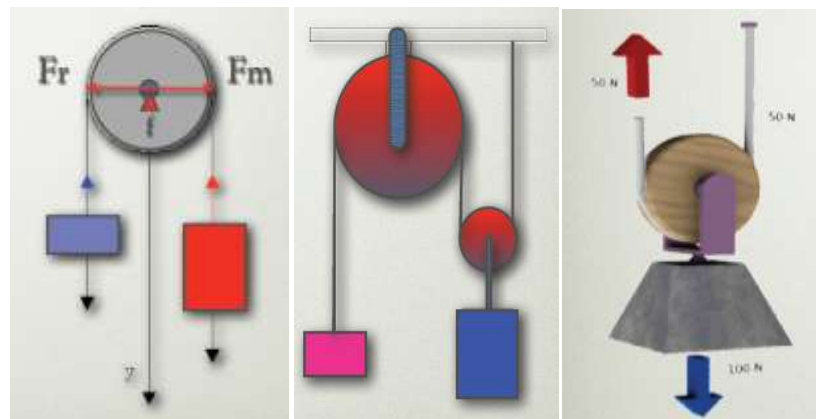


Figura 52 Verricello

E' **mobile**, quando il peso e' attaccato alla staffa, che quindi sale e scende con esso; In questo caso esiste un vantaggio meccanico pari al 50% , ovvero per sollevare un peso di 100 kg dovremo applicare una forza di soli 50 kg. E' **composta** se costituita da carrucole fisse e mobili. E' il sistema senza dubbio più vantaggioso dal punto di vista dell'utilizzo della forza, ma è svantaggioso in termini di velocità del movimento.

Per mezzo della fune e delle carrucole multiple i marinai riescono a sollevare pesanti vele con poco sforzo. Per contro il movimento sarà meno veloce per via di una fune estremamente lunga. Il dispositivo descritto prende il nome di **verricello**. Il verricello è costituito da un disco di raggio R girevole attorno al suo asse rigidamente saldato al disco; vi è, inoltre, una manovella di braccio b maggiore di R.



YouTube

La pressione è un concetto che rientra in molti ambiti. Si pensi alla pressione atmosferica, alla pressione che si esercita su un fluido, quella esercitata ad una certa profondità in piscina o nel mare, quella di un coltello mentre taglia o la pressione cui è sottoposto un tacco mentre una donna lo indossa. Per i Fluidi e nella Termodinamica, con i Gas, useremo molto questo concetto.

3.11 La pressione

Finora abbiamo sempre applicato le forze ad un unico punto, in generale coincidente con il baricentro, ossia con il punto nel quale possiamo pensare concentrata tutta la massa del corpo. Quando però abbiamo a che fare con corpi estesi omogenei la forza-peso è distribuita in maniera uniforme e l'estensione della **superficie d'appoggio** può giocare un ruolo importante nel definire le condizioni di equilibrio.

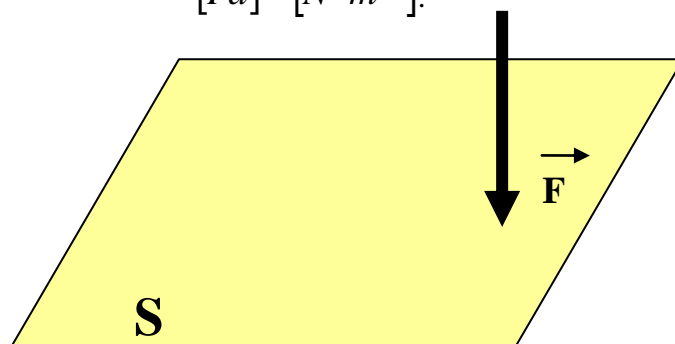
Partiamo ad esempio dalla seguente domanda: perché uno sciatore sprofonda nella neve se indossa solamente gli scarponi mentre non sprofonda con le racchette da neve o gli sci? È chiaro che in entrambi i casi la forza-peso dello sciatore è la stessa. La differenza sta nel fatto che, nel caso delle racchette o degli sci, la forza-peso dello sciatore viene distribuita su tutta la superficie d'appoggio delle racchette o degli sci e questa superficie ha un'area molto più grande di quella degli scarponi.

La grandezza che quantifica quanto una forza è distribuita su una superficie è detta **pressione**. La pressione p è una grandezza **scalare** e si definisce come il rapporto tra l'intensità della forza F che preme su una superficie e l'area A della superficie premuta:

$$p = \frac{F}{S} \quad (12)$$

Nel Sistema Internazionale la forza si misura in newton, l'area in metri quadri. Pertanto, l'unità di misura della pressione è il newton su metro quadro, N / m^2 . Questa unità di misura prende anche il nome di **pascal** (simbolo **Pa**). Dimensionalmente abbiamo pertanto che

$$[Pa] = [N \cdot m^{-2}].$$



3.12 La pressione del sangue

È la pressione esercitata sulle pareti dei vasi arteriosi dal sangue che scorre al loro interno. La pressione arteriosa dipende dal ritmo e dalla forza di contrazione del cuore, dalla quantità di sangue e, soprattutto, dalle resistenze che arterie, arteriole e capillari oppongono al flusso sanguigno.

3.13 I fluidi

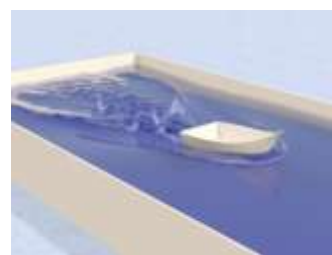
Definiamo fluidi le sostanze che si presentano allo stato liquido o aeriforme. Le loro molecole hanno scarsa coesione e possono scorrere liberamente le une sulle altre (**liquidi**) o spostarsi indipendentemente le une dalle altre (**gas**) in modo che il corpo prenda la forma del recipiente che lo contiene.

Blaise Pascal, matematico e filosofo francese (1623-1662), osservò sistematicamente il comportamento di liquidi compressi in recipienti, arrivando alla conclusione che in tutto il volume di liquido si stabilisce una pressione uniforme: sulle pareti del recipiente, tale pressione dà luogo a forze perpendicolari in ogni punto della parete.

RICORDA

La pressione è una **grandezza scalare**, anche se è il rapporto tra una grandezza vettoriale come la Forza e una superficie.

Il motivo è dovuto al fatto che anche se la forza fosse inclinata, la pressione è dovuta sempre alla componente perpendicolare alla superficie su cui quella forza è esercitata, quindi per descriverla non c'è bisogno di una direzione e un verso

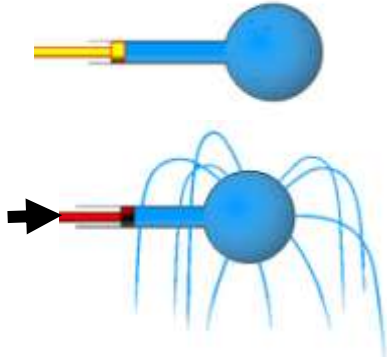


YouTube



Figura 53 Blaise Pascal 19 giugno 1623 – Parigi, 19 agosto 1662

YouTube



3.14 Esperienza di Pascal

Una sfera di rame con tanti forellini contiene acqua che può essere compressa per mezzo di un pistone

così compressa, l'acqua zampilla con la stessa velocità in tutte le direzioni

anche se cambia la forma del contenitore, la direzione di ogni zampillo si adegua alla superficie restando perpendicolare ad essa.

3.15 Principio di Pascal

La pressione esercitata in un punto qualunque di un fluido, si trasmette inalterata su tutti i punti del fluido, indipendentemente dalla direzione come è stata esercitata.



Figura 54 Principio di Pascal

3.16 Peso specifico di un corpo

Il peso specifico di un corpo indicato con p_s è definito come il rapporto tra il suo peso ed il volume da esso occupato:

$$p_s = \frac{P}{V} \quad (13)$$

nel sistema internazionale l'unità di misura è il N/m^3 .

Da notare che ha una formula simile a quella della densità di massa già studiata nel capitolo 1 ($\rho = \frac{m}{V}$). In tal senso potremo considerarla come una densità di peso.

Comunemente il termine peso specifico è usato impropriamente come sinonimo di densità e per questo si trova molto spesso indicato come g/cm^3 o $kg/litro$ o kg/dm^3 . In questo caso i grammi sarebbero da intendersi secondo un'obsoleta definizione di *grammi peso*, non *grammi massa*, dove 1 grammo peso è il peso di 1 grammo massa in condizioni di accelerazione di gravità standard.



YouTube

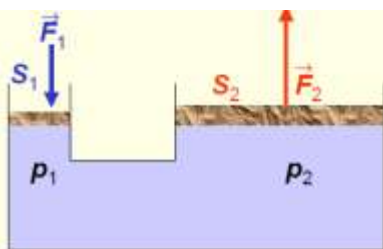


Figura 55 Torchio idraulico

3.17 Il torchio idraulico

Il torchio idraulico è costituito da due cilindri contenenti un liquido (solitamente un olio) collegati da un tubo, comunque lungo, ma rigido, o meglio capace di piccole deformazioni.

Funziona in base al Principio di Pascal in quanto la pressione esercitata su uno dei due pistoni si trasmette interamente in tutto il liquido e quindi anche all'altro pistone.

Possiamo calcolare la forza F subita dal pistone di diametro D mettendola in relazione a quella esercitata sul pistone di diametro d .

Essendo libero di muoversi il liquido, la pressione esercitata da una parte si trasmette interamente dall'altro lato e per il Principio di Pascal sappiamo che

$$P_f = P_F \quad (14)$$

dove $P_f = \frac{f}{S_d}$ mentre $P_F = \frac{F}{S_D}$ con S_d ed S_D le due superfici dei pistoni.

Sostituendo nella (13) otteniamo:

$$\frac{f}{S_d} = \frac{F}{S_D} \text{ da cui ricavando } \mathbf{F} \text{ e tenendo conto che } S_d = \pi \frac{d^2}{4} \text{ e } S_D = \pi \frac{D^2}{4} \text{ otteniamo:}$$

$$F = \left(\frac{D}{d} \right)^2 \cdot f \quad (15)$$

da essa è facile osservare che la forza si moltiplica o si riduce secondo il rapporto dei quadrati dei diametri dei due pistoni. Quindi riducendo sempre più il pistone di diametro d su cui esercitiamo la forza f e aumentando il diametro del pistone D su cui viene trasmessa la pressione, come indicato dal principio di Pascal, è possibile costruire un dispositivo in grado di sollevare anche grosse masse con un piccolo sforzo.

Le applicazioni del torchio idraulico sono innumerevoli ma solo per citarne una, è esattamente il dispositivo che troviamo nelle officine meccaniche utilizzate per sollevare automobili di massa considerevole, circa 1,5 tonnellate, con uno sforzo irrisorio. Quelle moderne sono sollevate con dei piccoli motori elettrici che sostituiscono quelli del vecchio tipo azionate a pedale.

3.18 La legge di Stevin

La **legge di Stevin** (o Stevino italianizzando il nome) è uno dei principi fondamentali della statica dei fluidi (**idrostatica**) e venne enunciata da **Simon Stevin** (1548-1620) nel suo trattato del 1586 *De Beghinseen den Waterwichts* dedicato all'idrostatica.

La legge afferma che dato un fluido di densità costante ρ , la pressione esercitata da una colonna di fluido in un suo punto di profondità h (distanza dal pelo libero del fluido, ossia affondamento di un punto dalla superficie in alto del liquido a contatto con l'ambiente esterno) è direttamente proporzionale a h ,

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h \quad (16)$$

essendo il modulo dell'accelerazione di gravità $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.



Figura 56 Esempio Torchio idraulico in un'autofficina

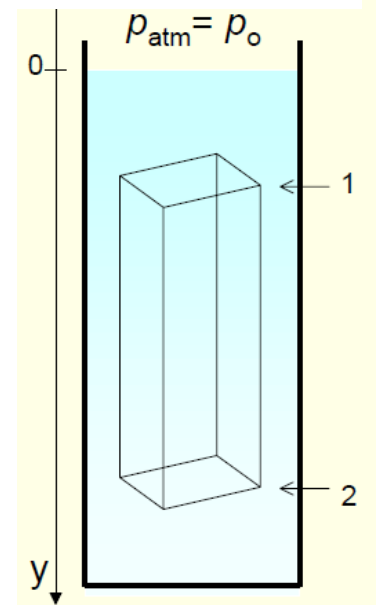


Figura 57 Legge di Stevin



Nelle immersioni, i sub, devono tener in giusto conto la profondità, perchè più ci si immerge in profondità e più risulta difficile risalire, perchè quella maggiore pressione, richiederebbe un maggiore sforzo per vincerla. Per fare immersioni a certe profondità si usa infatti una fune, che rende più agevole la risalita.

Il prodotto $\rho \cdot g$ è pari al **peso volumico** γ del fluido ($\rho \cdot g = \frac{m}{V} \cdot g = \frac{Peso}{Volume}$), pertanto la legge di Stevin può intendersi anche come legame fra la pressione in un punto del fluido e il suo approfondimento dalla superficie libera, dove γ è il coefficiente di proporzionalità costante:

$$p_h = \gamma \cdot h \quad (17)$$

Se la superficie della colonna di liquido è esposta alla pressione atmosferica P_A allora la legge di Stevin può essere scritta anziché in termini di pressione relativa, in quella di pressione assoluta:

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h + p_A \quad (18)$$

dove $p_A = 101.325 Pa$ è la **pressione atmosferica** standard, di cui successivamente ne verrà indicato il calcolo attraverso l'esperimento di Torricelli.

Dimostrazione della formula (16).

La pressione dovuta al peso del fluido ad una certa profondità h è dato da:

$$p = \frac{P}{S} \quad (\text{forza peso fratto superficie})$$

ma ricordando che la forza peso vale $P = m \cdot g$ e che dalla formula della densità di massa possiamo ricavare $m = \rho \cdot V$, sostituendo otteniamo:

$$p_h = \frac{mg}{S} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} \quad (19)$$

tenuto ora conto come se la colonna di fluido fosse cilindrica (ma vale anche per altre figure regolari come i parallelepipedi o i cubi), il suo volume V può essere espresso come $V = S \cdot h$ (superficie di base per altezza) da cui sostituendo nella (19) otteniamo:

$$p_h = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot \cancel{S} \cdot h \cdot g}{\cancel{S}} = \rho \cdot g \cdot h$$

3.19 Pressione idrostatica

La pressione enunciata nella formula di Stevin, $p_h = \rho \cdot g \cdot h$ va sotto il nome di **pressione idrostatica** ed è la forza esercitata da un fluido in quiete su ogni superficie a contatto con esso. Dunque è indipendente dalla massa sottostante il punto considerato.

Ad una certa profondità un fluido esercita una certa pressione indipendentemente dalla quantità di fluido sovrastante il corpo che subisce tale pressione, ma solo dalla densità del fluido e dall'altezza (o profondità) cui ci troviamo, essendo l'accelerazione gravitazione costante ($g = 9,81 N/Kg$)

Quella **atmosferica** è dovuta alla colonna d'aria che abbiamo sopra di noi. Più saliamo in alta quota e più diminuisce, diminuendo la lunghezza di quella colonna d'aria. A 10 metri in profondità, invece, si ha una pressione equivalente a quella atmosferica presente a livello del mare, cui ovviamente poi va aggiunta 1atm per la colonna d'aria. A 10m, in immersione, la pressione risulta circa di 2atm.

3.20 Paradosso idrostatico

In una botte piena d'acqua immergiamo, attraverso il coperchio, un tubo stretto e *molto alto*. Versando acqua nel tubo la pressione idrostatica aumenta, secondo la legge di Stevin, proporzionalmente all'altezza ($p_h = \rho \cdot g \cdot h$).

Per il principio di Pascal l'aumento di pressione si trasmette a tutto il liquido contenuto nella botte e di conseguenza aumenta anche la forza esercitata dall'acqua contro le pareti interne della botte, essendo il prodotto di pressione per superficie.

Versando quindi acqua nel tubo si arriverà ad un punto in cui la botte si rompe in quanto il materiale che la costituisce non è in grado di supportare la forza esercitata dal liquido.

Ciò conferma l'indipendenza della pressione in un certo punto interno ad un fluido dalla forma del recipiente che lo contiene: un tubo alto ma relativamente stretto può produrre pressioni notevoli senza la necessità di impiego di grossi volumi di liquido.

YouTube

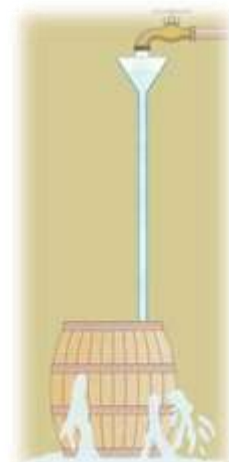


Figura 58 Paradosso idrostatico

3.21 Principio dei vasi comunicanti

Abbiamo visto che l'acqua come tutti i liquidi assume la forma del recipiente che la contiene. Osserviamo che cosa succede versando dell'acqua in un particolare recipiente, formato a sua volta da vari recipienti di forma e dimensioni diverse e tutti fra loro comunicanti. L'acqua raggiunge lo stesso livello in tutti i vari recipienti. Tale principio, detto principio dei vasi comunicanti, viene sfruttato per travasare i liquidi con i sifoni.

YouTube



Figura 59 Principio dei vasi comunicanti

3.22 Capillarità

Osserviamo adesso lo stesso fenomeno in vasi comunicanti un po' particolari, formati, da tubi via via sempre più stretti; l'ultimo tubicino il più sottile, viene chiamato capillare. Che cosa succede versando dell'acqua nella vaschetta? Invece di raggiungere lo stesso livello in tutti i tubicini, l'acqua raggiunge livelli più alti via via che i tubi diventano più stretti; nel capillare infatti il livello è decisamente più alto. Questo fenomeno si verifica perché l'acqua possiede una particolare forza, detta forza di adesione, che la fa aderire alle pareti del recipiente con cui viene a contatto; la superficie di contatto è più grande rispetto alla quantità d'acqua, proprio nel capillare in cui l'acqua si "arrampica" raggiungendo il livello più alto.

YouTube

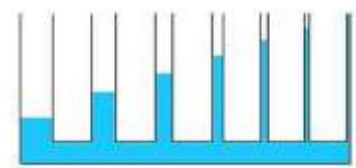


Figura 60 Effetto della Capillarità

3.23 Vasi comunicanti con liquidi diversi

Se ai capi dei vasi comunicanti troviamo due liquidi differenti (non miscibili) e indichiamo con ρ_1 e ρ_2 la densità dei due liquidi, h_1 e h_2 la loro altezza, p_1 e p_2 la pressione che essi esercitano e indichiamo con g la gravità e p_A la pressione atmosferica si ha:

$$p_1 = p_2$$

da cui semplificando p_A ad ambo i membri, otteniamo:

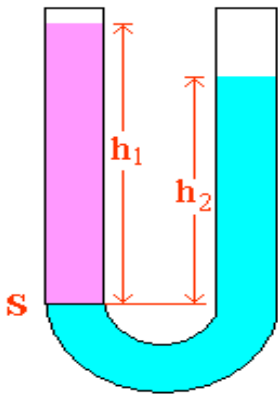


Figura 61 Vasi comunicanti con liquidi non miscibili

$$\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \quad (20)$$

Notiamo che nell'ultima equazione il prodotto $\rho \cdot h$ dimensionalmente è dato da $\left[\frac{Kg}{m^3} \right] \cdot [m] = \left[\frac{Kg}{m^2} \right]$ che rappresenta una densità superficiale del liquido.

Si evince inoltre che la proprietà dei vasi comunicanti è un caso particolare della formula, nel quale si considera un solo liquido e l'equazione si riduce alla seguente forma:

$$h_1 = h_2.$$

Nel caso di liquidi non miscibili aventi densità diversa, il liquido con densità maggiore presenterà, dal suo lato, un'altezza minore rispetto a quella a densità minore, come seppur con la stessa quantità di liquido, il primo spingesse maggiormente l'altro in direzione opposta, facendolo così alzare di livello. È anche rilevante notare che il livello del liquido non dipende dalla distanza fra i vasi.

3.24 C.L.I.L. PROJECT

Hydrostatic Paradox

In a barrel full of water plunge, through the lid, a narrow tube and very high. By pouring water in the pipe hydrostatic pressure increases, according to the law of Stevin, in proportion to height ($p_h = \rho \cdot g \cdot h$).

For the principle of Pascal the pressure increase is transmitted to the liquid contents in the barrel and thus also increases the force exerted by the water against the inner walls of the cask, es-Sendo the product of pressure to the surface.

Then pouring water into the tube it will come to a point where the barrel breaks because the material that is is not able to withstand the force exerted by the liquid.

This confirms the independence of the pressure in a certain point internal to a fluid from the shape of the container that contains: a relatively narrow but tall tube can produce considerable pressure without the need to use large volumes of liquid.

Principle of communicating vessels

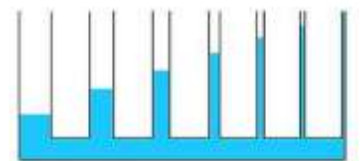
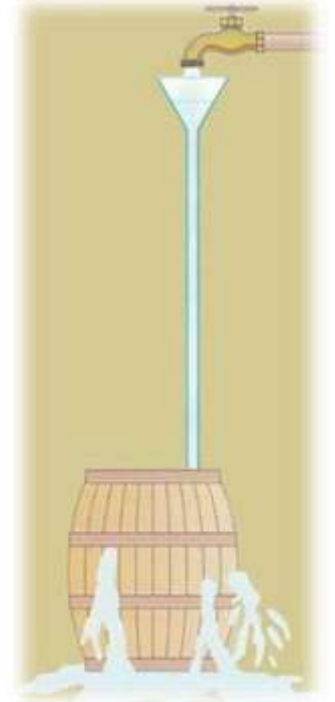
We have seen that the water like all the liquid assumes the shape of its container. Os-serve what happens by pouring water in a particular container, formed in turn by various containers of different shape and size and all communicating with each other. The water reaches the same level in all the various containers. This principle, called the principle of communicating vessels, is used for pouring liquids with the siphons.

Capillarity

Now we observe the same phenomenon in communicating vessels a bit 'special sizes, from tubes gradually more and more narrow, the last tube the thinnest, is called capillary action. What happens pouring water into the tank? Instead of reaching the same level in all the tubes, the water reaches the highest levels gradually that the tubes become narrower; capillary in fact the level is much higher. This phenomenon occurs because the water has a particular force, said force of adhesion, which makes it adhere to the walls of the container with which it comes in contact, the contact surface is larger than the amount of water, right in the capillary which water "climbing" reaching the highest level.

e in base alla legge di Stevin:

$$\rho_1 \cdot g \cdot h_1 + p_A = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 + p_A$$



YouTube

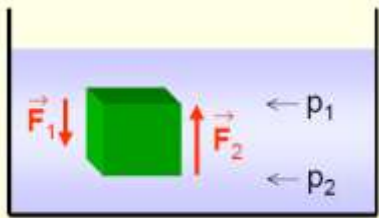


Figura 62 Principio di Archimede

3.25 Principio di Archimede

Il **principio di Archimede** afferma che ogni corpo immerso in un fluido (liquido o gas) riceve una spinta verticale dal basso verso l'alto, uguale per intensità al peso del volume del fluido spostato.

Se abbiamo a disposizione un cubo di lato d , parallelo alla verticale, agiscono su di esso ben 6 forze, ciascuna su ogni faccia. Quattro forze (a coppie di due) agenti sui lati si annullano, perché per la legge di Stevino sappiamo che ad una certa profondità la pressione è costante, quindi ogni coppia presenta forze di pari modulo ma verso opposto, quindi il loro bilancio è nullo.

Restano invece in gioco le forze $F_1 = p_1 \cdot d^2$ e $F_2 = p_2 \cdot d^2$

La forza totale F_{TOT} agente sul corpo sarà pari a:

$$F_{TOT} = F_1 - F_2 = (p_1 - p_2) \cdot d^2 \quad (21)$$

sapendo che $(p_1 - p_2) = \rho_{liquido} \cdot g \cdot h$ dove h coincide con un lato d , sostituendo otteniamo:

$$F_{TOT} = (p_1 - p_2) \cdot d^2 = \rho_{liquido} \cdot g \cdot d \cdot d^2 = \rho_{liquido} \cdot g \cdot V_{corpo}$$

ma essendo: $\rho_{liquido} \cdot V_{corpo} = m_{liquido}$

si deduce che:

$$F_{TOT} = \rho_{liquido} \cdot V_{corpo} = m_{liquido} \quad (22)$$

ovvero,

“la forza di Archimede è pari alla forza peso del liquido spostato, ed è diretta verso l'alto”

si può dimostrare che il **principio di Archimede**, vale in generale, anche con corpi di qualsiasi forma.

È così detto in onore di **Archimede di Siracusa**, matematico e fisico greco, vissuto nel III secolo a.C. che lo enunciò nella sua opera *Sui corpi galleggianti* (nell'opera di Archimede si trattava però di un teorema, dedotto da un semplice postulato che oggi non viene quasi mai enunciato esplicitamente).

Nel 2012 in un studio condotto dal Politecnico di Milano è stato mostrato sperimentalmente che il principio non sembra essere valido per dimensioni **nanometriche** (molto piccole). Nell'esperimento particelle d'oro del diametro di pochi nanometri disperse in una sospensione acquosa di particelle di materiale plastico poco più denso dell'acqua, ma con diametro 6 volte superiore, invece di andare a fondo vengono a galla lentamente e nel giro di qualche giorno formano sulla superficie un sottile strato. È come se un pezzo di ferro galleggiasse sull'acqua. Si prevedono applicazioni interessanti in biologia e in geologia.

Da un punto di vista matematico, la forza di Archimede può essere espressa nel modo seguente:

$$F_A = \rho_{flu} \cdot g \cdot V \quad (21)$$

essendo $\rho_{liquido}$ la densità (massa volumica) del fluido, g l'accelerazione di gravità e V il volume spostato (che in questo caso è uguale al volume del corpo). Allo stesso modo, il peso del corpo è dato da

$$F_p = \rho_{corpo} \cdot g \cdot V \quad (22)$$

essendo ρ_{corpo} la densità media del solido immerso.

La spinta è indipendente dalla profondità alla quale si trova il corpo.

La **densità relativa** (del corpo immerso nel fluido rispetto alla densità del fluido) è facilmente calcolabile senza misurare alcun volume:

$$d_{rel} \% = \frac{\text{peso del corpo nello spazio vuoto}}{\text{peso del corpo nello spazio vuoto} - \text{peso della parte immersa nel fluido}} \cdot 100 \quad (23)$$

Il peso di un corpo immerso (parzialmente o totalmente) non è quello totale misurabile fuori dal liquido, ma il peso del volume di fluido spostato dalla parte immersa. Questa quantità riduce il peso del corpo (parte immersa e non nel fluido) quando si trova appeso ad un filo nello spazio vuoto.

3.26 Corpo immerso in un liquido

Possono darsi due casi, illustrati da sinistra a destra in figura:

- Il corpo tende a **cadere** fino a raggiungere il fondo se la forza di Archimede è *minore* del peso, $F_A < F_p$, ovvero se $\rho_{flu} < \rho_{corpo}$.
- Il corpo si trova in una situazione di **equilibrio** se la forza di Archimede è *uguale* al peso, $F_A = F_p$, ovvero se $\rho_{flu} = \rho_{corpo}$. Questo significa che se il corpo era in quiete rimarrà in quiete, mentre se era in moto si muoverà di moto decelerato fino a fermarsi per effetto dell'attrito.
- Il corpo tende a risalire fino alla superficie dove **galleggia** se la forza di Archimede è *maggiore* del peso, $F_A > F_p$, ovvero se $\rho_{flu} > \rho_{corpo}$.

In questo caso il *volume immerso* V_i sarà tale da spostare un volume di fluido che equilibri il peso del corpo, ovvero:

$$\rho_{flu} \cdot g \cdot V_i = \rho_{corpo} \cdot g \cdot V \quad (24)$$

da cui si deriva la formula del galleggiamento:

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\rho_{corpo}}{\rho_{flu}} \quad (25)$$

La frazione di volume immerso è quindi uguale al rapporto tra le densità del corpo e del liquido. Nel caso di un iceberg che galleggia nel

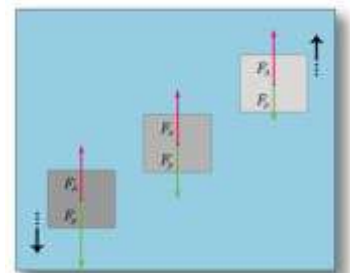


Figura 63 Corpo immerso in un liquido

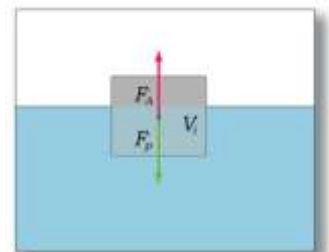


Figura 64 Galleggiamento di un corpo in un fluido



Laboratorio 6 Galleggiamento dei corpi



Figura 65 Mongolfiera come esempio del Principio di Archimede

mare, la densità del ghiaccio è circa 917 kg/m^3 , mentre la densità dell'acqua salata è circa 1025 kg/m^3 ; in base alla formula precedente, la percentuale di volume immerso è quindi del 89,5%.

3.27 Corpo immerso nell'atmosfera (o in un altro gas)

Le considerazioni fatte sopra per i liquidi valgono anche per i gas, con due importanti differenze:

- la densità dell'aria nell'atmosfera è oltre settecento volte minore di quella dell'acqua; questo fa sì che solo i corpi con densità molto bassa possono essere sollevati dalla spinta di Archimede.
- La maggior parte dei corpi ha una densità maggiore di quella dell'aria e per questo cade;
- Alcuni corpi con densità uguale a quella dell'aria galleggiano;
- I corpi con densità minore dell'aria vengono portati verso l'alto, come i palloncini di elio e le mongolfiere.

Una mongolfiera con $\rho_{flu} < \rho_{corpo}$ salirà fino ad una quota a cui la densità dell'aria calda interna è uguale a quella dell'aria esterna.

YouTube



3.28 Pressione atmosferica e sua misura

La **pressione atmosferica** è la pressione presente in qualsiasi punto dell'atmosfera terrestre. Nella maggior parte dei casi il valore della pressione atmosferica è equivalente alla pressione idrostatica esercitata dal peso dell'aria presente al di sopra del punto di misura.

Evangelista Torricelli, fisico e matematico italiano, realizzò nel 1644 il primo barometro a mercurio, arrivando con metodo sperimentale alla definizione dell'unità di pressione atmosferica. Come venne condotta la misurazione. Utilizzando un tubo, lungo 1 m, della sezione di 1 cm^2 e sigillato a un'estremità, viene riempito di mercurio e posto, con l'apertura verso il basso tenuta chiusa in modo che non entri aria, in una bacinella anch'essa piena di mercurio. A questo punto viene aperta l'estremità inferiore e si constata che il tubo non si svuota e che il mercurio scende solo per un certo tratto (vi è da notare il fatto che l'esperimento è valido con tubi di qualsiasi sezione).

Torricelli misurò l'altezza che la colonna di mercurio aveva raggiunto, pari a 760 mm, e dedusse che il peso di questa colonna era antagonista ad una forza, generata da quella che oggi chiamiamo pressione atmosferica. Il mercurio contenuto nel tubo non è infatti soggetto alla pressione esterna, al contrario di quello nella vaschetta. Torricelli notò che il mercurio contenuto nel tubo si abbassava fino ad un certo punto. Infatti la pressione agiva solo sulla vaschetta e non nel tubo non essendovi aria dentro questo, e faceva ostacolo al mercurio nel tubo. Per ottenere il valore della pressione atmosferica in **pascal** sarà quindi sufficiente calcolare il valore della pressione della colonna di mercurio, di cui è nota l'altezza e la densità, applicando la legge di Stevin:

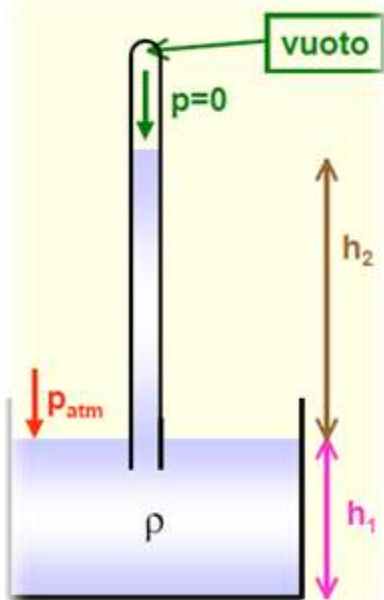


Figura 66 Esperienza di Torricelli

$$\begin{aligned}
 p_{Hg} &= \delta \cdot g \cdot h_{Hg} = 13579 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,76\text{m} = \\
 &= 1,013 \cdot 10^5 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 1,013 \cdot 10^5 \text{Pa}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

dalla definizione di pressione ($p = \frac{F}{S}$, forza fratto superficie) risulta

$$\text{agevole verificare che: } 1\text{Pa} = \frac{1\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{1\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

(anticipando sin d'ora che $1\text{N} = 1 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$)

Da questo esperimento e dal suo inventore prende nome un'unità di misura della pressione, il **Torr**, chiamato anche "millimetro di mercurio" (*mmHg* dove Hg è il simbolo chimico del mercurio), in quanto indica la pressione generata da una colonna di mercurio alta 1 mm.

La scelta del mercurio non è casuale: questo materiale, infatti, ha anche allo stato liquido una densità notevole, tale da poter eguagliare la pressione atmosferica con una colonna alta, appunto soltanto **76 cm**; ripetendo lo stesso esperimento con dell'acqua, per esempio, sarebbe necessario un tubo lungo **10.33 metri**.

3.29 Manometri e Barometri

Il **manometro** è uno strumento di misura della **pressione dei fluidi**. La corretta accezione del lemma si riferisce a strumenti dedicati alla misura di pressioni maggiori dell'atmosferica; per valori inferiori all'atmosferica il termine corretto è **vacuometro** o vuotometro (misuratore del vuoto).

Inizialmente la parola manometro si riferiva solo a strumenti idrostatici con liquido a colonna, oggi chiamati *manometri ad U*, poi fu esteso per abbracciare anche strumenti a quadrante o digitali.

Il **barometro** (dal greco βάρος, peso e μέτρον, misura) è lo strumento di misura per la **pressione atmosferica**. È usato nell'ambito della meteorologia per rilevare dati utili per le previsioni del tempo. È di fatto un manometro differenziale, in cui la misura di riferimento (lato bassa pressione) è il vuoto assoluto.

3.30 Viscosità di un fluido

La **viscosità** (spesso detta dinamica) μ è una grandezza fisica che quantifica la **resistenza dei fluidi allo scorrimento**, quindi la *coesione interna* del fluido.

Nei liquidi la viscosità decresce all'aumentare della temperatura, nei gas invece cresce.

Esiste un termine, detto coefficiente di viscosità e vale



Figura 67 Manometro



Figura 68 Barometro

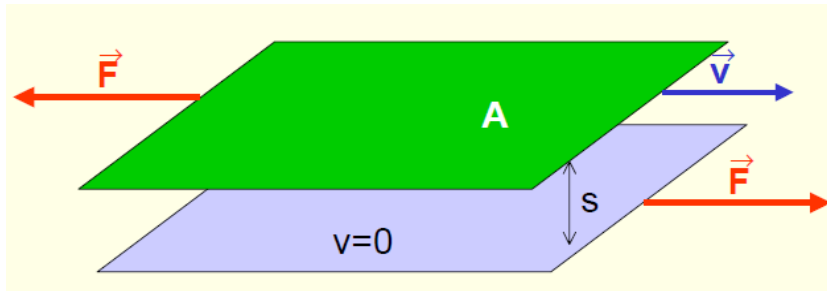


Figura 69 Viscosità di un fluido

dette

- A = area di due lamine di liquido, poste a distanza s ;
- v = velocità relativa delle lamine;
- η = coefficiente di viscosità del liquido (funzione anche di temperatura, pressione);

la forza di viscosità F (due forze uguali ed opposte sulle due lamine) risulta pari a:

$$|\vec{F}| = \frac{\eta \cdot A \cdot v}{s} \quad (27)$$

3.31 Fluido ideale

In fluidodinamica si definisce il “fluido ideale” un fluido con le seguenti caratteristiche:

- **incompressibile** (ρ è costante, indipendente da p , v , T , h , ...);
- **viscosità nulla** ($\eta = 0$, lavoro di scorrimento nullo);
- **moto non rotazionale** (cfr. i vortici nei fiumi);
- **moto “laminare”** (le traiettorie delle molecole del fluido sono linee che non si chiudono e non variano nel tempo).

3.32 Concetto di “tubo di flusso”

Un **tubo di flusso** è definito dallo spazio individuato dalla superficie tubolare che si forma tracciando una linea di flusso passante per ogni punto di una curva chiusa che non sia essa stessa una linea di flusso.

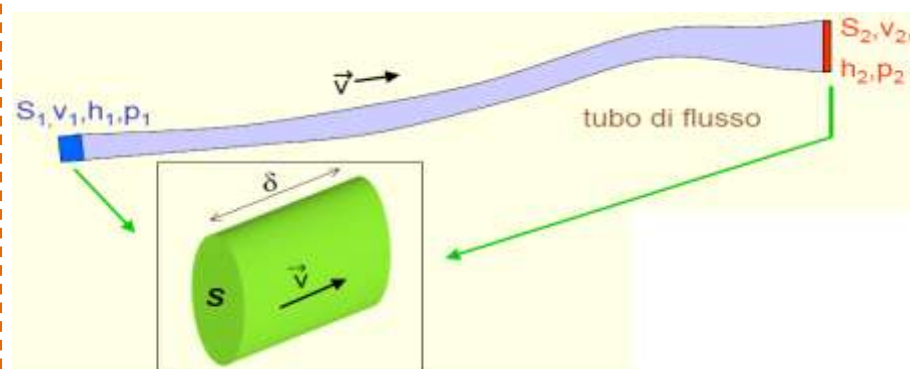


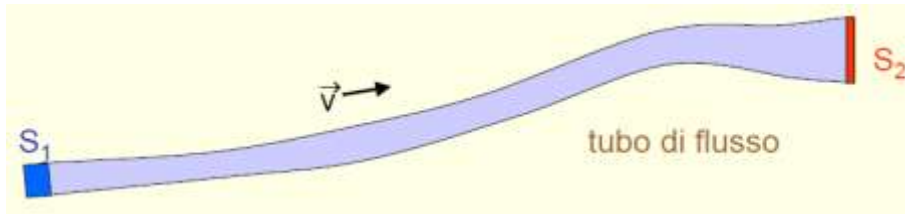
Figura 70 Teorema di Bernoulli per i fluidi

$h_1, h_2 =$ quota

$p_1, p_2 =$ pressione

$v_1, v_2 =$ velocità

dove il volume risulta: $S_1 \cdot \delta_1 = V = \frac{m}{\rho}$ e $S_2 \cdot \delta_2 = V = \frac{m}{\rho}$



nel tempo Δt , dati due volumi uguali, di area perpendicolare S_1 ed S_2 , attraverso:

$$\frac{m_1}{S_1} = \rho \cdot V_1 = \rho \cdot d_1 \cdot S_1 = \rho_1 v_1 \cdot \Delta t \cdot S_1$$

$$\frac{m_2}{S_2} = \rho \cdot V_2 = \rho \cdot d_2 \cdot S_2 = \rho_2 v_2 \cdot \Delta t \cdot S_2$$

sapendo che $\rho_1 = \rho_2$ e $m_1 = m_2$ otteniamo:

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad (28)$$

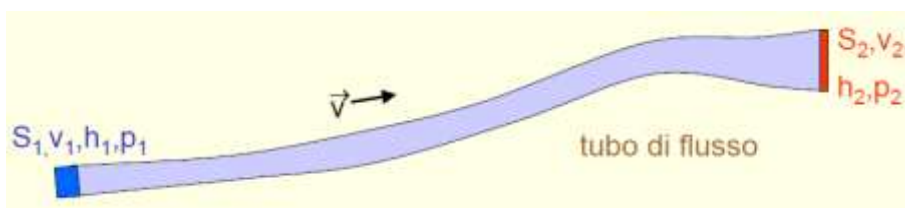
Definiamo la grandezza $Q = v \cdot S$ la portata del liquido che dalla relazione (28) risulta costante.

3.33 Legge di Bernoulli

Il **principio (o legge) di Bernoulli**, può essere sinteticamente espresso con l'equazione scritta sotto, detta **equazione di Bernoulli**:

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{costante} \quad (29)$$

dove p è la pressione, ρ è la **densità** del fluido, g è l'**accelerazione di gravità**, h è l'altezza e v è la velocità del fluido.



YouTube



Dal punto di vista fisico, l'equazione di Bernoulli è l'equivalente della conservazione dell'energia meccanica però applicata ad un fluido. Nel suo moto il fluido cambia quota, velocità e pressione, ma una certa combinazione di queste quantità (in cui compaiono anche l'accelerazione e la densità del fluido) rimane invariata.

3.34 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Questo è il capitolo dedicato **all'equilibrio**, in tutte le sue espressioni. Siamo partiti dallo studio del **piano inclinato**, piano che forma con l'orizzontale un certo angolo, per poi trattare i **momenti di una forza** e di una coppia di forze, dove il momento è l'espressione, per i corpi rigidi, della capacità di produrre una rotazione del corpo stesso. Dopo aver chiarito il significato di **baricentro** circa il poterlo considerare come il centro di massa di un corpo, abbiamo affrontato lo studio delle **macchine semplici**, tra cui le leve e la carrucola. Chiariti quali i tre diversi **generi** di leve esistenti e in quali situazioni risultano **vantaggiose** o **svantaggiose**, abbiamo introdotto l'importante concetto di **pressione**, che è in qualche modo l'estensione del concetto di forza però applicato ad

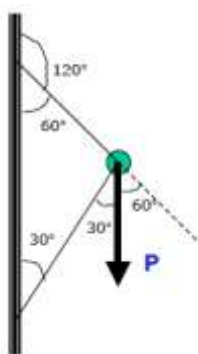
una intera superficie e non solo ad un punto. L'esperienza di **Pascal** ci ha condotti verso la sua legge, circa la distribuzione uniforme della pressione lungo tutte le direzioni e l'importante applicazione del torchio idraulico. Con la legge di **Stevin** siamo invece in grado di calcolare la pressione esercitata da un fluido ad una certa profondità. Abbiamo ripercorso l'esperienza di **Torricelli** per calcolare la **pressione atmosferica** utilizzando una colonnina di mercurio e conosciuto gli strumenti per misurare una pressione di qualunque tipo, con un **manometro** ovvero quella atmosferica con il **barometro**. Infine abbiamo affrontato la **legge di Bernoulli** nel moto dei fluidi che si esprime parimenti ad una legge di conservazione dell'energia, come potremo vedere nell'unità 6.

3.35 Problemi proposti

Equilibrio di un corpo

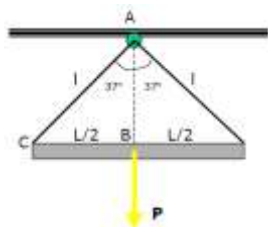
1) Un punto materiale pesante poggia in quiete su un piano inclinato avente alla base un angolo θ ; aumentando progressivamente tale angolo si osserva che per $\theta=35^\circ$ il punto comincia a scivolare sul piano. Si calcoli il coefficiente di attrito statico tra punto e piano.

2) Un blocco di massa $m_1=1\text{kg}$ poggia su un piano inclinato avente inclinazione $\theta=30^\circ$ e coefficiente di attrito statico $\mu=0.1$. Esso è collegato tramite un filo ed una carrucola (entrambi di massa trascurabile) ad un corpo di massa m_2 che pende verticalmente. Calcolare il minimo e massimo valore di m_2 che assicurano l'equilibrio di m_1 .

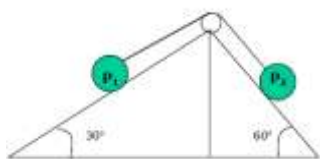


3) Un libro che ha peso 4 N viene mantenuto in equilibrio su un piano inclinato alto 0,4 m e lungo 0,8 m. Trascurando l'attrito, determina la forza necessaria a mantenere in equilibrio il libro e la reazione vincolare.

4) Un oggetto di massa $m = 10 \text{ kg}$ è sospeso ad un anello posto all'estremità di una struttura costituita da due aste leggere fissate al muro, come in figura. Scomponi il peso dell'oggetto nelle direzioni delle due aste e determina le forze che agiscono sull'anello che sostiene l'oggetto quando il sistema è in equilibrio.



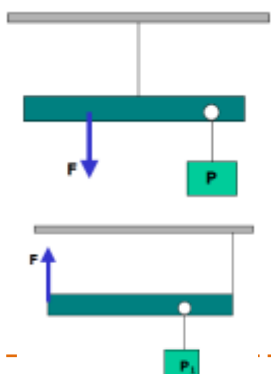
5) Si usano due funi di lunghezza uguale $l = 1,0 \text{ m}$ per sospendere ad un gancio sul soffitto una sbarra lunga $L = 1,2 \text{ m}$ e di massa $m = 16 \text{ kg}$. La sbarra viene sospesa agganciandola ai suoi estremi in modo che rimanga orizzontale. Determinare le forze agenti sul gancio nell'ipotesi di considerare la sbarra omogenea ed il peso delle funi trascurabile.



6) Due piani inclinati sono accostati come in figura. Due blocchi P_1 e P_2 sono legati da una fune di peso trascurabile e sono in equilibrio. Sapendo che $P_1 = 120 \text{ N}$, trovare P_2 .

Momento delle forze

7) Un'asta rigida è sospesa come in figura. Calcolare l'intensità della forza F che si deve applicare a 20 cm dal punto di sospensione per equilibrare il peso $P = 1,8 \text{ N}$ applicato alla distanza di 30 cm dal punto di sospensione.



8) Un'asta rigida di lunghezza 1 m e di peso 2N può ruotare intorno ad un punto fissato a 20 cm dall'estremità in cui è agganciato un peso di 4N. Determinare il valore del peso da applicare all'altra estremità affinché l'asta sia in equilibrio in posizione orizzontale, sapendo che nel suo baricentro è applicata una forza di 10N diretta verso l'alto.

9) Un'asta rigida di lunghezza 1m e peso 1N, rappresentata in figura, può ruotare intorno al punto D. Ad essa è applicato un peso di 2N distante 0,2m rispetto al punto D. Calcolare la forza F che bisogna applicare nel punto A affinché l'asta sia in equilibrio orizzontale.

10) Un corpo è posto su un piano inclinato di un angolo $\alpha = 30^\circ$ rispetto all'orizzontale. Sapendo che il coefficiente di attrito statico fra corpo e piano vale 0.4, stabilire se il corpo è in equilibrio.

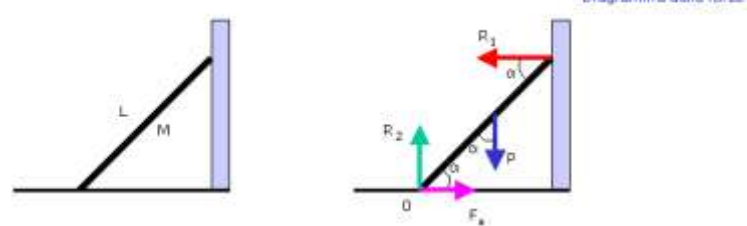
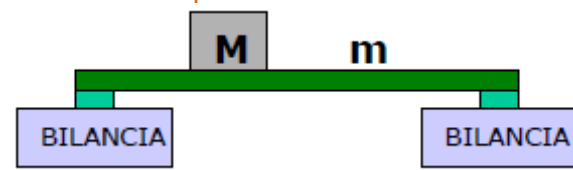
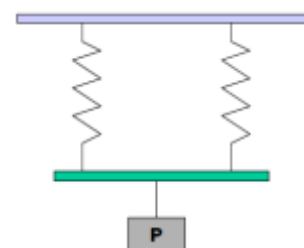
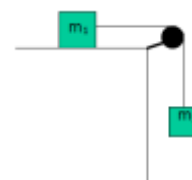
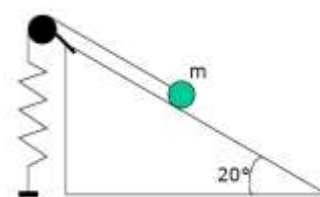
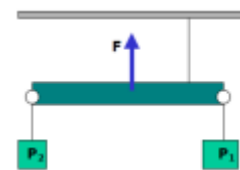
11) Dato il dispositivo rappresentato in figura, sapendo che la costante elastica della molla vale $k = 500\text{N/m}$, la massa del corpo $m = 4\text{kg}$ e l'inclinazione del piano 20° , determinare l'allungamento della molla affinché il sistema risulti in equilibrio.

12) Dato il dispositivo rappresentato in figura, determinare il valore minimo della massa m_2 perché il sistema possa mettersi in moto, sapendo che il coefficiente di attrito statico tra la massa $m_1 = 4\text{kg}$ ed il piano orizzontale vale 0,2.

13) A due molle elastiche identiche collegate come in figura è applicato un corpo di peso 4N. L'allungamento subito da ciascuna molla è 10 cm. Calcolare la costante elastica delle molle.

14) Una trave omogenea di lunghezza $L = 12\text{m}$ e massa $m = 1,8\text{ kg}$ è appoggiata agli estremi su due bilance come in figura. Un blocco omogeneo di massa $M = 2,7\text{ kg}$ è appoggiato sulla trave alla distanza di 3 m dalla bilancia di sinistra. Calcolare i pesi segnati dalle due bilance.

15) Si abbia una scala di lunghezza L e massa M appoggiata ad un muro senza attrito e su un pavimento orizzontale, con $\alpha = 30^\circ$, con coefficiente d'attrito $\mu = 0,5$. Stabilire se il sistema è in equilibrio.



Le leve

16) Una trave lunga 120 cm appoggia su di un fulcro posto a 40 cm da un suo estremo sul quale agisce una forza resistente del peso di 30 kg. Quale forza deve essere applicata all'altro estremo per equilibrare l'asta?

17) Due ragazzi giocano su un'altalena lunga 8 m, il cui fulcro è posto al centro dell'asse. Se uno dei ragazzi pesa 40 Kg e siede a 2 m dal fulcro, a quale distanza dovrà sedere il compagno che pesa 20 Kg?

18) Una sbarra di ferro lunga 2,10 metri viene utilizzata per sollevare un peso di 70 kg posto a 30 cm dal fulcro. Quale forza occorre esercitare all'altro estremo della leva per avere l'equilibrio?

19) Sia data una leva di primo genere. La resistenza R , posta a 4 metri dal fulcro, è pari a 3 kg. Ponendo una forza di 1 kg a 12 metri dal fulcro si ha l'equilibrio. Sposta la posizione della potenza dai 12 metri iniziali in 10, 8, 6, 4, 3, 2 e 1 metri il punto di applicazione della potenza necessaria a equilibrare la leva. Calcola la misura della potenza necessaria a equilibrare la leva. Disegna il grafico che lega il braccio della potenza (asse x) e la potenza (asse y). Di che tipo di proporzionalità si tratta.

20) Sapendo che un corpo, di 90 kg peso, subisce uno spostamento di 230 m, calcola la misura del lavoro. Che tipo di proporzionalità lega le due grandezze?

21) Un corpo subisce uno spostamento di 200 m. Supponendo che la forza applicata sia prima di 10 kg peso, poi di 20 kg peso, di 30 kg peso e infine di 40 kg peso, calcola la misura del lavoro svolto nei diversi casi costruendo una opportuna tabella. Rappresenta i dati in un grafico e indica il tipo di proporzionalità che lega le due grandezze.

22) Per tagliare l'erba del prato si percorrono 1,5 km e si spinge il tagliaerba con una forza pari a 100 N. Calcola la misura del lavoro svolto?

23) Un corpo di 80 kg peso subisce uno spostamento prima di 20 m, poi di 40 m, 60 m e infine di 80 m. Calcola la misura del lavoro svolto costruendo una opportuna tabella. Rappresenta i dati in un grafico e indica il tipo di proporzionalità che lega le due grandezze.

Statica dei fluidi

24) Quanto deve essere alto un tubo riempito di mercurio ($d = 13:590 \text{ Kg=m}^3$) per esercitare sulla base una pressione di 2Atm sulla sua base?

25) Una pompa idraulica deve sollevare l'acqua di una condotta ad un serbatoio posto su un grattacielo alto 130m. Quale pressione è necessaria per effettuare questa operazione?

26) Su una fiancata di una nave si apre una falla di 75cm^2 di area, a 4,5 metro sotto la superficie di galleggiamento. Sapendo che la densità dell'acqua marina è $d = 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, calcola quale forza è necessario applicare dall'interno per opporsi all'apertura della falla.

27) Un cilindro C di massa $m = 1000\text{Kg}$ e di sezione $S_2 = 3\text{dm}^3$ è appoggiato sulla superficie libera di un liquido di densità $d = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. All'altra estremità del tubo un pistone P di sezione $S_1 = 25\text{cm}^3$ tiene in equilibrio il liquido, agendo sulla sommità di una colonna di liquido alta $h = 3\text{m}$. Calcolare la massa del pistone P

28) Si deve sollevare un'automobile di massa $m_a = 1200\text{Kg}$ con un torchio idraulico, poggiandola su una piattaforma di $S_a = 5\text{m}^2$ di superficie. Avendo a disposizione un pistone di superficie $S_p = 3,5\text{dm}^2$, calcolare quale è la minima forza da applicare sul pistone per poter sollevare l'automobile.

29) Un corpo in aria pesa 500N, mentre quando è immerso in acqua pesa 460N. Determinare il suo volume e la sua densità relativa rispetto all'acqua

30) Un acquario è posto sopra una bilancia che misura una massa $m=48\text{Kg}$. Si introducono cinque pesciolini rossi, ciascuno di volume pari a $3,3\text{cm}^3$. Quale valore della massa fornirà la bilancia dopo l'immersione dei pesciolini?

31) Una cassa galleggia sulla superficie del mare, affondando per $1/3$ del proprio volume. Calcolare la densità della sostanza di cui è fatta la cassa

32) Un iceberg, la cui forma può essere approssimata ad un cono di altezza 50m e raggio di base di 12m, galleggia sulla superficie del mare. Calcolare il volume della parte emersa, sapendo che la densità del ghiaccio è di $d = 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

33) Lo sportello di un sommergibile che si trova a 400 m di profondità nell'oceano subisce una forza $F = 2,026 \cdot 10^6 \text{N}$. Calcolare la superficie dello sportello, sapendo che l'acqua marina ha densità $d = 1,03 \text{g/cm}^3$

34) Un pallone aerostatico di 10 m^3 di volume è pieno di elio $d_{\text{He}} = 0,178 \cdot 10^{-3}\text{ g/cm}^3$. Calcolare quale è la forza con cui l'aria $d_{\text{aria}} = 1,292 \cdot 10^{-3}\text{ g/cm}^3$ lo spinge in alto. Quale zavorra sarebbe necessaria per mantenere in equilibrio il pallone?

Principio di Bernoulli

35) Un recipiente d'acqua chiuso ha solo un foro d'uscita posto 50 cm sotto il livello del liquido. Calcolare la velocità d'uscita del liquido se la pressione relativa nello spazio sopra l'acqua quando è zero e quando è 0.40 bar.

36) In un tubo orizzontale di sezione $S_1 = 10\text{cm}^2$ scorre dell'acqua ad una velocità $v_1 = 8\text{m/s}$ con una pressione $p_1 = 15.000\text{Pa}$. Ad un certo punto la sezione del tubo aumenta fino al valore $S_2 = 16\text{cm}^2$. Quanto valgono la velocità e la pressione dell'acqua nella parte larga del tubo?

3.36 In laboratorio

Principio di Archimede

6) calcolo del volume di un corpo di forma irregolare e di piccole dimensioni, per immersione in un liquido.

Legge di Stevin

7) Verifica sperimentale della legge di Stevin con una bottiglia di plastica riempita con un liquido, applicando alla bottiglia fuori a diverse altezze.

3.37 **Approfondimento: Archimede da Siracusa**

Archimede fu un matematico e un fisico siracusano (Siracusa 287 a.C. - 212 a.C.).

Figlio di un noto astronomo di nome Fidio. Compì la maggior parte degli studi ad Alessandria d'Egitto con i successori di **Euclide**.

Quando tornò a Siracusa mantenne l'amicizia con i matematici alessandrini tra cui Eratostene, Conone di Samo e Dosideo.

Essendo amico o parente di Gerone, tiranno di Siracusa, svolse la sua attività di matematico e inventore sotto la sua protezione e al servizio della città.

Si narra che durante l'assedio dei Romani alla città le sue macchine da guerra e i suoi specchi ustori frenarono l'avanzata nemica e solo a causa di un tradimento Siracusa cadde sotto il dominio romano.

Il console Marcello, raggiunto durante l'assedio, durato molti anni, dalla fama di Archimede, ordinò che lo scienziato fosse consegnato a lui vivo.

Un soldato, però, disobbedì agli ordini del console Marcello, entrò in casa di Archimede, ormai vecchio, e lo uccise.

Numerose sono le versioni della morte di Archimede, narrate da numerosi storici, la più famosa è sicuramente quella di Plutarco.

Gli studi di Archimede abbracciano vasti campi della scienza; le sue scoperte principali riguardano la geometria e l'idrostatica.

Le sue opere principali sono:

Dell'equilibrio dei piani;

I corpi galleggianti, questo contenente il suo famoso principio che dice che:

"un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto, pari al peso del fluido spostato";

Misura del cerchio e delle spirali, nella quale calcola la lunghezza della circonferenza sfruttando il metodo di esaustione di Eudosso;

Sfera e cilindro, la più nota durante tutta l'antichità;

Un breve trattato di aritmetica *L'arenario*, dove espone un metodo per esprimere numeri molto grandi: con esso calcolò le dimensioni dell'Universo.

Tra tutti gli scritti di Archimede, grande importanza riveste il *Metodo* che è un'opera dedicata a Eratostene.

Come Eudosso, anche Archimede si appoggia al concetto aristotelico di infinito, come dimostra l'enunciato del suo famoso postulato:

date due grandezze geometriche esiste sempre una grandezza multipla di una che è maggiore dell'altra.

Le dimensioni dell'universo

Archimede aveva inventato un metodo per esprimere numeri molto grandi.

Il sistema consisteva nel raggruppare i numeri in ottadi, cioè in potenze in base 10 con esponente multiplo di 8.

La prima ottade è 10^8 , pari a 100 milioni, la seconda ottade parte da 10^{8+1} e giunge a 10^{16} e così di seguito fino a $10^{800000000}$.



Figura 71 Archimede da Siracusa (287 a.C. - 212 a.C.)

Questo nuovo sistema di numerazione permetteva di superare la difficoltà insite nel modo usato dai Greci per rappresentare i numeri quando si trattava di scrivere cifre di grande entità, cioè le lettere dell'alfabeto.

Lo scienziato si servì delle ottadi per calcolare il numero dei granelli di sabbia necessari per riempire tutto l'Universo. Calcolò le dimensioni di un granello di sabbia, pari alla decima parte di un seme di papavero.

Conoscendo poi, grazie agli studi di Aristarco di Samo e di Eratostene, la circonferenza della Terra e la sua distanza dal Sole (allora valutata in 925 milioni di chilometri, mentre in realtà si tratta di 150 milioni di chilometri), prese in esame il cielo delle stelle fisse ed arriva alla conclusione che l'universo abbia un diametro di 9 miliardi di chilometri. Tale grandezza sarebbe stata riempita da un numero di granelli di sabbia pari a 10^{63} , praticamente nemmeno 8 ottadi.

Il metodo di esaustione

A partire dal IV secolo a.C., i matematici greci si erano accorti della necessità di fare ricorso al concetto di infinitesimo per la soluzione dei problemi di misura.

Per dimostrare che l'area o il volume A di una certa figura è uguale a un'area o a un volume noto B, i matematici greci dimostravano che non poteva essere né $A > B$, né $A < B$, facendo vedere che qualunque fosse la differenza $A - B$, questa doveva essere minore di qualsiasi numero arbitrariamente piccolo, e quindi non poteva che risultare prossima allo 0, cioè $A = B$.

In questa forma "negativa" di dimostrazione, nota come *metodo di esaustione*, sono evidenti le origini del calcolo infinitesimale, duemila anni prima dei lavori di Newton e Leibniz. L'inventore del metodo di esaustione è certamente Eudosso di Cnido ma colui che seppe mostrare tutta la potenza di tale metodo nelle applicazioni possibili fu Archimede.

Le scoperte principali

Caso particolare dell'equazione generale dell'idrostatica: afferma che un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso il piano a pressione relativa nulla (piano dei carichi idrostatici=p.c.i.) quindi, nel caso più comune, verso l'alto, pari al peso di fluido spostato. Questo principio trova la sua applicazione più importante nello studio dell'equilibrio dei galleggianti; su esso si basa anche il principio di funzionamento della cosiddetta bilancia di Archimede, detta più comunemente bilancia idrostatica, usata per la misura della densità di un corpo.

Gli studi di Archimede sul principio della leva fanno parte del suo trattato, in due libri, sull'equilibrio dei piani.

Si sottolineava il fatto che gli estremi dei bracci disuguali di una bilancia, quando vengono fatti ruotare attorno al fulcro, tracciano circonferenze piuttosto che segmenti rettilinei: l'estremo del braccio più lungo si muove lungo una circonferenza più ampia e pertanto la sua

traiettorie si avvicina di più al moto rettilineo verticale naturale di quanto non faccia l'estremo del braccio più corto.

Pertanto il principio della leva è una conseguenza naturale di questo principio cinematico.

Archimede, d'altro canto, deduceva il principio da un postulato statico più plausibile, ossia che corpi a simmetria bilaterale sono in equilibrio. Supponendo che una sbarra imponderabile lunga tre unità e sostenente tre pesi unitari, uno a ciascuno degli estremi e uno nel mezzo, sia in equilibrio su un fulcro situato nel centro.

Per il postulato archimedeo di simmetria, il sistema è in equilibrio. Ma il principio di simmetria mostra anche che, considerando soltanto la metà destra del sistema, questo rimane comunque in equilibrio, se i due pesi, che sono distanziati di due unità, vengono avvicinati nel punto di mezzo del braccio destro. Ciò significa che un peso unitario posto a due unità di lunghezza dal fulcro sostiene sull'altro braccio un peso di due unità che sia collocato alla distanza di una unità dal fulcro.

Attraverso una generalizzazione di questo procedimento, Archimede stabilì il principio della leva, basandosi soltanto su principi statici, senza ricorrere al ragionamento dinamico aristotelico. Come insegna la storia della scienza, nel Medioevo sarebbe stata realizzata una sintesi tra i due punti di vista, statico e dinamico, che avrebbe comportato notevoli progressi sia nella scienza in generale, sia nella matematica in particolare.



4. Il movimento: Cinematica e Dinamica

Prerequisiti

I concetti dello spazio e del tempo e loro misurazioni. I vettori. significato di diretta e inversa proporzionalità.

Sapere

Conoscere il concetto di sistema di riferimento e di traiettoria. conoscere il concetto di velocità in tutte le sue forme, con le diverse leggi orarie del moto. Conoscere il concetto di accelerazione costante con le sue applicazioni nella gravità. Conoscere i moti con traiettoria circolare e le componenti della velocità e accelerazione in tale moto. Il moto armonico e il pendolo semplice. Conoscere i diversi tipi possibili di lancio di un oggetto in aria, verso l'alto, in modo obliquo o orizzontalmente. Conoscere il moto armonico di una molla.

Saper fare

Saper rappresentare le diverse grandezze, quali velocità, spostamenti e accelerazioni nei sistemi cartesiani, sapendone dedurre le leggi di proporzionalità dal grafico. Saper distinguere tra i diversi tipi di moto uniforme e le caratteristiche utilizzando in maniera appropriata le diverse formulazioni. Saper calcolare la velocità tangenziale e le accelerazioni del moto circolare uniforme. Saper riconoscere un moto armonico dal pendolo semplice e dal moto della molla.

4.1 Sistemi di riferimento

Si definisce **sistema di riferimento**, l'insieme dei riferimenti o coordinate utilizzate per individuare la posizione di un oggetto nello spazio. A seconda del numero di riferimenti usati si può parlare di:

- Sistema di riferimento *monodimensionale*
- Sistemi di riferimento *bidimensionale*
- Sistemi di riferimento *tridimensionale* (3D)



Figura 72 Sistema di riferimento mono dimensionale

Il sistema di riferimento monodimensionale ideato da Cartesio è costituito da una retta, sulla quale un oggetto, di solito un punto, è vincolato a muoversi. Su questa retta si fissa un'origine, che è consuetudine indicare con O , un verso di percorrenza ed un'unità di misura delle lunghezze. È possibile individuare un punto sulla retta in base ad un numero reale, che individua la distanza dall'origine nell'unità di misura scelta, positiva se concorde con il verso di percorrenza scelto e negativa altrimenti, del punto. Tale numero è detto *coordinata*, e per indicare genericamente tale coordinata si usa la lettera x . La retta su cui si è fissato origine, verso di percorrenza e unità di misura è detta *ascissa*.

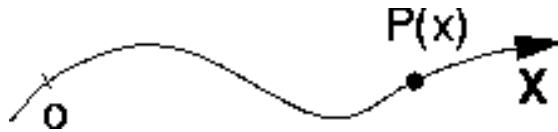


Figura 73 Sistema di riferimento monodimensionale curvilineo

Quando un punto, anziché su una retta, è vincolato a muoversi su una curva è possibile scegliere anche su quest'ultima un'origine, un verso di percorrenza ed un'unità di misura, ma in tal caso si parlerà di *ascissa curvilinea*. La distanza con segno del punto dall'origine è la *coordinata curvilinea* del punto.

4.2 Sistemi di riferimento bidimensionali

Il sistema cartesiano

Uno dei sistemi di riferimento bidimensionale è costituito da una coppia di rette incidenti. Tali rette sono indicate, in genere, con X e Y , ed il loro punto di intersezione è l'origine per entrambe le rette. Su ciascuna retta si fissa un verso di percorrenza ed un'unità di misura che in genere è uguale per entrambe le rette, ma per esigenze particolari può benissimo essere diversa per ciascuna retta. La posizione di un punto vincolato a muoversi su un piano può essere individuata da una coppia di valori reali, genericamente indicati con le lettere x e y . Si indica con x il numero reale che individua la distanza dall'asse Y del punto, misurata parallelamente all'asse X nell'unità di misura scelta per quest'ultimo; con y il numero reale che individua la distanza dall'asse X del punto, misurata parallelamente all'asse Y nell'unità di misura scelta per

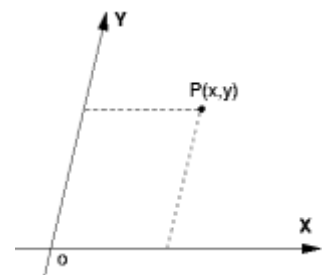


Figura 74 Sistema di riferimento bidimensionale NON cartesiano

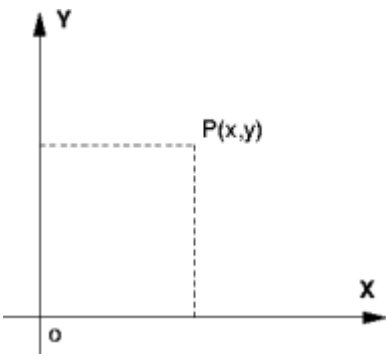


Figura 75 Sistema di riferimento Cartesiano

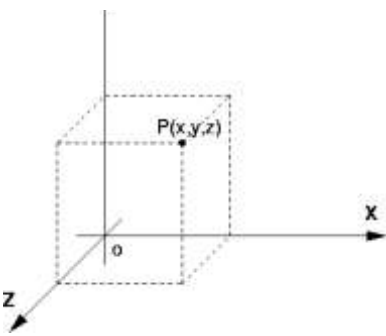


Figura 76 Sistema di riferimento cartesiano tridimensionale

quest'ultimo. La coppia di coordinate che individua il punto si indica scrivendo (x,y) oppure $\langle x, y \rangle$.

Quando gli assi X e Y sono fra loro **ortogonali** tale sistema di riferimento si dice ortogonale, ortonormale o **cartesiano**, in onore del matematico francese Cartesio che lo riprese in età moderna, dopo che era già stato introdotto, nel Medio Evo, da Nicola d'Oresme. In tal caso l'asse X , orizzontale, prende il nome di **ascissa**, e l'asse Y , verticale, prende il nome di **ordinata**. In Oresme, erano, rispettivamente, *longitudo* e *latitudo*.

Sistema cartesiano tridimensionale

Il sistema di riferimento tridimensionale è costituito da tre rette non coincidenti passanti per un punto che è l'origine delle rette. Per ciascuna di tali rette, in genere indicate con X , Y e Z , si sceglie un'unità di misura ed un verso di percorrenza. Le coordinate generiche di un punto nello spazio sono indicate con le lettere x , y e z . Si indica con x il numero reale che individua la distanza di un punto dal piano individuato dalle rette Y e Z misurata parallelamente all'asse X nell'unità di misura scelta per quest'ultimo asse. Si definiscono analogamente y e z . Le tre coordinate che individuano un punto nello spazio sono indicate con la simbologia (x,y,z) . Quando i tre assi sono fra loro ortogonali il sistema di riferimento si dice *ortogonale* o *rettangolare*. Ciascuna delle tre rette è un *asse cartesiano*, e insieme formano la *terna cartesiana*.



4.3 Traiettoria

La **traiettoria** è l'insieme dei punti corrispondenti alla posizione di un corpo in moto o meglio la linea descritta nello spazio da un punto o da un corpo in movimento

Più automobili che percorrono la stessa strada, anche nello stesso verso (diremmo direzione nel linguaggio comune ma sappiamo che non è corretto parlare di direzione ma di verso) non è detto che compiano la stessa traiettoria, poiché potrebbe, ciascuna, occupare posizioni diverse sulla stessa, disegnando così traiettorie diverse



Figura 77 Esempio di traiettoria: una strada

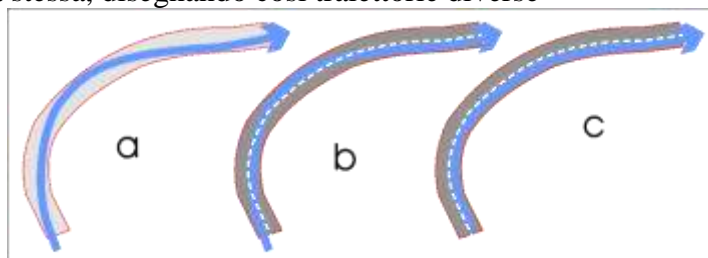


Figura 78 Traiettorie simili

quindi, di fatto, per andare da un punto iniziale o di partenza **A** ad un punto finale o di arrivo **B** un corpo, libero di muoversi, può raggiungere il punto **B** percorrendo una qualunque delle traiettorie possibili, ovvero una qualunque linea che congiunga il punto **A** al punto **B**.

4.4 Concetto di velocità

La velocità è una **grandezza vettoriale** (quindi specificata da intensità direzione e verso), definita come il rapporto tra lo spostamento percorso in una certa direzione e l'intervallo di tempo impiegato. Più precisamente si può distinguere tra velocità *vettoriale* e *scalare*.

La **velocità vettoriale** può essere definita come il rapporto tra il vettore spostamento e l'intervallo di tempo impiegato:

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{\text{spostamento}}}{\text{tempo}} \quad (1)$$

dove \vec{v} è un vettore, così come lo spostamento, quindi specificato da intensità o modulo, direzione e verso. Si noti che lo spostamento può essere anche negativo (dipende dal verso del vettore), quindi possiamo sapere il verso della velocità.

La **velocità scalare** può essere invece definita come il rapporto tra la distanza percorsa ed il tempo impiegato a percorrerla:

$$v = \frac{\text{distanza}}{\text{tempo}} = \frac{s}{t} \quad (2)$$

dove v non è un vettore ma è un numero senza segno (sempre positivo).

Essendo quindi il rapporto tra una distanza ed un tempo, la sua unità di misura è m/s (metri al secondo). Una seconda unità di misura per la velocità, di uso comune, è il chilometro all'ora (km/h), dove $1 \text{ km/h} = 0,278 \text{ m/s}$. Di conseguenza

$$1 \frac{m}{s} = 3,6 \frac{Km}{h}$$

mentre

$$1 \frac{Km}{h} = \frac{m}{3,6 s}$$

Spesso per velocità si intende anche la **rapidità** con cui avviene un movimento, potendo distinguere così tra due moti che avvengono lungo la stessa traiettoria ma in tempi diversi.

4.5 Moto relativo

La Fisica descrive il moto degli oggetti, ma il laboratorio dove facciamo gli esperimenti è anch'esso in movimento. Anche se immaginiamo il nostro laboratorio fermo, occorre rendersi conto che esso si trova sulla superficie di un pianeta che ruota attorno a se stesso e poi ruota attorno al sole e così via. E' necessario quindi porsi il problema:

YouTube



“...Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e qui vi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma....”

Dialogo sopra i massimi sistemi -Galileo Galilei

come si compongono i movimenti degli oggetti? Come cambiano le leggi della Fisica passando da un sistema in moto ad un altro?

Questo è un problema complesso di cui continueremo ad occuparci anche in seguito. Qui ci occuperemo di ricavare alcune semplici relazioni.

Supponiamo che (ma non è fondamentale) il vostro sistema di riferimento sia fermo. Chiameremo **S** questo riferimento e lo definiremo “**assoluto**”. Tutto ciò che misurerete in questo sistema di riferimento: spostamenti, velocità (la definiremo tra poco) ecc. saranno denominati assoluti. Immaginiamo ora un nuovo sistema di riferimento in moto rispetto al vostro.

Possiamo immaginare questo nuovo sistema di riferimento come un vagone ferroviario con una parete a vetri che vi permette di osservare i fenomeni che accadono all'interno. Gli abitanti di questo riferimento faranno muovere degli oggetti e tutto ciò che misureranno, velocità, spostamenti ecc. saranno chiamati “**relativi**”. Chiameremo **S'** questo nuovo riferimento. Il sistema **S'** si muove rispetto al sistema **S**, se volete il vagone ferroviario è in moto rispetto alla vostra stanza. Questo moto lo chiameremo “**Moto di Trascinamento**”. La situazione è schematizzata in figura:

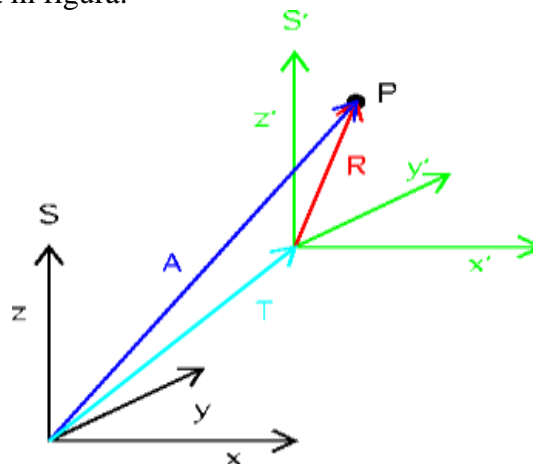


Figura 79 Moti relativi galileiani

Nella figura è anche indicata la posizione di un punto P. Questo punto viene localizzato mediante il vettore **R** nel sistema di riferimento relativo, dal vettore **A** nel sistema di riferimento assoluto, mentre la posizione del sistema di riferimento **S'** viene individuata dal vettore **T** nel S. Ci interessano ora i casi in cui il punto P si muova e così anche si muova il sistema di riferimento **S'** rispetto ad **S**. La legge cinematica che governa questi problemi è la **Legge di composizione degli spostamenti infinitesimi**. Questa dice che se il punto **P** si sposta di una quantità ΔR (il simbolo Δ si legge delta) nel sistema di riferimento relativo, mentre il sistema di riferimento **S'** si sposta di un tratto ΔT , allora lo spostamento complessivo visto dal sistema di riferimento assoluto ΔA è dato da:

$$\Delta A = \Delta T + \Delta R \quad (3)$$

ovviamente quella descritta è una relazione vettoriale, per cui il valore di ΔA non è semplicemente la somma algebrica di $\Delta T + \Delta R$ ma an-

rebbe calcolata in base alla composizione dei vettori. Una scrittura più corretta sarebbe:

$$\vec{\Delta A} = \vec{\Delta T} + \vec{\Delta R}$$

La situazione è schematizzata nella figura seguente:

Supponiamo ora che il tempo scorra nello stesso modo nel sistema di riferimento assoluto e in quello relativo.

Dividendo ogni termine della (3) per l'intervallo di tempo Δt in cui avvengono questi spostamenti otterremo:

$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{\Delta T}{\Delta t} + \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (4)$$

Come vedremo successivamente, questa non è altro che una relazione fra velocità e rappresenta la legge di composizione delle velocità:

$$v_A = v_T + v_R \quad (5)$$

dove

- v_A è la velocità del punto nel sistema di riferimento assoluto (velocità assoluta),
- v_T è la velocità del sistema di riferimento S' rispetto ad S (velocità di trascinamento) e
- v_R è la velocità del punto nel sistema di riferimento relativo (velocità relativa).

4.6 Velocità media

Se consideriamo che durante il moto possono variare sia l'intensità che direzione e verso della velocità, può avere senso parlare di velocità media, come se considerassimo di fatto il moto durante tutto il tempo in cui avviene senza soffermarci istante per istante cosa accade.

Riguardo alla velocità vettoriale, dalla (1) avremo quindi che:

$$\vec{v}_m = \frac{\vec{\Delta S}}{\Delta t} = \frac{\vec{s}_2 - \vec{s}_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

La **velocità scalare media** è quella che viene data nella telecronaca delle corse automobilistiche sui circuiti (lunghezza del circuito)/(tempo cronometrato).

Dato che questa è la "velocità media" del linguaggio comune, spesso nascono dei problemi quando questa grandezza viene definita per la prima volta in fisica.

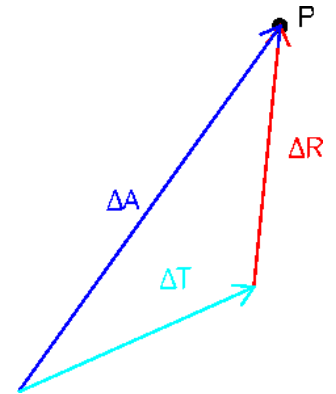


Figura 80 Somma di vettori spostamento

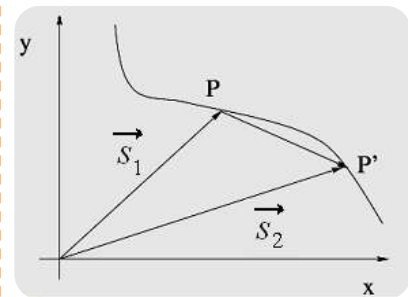


Figura 81 Vettore velocità

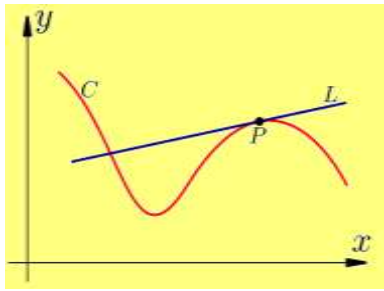


Figura 82 Concetto di limite di funzione

4.7 Cenni sul concetto di limite e derivata di una funzione

Malgrado siano concetti che lo studente affronterà in anni successivi nel corso di Matematica, è comunque utile richiamarne le definizioni generali, potendone così interpretare, almeno in modo semplificato, il significato del concetto di limite e di derivata di una funzione.

Il **limite di una funzione** è uno dei concetti fondamentali dell'analisi matematica. Con questo concetto viene formalizzata la nozione di funzione continua e di punto di discontinuità. Serve inoltre a definire la derivata ed è quindi basilare per tutto il calcolo differenziale. Il limite di una funzione f in un punto x_0 indica il valore "a cui si avvicinano sempre di più" i valori della funzione quando viene calcolata in punti sempre più vicini a x_0 . Viene indicato con il simbolo

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$$

La nozione di **derivata di funzione** si introduce, nel caso più semplice, considerando una funzione reale $f(x)$ di variabile reale x ed un punto x_0 del suo dominio. La derivata di $f(x)$ in x_0 è definita come il numero $f'(x_0)$ pari al limite del rapporto incrementale al tendere a 0 dell'incremento, sotto l'ipotesi che tale limite esista e sia finito. In modo esplicito, detto h l'incremento, una funzione f definita in un intorno di x_0 si dice derivabile nel punto x_0 se esiste ed è finito il limite:

$$f'(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h} \quad (7)$$

Dire la derivata in un punto è il rapporto dell'incremento della f con l'incremento delle x (a denominatore è come fosse $(x_0 + h) - x_0 = h$) quando l'incremento h tende a zero, vuol significare che vogliamo studiare questo rapporto quando h è sempre più piccolo, in modo che diventi infinitesimo, potendo così giungere ad un valore di quel rapporto assomigliante sempre più alla tangente alla curva $f(x)$ intorno al punto x_0 .

4.8 Velocità istantanea

La *velocità istantanea* si ottiene rendendo piccolo a piacere il tempo nella velocità media vettoriale. In pratica si va a definire la velocità *per un certo istante* piuttosto che *in un certo intervallo*, definendo la velocità istantanea come il limite per la variazione di tempo tendente a zero del rapporto che definisce la velocità media:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{\Delta p}}{\Delta t} \quad (8)$$

La velocità istantanea è quella rilevata, ad esempio, dal tachimetro di un'automobile.

In realtà il tachimetro compie una approssimazione, perchè non potrebbe applicarsi il limite per $\Delta t \rightarrow 0$ in un sistema reale.

Ove \vec{p} è il vettore posizione. Lo strumento matematico per effettuare tale operazione è appunto la derivata del vettore posizione $\vec{p}(t)$ rispetto al tempo t .

L'autovelox e il tutor in autostrada

il concetto di velocità istantanea e velocità media sono entrambi applicati dalla Polizia Stradale sull'autostrada italiana. **L'autovelox** è in grado di rilevare la velocità istantanea del veicolo, che in autostrada non dovrebbe essere maggiore di 130 Km/h , mentre il **Tutor** consente, mediante due rilevamenti, di calcolare la velocità media del veicolo durante i due punti presi in considerazione (solitamente distanti una quindicina di chilometri).

Questo sistema, garantisce che anche qualora l'automobilista riesca ad eludere la fotocellula che misura la velocità istantanea (rallentando in prossimità della stessa), se la sua condotta di guida è al di sopra della media consentita, si vedrà segnalare la sanzione anche se nei due rilevamenti la sua velocità istantanea non è stata mai superiore ai 130 Km/h .

4.9 Legge oraria del moto

La **legge oraria** è una funzione dipendente esclusivamente dal tempo che stabilisce la posizione di un punto materiale in ogni istante; in altre parole, ne stabilisce il moto nello spazio-tempo. Conoscere la legge oraria di un sistema meccanico significa di fatto conoscere il comportamento, in ogni istante, del sistema stesso, e la traiettoria nello spazio di ogni sua componente.

4.10 Moto rettilineo uniforme e sua legge oraria

Il più semplice tipo di movimento di un corpo è costituito dal moto rettilineo, dove la sua traiettoria si riduce a una retta e la velocità mantenuta dal corpo è costante. La legge oraria può essere espressa tramite la variazione nel tempo di una sola delle tre coordinate (solitamente la x). In ciascun istante, la posizione del punto P può così essere rappresentata da un vettore spostamento avente:

- direzione coincidente con la retta traiettoria del moto;
- verso nel senso del movimento di P ;
- intensità, o modulo, pari alla distanza di P stesso dall'origine del sistema di riferimento.

La velocità

Consideriamo le due posizioni x_1 e x_2 di un medesimo punto P in due successivi istanti di tempo t_1 e t_2 ; ciò significa che, nell'intervallo di tempo $t_2 - t_1$, si definisce velocità media v_m di P una grandezza che



Figura 83 Sistema Tutor autostradale

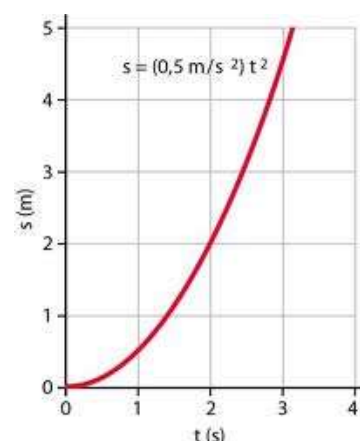
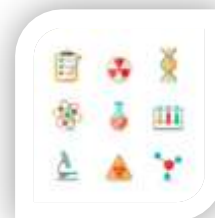


Figura 84 Rappresentazione della Legge oraria del moto



Laboratorio 7 Moto rettilineo uniforme

esprime il rapporto tra lo spazio percorso $x_2 - x_1$ e il tempo impiegato per percorrerlo $t_2 - t_1$:

$$v_m = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

In fisica, la variazione di una grandezza (come lo spazio x o il tempo t) viene preferibilmente indicata tramite la lettera greca maiuscola Δ (delta), che rappresenta un incremento; le differenze $x_2 - x_1$ o $t_2 - t_1$ possono venire quindi espresse dalle notazioni Δx e Δt ; la definizione di velocità media assume allora la forma:

$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (10)$$

dove il rapporto $\Delta x/\Delta t$ è detto **rapporto incrementale**.

Se consideriamo vari istanti successivi t_1, t_2, t_3, t_4 ecc. per ogni intervallo di tempo considerato, questo rapporto risulta essere costante: si dice che il punto P si muove di **moto rettilineo uniforme**, cioè percorre spazi uguali in intervalli di tempo uguali, con velocità data dal vettore V , avente direzione lungo la traiettoria, verso nel senso del moto e intensità:

$$V = v_m \quad (11)$$

Più in generale, nel caso di un moto rettilineo uniforme è possibile esprimere la velocità come rapporto costante tra spazio percorso s e tempo impiegato t tramite la semplice relazione:

$$\text{velocità} = \frac{\text{spazio}}{\text{tempo}} \quad \text{ovvero} \quad v = \frac{s}{t} \quad (12)$$

da cui si ricava la legge oraria del moto rettilineo uniforme:

$$s = v \cdot t \quad (13)$$

Nel caso in cui, all'istante iniziale $t = 0$, il corpo in movimento si trovi in una posizione iniziale s_0 diversa dall'origine O del sistema di riferimento, la legge oraria del moto rettilineo uniforme assume la forma più generale:

$$s(t) = v \cdot t + s_0 \quad (14)$$

Questa **legge oraria**, rappresentata graficamente in un piano cartesiano avente in ascissa il tempo t e in ordinata lo spazio s , corrisponde a

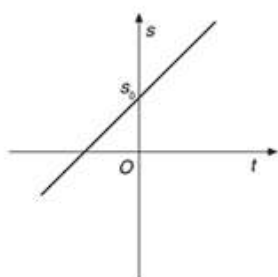


Figura 85 Legge oraria del moto come nella relazione (14)

una retta, che interseca l'asse (s) delle ordinate nel punto di coordinate $(0; s_0)$.

La velocità ha le dimensioni di uno spazio diviso un tempo. Nel Sistema Internazionale, l'unità di misura della velocità è quella di un corpo che percorre 1 metro (m) di spazio in 1 secondo (s) di tempo; tale unità viene indicata con il simbolo m/s, che si legge "metro al secondo". Una seconda unità di misura per la velocità, di uso comune, è il chilometro all'ora (km/h), dove $1 \text{ km/h} = 0,278 \text{ m/s}$. Di conseguenza $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$.

4.11 Vettore spostamento e velocità

In cinematica si definisce **spostamento** il cambiamento di posizione di un punto in movimento. Date due posizioni \vec{p}_1 e \vec{p}_2 dello stesso punto, il vettore \vec{p}_2 può essere espresso come:

$$\vec{p}_2 = \vec{p}_1 + \vec{s} \quad (15)$$

Il vettore spostamento in pratica è il vettore differenza dei due vettori posizione e \vec{p}_2 e \vec{p}_1 in quanto:

$$\vec{s} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 \quad (16)$$

4.12 Accelerazione media e istantanea

L'accelerazione può essere definita come la rapidità con cui varia la velocità.

$$\text{accelerazione media} = \frac{\text{variazione di velocità}}{\text{tempo in cui avviene}}$$

Per un punto materiale che, muovendosi lungo l'asse x , abbia velocità v_i all'istante t_i (tempo iniziale) e v_f all'istante t_f (tempo finale), si definisce accelerazione scalare media nell'intervallo di tempo $\Delta t = t_f - t_i$ la grandezza

$$a_{med} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (17)$$

Analogamente alla velocità, si definisce accelerazione scalare istantanea il limite dell'accelerazione scalare media quando Δt tende a zero:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (18)$$

L'accelerazione media di un corpo in un dato intervallo di tempo è data quindi dal rapporto tra la variazione di velocità del corpo e la durata dell'intervallo di tempo in cui tale variazione avviene. L'unità di mi-

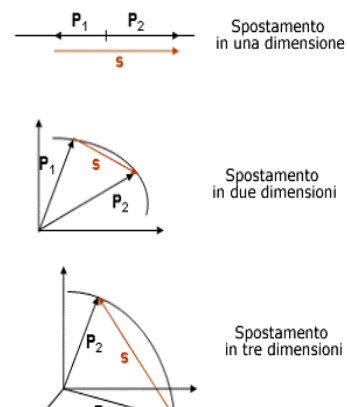


Figura 86 Esempi di vettori spostamento

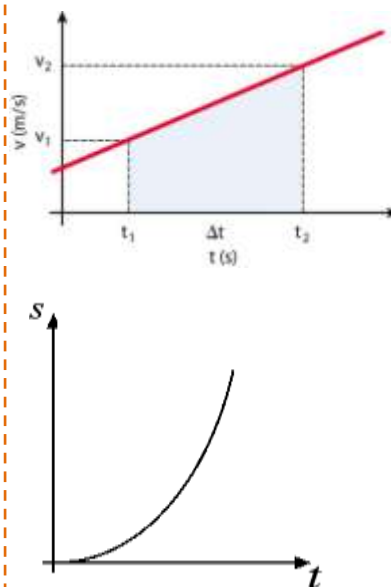


Figura 87 Rappresentazioni grafiche di una accelerazione

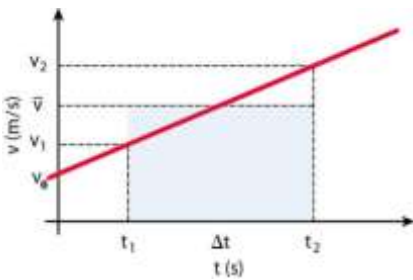


Figura 88 Moto rettilineo uniformemente accelerato

Un esempio di moto rettilineo uniformemente accelerato è quello di un corpo in caduta libera. Man mano che cade, aumenta la propria velocità in modo costante. In realtà per un paracadutista, vi è una velocità limite, oltre il quale non riesce ad andare, dovuto agli effetti di attrito del mezzo in cui si muove (in questo esempio l'aria)

sura dell'accelerazione nel SI è il metro al secondo al secondo, $(\text{m/s})/\text{s}$, più spesso chiamata metro al secondo quadrato, e indicata con m/s^2 .

4.13 Moto rettilineo uniformemente accelerato

Si ha un moto uniformemente accelerato, quando la velocità di un corpo che si muove con accelerazione costante.

Un'accelerazione che non varia nel tempo viene detta accelerazione costante e il moto che gode di tale caratteristica viene detto **moto uniformemente accelerato**.

Il grafico velocità-tempo di un moto uniformemente accelerato è una retta.

$$v_f = v_i + a \cdot t \quad (19)$$

lo spostamento quando si conoscono velocità e tempo

Quando un corpo si muove con velocità costante, il suo spostamento si può ricavare moltiplicando la velocità costante per l'intervallo di tempo $s = v \cdot t$ (vedi formula 2 di questo capitolo).

Se la velocità del corpo non è costante, ma varia di quantità uguali in intervalli di tempo uguale, cioè nel caso di un corpo soggetto ad accelerazione costante si può applicare questa stessa legge, sostituendo il valore costante della velocità con il valore v (vettoriale) della media aritmetica tra velocità iniziale v_i velocità finale v_f .

$$v = \frac{v_f + v_i}{2} \quad (20)$$

da cui, sostituendola nella relazione anzi richiamata otteniamo:

$$s = \frac{v_f + v_i}{2} t \quad (21)$$

Lo spostamento quando si conoscono l' accelerazione e il tempo

Se si conoscono la velocità iniziale, l'accelerazione e l'intervallo di tempo; si può ricavare lo spostamento del corpo combinando le equazioni del moto (19) e (21):

$$s = \frac{v_f + v_0}{2} \cdot t = \frac{(v_0 + a \cdot t) + v_0}{2} \cdot t = \frac{2v_0 + at}{2} \cdot t$$

da eseguendo la moltiplicazione, otteniamo:



$$s = v_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (22)$$

la (19) e la (22) insieme rappresentano la **legge oraria del moto uniformemente accelerato**:

$$v_f = v_i + a \cdot t \quad (23)$$

$$s = v_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (24)$$

Lo spostamento, quando si conoscono la velocità e l' accelerazione

Combinando assieme le precedenti equazioni (19) e (21) che danno la velocità finale e lo spostamento del corpo in moto uniformemente accelerato si può ottenere una nuova equazione che correla tra loro la velocità iniziale e quella finale, l'accelerazione e lo spostamento e nella quale non compare il tempo.

Usando la relazione $s = \frac{v_f + v_i}{2} t$ e $v_f = v_0 + a \cdot t$ da cui ricavi-

viamo $t = \frac{v_f - v_i}{a}$ e sostituendo nella prima otteniamo:

$$s = \frac{v_f + v_i}{2} \cdot \frac{v_f - v_i}{a} = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2 \cdot a} \quad (25)$$

da cui è possibile ricavare anche:

$$v_f^2 = v_i^2 + 2 \cdot a \cdot s \quad (26)$$

4.14 L'accelerazione di gravità

Galileo fu il primo a stabilire che tutti i corpi cadono verso terra con la medesima accelerazione costante.

Dopo vari esperimenti aveva infatti dimostrato che il ricorso a un piano inclinato permette di “diluire” la forza di gravità e, di conseguenza, permette di rendere meno rapido il moto delle sfere.

Quando è possibile prescindere dalla resistenza dell'aria, l'accelerazione di un corpo che cade non dipende dalla massa del corpo, né dalla quota iniziale, né dalla velocità iniziale.

A tale accelerazione, denominata accelerazione di gravità, è stato attribuito un simbolo particolare: g .

L'accelerazione è una grandezza vettoriale, quindi anche l'accelerazione di gravità g deve avere, oltre a un valore, anche una direzione e un verso.



Figura 89 Paracadutisti in caduta libera

In altre parole, la velocità è diretta verso il basso che aumenta il modulo di **9.81m/s** ogni secondo.

4.15 Accelerazione e sicurezza

L'eccesso di velocità

Valutare l'eccesso di velocità unicamente rispetto al limite imposto, al cartello, è riduttivo. Sono infatti molto importanti anche le condizioni della strada, del traffico, del conducente,...

Velocità eccessive anche solo di 10-20 Km/h possono determinare conseguenze mortali. È proprio la classica velocità di 65-70 Km/h, “**velocità standard**” su molti percorsi cittadini, a risultare determinante:

- a 70 Km/h un pedone investito non ha scampo!
- a 50 Km/h quell'incidente può essere evitato, grazie ad un maggiore spazio di frenata a disposizione.

Spazio di frenata

Quanti metri sono necessari per fermare un'automobile che viaggia 50-60 km orari?

- a **65 Km/h** l'autovettura percorre nell'intervallo psicotecnico (tempo di reazione) 18 metri, poi 25 metri in frenata, arrestandosi magari solo DOPO avere travolto il pedone.
- a **50 Km/h** avrebbe percorso, nell'intervallo psicotecnico, 14 metri e circa 15 metri di frenata, ovvero 10-15 metri di vantaggio per fermarsi!

Eccessi di velocità apparentemente modesti incidono pesantemente sulla capacità di fermare un'auto (tempo di reazione + spazio di frenata).

Pochi chilometri orari in più possono fare la differenza, perché **raddoppiando la velocità i metri necessari a fermarsi triplicano!** Passando da 100 a 150 Km/h lo spazio di arresto raddoppia; da 50 a 150 Km/h (tre volte) lo spazio di arresto aumenta di ben sei volte.

- a 150 Km/h: 177 metri
- a 100 Km/h: 88 metri
- a 50 Km/h: 29 metri

Va da sé che quello di travolgere un pedone investito è solo un esempio di cosa possa significare una condotta scorretta alla guida di un veicolo. Al posto del pedone, a quella stessa distanza potrebbe esserci un albero o un burrone, arrecando così danno solo a se stessi ed al proprio mezzo.

Conoscere un po' di fisica e cercando di trovare un po' di buon senso, si possono evitare situazioni davvero spiacevoli che segnano quasi sempre non solo la vita della vittima ma anche dell'investitore.

Cercheremo di capire meglio il fenomeno della frenata quando tratteremo il concetto di **quantità di moto** di un corpo in uno dei prossimi capitoli.



Figura 90 Spazi di frenata in base alla velocità

4.16 C.L.I.L. PROJECT

The acceleration of gravity

Galileo was the first to establish that all bodies fall to the ground with the same acceleration constant.

After several experiments had shown that the use of an inclined plane allows to "dilute" the force of gravity and, consequently, allows to make less rapid motion of the spheres.

When it is possible regardless of the air resistance, the acceleration of a falling body does not depend on the mass of the body, or from the initial share, or from the initial speed.

In this acceleration, called the acceleration of gravity, has been assigned a particular symbol: g .

The acceleration is a vector quantity, therefore, the acceleration of gravity g must have, in addition to a value, also a direction and a sense. In other words, the speed is directed downward, which increases the form of **9.81m/s** every second.

Acceleration and security

The speeding

Evaluate the speeding only than the limit set, the cartel is an understatement. They are in fact also very important road conditions, traffic, driver, ...

Excessive speed even just 10-20 Km / h can lead to deadly consequences. It is precisely the classical speed of 65-70 km/h, "**standard speed**" on many paths citizens, to be de-ends:

- 70 km / h hit a pedestrian has no escape!
- 50 km / h incident can be avoided, thanks to a greater braking distance available to.

Braking

How many meters are needed to stop a car traveling 50-60 miles per hour?

- at **65 Km/h** the car travels in the range psicotecnico (reaction time) 18 meters, then 25 meters under braking, stopping maybe just get overwhelmed AFTER the pedestrian.
- at **50 km/h** would have covered, in the range psicotecnico, 14 meters and 15 meters braking, or 10-15 meters ahead to stop!

Speeding seemingly modest weigh heavily on the ability to stop a car (reaction time + braking distance).

A few more miles per hour can make a difference, because doubling the speed necessary to stop the meters tripled!

From 100 to 150 Km / h the stopping doubles; from 50 to 150 Km / h (three times) the stopping distance increases by six times.

- 150 km / h: 177 meters.



4.17 Moto circolare uniforme

YouTube



Il **moto circolare** è uno dei moti semplici studiati dalla fisica e dalla cinematica, e consiste in un moto di un punto materiale lungo una circonferenza.

Il moto circolare assume importanza per il fatto che la velocità e l'accelerazione variano in funzione del cambiamento di direzione del moto, seppur rimanendo invariato il modulo della velocità. Tale cambiamento si può misurare comodamente usando le misure angolari per cui le equazioni del moto, introdotte con il moto rettilineo, vanno riviste e rielaborate con misure angolari.

Infatti, poiché gli spostamenti $\vec{\Delta s}$ cambiano continuamente direzione, ed essendo il vettore velocità media $\vec{v} = \frac{\vec{\Delta s}}{\Delta t}$ anche il vettore velocità varia continuamente.

Anche se i moduli degli spostamenti compiuti in intervalli di tempo uguali sono uguali, la direzione e il verso degli spostamenti cambiano continuamente. Per conoscere la direzione del vettore spostamento in un dato istante si considerano spostamenti sempre più piccoli lungo la traiettoria circolare.

Si trova così che la direzione del vettore spostamento in un punto (in un dato istante) è uguale alla direzione della retta tangente alla circonferenza in quel punto.

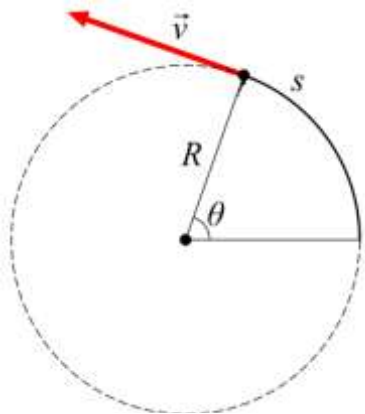


Figura 91 Moto circolare uniforme

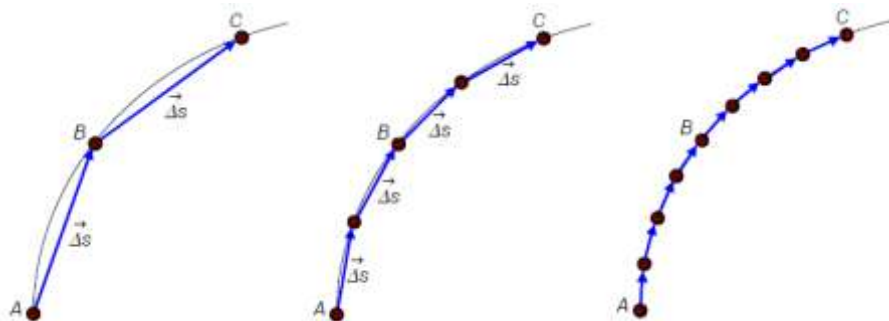


Figura 92 Moto circolare uniforme - spostamenti

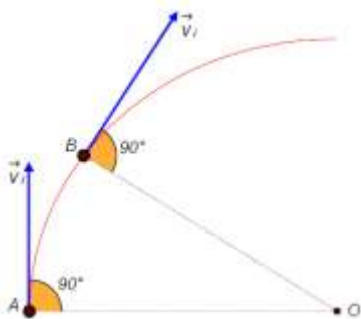


Figura 93 Moto circolare uniforme - velocità tangenziale

Anche se i moduli dei vettori velocità istantanea sono uguali in ogni punto della traiettoria circolare, i vettori velocità istantanea cambiano continuamente perché cambiano le loro direzioni, che sono uguali a quelli degli spostamenti. Pertanto anche la direzione del vettore velocità istantanea in un punto è tangente alla traiettoria circolare in quel punto, cioè perpendicolare al raggio della traiettoria circolare che passa per quel punto.

4.18 La velocità tangenziale

Nel moto circolare uniforme il modulo della velocità è costante, pertanto il corpo percorre archi di circonferenza uguali in tempi uguali.

Periodo

L'intervallo di tempo impiegato dal corpo per compiere un giro completo è chiamato *periodo* T .

Frequenza

La *frequenza* è il numero di giri compiuti nell'unità di tempo T , da cui la relazione:

$$f = \frac{1}{T} \quad (27)$$

Essa si misura in giri al secondo, s^{-1} o **Hertz** ($1\text{Hz} = \frac{1}{s}$).

La *velocità tangenziale* è la velocità di un corpo che si muove di moto circolare uniforme lungo una circonferenza di raggio r e che impiega un tempo T per percorrere l'intera circonferenza.

La *velocità tangenziale* ha modulo costante:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} \quad (28)$$

mentre la sua direzione, in ogni punto, è quella della retta tangente alla circonferenza in quel punto.

Dalla formula si osserva che la velocità tangenziale è direttamente proporzionale al raggio ed inversamente proporzionale al periodo T .

4.19 Velocità angolare

La *velocità angolare* (o velocità radiale) esprime la rapidità con cui il raggio, che collega il centro della circonferenza al corpo, descrive l'angolo al centro corrispondente all'arco di circonferenza percorso dal corpo.

Il modulo della velocità angolare media è il rapporto tra lo spostamento angolare del corpo e l'intervallo di tempo impiegato a compiere tale spostamento:

$$\omega = \frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} \quad (29)$$

La velocità angolare si misura in *Radiani al secondo* Rad/s . Essendo il radiante un numero puro, la dimensione della velocità angolare è t^{-1} .

Il vettore $\vec{\omega}$ è un vettore avente direzione perpendicolare al piano della circonferenza e verso dalla parte dell'osservatore che vede ruotare il punto materiale in senso antiorario.

Un corpo che si muove di moto circolare uniforme percorre archi uguali in intervalli di tempo uguali, e quindi il raggio che passa per esso descrive angoli al centro uguali in intervalli di tempo uguali.

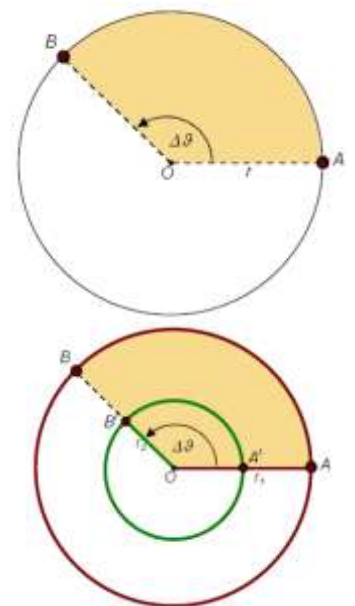


Figura 94 Velocità angolare nel moto circolare uniforme

Pertanto il modulo della velocità angolare è costante. Il modulo della velocità angolare media è:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (30)$$

Considerato che, nel moto circolare uniforme, la velocità angolare media assume valori costanti, si ha che essa coincide con la velocità angolare istantanea.

Da tale formula si osserva che la velocità angolare, a differenza della velocità tangenziale, non dipende dal raggio della circonferenza.

Dal grafico a lato si osserva che corpi che descrivono angoli al centro uguali in intervalli di tempo uguali hanno la stessa velocità angolare, ma percorrono archi di circonferenza diversi a seconda della loro distanza dal centro della circonferenza, e quindi hanno velocità tangenziali diverse.

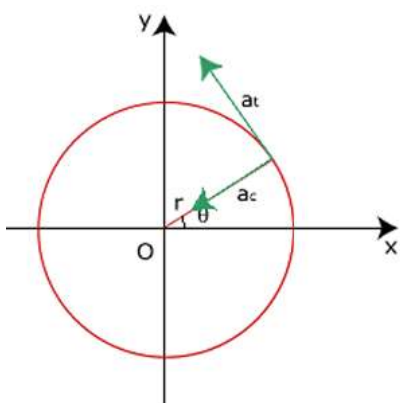


Figura 95 Accelerazione centripeta nel moto circolare uniforme

Osservando attentamente le relazioni (28) e (30) è semplice dedurre la relazione fra le due velocità, angolare e tangenziale, che risulta:

$$v = \omega \cdot r \quad (31)$$

4.20 Accelerazione centripeta

Il moto circolare uniforme è un moto accelerato perché la direzione della sua velocità cambia punto per punto, per cui è presente una accelerazione detta accelerazione centripeta. L'aggettivo "centripeta" deriva dal fatto che prendendo intervalli temporali molto piccoli, la variazione di velocità $\Delta \vec{v}$ è sempre diretta, con buona approssimazione, verso il centro della circonferenza, di qui il nome centripeta.

È possibile dimostrare, utilizzando il concetto di derivata applicato alla variazione di velocità $\Delta \vec{v}$, che vale:

$$a_c = \omega^2 \cdot r \quad \text{ovvero} \quad a_c = \frac{v^2}{r} \quad (32)$$

4.21 Accelerazione tangenziale

La **componente tangenziale** dell'accelerazione, invece, è responsabile della variazione del *modulo* della velocità, ed ha lo stesso significato che ha l'accelerazione istantanea nel moto rettilineo.

4.22 Moto armonico

Il moto armonico è un tipo particolarmente semplice di moto periodico: la legge del moto di un punto che si muova di moto armonico, cioè la funzione che descrive la posizione del punto in funzione del tempo è una semplice sinusoide di ampiezza costante.



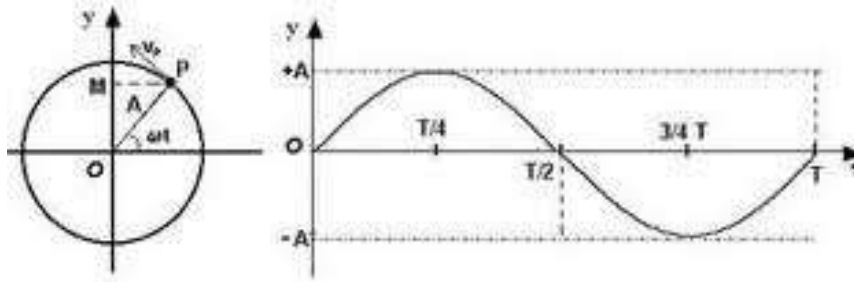


Figura 96 Moto armonico semplice

Di conseguenza il moto armonico è completamente descritto da soli tre parametri: il **periodo** dell'oscillazione (o la sua frequenza), l'**ampiezza** dell'oscillazione, e la sua **fase** (che indica la posizione iniziale dell'oscillazione).

Supponiamo che la velocità di un punto segua la legge armonica, allora anche l'accelerazione e la posizione di quel punto seguono una legge armonica.

Anche in questo caso, senza addentrarci troppo in argomentazioni che richiederebbero strumenti trigonometrici approfonditi, possiamo però dedurre agevolmente la formula che ci permette di descrivere il vettore posizione \vec{s} . Detto α l'angolo in O della figura, il vettore \vec{s} è dato dal prodotto del coseno di quell'angolo per il raggio R, ovvero:

$$s = R \cdot \cos \alpha \quad (33)$$

ma se consideriamo che $\omega = \frac{\alpha}{t}$ se riferito al solo tempo t e non all'intero periodo T, esplicitando $\alpha = \omega \cdot t$, otteniamo:

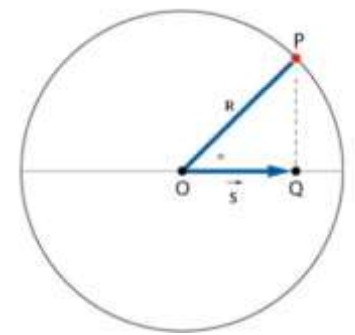
$$s = R \cdot \cos(\omega t) \quad (34)$$

4.23 Il pendolo semplice

Il pendolo semplice è un sistema fisico schematizzabile come in figura. Un oggetto viene appeso a un filo che in meccanica classica si considera inestensibile e rigido e viene messo in oscillazione di un angolo θ rispetto alla posizione di equilibrio verticale. Le forze che agiscono sul pendolo sono esclusivamente la forza peso e la tensione del filo. Possiamo scomporre la forza peso in due componenti una parallela alla direzione del filo e un'altra perpendicolare alla stessa.

Le componenti di queste due forze variano al variare dell'angolo θ che varia nel tempo. Si tratta quindi di un moto oscillatorio generato da una forza di tipo elastico che tende a riportare il pendolo nella posizione di equilibrio iniziale. L'equazione del moto del sistema è dunque:

$$\vec{T} + \vec{P} = m \cdot \vec{a} \quad (35)$$



YouTube

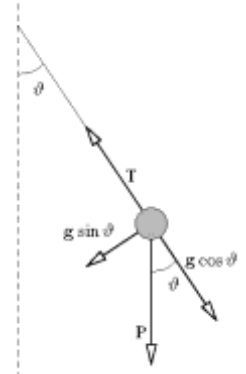


Figura 97 il Pendolo semplice



Laboratorio 8 il Pendolo semplice

Attraverso calcoli matematici si può arrivare alla formulazione che lega tra loro le grandezze come il periodo di oscillazione T , da non confondere con il vettore \vec{T} che indica la tensione della fune, la lunghezza del filo l , l'accelerazione di gravità g . Si dimostra che per angoli molto piccoli la formula è semplificabile come:

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (36)$$

da cui è possibile ricavare, noto il periodo T con la formula inversa, la lunghezza del filo:

$$l = \frac{T^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2} \quad (37)$$



4.24 Oscillazione di una molla

Se una molla appoggiata su un piano orizzontale, privo d'attrito, viene tirata o compressa, inizia ad oscillare di moto armonico semplice.

In ogni istante viene applicata una forza \vec{F} pari ad $m\vec{a}$, mentre la molla reagisce con una forza elastica di richiamo pari a $-kx$, in modulo sempre pari alla \vec{F} applicata.

Sapendo che l'accelerazione è la derivata seconda della posizione, rispetto al tempo, ovvero $a = \frac{d^2x}{dt^2}$, sostituendo nella relazione $m\vec{a} = -kx$, otteniamo

$$ma = m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

Esprimendo la x in funzione del tempo, ovvero con $x(t)$, otteniamo:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\frac{k}{m} x(t) = -\omega^2 x(t)$$

Da cui risulta

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (38)$$

Ma essendo il periodo di oscillazione, nel moto armonico semplice, espresso da $T = \frac{2\pi}{\omega}$, otteniamo:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (39)$$

Che esprime il periodo di oscillazione del moto armonico prodotto da una molla non soggetta a forze d'attrito.

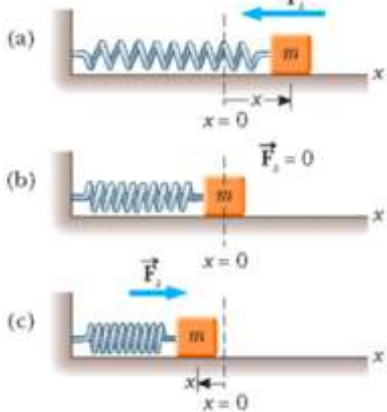


Figura 98 Oscillazione di una molla

4.25 Moto di un corpo lanciato orizzontalmente

Il moto parabolico è il moto descritto da un *proiettile lanciato in direzione orizzontale* oppure da un *proiettile lanciato da terra verso l'alto*, inclinato rispetto alla verticale. Nel primo caso possiamo usare una biglia di vetro lanciata ad una certa velocità su una superficie orizzontale, ad esempio un tavolo; arrivata al bordo del tavolo la pallina cade, descrivendo una traiettoria parabolica.

Come vediamo dal disegno, il moto parabolico del proiettile deriva dalla composizione di due moti: il **moto orizzontale rettilineo uniforme**, che la pallina mantiene per inerzia, e il **moto verticale uniformemente accelerato**, di caduta libera. La velocità di caduta aumenta mano a mano che la pallina si avvicina al suolo (a causa della forza di gravità), mentre il moto orizzontale della biglia resta costante.

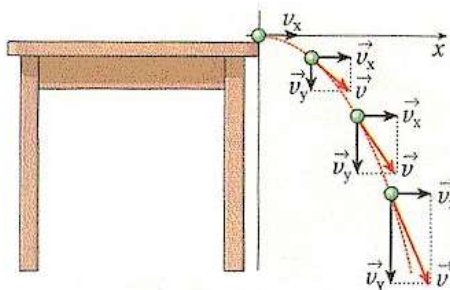


Figura 99 Moto di un corpo lanciato orizzontalmente

Per ottenere la traiettoria del moto occorre conoscere la posizione del corpo in ogni istante, sapendo che la sua posizione lungo l'asse x si trova utilizzando la legge del moto rettilineo uniforme:

$$x = v_x \cdot t \quad (40)$$

(ovvero spazio = velocità \times tempo)

dove x è lo spazio percorso, v_x la velocità e t il tempo

Se invece consideriamo l'asse y , per individuare la posizione la posizione del corpo possiamo utilizzare la legge del moto di caduta:

$$y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (41)$$

ricavando t dalla formula (38) otteniamo $t = \frac{x}{v_x}$;

sostituendo il suo valore nella formula del moto di caduta libera, la (38), otteniamo la legge del moto circolare:

$$y = \frac{1}{2} \frac{g}{v_x^2} x^2 + \frac{v_y}{v_x} x \quad (42)$$

da queste è possibile ricavare le equazioni che esprimono le componenti della velocità istante per istante:

$$\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} \\ v_y(t) = v_{0y} - g \cdot t \end{cases} \quad (43)$$

4.26 Moto di un corpo lanciato verticalmente

Supponiamo ora che un corpo venga lanciato lungo la verticale, formando un angolo di 90° rispetto all'asse x.

Lungo l'asse delle x rimane tutto costante poiché il corpo, lanciato in verticale, raggiunge una certa quota e dopo essersi fermato ripercorre la stessa traiettoria in verso opposto.

Durante il viaggio di salita le leggi del moto risultano essere:

$$\begin{cases} v_y = v_{0y} - g \cdot t \\ y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \end{cases} \quad (44)$$

da notare che la curva che descrive l'altezza y è rappresentata da una parabola, quindi è possibile ricavare la massima altezza che sarà posta nel vertice di questa parabola che ha orientamento verso il basso, essa viene raggiunta all'istante:

$$t = \frac{g}{v_{0y}} \quad (45)$$

4.27 Moto di un corpo lanciato in obliquo

Visto che sull'asse x si svolgerà un moto rettilineo uniforme, mentre sull'asse y un moto rettilineo uniformemente accelerato, per l'Asse x riportiamo la legge oraria del moto rettilineo uniforme e per l'Asse y la legge oraria del moto rettilineo uniformemente accelerato.

Avremo quindi:

$$\begin{cases} v_x = v_{ix} \\ v_y = v_{iy} - g \cdot t \end{cases} \quad (46)$$

Visto che sull'asse x si svolgerà un moto rettilineo uniforme, mentre sull'asse y un moto rettilineo uniformemente accelerato, per l'Asse x riportiamo la legge oraria del moto rettilineo uniforme e per l'Asse y la legge oraria del moto rettilineo uniformemente accelerato:

$$\begin{cases} x = v_{ix} \cdot t \\ y = v_{iy} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \end{cases} \quad (47)$$

che rappresenta geometricamente ancora una parabola, il cui vertice però non è più nell'origine ma nel punto A. L'ordinata di A è l'altezza massima h raggiunta dal proiettile, altezza che si può calcolare facil-

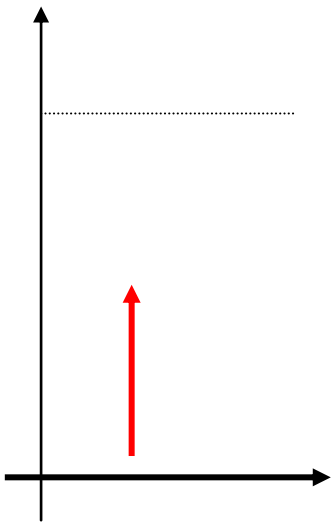


Figura 100 Moto di un corpo lanciato verticalmente

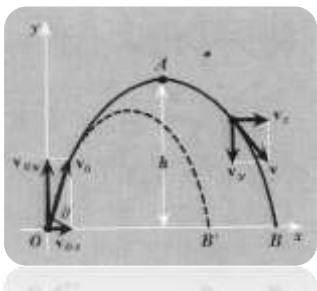
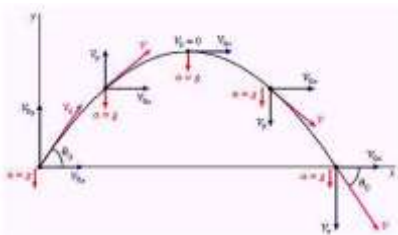


Figura 101 Moto di un corpo lanciato obliquamente



Laboratorio 9 Moto del proiettile

mente osservando che v_y si annulla in A per poi cambiare segno. Allora:

$$0 = v_{iy} - g \cdot t_A$$

da cui:

$$t_A = \frac{v_{iy}}{g}$$

Introducendo t_A nell'espressione di y si ottiene:

$$h = y_A = v_{iy} \left(\frac{v_{iy}}{g} \right) - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_{iy}}{g} \right)^2 = \frac{v_{iy}^2}{2g} \quad (48)$$

La **gittata** OB , che è la distanza raggiunta dal proiettile, si può calcolare in due modi:

1) Imponendo $y = 0$ nell'equazione della traiettoria, e risolvendo l'equazione di 2° grado in x ; si otterranno due soluzioni, di cui una ovviamente è $x = 0$ (punto di partenza), e l'altra è x_B .

2) Osservando che il tempo impiegato per tornare al suolo ("tempo di volo") è il doppio di quello per raggiungere A. Quindi:

$$x_B = v_{ix} (2 \cdot t_A) = 2 \cdot \frac{v_{ix} \cdot v_{iy}}{g} \quad (49)$$

La gittata dipende sia da v_{ix} che dall'angolo ϑ , e si potrebbe dimostrare che è massima per $\vartheta = 45^\circ$.

4.28 Moto generato da una molla sospesa

Uno dei più importanti esempi di **moto armonico semplice** (MAS) è il moto di una molla. (Una **molla ideale** è una molla che rispetta la **Legge di Hooke**.)

Consideriamo una molla sospesa verticalmente, con una massa M attaccata alla sua estremità libera. Se tirate verso il basso la molla e la lasciate andare, la massa si muove con moto armonico semplice verticale.

Le variabili in gioco sono rappresentate dalla massa M , la costante della molla k , l'ampiezza del moto y_0 e il tempo t . Come detto nel paragrafo 4.24, la pulsazione ω è data da:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (50)$$

ed il periodo

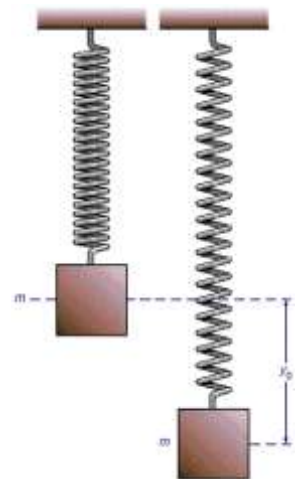


Figura 102 Legge di Hooke per una molla appesa ad un sostegno



Laboratorio 10 Masse e Molle



Laboratorio 11 Legge di Hooke

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{k}} \quad \text{e la frequenza} \quad f = \frac{\sqrt{k}}{2\pi} \quad (51)$$

essendo $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Da notare che l'**ampiezza** del moto non appare nell'equazione per la frequenza e il **periodo** della molla. Di conseguenza, tirando il blocco solo un po, oppure per una grande distanza, quando si fa iniziare il moto non influenza la frequenza del periodo.

Influenza la velocità del moto e quanto lontano il blocco si muove, ma non la sua frequenza.

Ciò che influenza il periodo e la frequenza del moto sono la **massa** del blocco e la **costante della molla**. Se il blocco è pesante, T aumenta ed f decresce, così il blocco si muove lentamente. Un blocco leggero oscilla più rapidamente per la stessa ampiezza iniziale. D'altro canto, aumentando la costante della molla si fa diminuire T ed aumentare f , così il blocco si muove più rapidamente.

Equazioni del moto

Spostamento:

$$y = y_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (52)$$

Velocità:

$$v = -y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (53)$$

Accelerazione:

$$a = -y_0 \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) = -y \omega^2 \quad (54)$$

4.29 Attrito viscoso del mezzo

Nel paragrafo 2.11 Abbiamo già trattato le diverse forme di attrito e considerato l'attrito radente che si manifesta quando un corpo striscia su una superficie. Quando un corpo invece si muove in un mezzo (aria, acqua, un qualunque fluido,...) siamo in presenza di attrito viscoso che il mezzo oppone all'attraversamento del corpo stesso. Ci appare alquanto evidente che maggiore sarà la velocità del corpo e maggiore risulterà l'attrito che il mezzo oppone al suo passaggio, risultando quindi direttamente proporzionale alla velocità e dipendente dal mezzo in considerazione. A velocità relativamente basse avremo quindi:

$$F_{av} \propto kv \quad (55)$$

dove k è un fattore di proporzionalità dipendente dalla forma del corpo e dal coefficiente di attrito riferibile al mezzo, mentre v è il modulo della velocità del corpo.

Quando invece la velocità tenda ad aumentare, si avrà un aumento quadratico della forza di attrito viscoso, risultando:

$$F_{av} \propto kv^2 \quad (56)$$

Un caso particolare di forze di attrito dovuto alla viscosità del mezzo è quello proposto nella **Legge di Stokes**, dove è rappresentato l'attrito subito da un corpo sferico che si muova all'interno di un fluido con coefficiente di viscosità η . La forza di attrito viscoso, risulterà:

$$F_{av} = -6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot r \cdot v \quad (57)$$

dove r rappresenta il raggio della sfera e v il modulo della sua velocità. Il meno nella formula è dovuto al fatto che quella del mezzo, è sempre una forza che si oppone al moto, come del resto accade per tutte le forze di attrito, di qualunque natura siano. Nel calcolo della legge riportata nella (57) Stokes ha tenuto conto non solo dell'attrito del mezzo, ma anche della spinta di Archimede che tende anch'essa ad opporsi al moto, come visto nel paragrafo (3.25).

Velocità limite

Ogni corpo in caduta libera (pensiamo di un paracadutista prima ancora che apra il paracadute) raggiunge comunque una velocità limite che si ottiene dal momento in cui la forza peso va ad equilibrare la forza di attrito del mezzo. Dalla relazione $F_{av} = F_p$, si ottiene quindi la velocità limite:

$$v = \frac{mg}{6\pi\mu r} \quad (58)$$

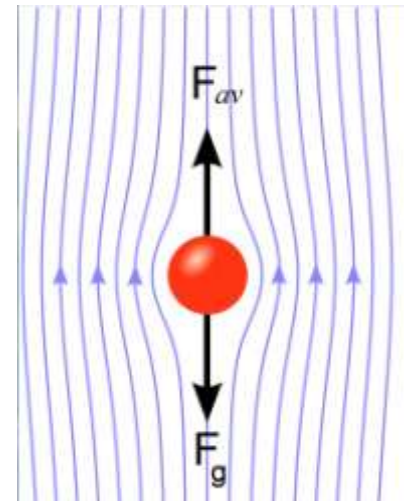


Figura 103 Legge di Stokes

4.30 Forze di attrito volvente

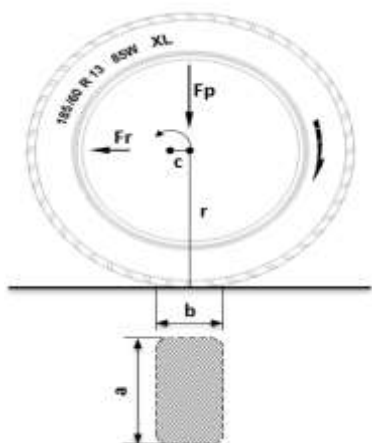


Figura 104 Rotolamento di uno pneumatico

Quando siamo in presenza di un corpo in movimento di forma sferica, cilindrica o comunque tale da poter produrre un rotolamento, su di esso si manifesterà una forza di attrito detta forza di attrito volvente. Nel caso ideale il punto di contatto (se trattasi di sfera) o il segmento (se trattasi di cilindro) durante il rotolamento, seppur sempre diverso, appare fermo configurandosi una forza di attrito statico in quel punto. Nella realtà invece piuttosto che di punto o segmento di contatto, dobbiamo parlare di superficie di contatto (immaginiamo uno pneumatico di un'automobile sull'asfalto).

Come è possibile vedere in figura, uno pneumatico soggetto ad un carico subisce uno schiacciamento sulla parte di contatto con la strada, quindi tende a sollevarsi come se il suo asse di rotazione fosse spostato di una distanza c . Questo spostamento dipenderà dall'impronta che lo pneumatico lascia sulla strada, ovvero le dimensioni di appoggio, in particolare dalla b . Tale superficie dipenderà, in modo inversamente proporzionale alla pressione di gonfiaggio, risultando minore laddove la pressione di gonfiaggio sia più alta. Dipenderà inoltre dalla larghezza dello pneumatico indicata con a . Con buona approssimazione risulterà

$$c \sim \frac{1}{16} b \quad (59)$$

Lo spostamento dell'asse reale di rotazione genera una coppia di momenti (vedi Momento di una forza paragrafo 3.2) dovuti alla forza resistente F_r ed alla forza peso F_p . Scrivendo i due momenti, risulterà:

$$F_r \cdot r = F_p \cdot c \quad (60)$$

Sostituendo la (59) nella (60) otteniamo:

$$F_r = \frac{F_p \cdot 0,0625 \cdot b}{r} \quad (61)$$

che esprime il valore della forza di attrito volvente nel caso reale di un corpo di forma cilindrica che rotola su una superficie piana.

4.31 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questa unità abbiamo appreso circa la necessità di fissare un **sistema di riferimento** dove poter studiare un qualsiasi moto. Risulta necessario anche individuare la **traiettoria** di un corpo, intendendo per essa l'insieme delle posizioni assunte durante il moto. Abbiamo così misurato la rapidità con cui vengono percorse le traiettorie, indicando tale grandezza come **velocità**, dapprima calcolandone un valore medio e successivamente quello istantaneo. Per fare ciò è stato necessario richiamare i concetti fondamentali dell'analisi matematica riferite alla **derivata di una funzione**. Abbiamo così potuto introdurre il concetto di legge oraria del moto, che non è altro che un diagramma spazio tempo, con tutte le posizioni assunte dal corpo nel moto.

Abbiamo iniziato così la trattazione dei diversi moti, iniziando da quelli più semplici, ovvero quelli in cui la velocità si mantiene costante e la traiettoria è rettilinea, ovvero i **moti rettilinei uniformi**. Ma a volte la velocità varia durante il moto e la grandezza **accelerazione** ne descrive proprio il cambiamento nel tempo in cui tale modificazione avviene. Completata la trattazione dei moti rettilinei, ci siamo posti nella situazione in cui la traiettoria fosse una curva chiusa, per l'esattezza una circonferenza, trattando così con il **moto circolare uniforme**, che mostra caratteristiche molto diverse rispetto a quello rettilineo, riscontrando che in ogni posizione il vettore **velocità tangenziale**, alla curva, pur rimanendo costante in modulo, è sempre diverso variando direzione e verso. Nello stesso moto abbiamo poi chiarito la presenza di due diversi tipi di **accelerazione**, quella **centripeta**, detta così perché ha verso orientato sempre verso il centro della circonferenza e quella **tangenziale**, perché tangente alla curva.

Altri moti mostrano inoltre caratteristiche di periodicità e sono quelli di **pendoli** oscillanti e di **molle** cui è stata applicata una forza. Entrambe generano quelli che vengono detti **moti armonici**. Infine, lasciate le traiettorie obbligate, abbiamo trattato tutte le situazioni in cui un corpo venga lanciato **verticalmente**, **orizzontalmente** e **obliquamente**.

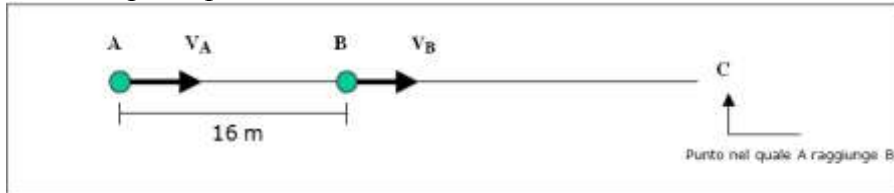
Negli ultimi paragrafi si è ripreso il concetto di attrito, considerando in questi due casi, l'attrito dovuto ad un corpo che si muove in un mezzo e quello dovuto al rotolamento di un corpo su una superficie.

4.32 Problemi proposti

- 1) Rappresentare graficamente le seguenti leggi del moto rettilineo uniforme e commentarle:
a) $s = 10 - 2t$ b) $s = 5t$ c) $s = -20 + 2t$ d) $s = 15 + 4t$
- 2) Anna e Lucia, che abitano a 15 km di distanza, decidono di incontrarsi. Anna parte alle 16^h 18^m con la sua bicicletta alla velocità di 20 km/h; Lucia parte alle 16^h 24^m e tiene una velocità di 25 km/h. A che ora s'incontrano e in quale posizione?
- 3) Un'automobile viaggia per un certo tempo T alla velocità di 40 km/h e poi per lo stesso tempo alla velocità di 80 km/h. Trovare la velocità media.
- 4) Un'automobile viaggia per un certo tempo T alla velocità di 40 km/h, percorrendo un cammino S , e poi per lo stesso tragitto S alla velocità di 80 km/h. Trovare la velocità media.
- 5) Un'automobile, durante una frenata uniforme, passa in un minuto dalla velocità di 40 km/h a quella di 28 km/h. Trovare il valore dell'accelerazione e dello spazio percorso
- 6) Un treno si muove tra due stazioni, poste a 1,5 km di distanza. Percorre la prima metà del tragitto di moto uniformemente accelerato e la seconda di moto uniformemente ritardato. Data la velocità massima di 50 km/h, calcolare il valore dell'accelerazione e il tempo totale di percorrenza.
- 7) Un'automobile viaggia a 120 km/h (33.3 m/s). Visto un ostacolo, il conducente riesce a fermarsi in 110 m. Qual è l'accelerazione e quanto tempo impiega?
- 8) Un'automobile viaggia a 120 km/h (33.3 m/s). Visto un ostacolo, il conducente riesce a fermarsi in 110 m. Qual è l'accelerazione e quanto tempo impiega?
- 9) Una palla viene lanciata da terra verso l'alto con una velocità iniziale $V_i = 12$ m/s.
 1. Quanto tempo impiega a raggiungere il punto più alto della traiettoria?
 2. Quanto vale l'altezza massima raggiunta?
 3. Dopo quanto tempo ricade a terra?
 4. Con che velocità tocca terra?
- 10) Un uomo lancia un sasso dal tetto di un palazzo verso l'alto, con una velocità di 12.25 m/s. Il sasso raggiunge il suolo dopo 4.25 s. Si calcoli:
 1. L'altezza del palazzo
 2. La massima altezza raggiunta dal sasso rispetto a terra
 3. La velocità con cui il sasso tocca il suolo
- 11) Due macchine viaggiano di moto uniforme lungo due strade rettilinee formanti tra loro un angolo retto. Calcolare a quale distanza, in linea d'aria, si trovano dopo 10 minuti, supponendo che le macchine sino partire allo stesso istante dall'incrocio delle due strade con velo-

cià, rispettivamente, di 90 km/h e 144 km/h.

12) Due atleti, "A" e "B", stanno facendo una gara. "A" parte 16 m dietro a "B" correndo alla velocità di 9 m/s. Se "B" corre alla velocità di 8 m/s, calcolare dopo quanto tempo "A" raggiungerà "B" e lo spazio percorso.



13) Un automobilista sta viaggiando alla velocità di 120 km/h ed il contachilometri segna 32640 km. Ad un certo istante l'automobilista frena e quando la macchina è ferma, legge sul contachilometri 32644 km. Calcolare la decelerazione, supposta costante ed il tempo di frenata.

14) Un elettrone parte con velocità iniziale di 5 cm/s muovendosi di moto rettilineo uniforme. Esso raggiunge una zona in cui è presente un'accelerazione costante $a = 1 \text{ cm/s}^2$ prodotta da un campo elettrico fra due piastre come in figura. Supponendo che tale zona sia lunga $d = 30 \text{ cm}$, calcolare:

Quanto tempo impiega l'elettrone a raggiungere la seconda piastra; con quale velocità la raggiunge.

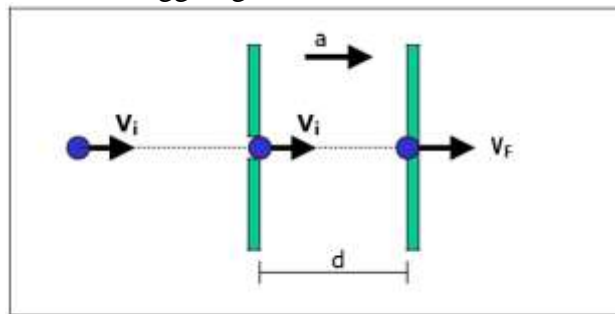


Figura 105 Moto dell'elettrone tra due armature

15) Un corpo parte, ad un certo istante e dall'origine del sistema di riferimento, con velocità costante $V_1 = 2 \text{ m/s}$. Un secondo corpo parte sempre dall'origine ma dopo un tempo $t = 5 \text{ sec}$ muovendosi di moto uniformemente accelerato con $a = 0,1 \text{ m/s}^2$ e con velocità iniziale nulla.

Calcolare:

- dopo quanto tempo e dove i due corpi s'incontrano;
- qual è la velocità del secondo corpo al momento dell'incontro.

16) Mentre un'automobile viaggia a velocità costante $V_M = 12 \text{ m/s}$ una palla è lanciata orizzontalmente dal finestrino perpendicolarmente alla direzione di moto della macchina con velocità $V_p = 5 \text{ m/s}$.

Calcolare:

- la velocità della palla, V_T , rispetto al suolo in modulo, direzione e verso
- in quale istante toccherà terra, se il finestrino della macchina è a $h = 80 \text{ cm}$ dal suolo.

- 17) Un pilota vuole volare da una città ad un'altra a nord-est distante 1200 km. Se la velocità costante dell'aereo è $V_A = 260$ km/h ed il vento soffia verso sud-est con velocità costante $V_V = 100$ km/h, calcolare:
 In quale direzione deve essere pilotato l'aereo?
 Quale sarà la velocità V_{AT} dell'aereo rispetto a terra?
 Quanto tempo impiegherà l'aereo a raggiungere la seconda città.
- 18) Un uomo si trova sulla riva di un fiume largo $h = 1$ km e vuole raggiungere un punto che si trova di fronte a lui sull'altra riva. Egli può nuotare in una direzione inclinata di un angolo φ con la verticale in modo che per effetto della corrente il suo moto risulti trasversale, oppure può attraversare il fiume partendo in direzione perpendicolare alle sponde e raggiungere a piedi il punto B voluto camminando sull'altra riva. Sapendo che l'uomo può nuotare con velocità costante $V_N = 2,5$ km/h, può camminare con velocità costante $V_P = 4$ km/h e che la velocità costante della corrente è $V_C = 2$ km/h, determinare:
 A) quale dei due tragitti è il più rapido
 B) l'angolo φ
- 19) Un punto materiale si muove lungo una circonferenza di raggio 20 cm con frequenza di 5,0 Hz. Calcolare la velocità tangenziale ed il numero di giri compiuti in 20 s.
- 20) Supponendo che la Terra si muove intorno al Sole lungo un'orbita circolare di raggio $R = 150 \cdot 10^6$ km, determinare la velocità tangenziale in km/s e l'accelerazione centripeta in m/s^2 , tenendo presente che il periodo di rivoluzione è di 365 giorni.
- 21) Secondo il modello atomico di Bohr – Rutherford l'elettrone di un atomo d'idrogeno ruota intorno al nucleo su determinate orbite. In condizioni di non eccitazione l'elettrone ruota con velocità tangenziale $V = 2,18 \cdot 10^6$ m/s e con accelerazione centripeta $a_c = 8,97 \cdot 10^{22}$ m/s^2 . Determinare il raggio dell'orbita, la velocità angolare e la frequenza.
- 22) Un pacco abbandonato da un aeroplano in volo orizzontale a 200 m/s, tocca terra dopo 12 s. Calcolare l'altezza dell'aeroplano, la distanza orizzontale percorsa dal pacco e la velocità con cui esso tocca il suolo, trascurando la resistenza dell'aria.
- 23) Un proiettile è stato sparato orizzontalmente dall'altezza di 49 m e tocca il suolo alla distanza orizzontale di 2000 m. Calcolare la velocità con cui è stato sparato.
- 24) Due corpi A e B si trovano su una torre alta 490 m. Il corpo A viene lasciato cadere verso il basso e, nello stesso istante, B viene lanciato con velocità orizzontale di 50 m/s. Quale dei due corpi tocca prima il suolo? Quanto vale la distanza tra A e B quando sono a terra?
- 25) A un aereo da bombardamento è affidato il compito di bombardare un sommergibile da una quota di 7840 m. Calcolare il tempo che il sommergibile ha a disposizione per immergersi.
- 26) Una palla viene lanciata orizzontalmente da un'altezza di 4,8 m con velocità iniziale di 4,5 m/s. Si chiede: la palla riuscirà a centrare

un canestro posto a terra a distanza orizzontale di 6,2 m?

27) Un punto materiale si muove di moto circolare uniforme con periodo di 48 s sopra una circonferenza di raggio 40 cm. Calcolare l'equazione oraria dei due moti armonici, proiezioni del moto circolare uniforme su due diametri perpendicolari, nell'ipotesi che il punto al tempo $t = 0$ si trovi ad un estremo dei due diametri.

28) Un pallone viene lanciato con un angolo $\alpha = 30^\circ$ dalla sommità di un palazzo alto 20 m come in figura. La velocità iniziale sia $V_0 = 10$ m/sec. Nello stesso istante, da un punto che si trova a 40 m dalla base del palazzo, un uomo corre per cercare di prendere il pallone quando questo tocca il suolo. Quale deve essere la velocità dell'uomo per poter prendere il pallone? Trascurare la resistenza dell'aria.

29) Un corpo viene lanciato, con una velocità iniziale orizzontale $V_0 = 10$ m/sec da un palazzo alto $h = 35$ m come in figura. Determinare: a) Il tempo di volo; b) la distanza x , misurata dalla base del palazzo, del punto d'impatto del corpo col suolo; c) l'angolo formato dalla direzione della velocità con la verticale al momento dell'impatto.

30) Un fucile, distante 45 m da un bersaglio, spara un proiettile alla velocità di 450 m/s. Quanto più alto dal bersaglio deve essere puntato il fucile per riuscire a colpire il bersaglio?

31) Un elettrone, per effetto di un campo magnetico, percorre una traiettoria circolare di raggio $R = 15$ cm e accelerazione centripeta $a_c = 3,0 \cdot 10^{14}$ m/s². Calcolare il periodo del moto.

32) Un satellite terrestre viaggia su un'orbita circolare alla quota di 640 km sopra la superficie terrestre. Il periodo di rivoluzione è di 98 minuti. Calcolare la velocità del satellite e il valore della gravità a quella quota.

4.33 In laboratorio

Velocità media

8) dopo aver descritto alcuni moti di esempi concreti, calcolarne la velocità media e quella istantanea, laddove possibile. (una passeggiata, una corsa a piedi, in bicicletta,...)

Moto rettilineo uniforme

9) verifica sperimentale della legge oraria del moto rettilineo uniforme con binario a cuscino d'aria.

Moto uniformemente accelerato

10) prendendo spunto da situazioni concrete (caduta di un grave, rotazione a cuscino d'aria inclinata...), descrivere un moto uniformemente accelerato, verificandone la legge oraria

Moto circolare uniforme

11) descrivere il moto di una giostra che compie un moto circolare, calcolandone velocità tangenziale ed angolare.

4.34 Approfondimento: Facebook e la fisica

Molti adulti interpretano il social network Facebook come il paradigma assoluto della inutilità più manifesta, ma non è proprio così!

Come in ogni spazio la cosa importante è il senso che si dà alle cose e nessun luogo ha un senso predefinito. Anche in un social network che è vero distrae sempre più i giovani allontanandoli da una scuola sempre più incapace di cogliere il cambiamento, nascono gruppi in cui si discute di cose tutt'altro che futili, si parla di fisica



Figura 106 Congresso Solvay a Bruxelles nel 1927

Il Gruppo di lavoro di Storia della Fisica dell'AIF è stato fondato nel 1985.

La sua attività è molteplice e proficua: organizza Scuole di Storia della Fisica a scadenza annuale e seminari ai Congressi A.I.F. a scadenza biennale; partecipa con poster o relazioni o comunicazioni su ricerche a carattere storico e didattico ai Convegni nazionali e internazionali su "Storia della Fisica e Didattica" della Società Europea di Fisica (EPS), cura l'organizzazione di Corsi d'Aggiornamento in "Storia e didattica della Fisica".

Il Gruppo inoltre ha curato la preparazione e la redazione dei Quaderni n. 5, n. 14, n. 17, n. 19 e n. 21 de "La Fisica Nella Scuola" sulla Storia della Fisica.

Pagina Facebook: <http://www.facebook.com/pages/Storia-della-Fisica-AIF/144645528918516>



Figura 107 Albert Einstein
(14 marzo 1879 - 18 aprile 1955)

5. Forze e moto: Principi della Dinamica

Prerequisiti

Saper riconoscere e rappresentare grandezze proporzionali tra di loro conoscere il moto rettilineo uniforme e quello uniformemente accelerato. Aver acquisito i concetti di velocità, di accelerazione e di forza. I corpi rigidi.

Sapere

Interpretare le cause del moto e la natura delle forze. Conoscere il principio d'inerzia, la seconda legge di Newton ed il principio di azione-reazione. Conoscere le applicazioni delle leggi di Newton sulla gravitazione universale e le diverse gravità presenti su altri pianeti. Conoscere le leggi dei moti dei pianeti nel sistema solare. Conoscere il concetto di campo gravitazionale. Saper distinguere tra sistemi di riferimento inerziali e non inerziali.

Saper fare

Saper individuare la natura di una forza in base ai suoi effetti. Saper applicare le leggi di Newton nei moti. Saper stabilire le orbite dei pianeti e il calcolo dei loro periodi di rivoluzione. Utilizzare le diverse schematizzazioni di riferimenti inerziali e non inerziali.



Figura 108 Mulino ad acqua



Figura 109 Trasmissione della quantità di moto



Figura 110 Moti relativi

5.1 Le cause del moto

La **dinamica** è il ramo della meccanica che si occupa dello studio del moto dei corpi e delle sue cause o, in termini più concreti, delle circostanze che lo determinano e lo modificano. Lo studio completo della meccanica comprende anche la statica e la cinematica: la dinamica si differenzia dalla prima che studia le configurazioni di equilibrio meccanico, dalla seconda che studia, in astratto, tutti i moti concepibili ma non si occupa di determinare quali moti possono avvenire in un determinato contesto sperimentale.

Secondo l'intuizione fondamentale di Galileo e Newton, **le forze non sono la causa del moto, ma producono una variazione dello stato di moto**, ovvero un'accelerazione. Questa intuizione equivale ad affermare la relatività del movimento; un osservatore può determinare il suo stato di quiete o di moto solo relativamente ad altri corpi (o altri osservatori). Per questo è possibile parlare delle cause che variano il moto, ma non delle cause del moto.

Lo studio della dinamica si effettua innanzitutto riferendosi a un'entità astratta, dotata di massa ma con dimensioni trascurabili: il punto materiale. Tutte le leggi riferite al punto materiale possono essere poi estese ai corpi reali (dotati di massa e di dimensioni finite) interpretati come *sistemi di punti materiali*; se ci si occupa di corpi nei quali le distanze relative tra i punti costituenti non variano nel tempo, si studia la dinamica dei *corpi rigidi*; in caso contrario si studia la dinamica dei *corpi deformabili*.

5.2 I sistemi di riferimento

Un **sistema di riferimento inerziale** è un sistema di riferimento in cui è valido il primo principio della dinamica. Con un'accettabile approssimazione è considerato inerziale il sistema solidale con il Sole e le stelle (il cosiddetto sistema delle stelle fisse), ed ogni altro sistema che si muova di moto rettilineo uniforme rispetto ad esso (e che quindi né acceleri né ruoti): in questo modo si viene a definire una classe di equivalenza per questi sistemi.

Un sistema di riferimento inerziale è un sistema di riferimento caratterizzato dalla seguente condizione: se un punto materiale libero, cioè non sottoposto a forze oppure sottoposto ad una risultante nulla di forze, viene posto in esso in condizioni di quiete, esso rimarrà in condizioni di quiete.

I **principi della dinamica** sono la base filosofica (essenzialmente metafisica) della meccanica, ossia la branca della fisica che studia e descrive le relazioni tra il movimento di un corpo e gli enti che lo modificano. All'interno della formalizzazione logico-matematica della meccanica newtoniana essi svolgono il ruolo di assiomi. Tali principi vengono anche detti Principi di Newton, dal nome dello scienziato che li ha proposti nel celebre *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, pubblicato nel 1687. Gli enunciati che oggi si utilizzano sono una riformulazione attuale di quelli scritti nei Principia; il volerli attribuire in breve a Newton è improprio. Si noti inoltre che le attuali formulazioni differiscono spesso l'una dall'altra in alcuni dettagli, non del tutto inessenziali.

Ai principi di Newton si affianca, nella meccanica classica, il principio di relatività di Galileo che stabilisce l'invarianza dei principi di Newton sotto taluni cambiamenti di coordinate, dette appunto trasformazioni galileiane. È molto importante tenere presente che i principi della dinamica sono validi in sistemi di riferimento inerziali e per sistemi i cui componenti siano a velocità molto minori di quella della luce.

5.3 Primo principio della dinamica o d'inerzia

Si parla di **principio** e non di legge né di assioma perché esso è un'affermazione filosofica, di natura essenzialmente metafisica, perciò non dimostrabile, né falsificabile: una richiesta arbitraria che definisce la base concettuale attraverso cui la fisica classica descrive e, “sperabilmente”, *spiega* il mondo, almeno per quanto riguarda la meccanica, cioè per quanto riguarda il movimento.

Aristotele nella sua “Fisica” del IV secolo a.C. asseriva che lo stato naturale dei corpi è la quiete, ossia l'assenza di moto, e che qualsiasi oggetto in movimento tende a rallentare fino a fermarsi, a meno che non venga spinto a continuare il suo movimento. Nel Medioevo, Guglielmo di Ockham e poi, nel Quattrocento, il Cusano, nell'opera “Il gioco della palla”, e Leonardo da Vinci ripensarono la dinamica aristotelica: non ne dimostrarono l'infondatezza (anche perché nessuno, filosoficamente parlando in maniera corretta potrebbe farlo), quanto, piuttosto, cominciarono a sviluppare una diversa meccanica, ossia fondata su diversi principi filosofici. Il principio di inerzia non è infatti di banale osservazione sulla Terra, dominata dagli attriti, anzi, nella realtà è letteralmente impossibile: consideriamo per esempio una biglia (assimilabile nella nostra trattazione ad un punto materiale) che rotola su una superficie piana orizzontale molto estesa. La nostra esperienza ci dice che con il passare del tempo la biglia rallenta fino a fermarsi; questo è dovuto al fatto che interagisce con il piano e con l'aria. Si può osservare, comunque, che facendo diminuire progressivamente questi attriti (rarefacendo l'aria e liscio il piano per diverse volte) la biglia percorre sempre più strada prima di fermarsi. L'idea che sta alla base del primo principio è che (generalizzando e) facendo diminuire gli attriti fino a renderli nulli (in teoria), il corpo non rallenti e quindi non si fermi mai, cioè persista nel suo stato di moto rettilineo uniforme.

Riferendosi invece alla tendenza di ogni corpo a mantenere lo stato di quiete o di moto si usa parlare di inerzia.

Ma solo dopo quasi 2000 anni Galileo Galilei (1564-1642) capovoltò il punto di vista di Aristotele con un *esperimento ideale*, immaginando il caso limite di un corpo che si muove su un piano orizzontale senza attriti. Un tale esperimento, come aveva ben compreso il grande scienziato pisano, non è riproducibile sulla Terra, ove è impossibile eliminare completamente tutti gli attriti.

YouTube



Newton chiarisce inoltre il concetto nella definizione :

« La vis insita, o forza innata della materia, è il potere di resistere attraverso il quale ogni corpo, in qualunque condizione si trovi, si sforza di perseverare nel suo stato corrente, sia esso di quiete o di moto lungo una linea retta. Questa forza è proporzionale alla forza che si esercita sul corpo stesso e non differisce affatto dall'inattività della massa, ma nella nostra maniera di concepirla. Un corpo, dall'inattività della materia, è tolto non senza difficoltà dal suo stato di moto o quiete. Dato ciò questa vis insita potrebbe essere chiamata in modo più significativo vis inertiae, o forza di inattività. Ma un corpo esercita questa forza solo quando un'altra forza, impressa su di esso, cerca di cambiare la sua condizione; e l'esercizio di questa forza può essere considerato sia resistenza che impulso; è resistenza quando il corpo, cercando di mantenere il suo stato attuale, si oppone alla forza impressa; è impulso quando il corpo, non dando libero corso alla forza impressa da un altro cerca di cambiare lo stato di quest'ultimo. La resistenza è solitamente ascritta ai corpi in quiete e l'impulso a quelli in moto; ma moto e quiete, come vengono intesi comunemente, sono solo relativamente distinti; e d'altronde, quei corpi che comunemente sono considerati in quiete non lo sono sempre realmente. » (Isaac Newton, Philosophiae Naturalis Principia Mathematica)

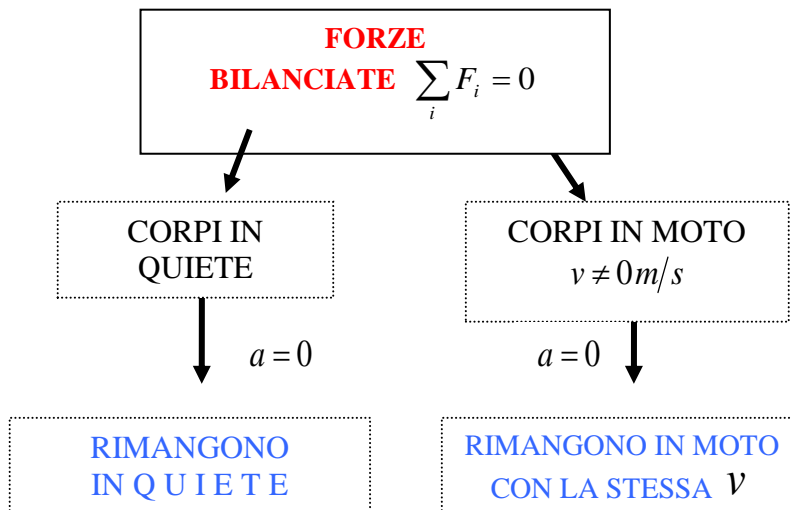
Enunciato del Primo Principio della dinamica

Se la forza totale applicata a un punto materiale in stato di quiete è uguale a zero, allora esso resterà inerte. Se la forza totale applicata a un punto materiale in stato di movimento è uguale a zero, allora esso continuerà a muoversi di moto rettilineo uniforme.

Allora se un corpo è fermo o si muove di moto rettilineo uniforme, vuol dire che non è soggetto a forze oppure che la risultante delle forze che agiscono su di esso è nulla. Il principio di inerzia vale quindi proprio per i sistemi di riferimento inerziali, definiti in realtà come l'ambito di validità del Principio di azione-reazione.

Infine va detto che il primo principio non è banalmente un caso particolare del secondo, ma ne chiarisce l'ambito di validità, ovvero i sistemi inerziali, in cui operano esclusivamente **forze reali** (azione o interazione tra due corpi). I principi, in questa formulazione non valgono nei sistemi accelerati (non inerziali) come i sistemi rotanti, perché in questi entrano in gioco forze apparenti.

Schema riassuntivo del primo principio della dinamica:



5.4 Secondo principio della dinamica o di Newton

Il **secondo principio della dinamica** (detto anche *legge di Newton*) viene espresso dalla **formula**:

$$a = \frac{F}{m} \quad (1)$$

dove a è l'**accelerazione**, F è la **forza totale applicata al corpo**, m è la **massa** del corpo. Ciò significa che un corpo, sottoposto all'azione di una forza F , subisce un'accelerazione a , ovvero una variazione di velocità, direttamente proporzionale all'intensità della forza e inversamente proporzionale al valore della massa del corpo, **supposto però** che non agiscano altre forze sul corpo.

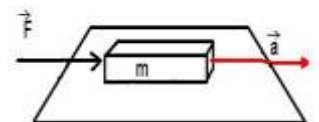


Figura 111 Seconda Legge di Newton



Laboratorio 12 Forze e Moto

FISSIAMO LE IDEE

Il Secondo Principio afferma che se la risultante delle forze è non nulla, il corpo si muoverà di moto rettilineo uniformemente accelerato.

In altre parole, un corpo che ha una massa maggiore rispetto ad un altro tenderà ad accelerare di meno, oppure ci vuole una forza di intensità maggiore per accelerarlo dello stesso valore di un corpo avente massa minore.

Il secondo principio della dinamica fornisce una spiegazione per il fatto che tutti i corpi cadono con una velocità, che è indipendente dalla loro massa. Simile risultato fu raggiunto da Galileo Galilei con lo studio del piano inclinato e l'esperimento della caduta dei gravi.

La (1) viene di solito rappresentata esplicitando la forza che può essere espressa anche in forma vettoriale:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (2)$$

Se sul corpo agiscono più forze, il secondo principio va espresso nel seguente modo:

$$\sum \vec{F}_i = m \cdot \vec{a}$$

dove le \vec{F}_i indicano le diverse forze agenti sul corpo.

La **forza peso**, già studiata nel capitolo 2, $P = m \cdot g$, non è altro che un caso particolare del secondo principio della dinamica, dove l'accelerazione considerata è quella gravitazionale dovuta alla forza gravitazionale che ciascun pianeta esercita sui corpi posti nelle proprie vicinanze.

Chiariremo in seguito tali aspetti quando tratteremo della gravitazione universale e delle leggi di Keplero.

5.5 Massa inerziale e massa gravitazionale

Massa inerziale

La **massa inerziale** m_i di un corpo viene definita nei Principia come **quantità di materia** legandola al principio di proporzionalità come costante di proporzionalità tra la forza applicata \vec{F} e l'accelerazione subita \vec{a} :

$$m_i = \frac{F}{a} \quad (3)$$

La massa inerziale si può in effetti ottenere *operativamente* misurando l'accelerazione del corpo sottoposto a una forza nota, essendo l'indice della tendenza di un corpo ad accelerare quando è sottoposto a una forza, cioè dell'inerzia del corpo. Il problema di utilizzare questa proprietà come **definizione** è che necessita del **concetto progressivo** di forza; per evitare il circolo vizioso generato da Newton che non specificava lo strumento per misurarla spesso la forza viene allora definita legandola all'allungamento di una molla che segua la legge di Hooke, definizione chiaramente insoddisfacente in quanto particolare e non generale. Inoltre questa definizione ha dato origine a diverse problematiche, legate in particolare al sistema di riferimento nel quale si effettua la misura: il concetto di inerzia, come quello di forza, fu infatti storicamente criticato da molti pensatori, tra i quali Berkeley, Ernst Mach, Percy Williams Bridgman e Max Jammer.

Massa gravitazionale

Consideriamo un corpo, per esempio una palla da tennis. Notiamo che se la palla è lasciata libera in aria, essa è attratta verso il basso da una forza, in prima approssimazione costante, chiamata forza peso. Tramite una bilancia a piatti si può notare che corpi diversi, in generale, sono attratti diversamente dalla forza peso, cioè *pesano* diversamente. La bilancia a piatti si può usare per dare una definizione operativa della massa gravitazionale: si assegna massa unitaria a un oggetto campione e gli altri oggetti hanno una massa pari al numero di campioni necessari a bilanciare i piatti.

Possiamo così parlare di **massa gravitazionale passiva** che rappresenta una grandezza fisica proporzionale all'interazione di ciascun corpo con il campo gravitazionale e **massa gravitazionale attiva** di un corpo è proporzionale all'intensità del campo gravitazionale da esso generata.

Per definizione, possiamo esprimere la forza peso \mathbf{P} come il prodotto della massa gravitazionale m_g per un vettore \mathbf{g} , chiamato *accelerazione di gravità*, dipendente dal luogo nel quale si effettua la misurazione e le cui unità di misura dipendono da quella della massa gravitazionale:

$$m_g = \frac{P}{g} \quad (4)$$

Equivalenza tra massa inerziale e gravitazionale

L'utilizzo di un piano inclinato permette, se l'attrito è trascurabile, di osservare meglio gli effetti dell'accelerazione gravitazionale.

Gli esperimenti hanno dimostrato che la massa inerziale e quella gravitazionale sono sempre proporzionali con la stessa costante di proporzionalità, entro la precisione delle misure effettuate sinora. I primi esperimenti furono condotti da Galileo; si dice comunemente che Galileo ottenne i suoi risultati lasciando cadere oggetti dalla torre di Pisa, ma ciò è probabilmente apocrifo: più verosimilmente studiò il moto di biglie tramite l'uso di piani inclinati.

Supponiamo di avere un oggetto di massa inerziale e gravitazionale rispettivamente m_i ed m_g . Se la forza peso è la sola forza agente sugli oggetti la seconda legge di Newton ci fornisce:

$$\vec{F} = m_i \vec{a} = m_g \vec{g} \quad (5)$$

da cui:

$$\vec{a} = \frac{m_g}{m_i} \vec{g} \quad (6)$$

Un esperimento di verifica dell'equivalenza tra le due definizioni di massa, una volta fissato il luogo (altrimenti potrebbe variare \mathbf{g}) potrebbe consistere, per esempio, nel misurare \mathbf{a} per diversi corpi cercando eventuali variazioni; in parole povere, verificare se due corpi qualsiasi, cadendo, accelerano nello stesso modo. Come detto sopra,

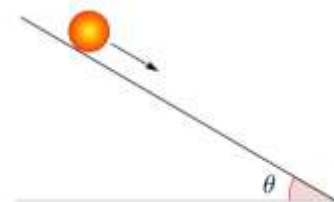


Figura 112 Massa inerziale e massa gravitazionale

sperimentalmente non si riscontrano violazioni dell'equivalenza, quindi scegliendo la stessa unità di misura per le due masse il **rapporto vale esattamente 1**:

$$\frac{m_g}{m_i} = 1 \quad (7)$$

per ogni corpo **non solo** massa gravitazionale e massa inerziale hanno le stesse unità di misura, ma sono anche espresse dallo stesso numero. Di conseguenza **g** è un'accelerazione, e viene chiamata infatti **accelerazione di gravità**.

5.6 Terzo principio della dinamica

È importante notare che nell'enunciazione del terzo principio, le forze si presentano sempre a coppie. Se un oggetto A esercita una forza **F** su un oggetto B, allora l'oggetto B eserciterà sull'oggetto A una forza **F uguale e contraria** o in termini più correnti:

“Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria”

è senza dubbio una delle frasi più celebrate della fisica e del parlare comune seppur non sempre riferibile al significato che essa assume in realmente nella fisica.

Va notata una riserva importante: **devono essere implicati due oggetti!** Esiste una grande quantità di situazioni in cui due forze uguali ed opposte agiscono sullo **stesso oggetto**, annullandosi a vicenda cosicché non si avrà alcuna accelerazione (o addirittura nessun moto). Questo non riguarda il terzo principio della dinamica, ma piuttosto un caso di **equilibrio** tra forze.

Alcuni esempi pratici sono:

Un oggetto pesante è appoggiato sul pavimento, attratto verso il basso dalla Terra con una forza mg . Tuttavia, l'oggetto non si muoverà in quella direzione, perché il pavimento lo impedisce. Ovviamente, il pavimento esercita sull'oggetto una forza uguale ed opposta $-mg$ (velocità $v=0$, accelerazione $a=0$).

Esempi

- Quando si spara un colpo di pistola, la forza del gas prodotto dalla combustione della polvere da sparo spinge in fuori il proiettile. Per la legge di Newton, la pistola rincula all'indietro.
- L'impugnatura di un grosso idrante ha delle maniglie che i pompieri devono afferrare saldamente, poiché il getto dell'acqua che fuoriesce spinge energicamente il tubo all'indietro.
- I getti rotanti per l'annaffiamento dei giardini funzionano sullo stesso principio. In modo simile, il moto in avanti di un razzo è dovuto alla reazione al violento getto di gas caldo che fuoriesce dalla sua parte posteriore.

- Chi ha familiarità con le piccole imbarcazioni sa bene che prima di saltare da una barca verso il molo di attracco, è opportuno legare prima la barca al molo e afferrare una presa sul molo prima di saltare. Altrimenti, quando saltate, la barca "magicamente" si allontana dal molo, facendovi fallire il salto, oppure spingendo la barca fuori dalla vostra portata. Tutto questo è dovuto alla terza legge di Newton: quando le gambe spingono il vostro corpo verso il molo, esse esercitano anche sulla barca una forza uguale e in verso opposto, e questa forza spinge via la barca dal molo.

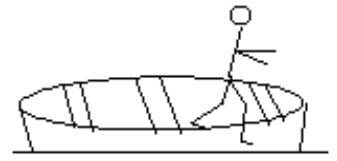


Figura 113 Moto di discesa da una barca

La bicicletta

Un esempio più sottile è fornito dalla **bicicletta**. È ben noto che stare in equilibrio su una bicicletta da fermo è quasi impossibile, mentre su una bicicletta in moto è piuttosto facile. **Perché?**

Diversi principi sono all'opera in questo caso. Supponete di sedervi su una bicicletta che stia ferma, e vi accorgete che si sta inclinando verso sinistra. Che cosa fate? La tendenza naturale è quella di inclinarvi verso **destra**, per controbilanciare quell'inclinazione mediante il vostro peso. Ma muovendo la parte superiore del vostro corpo verso destra, secondo la terza legge di Newton, state in realtà spingendo la bicicletta ad inclinarsi **ancora di più** verso sinistra. Forse dovrete inclinarvi verso sinistra per spingere la bicicletta indietro? Potrebbe funzionare per una frazione di secondo, ma a quel punto voi avete perso **del tutto** l'equilibrio. Non c'è modo! Su una bicicletta in movimento, l'equilibrio è mantenuto mediante un meccanismo completamente diverso. Ruotando leggermente il manubrio a destra o a sinistra, voi impartite una certa rotazione alla ruota anteriore - momento angolare - per ruotare la bicicletta attorno al suo asse maggiore, la direzione di marcia della bicicletta. In questo modo il ciclista può controbilanciare ogni tendenza della bicicletta a cadere da un lato o dall'altro, **senza** innescare il circolo vizioso di azione e reazione. Per scoraggiare i ladri, alcune biciclette montano un antifurto che blocca il manubrio in una posizione fissa. Se la posizione del manubrio è bloccata nella direzione in avanti, la bicicletta può essere condotta a mano da una persona che cammina, ma non può essere montata, poiché il ciclista non potrebbe mantenere l'equilibrio.



Figura 114 Bicicletta

5.7 La gravitazione universale

Il modulo della forza con cui interagiscono due corpi qualsiasi dotati di massa è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della reciproca distanza (o, più precisamente, dalla distanza tra i centri di massa dei due corpi). La direzione lungo cui agisce la forza è quella della retta congiungente i centri di massa. La forza gravitazionale è sempre attrattiva. La costante di gravitazione universale, indicata con G , esprime la proporzionalità tra le suddette grandezze ed è la medesima per qualsiasi coppia di corpi dotati di massa, ovunque si trovino nell'universo.

Avremo quindi:

$$F = G \frac{m \cdot M}{r^2} \quad (8)$$

dove $G = 6,67259 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$ (9)

mentre m e M rappresentano le masse dei corpi ed r la loro distanza.

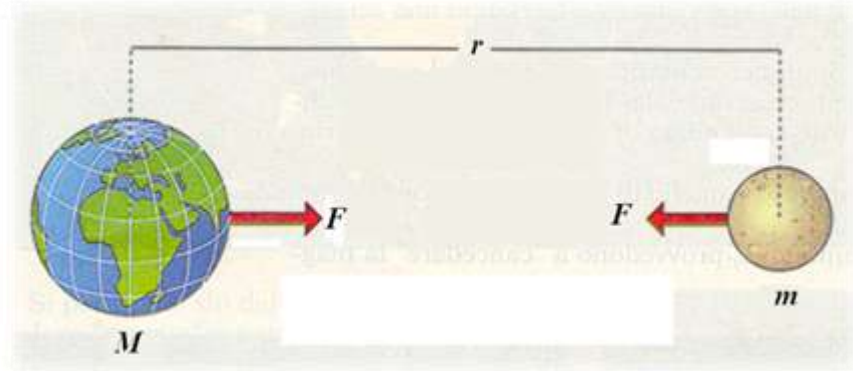


Figura 115 Gravitazione tra corpi

Osservazione 1

Se una data massa è soggetta all'azione gravitazionale di un certo numero di altre masse, la forza risultante su di essa è semplicemente il vettore risultante dalla somma delle singole forze. Questa proprietà della forza di gravità è chiamata principio di sovrapposizione. La sovrapposizione implica, ad esempio, che la forza gravitazionale risultante che agisce sui nostri corpi in questo momento sia il vettore somma delle forze esercitate dalla Terra, dalla Luna, dal Sole e così via.

Osservazione 2

La legge di gravitazione universale (o legge di Newton) solitamente è enunciata prendendo in considerazione corpi puntiformi. Ma come possiamo calcolare, allora, la forza gravitazionale per corpi estesi?

Il metodo generale è quello di suddividere l'oggetto in un insieme di elementi di massa talmente piccola da potersi considerare puntiforme (al limite di massa infinitesima) e poi utilizzare il principio di sovrapposizione per calcolare la forza gravitazionale risultante (normalmente utilizzando il calcolo integrale). Per un oggetto di forma qualsiasi tale calcolo si presenta, solitamente, piuttosto difficile. Per un corpo uniforme di forma sferica il risultato finale è particolarmente semplice. Newton (che inventò anche il metodo per effettuare questi calcoli) dimostrò che la forza risultante esercitata da una sfera su una massa puntiforme è la stessa che si avrebbe se tutta la massa della sfera fosse concentrata nel suo centro. La stessa cosa accade se si considerano due corpi sferici. Tale risultato risulta quindi particolarmente importante perché ci permette di trattare i pianeti (e a maggior ragione gli oggetti di dimensioni ordinarie) come se fossero oggetti puntiformi, semplificando notevolmente i calcoli necessari per descriverne il moto.

5.8 C.L.I.L. Project

The universal gravitation

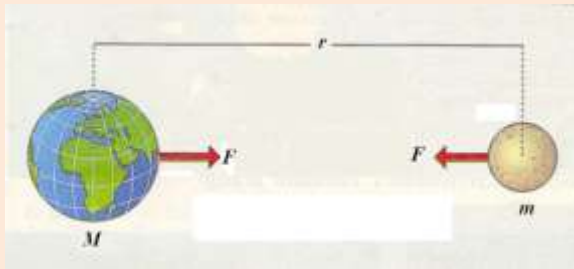
The form of the force with which two bodies interact with any mass is directly proportional to the product of their masses and inversely proportional to the square of the reciprocal distance (or, more precisely, the distance between the centers of mass of the two bodies). The direction along which the force acts is that of the straight line joining the centers of mass. The gravitational force is always attractive. The gravitational constant, denoted G , expresses the proportionality between these variables and is the same for any two massive bodies, wherever they are in the universe.

So we will have:

$$F = G \frac{m \cdot M}{r^2} \quad (8)$$

where $G = 6,67259 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$ (9)

while m and M are the masses of the bodies and r the distance between them.



Observation 1

If a given mass is subject to the gravitational action of a number of other masses, the resultant force on it is simply the vector resulting from the sum of the individual forces. This property of the force of gravity is called the principle of superposition. The overlap means, for example, that the resulting gravitational force acting on our bodies at this moment is the vector sum of the forces exerted by the Earth, the Moon, the Sun and so on.

Observation 2

The law of universal gravitation (or Newton's law) is usually laid down taking into consideration point-like bodies. But how can we calculate, then, the gravitational force for extended bodies? The general method is to divide the object into a set of items of mass so small as to be considered point-like (to the limit of infinitesimal mass) and then use the superposition principle to calculate the gravitational force resulting (normally using the integral calculus). For an object of any shape such calculation occurs, usually rather difficult. For a uniform body of spherical shape the end result is particularly

simple. Newton (who also invented the method for carrying out these calculations) demonstrated that the resulting force exerted by a ball on a point mass is the same as it would be if the entire mass of the sphere were concentrated in its center. The same thing happens if we consider two spherical bodies. This result is therefore particularly important because it allows us to treat the planets (and even more so the objects of ordinary dimensions) as if they were point-like objects, greatly simplifying the calculations necessary to describe the motion.

Dedotta quindi le legge di gravitazione universale, passiamo ad applicarla per dedurre in modo immediato alcune relazioni interessanti. Si osservi che, per non appesantire la notazione, le successive relazioni riguardanti grandezze vettoriali - velocità, accelerazione, . . . - verranno ricavate limitatamente ai moduli; direzione e verso saranno omesse, essendo immediatamente deducibili dalla legge di gravitazione universale o dalle informazioni elementari sulla traiettoria.

5.9 Accelerazione gravità

Consideriamo un corpo di massa m_c che si trovi sulla superficie di un pianeta di raggio R (supponiamo, per fissare le idee, che il pianeta sia la Terra). La forza agente su tale corpo è stata espressa, nello studio della dinamica, come forza peso, quantificata come prodotto della massa del corpo per l'accelerazione di gravità:

$$P = m_c \cdot g \quad (10)$$

Essendo tuttavia tale forza di natura gravitazionale, potrà parimenti essere scritta mediante la legge di gravitazione universale:

$$F = G \frac{m_c \cdot M}{R^2}$$

esprimibile a patto di conoscere il raggio R e la massa M del pianeta. Tali differenti relazioni possono essere uguagliate, visto che esprimono la medesima forza:

$$P = F \quad \text{da cui} \quad m_c \cdot g = G \frac{m_c \cdot M}{R^2}$$

Semplificando la massa del corpo a primo e a secondo membro otteniamo la relazione:

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2} \quad (11)$$

che ci permette di calcolare l'accelerazione di gravità sulla superficie di un qualsiasi pianeta, noti il raggio e la massa.

Da tale espressione, sulla superficie terrestre, a livello del mare, la g risulta:

$$g = \frac{G \cdot M}{R^2} = \frac{6,67259 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} Kg}{(6,38 \cdot 10^6 m)^2} =$$

$$= 9,80289 \frac{m}{s^2}$$

La relazione (11) può essere immediatamente generalizzata ad una relazione che esprima la variazione dell'accelerazione di gravità (e conseguentemente della forza peso) al variare dell'**altezza h dal suolo**:

$$g = \frac{G \cdot M}{(R + h)^2} \quad (12)$$

- Esempio

Calcolare l'accelerazione gravitazionale ad un'altezza di 6000 metri sopra il livello del mare.

Tenuto conto che $h = 6000m = 0,006 \cdot 10^6 m$ in modo da riportare allo stesso ordine di grandezza del raggio terrestre, otteniamo:

$$g_{6000} = \frac{G \cdot M}{(R + h)^2} = \frac{6,67259 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} Kg}{(6,38 \cdot 10^6 m + 0,006 \cdot 10^6 m)^2} =$$

$$= 9,7844 \frac{m}{s^2}$$

si può notare, già dalla formula (12), che maggiore sarà l'altitudine a cui misuriamo la g e minore sarà il suo valore misurato, fino a diventare piccolissimo a distanze enormi dal suolo terrestre

5.10 Le leggi di Keplero

Prima legge di Keplero

Afferma che:

L'orbita descritta da un pianeta è un'ellisse, di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.

Keplero propone un modello eliocentrico in cui non vengono più considerate le orbite circolari, le forme perfette, ed è supportato nel farlo dai dati sperimentali ottenuti da Tycho Brahe. Osserviamo che, poiché l'ellisse è una figura piana, i moti dei pianeti avvengono in un piano, detto piano orbitale. Per la Terra tale piano è detto **eclittica**. Nella figura a fianco è rappresentata un'orbita ellittica, con indicati i suoi pa-

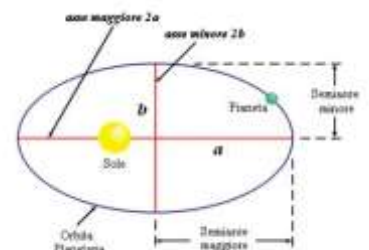
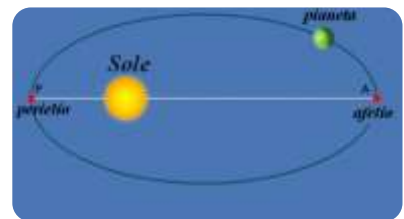


Figura 116 Moto dei pianeti intorno al Sole

parametri caratteristici: semiasse maggiore a , semiasse minore b , semidistanza focale c , eccentricità e .

Tra questi parametri esistono le relazioni seguenti:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{con eccentricità } e = \frac{c}{a}$$

I pianeti hanno in realtà eccentricità molto piccole: 0,0167 per la Terra, 0,0934 per Marte e 0,2482 per Plutone (pianeta nano).

La distanza dei pianeti dal Sole non è costante, ma varia da un massimo (**afelio**) ad un minimo (**perielio**).



Seconda legge di Keplero

Afferma che:

Il raggio vettore che unisce il centro del Sole con il centro del pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.

Le conseguenze di questa legge sono:

- La velocità **areolare** (area fratto tempo) è costante.
- La velocità orbitale non è costante, ma varia lungo l'orbita. Le due aree evidenziate nella figura qui a fianco sono infatti uguali e vengono quindi percorse nello stesso tempo. In prossimità del perielio, dove il raggio vettore è più corto che all'afelio, l'arco di ellipse è corrispondentemente più lungo. Ne segue quindi che la velocità orbitale è massima al perielio e minima all'afelio.

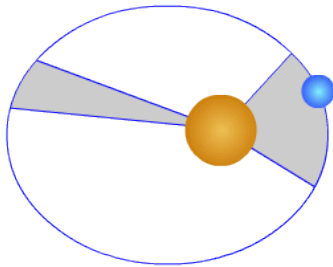


Figura 117 Afelio e Perielio



Terza legge di Keplero

Afferma che:

I quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti sono proporzionali ai cubi dei semiasse maggiori delle loro orbite.

Questa legge è valida anche per i satelliti che orbitano intorno ai pianeti e può essere espressa in forma matematica nel modo seguente:

$$K = \frac{T^2}{a^3} \quad (13)$$

dove a è il semiasse maggiore (o equivalentemente il raggio medio) dell'orbita, T il periodo di rivoluzione e K una costante (a volte detta di Keplero), che dipende dal corpo celeste attorno al quale avviene il moto di rivoluzione (ad esempio, se si considera il moto di rivoluzione dei pianeti del sistema solare attorno al Sole e misurando le distanze in Unità Astronomiche (UA) e il tempo in anni solari, K vale 1). Per un'orbita circolare la formula si riduce a:

$$T^2 = r^3 \cdot K \quad (14)$$

dove r è il raggio dell'orbita.

Si può dimostrare che
$$K = \frac{4\pi^2 \mu}{|k|} \quad (15)$$

con $k = G \cdot m_1 \cdot m_2$ per il caso gravitazionale, μ la massa ridotta (è la massa inerziale di un corpo).

| 3^a legge di Keplero | | | | |
|---|-------------------------|---|----------------------|-------------------------|
| T in anni, a in unità astronomiche; quindi $T^2 = a^3$ | | | | |
| Le discrepanze dipendono dalla scarsa precisione | | | | |
| Pianeta | Periodo T (anni) | Dist. a dal Sole (UA) | T² | a^3 |
| Mercurio | 0,241 | 0,387 | 0,05808 | 0,05796 |
| Venere | 0,616 | 0,723 | 0,37946 | 0,37793 |
| Terra | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Marte | 1,88 | 1,524 | 3,5344 | 3,5396 |
| Giove | 11,9 | 5,203 | 141,61 | 140,85 |
| Saturno | 29,5 | 9,539 | 870,25 | 867,98 |
| Urano | 84,0 | 19,191 | 7056 | 7068 |
| Nettuno | 165,0 | 30,071 | 27225 | 27192 |
| Plutone | 248,0 | 39,457 | 61504 | 61429 |

5.11 Moto di un satellite intorno alla Terra

Per studiare il moto di un satellite intorno alla Terra partiamo dal sempre presente secondo principio della dinamica:

$$F = m \cdot a$$

dove $F = G \cdot \frac{m \cdot M_r}{R^2}$ è la forza di gravità mentre $a = \frac{v^2}{R}$ è

l'accelerazione centripeta. M_r la massa della Terra, m la massa del satellite, R la distanza del satellite dal centro della Terra e v la velocità del satellite

Unendo insieme la parte dinamica e la parte cinematica otteniamo:

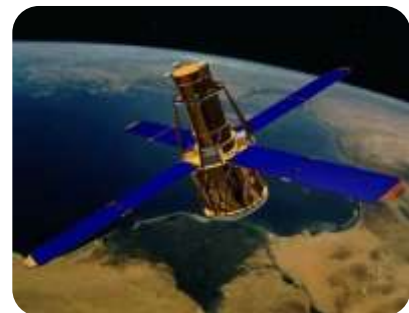


Figura 118 Satellite in orbita intorno alla Terra

$$G \cdot \frac{m \cdot M_r}{R^2} = m \frac{v^2}{R} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{G \cdot M_r}{R}} \quad (16)$$

Questa relazione vale qualunque sia il corpo celeste, quindi in generale la si scrive:

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}} \quad (17)$$

con M massa del corpo celeste ed R raggio dell'orbita del satellite.

Se si considera che $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T}$ la formula (17) si può scrivere come:

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{T} = \sqrt{\frac{G \cdot M}{R}} \quad \rightarrow \quad \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{T^2} = \frac{G \cdot M}{R}$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M} \quad (18)$$

Dove nella (18) se M è la massa del Sole si ottiene che:

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M_s} = \text{costante per tutti i pianeti.}$$

Abbiamo così ottenuto la famosa terza legge di Keplero partendo dall'equazione di gravitazione universale e dal secondo principio della dinamica.

Orbita geostazionaria

Si chiama orbita geostazionaria, un'orbita in cui il satellite che vi risiede ha un periodo di rivoluzione intorno al pianeta pari al periodo di rotazione del pianeta intorno al proprio asse. In questo modo il satellite sembra fermo rispetto ad un punto sulla Terra. Quest'orbita particolare è utilizzata dai satelliti per telecomunicazione o da quelli meteorologici, nel caso della Terra tale orbita si trova ad un'altezza fissa dal suolo.

Nel caso della Terra, il satellite deve percorrere l'orbita in un tempo uguale al **giorno siderale**, $T_{rot} = 23h 56min 4,09sec = 86164,09sec$, e considerato che la massa della Terra risulta $M = 5,98 \cdot 10^{24} Kg$, il raggio di tale orbita può essere determinato mediante la terza legge di Keplero:

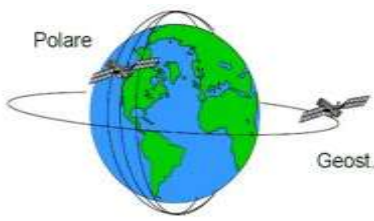


Figura 119 Satelliti geostazionari

$$r_{geos} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T_{rot}^2}{4 \cdot \pi^2}} = 42.168 \text{ Km} \quad (19)$$

- Esempio 1

Calcolare la velocità orbitale e il periodo del Telescopio Spaziale (HST), che compie orbite circolari intorno alla Terra alla quota di 600 km.

Svolgimento

Il raggio dell'orbita di HST si ottiene dalla somma del raggio terrestre e della quota di HST rispetto alla superficie terrestre:

$$r = 6378 \text{ km} + 600 \text{ km} = 6978 \text{ km} = 6,978 \cdot 10^6 \text{ m}$$

La velocità orbitale si ottiene tramite la formula data nella definizione

$$m \frac{v_c^2}{r} = \frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$$

dove M è la massa della Terra. Avremo

$$v_c = \frac{\sqrt{6,673 \cdot 10^{-11} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ Kg}}}{6,978 \cdot 10^6 \text{ m}} = 7562 \text{ m/s}$$

Il periodo si trova invertendo la formula:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_c} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6,978 \cdot 10^6 \text{ m}}{7592 \text{ m/s}} = 5795 \text{ s}$$

che trasformato in ore e minuti, risulta equivale a 1h 36m 35s.

Si può determinare il periodo orbitale anche senza bisogno di calcolare prima la velocità. Infatti, combinando la definizione di periodo con la formula della velocità orbitale, si ottiene:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \sqrt{r}}{\sqrt{G \cdot M}}$$

- Esempio 2

I satelliti geostazionari sono detti così perché sono fermi rispetto alla superficie terrestre; essi sono utilizzati per telecomunicazioni intercontinentali o per osservazioni meteorologiche. Per ottenere questo comportamento, i satelliti geostazionari si devono trovare in orbita equatoriale ad una distanza dalla Terra tale che il loro periodo orbitale risulti esattamente uguale al periodo di rotazione terrestre. Utilizzando la terza legge di Keplero, calcolare a quale distanza dalla Terra si devono trovare questi satelliti.

Soluzione

Come termine di confronto conviene usare la Luna, di cui si hanno dati precisi. Dalla terza legge di Keplero, indicando con il pedice s i dati relativi al satellite e con il pedice L quelli relativi alla Luna, si ha:

$$T_s^2 / T_L^2 = r_s^3 / r_L^3$$

$$T_s = 1 \text{ giorno} = 3600s \cdot 24h = 86.400s = 8,64 \cdot 10^4 s.$$

Poiché il periodo orbitale della Luna è 27d 7h 43m 11s e il raggio orbitale medio 384.000 km, si ha:

$$T_L = 27d \cdot 86.400s + 7h \cdot 3600s + 43m \cdot 60s + 11s \quad T_L = 2.360.591s = = 2,36 \cdot 10^6 s$$

$$r_L = 3,84 \cdot 10^8 m$$

Risolvendo quindi la formula di Keplero rispetto a r_s^3 , si ha:

$$r_s^3 = \frac{(8,64 \cdot 10^4 s)^2 \cdot (3,84 \cdot 10^8 m)^3}{(2,36 \cdot 10^6 s)^2} = 7,585 \cdot 10^{22} m^3$$

Per ottenere r_s bisogna ora estrarre la radice cubica del risultato:

$$r_s = \sqrt[3]{7,585 \cdot 10^{22} m^3} = 42,33 \cdot 10^6 m = 42.330 km$$

Questa è la distanza dei satelliti dal centro della Terra; la quota h rispetto alla superficie si ottiene sottraendo da questa distanza il raggio terrestre:

$$h = 42.330 km - 6378 km = 35.952 km$$



5.12 Campo gravitazionale

Una grandezza fisica si dice di **campo** se è definita in funzione dei punti di una zona di spazio fisico; i suoi valori dipendono unicamente dalla posizione del punto e variano con continuità (senza salti).

Le grandezze di campo, come alcune di quelle elencate (altitudine, pressione, temperatura) possono essere definite in una zona di spazio fisico e tabulate *in funzione del punto*, anche se il loro valore non è *stazionario*, ma varia nel tempo. Nelle cartine di previsioni del tempo, quelle caratterizzate dalla stessa pressione sono dette *isobare* e quelle con la stessa temperatura sono dette *isoterme*.

L'accelerazione di gravità \mathbf{g} è un vettore diretto verso il centro della Terra (o di un altro pianeta) e la sua intensità può essere calcolata punto per punto mediante la legge di gravitazione universale.

- Il vettore \mathbf{g} è definito in una zona di spazio fisico intorno a un pianeta;
- il modulo, la direzione e il verso di \mathbf{g} dipendono unicamente dalla posizione, cioè dalla distanza dal centro del pianeta;
- i valori di \mathbf{g} variano con continuità da un punto all'altro e, all'aumentare della distanza, diminuiscono rapidamente fino a divenire trascurabili.

UN COMMENTO

Quello di Campo è un concetto davvero importante, non sempre intuitivo ma che si manifesta sotto i nostri occhi in vari ambiti, dalla gravitazione alle cariche elettriche a quelle magnetiche. Siamo abituati a vedere l'effetto delle cose. Con il concetto di Campo siamo costretti a vedere prima che questi effetti ci siano.

L'accelerazione di gravità è una *grandezza di campo* e viene detta **campo gravitazionale**

| Corpo celeste | Campo gravitazionale sulla superficie (N/kg) |
|---------------|--|
| Terra | 9,8 |
| Luna | 1,6 |
| Mercurio | 2,6 |
| Venera | 8,5 |
| Marte | 3,7 |
| Giove | 26,0 |
| Sole | 273,4 |

Il concetto di **campo** è un superamento del concetto di **azione a distanza**. La forza gravitazionale attrattiva *a distanza* tra due corpi che non sono in contatto, ma che anzi possono essere lontanissimi nello spazio, non convinceva del tutto neppure lo stesso creatore della legge di gravitazione: secondo Newton la proprietà delle masse di *attrarsi a distanza* aveva in sé qualcosa di *magico* e inspiegabile.

Il concetto di azione a distanza implica una **azione istantanea della forza**: se la distanza tra gli oggetti aumenta, la forza tra di essi diminuisce istantaneamente. Noi oggi sappiamo che **nessuna informazione può trasferirsi istantaneamente**, cioè a *velocità infinita*. Se il Sole scomparisse in questo preciso istante, noi (sulla Terra) lo potremmo percepire solo tra 8 minuti circa (il tempo che impiega la luce a percorrere la distanza Sole-Terra).

Perché si abbia una forza *occorre la presenza di 2 corpi* perché essa è una *interazione tra corpi*, invece in un campo gravitazionale è creato dalla presenza anche di solo corpo dotato di massa.

C'è quindi una differenza sostanziale tra lo spazio vuoto e lo spazio *modificato* dalla presenza di una massa.

Una massa cambia le proprietà dello spazio in cui è immersa: chiamiamo **campo gravitazionale** la modificazione dello *spazio circostante una massa*.

5.3 Campi conservativi

Un campo si dice conservativo se il lavoro compiuto dalle forze in gioco, per spostare un corpo da un punto A ad un punto B non dipende dalla traiettoria.

Il Campo gravitazionale è un Campo Conservativo

Nella figura affianco è rappresentato un corpo che parte da un punto A e supponiamo percorra, in diversi momenti, lungo il piano inclinato, arrivando nel punto C per poi essere portato verso sinistra nel punto B, oppure possa cadere in caduta libera partendo da A giungendo direttamente in B. Se calcoliamo il lavoro L compiuto, lungo la verticale, sarà sempre del tipo $L = mgh$, indipendentemente se esso percorra il primo o il secondo percorso (ACB oppure AB).

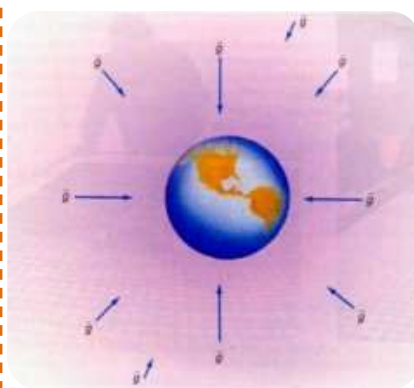


Figura 120 Campo gravitazionale

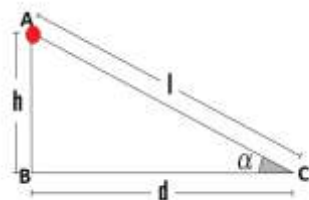


Figura 121 Campo gravitazionale conservativo

5.4 Sistemi di riferimento non inerziali

Un sistema di riferimento non inerziale è un sistema di riferimento nel quale la descrizione della dinamica dei corpi non vede verificato il principio di inerzia. Un sistema di riferimento non inerziale è cioè un sistema di riferimento in cui un corpo soggetto ad una risultante di forze nulla (di massa) si muove comunque di moto non uniforme (accelerato). Tutti e soli i sistemi di riferimento che si muovono di moto accelerato rispetto al sistema delle stelle fisse presentano questa particolarità e possono essere quindi definiti non inerziali.

5.5 Inerzia e forze apparenti

La descrizione di un evento di un sistema fisico può risultare differente se operata da sistemi di riferimento differenti. Le trasformazioni di Galileo stabiliscono le equazioni che permettono di passare dalla descrizione di un evento E da un sistema di riferimento inerziale S_1 ad un altro inerziale S_2 : le grandezze che cambiano da un sistema all'altro sono la posizione e la velocità dei singoli corpi, ma l'eventuale accelerazione di un corpo risulta essere un'invariante per tutti i sistemi di riferimento inerziali.

In particolare poi, tutti i sistemi di riferimento inerziali concordano nell'associare all'accelerazione di un corpo un'azione esterna, la forza F , legata alla massa m e all'accelerazione a del corpo dalla formula $F = m \cdot a$ (legame espresso dal secondo principio della dinamica).

Ora consideriamo un sistema di riferimento S_3 che non si muove di moto uniforme rispetto al sistema delle stelle fisse (che chiamiamo per semplicità S_0), e che quindi non rispetta la definizione di sistema di riferimento inerziale. Poniamo per semplicità che S_3 si muova di moto uniformemente accelerato rispetto a S_0 : per quanto detto precedentemente sull'invarianza di a per i sistemi inerziali, S_0 e qualunque altro sistema inerziale misureranno una stessa accelerazione a_3 per S_3 , e per il secondo principio della dinamica misureranno anche una stessa forza F_3 applicata a S_3 affinché esso possa veder variata la propria velocità.

- Esempio 3

Una macchina (S_3) sulla strada partendo da ferma aumenta costantemente la propria velocità; il valore di questa accelerazione (quindi la rapidità di variazione della velocità della macchina) sarà la stessa se misurata da un pedone fermo sul marciapiede (S_0) o da un ciclista (S_1) che pedala a velocità costante sul ciglio della strada, così come risulterà la stessa la forza esercitata dalla rotazione degli pneumatici per accelerare la macchina (calcolabile con $F = m \cdot a$, con m la massa macchina), che come a è invariante tra S_1 e S_0 benché il valore della velocità della macchina misurato dai due osservatori in ogni istante sia diverso.

Analizziamo ora il punto di vista di un osservatore solidale con S_3 ; per questo osservatore ogni corpo solidale con un sistema di riferimento inerziale apparirà accelerato di un'accelerazione pari a $-a_3$. Questa descrizione solidale con S_3 non è simmetrica a quelle solidali con S_0 e S_1 , perché l'osservatore "agganciato" a S_3 non è in grado di individuare

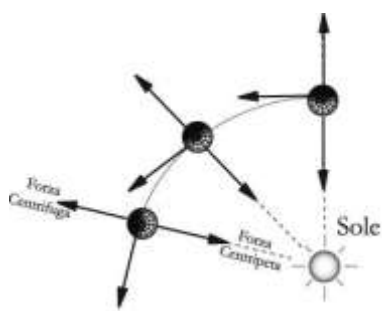


Figura 122 Forze centrifuga e centripeta cui sono soggetti i pianeti

alcuna forza che sia responsabile dell'accelerazione dei corpi suddetti: questo osservatore è dunque costretto a rinunciare al principio di inerzia e a constatare che oggetti e persone, se descritti dal proprio sistema di riferimento, possono subire variazioni della propria velocità senza che vi sia un'azione esterna a causarla.

- Esempio 4

l'autista della macchina è fermo rispetto a quest'ultima, ed è dunque solidale con il sistema di riferimento non inerziale da essa rappresentato. Se l'autista guarda fuori dal finestrino vedrà il pedone e il ciclista muoversi di moto accelerato in direzione che va dal parabrezza alla parte posteriore della macchina. Ma, mentre il pedone e il ciclista concordano nell'identificare un'agente che causa l'accelerazione della macchina (la forza d'attrito dell'asfalto generata dalla rotazione degli pneumatici), l'autista li vede accelerare "spontaneamente", senza cioè poter individuare una forza che sia causa del loro moto osservabile. L'autista stesso sente un'accelerazione sul proprio corpo: se sul cruscotto della macchina ci fossero delle biglie libere di muoversi, l'autista le vedrebbe accelerare verso la parte posteriore del veicolo.

Per "reintegrare" la legge d'inerzia l'osservatore nel sistema di riferimento non inerziale può fare appello alla cosiddetta **forza apparente**, postulare cioè ad hoc l'esistenza di una forza per ogni corpo accelerato, calcolata con la formula $F = m \cdot a$.

È un esempio di forza apparente la **forza centrifuga** F_c , percepita da un osservatore situato su di un sistema di riferimento in moto non rettilineo che osservi un corpo non solidale allo stesso.

Viene espressa dalla relazione:

$$F_c = m \frac{v^2}{r} \quad (20)$$

dove **m** rappresenta la massa rotante succitata in kg., **v** la velocità in m/sec e **r** il raggio della circonferenza lungo cui avviene il moto. È da notare infine come non abbia senso affermare che la descrizione della dinamica dei corpi in un sistema inerziale sia "più corretta" di quella effettuata in un sistema non inerziale: semplicemente, assumere la prospettiva del primo sistema è più funzionale ai fini di una rigorosa descrizione matematica dell'evento, perché permette di legare causalmente le forze con l'interazione con altri corpi (scambi di energia o di quantità di moto). Ciò non toglie che in taluni casi sia invece più pratico considerare la prospettiva non inerziale.

5.6 Forza apparente in un ascensore

Riferimento terra

Sulla persona agiscono la forza peso \mathbf{P} verso il basso e la reazione normale \mathbf{N} verso l'alto.

Rispetto alla Terra (*riferimento inerziale*) la persona *accelera verso l'alto*, quindi la risultante delle forze sulla persona **deve essere diretta verso l'alto**.

Poiché il peso della persona non varia (perché dipende dal campo gravitazionale terrestre), significa che la reazione normale del pavimento è *maggiore* del peso.

E' evidente che le forze \mathbf{P} e \mathbf{N} *non* costituiscono una coppia azione-reazione!

La persona, per il principio d'inerzia, tende a mantenere il proprio stato di quiete nonostante l'accelerazione verso l'alto dell'ascensore e preme sulla bilancia con una forza maggiore del suo peso (questa forza non è rappresentata nel diagramma perché applicata alla bilancia).

La bilancia risponde con la reazione normale \mathbf{N} che è quella che leggiamo e così *sembra* che la persona abbia aumentato il suo peso.

Riferimento ascensore

La persona è **in quiete** rispetto all'ascensore, ma la risultante della forza peso \mathbf{P} e della reazione normale \mathbf{N} non è nulla.

Questo, infatti, è un riferimento non inerziale in cui non vale il principio d'inerzia.

Per continuare ad usare le leggi della dinamica introduciamo una **forza fittizia \mathbf{I}** (o apparente o inerziale) verso il basso che renda nulla la risultante delle forze sulla persona.

Queste forze vengono introdotte solo nei riferimenti non inerziali.

La forza peso \mathbf{P} è dovuta all'interazione persona-Terra, la forza \mathbf{N} all'interazione persona-pavimento, ma a chi è dovuta la forza supplementare \mathbf{I} ?

Essa non deriva dall'interazione della persona con un altro corpo, ma dal fatto che ci troviamo in un riferimento accelerato.

Questa forza inerziale (reale e misurabile) si sente in modo molto evidente quando il riferimento accelera violentemente: si pensi alla partenza di un razzo o a certe attrazioni dei parchi di divertimento.

In un riferimento inerziale non esistono forze inerziali: tutte le forze dipendono solo dall'interazione di due corpi.

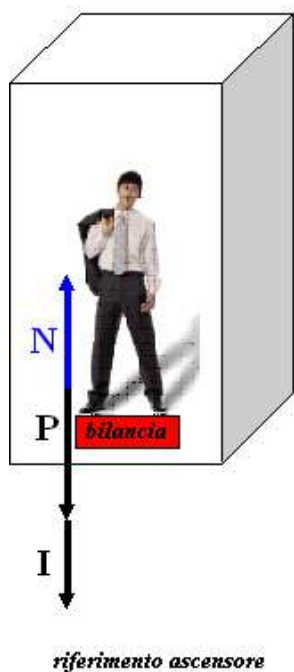
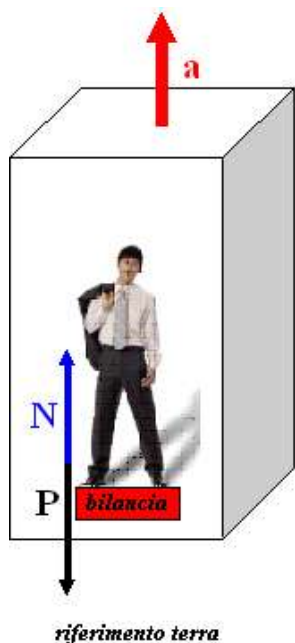


Figura 123 Forze apparenti in un ascensore

5.7 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questo capitolo abbiamo imparato ad interpretare le forze non come **cause del moto** ma come enti in grado di variare il moto, ovvero di produrre accelerazioni. Abbiamo così introdotto il concetto di **sistema di riferimento inerziale**, che rappresenta una schematizzazione di un sistema in cui tutte le forze eventualmente agenti tra di loro si bilanciano producendo una risultante nulla. Introdotto il primo principio della dinamica, detto anche **principio di inerzia** secondo cui in sistema in cui le forze sono bilanciate i corpi permangono nello stato in cui erano, ovvero fermi o di moto rettilineo uniforme. Di **qui la seconda legge di Newton** che lega due fondamentali grandezze come le forze e l'accelerazione tra di loro, indicando la lineare dipendenza avendo come costante la massa del corpo. Abbiamo così imparato a distinguere tra **massa inerziale**, misurata in presenza di una forza qualunque, e la **massa gravitazionale**, riferita essenzialmente alla forza peso e la loro sostanziale equivalenza. Di qui le implicazioni circa la **gravitazione uni-**

versale, sempre imputata a Newton, che descrive con che forze si attraggono due qualsiasi corpi posti ad una determinata distanza, verificando che il modulo di tale forza risulta direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Tale legge è alla base di tutte le argomentazioni circa **l'attrazione che i pianeti** esercitano sui corpi posti nelle loro vicinanze. Il terzo principio della dinamica, invece esprime una dipendenza di causa-effetto o meglio noto come **principio di azione e reazione**. **Keplero** con le tre leggi enunciate riferisce invece circa **l'orbita ellittica** che ciascun pianeta percorre intorno al Sole che occupa uno dei due fuochi, circa le **velocità areolari**, ovvero le aree percorse nell'unità di tempo, che si mantengono costanti per ciascun pianeta, per concludere con il **terzo principio** che afferma che per ciascun pianeta è costante il rapporto tra il quadrato del proprio periodo ed il cubo del proprio semiasse maggiore.

Abbiamo così introdotto il concetto di **campo**, ricordando che esso è un modo per indicare che le variazioni di una certa grandezza dipendono solo dalla posizione occupata e non dal corpo che vi si trova nelle vicinanze, così come avviene per i pianeti che esercitano, ciascuno, il proprio **campo gravita-**

zionale. Infine abbiamo parlato di **sistemi di riferimento non inerziali** in cui sostanzialmente non è valido il principio d'inerzia ed appaiono **forze apparenti** come la forza centrifuga nel moto rettilineo uniforme o quella che percepiamo su un ascensore in fase di salita.

5.8 Problemi proposti

Massa inerziale

- 1) La forza totale che agisce su un'automobile è di 540N verso destra. Se l'accelerazione dell'automobile è di $0,39 \text{ m/s}^2$ verso destra, qual è la sua massa inerziale?
- 2) Una forza F agisce su di un corpo la cui massa inerziale è 100 kg, esso accelera con $a = 12 \text{ m/s}^2$. Calcola l'intensità della forza F .
- 3) Un corpo è soggetto ad un'accelerazione costante il cui valore è $4,0 \text{ m/s}^2$, la forza che causa questa accelerazione è di intensità costante 10,0N. Quanto vale la massa inerziale del corpo? (L'accelerazione e la forza hanno stessa direzione e stesso verso).
- 4) E' maggiore l'accelerazione di un corpo di massa inerziale $m_1 = 26,5 \text{ kg}$ spinto da una forza di intensità $F_1 = 108\text{N}$, oppure quella di un corpo di massa inerziale $m_2 = 3,2 \text{ kg}$ spinto da una forza di intensità $F_2 = 12,7\text{N}$?
- 5) Due gruppi di canoisti si incontrano nel mezzo di un lago. Una persona della canoa 1, per separare le canoe, spinge la canoa 2 con una forza di 46 N. Se la massa inerziale della canoa 1, con i suoi occupanti, è $m_1 = 150 \text{ kg}$ e la massa inerziale della canoa 2, con i suoi occupanti, è $m_2 = 250 \text{ kg}$:
 - a) determina l'accelerazione di ogni canoa,
 - b) qual è la distanza tra le due canoe dopo 1,2 s dalla spinta?

Massa gravitazionale e Keplero

- 6) La massa ed il raggio della terra e della luna sono $M_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, $R_T = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$, $M_L = 7,36 \cdot 10^{22} \text{ kg}$, $R_L = 1,75 \cdot 10^6 \text{ m}$, rispettivamente. La loro distanza relativa è $d = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$. Spiegare come mai è necessario più carburante ad una navicella per viaggiare dalla terra alla luna che non per il viaggio di ritorno. Stimare la differenza.
- 7) Il campo gravitazionale sulla superficie della luna è circa un sesto di quello sulla superficie terrestre. Se il raggio della luna è circa un quarto di quello della terra, trovare il rapporto la densità media della luna e la densità media della terra.
- 8) Io, una piccola luna di Giove, ha un periodo orbitale di 1,77 giorni ed un raggio orbitale $r = 4,22 \cdot 10^5 \text{ km}$. Determinare la massa M di Giove.

Terzo principio della dinamica

- 9) Si vuole conferire alla gabbia di un montacarichi di massa $m=700\text{Kg}$ un'accelerazione, verso l'alto, di modulo $a=2,00\text{ m/s}^2$. quale deve essere il valore della massa M del contrappeso?
- 10) Due masse $m_1=3\text{Kg}$ e $m_2=5\text{Kg}$, collegate mediante una fune inestensibile, pendono da una carrucola e sono inizialmente in quiete.
- si calcoli l'accelerazione delle masse e la tensione della fune.
 - che cosa cambierebbe se fosse $m_1 > m_2$?
 - che cosa cambierebbe se i blocchi avessero una velocità iniziale?
 - si potrebbe ottenere l'accelerazione delle masse senza far intervenire la tensione della fune?
- 11) Un carrello si muove di moto rettilineo uniformemente accelerato. Sul carrello è appeso ad un sostegno un corpo di massa m . Sapendo che l'angolo che il filo forma con la verticale è di 30° , determina l'accelerazione del carrello. Analizza il problema sia dal punto di vista di un osservatore solidale con il carrello sia dal punto di vista di un osservatore in quiete.
- 12) Un'auto di massa uguale a 1000 kg parte accelerando con un'accelerazione pari a 3 m/s^2 .
In base al terzo principio della dinamica, quale sarà l'accelerazione cui è soggetta la terra (considera la massa della terra come $5.976 \cdot 10^{24}\text{ Kg}$)
- 13) Calcolare l'attrazione gravitazionale esistente tra un libro di $2,5\text{ kg}$ e un quaderno di 200 g appoggiati su un tavolo alla distanza di 30cm . Quale massa dovrebbe avere il libro per smuovere il quaderno, se il coefficiente d'attrito di questi oggetti con il tavolo è $0,5$?

5.9 In laboratorio

Principi della Dinamica

- 12) Verifica sperimentale del secondo principio utilizzando corpi cui venga applicata una forza sempre maggiore (F , $2F$, $3F$,...) ad un corpo di una data massa.

5.10 Approfondimento: KEPLER E LE SUE LEGGI

Una teoria scientifica si forma in seguito alla paziente raccolta di dati osservativi e di fatti sperimentati da cui emergono, attraverso un'ispirazione intuitiva, armonica e geniale, la verifica e il completamento di teorie precedenti. Un esempio classico del progredire della scienza, attraverso l'ispirazione, è il tentativo, effettuato quattro secoli fa da un matematico e astronomo tedesco, di scoprire, utilizzando i dati messi a disposizione dal suo maestro, le leggi che definiscono le orbite e i movimenti dei pianeti del sistema solare, confermando e arricchendo il modello cosmologico eliocentrico di Copernico.

UN INIZIO DIFFICILE

Il matematico e astronomo tedesco di cui si è fatto cenno è **Johannes Kepler** (italianizzato in Giovanni Keplero) il quale nacque il 27 dicembre 1571 a Weil der Stadt, un paesino alle porte di Stoccarda, nel Württemberg, mentre il suo maestro era l'astronomo danese Tycho Brahe (1546-1601).

IL SEGRETO DELLE ORBITE CELESTI

Durante la sua permanenza a Graz studiò alcuni testi fondamentali di astronomia fra cui il “*De Revolutionibus*” di Copernico nella versione originale e ne rimase affascinato. Per tutta la vita Keplero dimostrò una doppia personalità: da un lato si rivelò esperto matematico, rigoroso e scrupoloso nell'utilizzo dei dati di osservazione anche quando questi contrastavano con le sue idee, dall'altro lasciò affiorare in tutti i suoi lavori un aspetto mistico ed esoterico.

Nel 1595, sempre durante la sua permanenza a Graz, credette di aver finalmente scoperto il “segreto” dell'Universo che pubblicò nella sua prima opera, il “*Mysterium Cosmographicum*”, in cui espose il suo **originale modello** copernicano. Egli trovò una corrispondenza fra le orbite dei sei pianeti conosciuti a quel tempo e gli unici cinque poliedri regolari noti da secoli come “solidi platonici”, le cui facce sono formate dal medesimo poligono regolare (triangolo equilatero, quadrato e pentagono).

Interpose quindi l'ottaedro (8 triangoli) fra Mercurio e Venere, l'icosaedro (20 triangoli) fra Venere e Terra, il dodecaedro (12 pentagoni) fra Terra e Marte, il tetraedro (4 triangoli) fra Marte e Giove, e infine il cubo (6 quadrati) fra Giove e Saturno. Ognuno di questi solidi risultava iscritto in una sfera in modo tale che i vertici del poliedro toccavano l'orbita del pianeta più esterno mentre l'orbita del pianeta immediatamente più interno risultava tangente ai centri dei loro lati. I risultati di questo modello di grande suggestione estetica si accordavano in modo soddisfacente con le dimensioni planetarie orbitali trovate da Copernico. In altre parole, facendo una scelta conveniente dei poliedri, Keplero aveva ottenuto una serie di sfere i cui raggi risultavano press'a poco proporzionali alle distanze dei pianeti secondo i valori attribuiti loro da Copernico. Il tentativo non era dunque così stravagante come era apparso ad una prima lettura: anzi, quel modello permise più tardi, a Keplero stesso, di individuare un rapporto fra la



Figura 124 Giovanni Keplero
(27 dic 1571 - 15 nov 1630)

grandezza dell'orbita dei pianeti e la durata del periodo di rivoluzione, il quale verrà espresso in modo sintetico nella cosiddetta "terza legge". Frattanto la Controriforma costrinse i protestanti a fuggire dalla cattolica Stiria. Anche se la scuola era stata chiusa, Keplero poté rimanere in quel Paese ancora per un po' di tempo, protetto dagli stessi Gesuiti, i quali forse pensavano, così facendo, di poterlo convertire al cattolicesimo. Alla fine fu cacciato anch'egli dall'Austria e gli fu pure confiscato tutto il patrimonio: rimase pertanto senza lavoro e senza denaro. A salvarlo dalla miseria fu il suo *Mysterium* di cui aveva inviato numerose copie a molti colleghi, fra i quali Galileo Galilei e Tycho Brahe.

L'impegno di Keplero nel dare grande diffusione ad un'opera in cui credeva fermamente produsse i suoi frutti, perché il libro diventò presto oggetto di dibattito fra gli astronomi del tempo. Anche se non ebbe successo da un punto di vista scientifico, l'opera fece conoscere il suo autore presso i colleghi come matematico abilissimo ed astronomo provetto.

Tycho Brahe, pur criticando aspramente il modello di Universo formulato dallo studioso tedesco, lo volle conoscere di persona e lo invitò nel castello di Benatek nei pressi di Praga, dove da poco aveva trasferito tutta la preziosa strumentazione per l'osservazione del cielo contenuta nella Specola di Uraniborg. Nel 1576 il re di Danimarca, Federico II, gli aveva donato l'isolotto di Hveen vicino a Copenhagen dove l'astronomo danese aveva costruito vere e proprie cittadelle di astronomia. Alla morte di Federico II, il successore Cristiano IV, informato dai collaboratori di Brahe del suo comportamento tirannico, costrinse lo scienziato danese ad abbandonare l'isola. Egli trasferì quindi ogni cosa dalla Specola di Uraniborg al castello di Benatek vicino alla città di Praga, dove era stato anche nominato Matematico imperiale alla corte di Rodolfo II.

Keplero, che nel frattempo si era sposato con Barbara Müller (donna "semplice di spirito e grassa di corpo, stupida, sempre col broncio, solitaria e malinconica" come la giudicò egli stesso), si trasferì a Praga dove Brahe gli affidò il compito di studiare lo strano **moto retrogrado di Marte**. Fra i due scienziati non vi era accordo: Tycho temeva che Keplero, più giovane e acuto di lui, potesse offuscare la sua fama e quindi gli negava l'accesso agli strumenti e ai dati di osservazione di cui disponeva; Keplero, d'altra parte, osservava che Brahe non era in grado di fare uso appropriato del ricco bagaglio di osservazioni di cui pure il danese era in possesso. Ma il disaccordo riguardava soprattutto il fatto che il loro modello di Universo era diverso: Brahe immaginava la Terra ferma al centro del mondo mentre gli altri pianeti giravano intorno al Sole il quale a sua volta si muoveva intorno alla Terra (un misto fra sistema tolemaico e sistema copernicano), mentre Keplero era fermo sostenitore del sistema copernicano.

Lo scontro fra i due scienziati durò poco perché meno di un anno dopo l'arrivo a Praga di Keplero l'uomo gigantesco, dal ventre enorme e dal naso d'argento che sostituiva quello che aveva perduto da giovane in seguito ad una mutilazione, morì. Il collerico e dispotico Ticone finì miseramente i suoi giorni all'età di 55 anni in conseguenza dello

scoppio della vescica provocato da una eccessiva bevuta di birra nel corso di un pranzo al palazzo imperiale a cui aveva dovuto partecipare. Sul letto di morte affidò a Keplero il compito di completare le tavole dedicate all'imperatore Rodolfo e di dare con esse l'irrefutabile dimostrazione della validità del suo sistema planetario, cosa che il suo collaboratore non fece.

LE PRIME DUE LEGGI

Anche Keplero come tutti gli scienziati e i filosofi del tempo era convinto che i moti celesti dovessero essere circolari. Il compito che gli era stato affidato da Brahe, come si ricorderà, era quello di trovare la forma dell'orbita di Marte e logicamente all'inizio anch'egli pensò ad un circolo eventualmente arricchito o modificato con l'introduzione di altri circoli. Dopo molti tentativi l'astronomo tedesco si rese conto che i punti calcolati a tavolino, che rappresentavano le posizioni di Marte rispetto al Sole su un'orbita circolare, non coincidevano con le osservazioni e gli scarti erano ben maggiori degli errori sperimentali. Notò inoltre che il moto del pianeta era ben lungi dall'essere uniforme. Per ottenere un moto uniforme del pianeta si doveva introdurre il "punto equante" ossia spostare il Sole dal centro della circonferenza, ma anche in questo caso fra i punti della traiettoria del pianeta osservati, e quelli calcolati, persistevano delle differenze molto grandi.

Keplero pensò allora che le deviazioni potessero dipendere dal fatto di non aver collocato bene l'orbita della Terra. Decise quindi di spostarsi idealmente su Marte e di osservare da quella posizione il percorso compiuto dal nostro pianeta: scoprì allora che neppure l'orbita da essa percorsa poteva essere considerata circolare. Quando infine cercò di immaginare come sarebbe apparso il moto di Marte osservandolo dal Sole, trovò la soluzione del problema: l'orbita percorsa dal pianeta intorno all'astro centrale è un'ellisse.

Con il vantaggio che ci viene dal considerare le cose a posteriori bisogna notare che le orbite percorse dai pianeti sono tutte quasi circolari ad eccezione di quella di Mercurio, che però è difficile da osservare, e di Marte: esse sono chiaramente ellittiche. Fu un evento favorevole dunque quello di avere fatto le misurazioni su Marte il cui asse maggiore dell'orbita differisce comunque di solo lo 0,5% dall'asse minore: sarebbe ad esempio difficile, guardando una figura in scala, notare la forma ellittica dell'orbita di quel pianeta. E in effetti le prime leggi vennero riferite esclusivamente a Marte.

Nel 1609 Keplero presentò l'opera che rese immortale il suo nome: *Astronomia Nova* nella quale venivano presentate le prime due leggi oggi note come "**leggi di Keplero**". La prima recita così: *L'orbita percorsa dal pianeta intorno al Sole è un'ellisse in cui il Sole occupa uno dei due fuochi*. Essa viene definita "prima legge di Keplero" ma in realtà è stata individuata per seconda, nel 1605.

Keplero non seppe dare giustificazione di questa come delle altre due sue leggi. A ciò pensò infatti Newton il quale nel 1687 dimostrò che qualsiasi corpo che si muova intorno ad un altro deve descrivere una "sezione conica". Prima di procedere vediamo di spiegare il significato di questo termine.

Se immaginiamo un cono retto ossia un solido che ha per base una circonferenza e il vertice si trova sulla perpendicolare al piano della circonferenza condotta per il suo centro, osserviamo che i piani che lo tagliano in svariate direzioni formano diverse curve che vengono dette sezioni coniche o semplicemente *coniche*. Un piano obliquo secondo un determinato angolo darà come intersezione un'ellisse; se il piano è perpendicolare all'asse non si formerà un'ellisse ma una circonferenza. Altre curve che si possono ottenere sezionando il cono sono la parabola e l'iperbole.

Ritorniamo ora all'ellisse. All'interno di questa figura esistono due punti notevoli detti fuochi (il termine di "fuoco dell'ellisse" come quelli di "satellite" per definire un corpo che gira intorno ad un pianeta e di "inerzia" sono stati proposti dallo stesso Keplero). Abbiamo già visto una prima definizione di ellisse. Un'altra definizione di quella figura piana tiene conto dei fuochi: "ellisse è la curva costituita dagli infiniti punti le cui distanze dai fuochi hanno somma costante". Se si fissano i capi di una cordicella ai due fuochi, girando tutto intorno con la punta di una matita che si appoggi alla cordicella, si ottiene sulla carta per l'appunto un'ellisse. Il centro dell'ellisse si trova alla metà del segmento che unisce i fuochi: più la curva è appiattita e più i fuochi sono lontani fra loro e dal centro. Il rapporto fra la distanza che separa i fuochi e il diametro maggiore dell'ellisse viene detta eccentricità. Date queste definizioni si può descrivere la circonferenza come una particolare ellisse che ha i fuochi coincidenti e quindi eccentricità nulla.

Newton dimostrò quindi che la traiettoria di un corpo qualsiasi che gira intorno ad un altro sarà un'ellisse se la velocità è al di sotto di un certo limite in relazione alla forza di attrazione. La legge è quindi di carattere generale e non vale solo per Marte o per i pianeti del sistema solare.

La seconda legge di Keplero, che è stata scoperta nel 1602, quindi, come abbiamo detto, prima di quella che va sotto il nome di "prima legge", può essere espressa nel modo seguente: *Le aree descritte dal raggio vettore che congiunge il pianeta al Sole in tempi uguali sono uguali*. Un pianeta non si muove pertanto lungo una traiettoria ellittica a velocità uniforme, ma è più veloce in prossimità del Sole e più lento quando ne è lontano.

GLI ANNI TORMENTATI E LA TERZA LEGGE

Il 1611 fu per Keplero un anno tristissimo: con esso iniziarono le sue sventure in uno scenario di guerre civili e imperversare di malattie. In quell'anno morirono la moglie Barbara, che aveva già perso il lume della ragione, per aver contratto il tifo e la seguì il figlio prediletto Friedrich di appena sette anni contagiato dal vaiolo portato dai mercenari che combattevano in quella che verrà chiamata "la guerra dei Trent'anni". Il 20 gennaio dell'anno seguente morì anche il suo protettore, l'imperatore Rodolfo II e qualche anno più tardi venne assassinato il suo migliore amico, l'astronomo olandese David Fabricius.

Frattanto Keplero, accogliendo l'invito della nobiltà protestante di Linz, si era trasferito in quella città. Ad alleviare la depressione di

quei giorni inquieti e tristi vi fu il matrimonio con una domestica ventiquattrenne che gli dette sette figli di cui quattro rimasero in vita. La scelta della seconda moglie fu fatta con metodo quasi scientifico, poiché essa fu selezionata fra una decina di pretendenti in relazione al carattere, allo stato di salute, alla reputazione della famiglia e naturalmente all'età. Dopo il trauma del primo matrimonio, celebrato sotto un "*calamitoso coelo*" ovvero con una disposizione astrologica sfavorevole, con una donna che aveva ventitrè anni ed era già due volte vedova e che morì pazza all'età di 37, le precauzioni da prendere in una seconda esperienza del genere non dovettero sembrargli mai troppe.

Ma la serenità seguente al secondo matrimonio durò poco perché nel 1615 la madre di Keplero fu accusata di stregoneria. Il figlio corse in soccorso della anziana donna ma lo fece con tale imperizia che mancò poco che la vedesse finire sul rogo. Presentò istanze su istanze al tribunale in sua difesa spendendo tutto quello che possedeva e, dopo un anno di carcere, nel 1621 la madre fu scagionata e liberata, ma pochi mesi dopo morì.

Fra il 1612 e il 1622 videro la luce opere fondamentali a cominciare dall'*Harmonices Mundi* che contiene la cosiddetta "terza legge di Keplero" la quale può essere espressa nei seguenti termini: *I quadrati dei periodi di rivoluzione di un qualunque pianeta intorno al Sole sono proporzionali ai cubi degli assi maggiori delle loro orbite.*

Questa legge suggerisce il fatto che i pianeti più lontani impiegano più tempo per completare il giro intorno al Sole e non tanto perché devono compiere un percorso più lungo, ma soprattutto perché viaggiano più lentamente di quelli più vicini. Newton dimostrò la validità di questa legge con le sue leggi del moto e della forza di gravitazione universale la quale afferma che più un pianeta sta lontano dal Sole tanto meno è attratto da questo e tanto minore risulta pure la forza che si oppone all'attrazione. La componente di queste due forze determina la spinta che genera la velocità del pianeta in orbita.

Il libro uscì nel 1619, quindi dieci anni dopo di quello in cui erano scritte le altre due leggi. In esso Keplero si ispira alla dottrina platonica dell'armonia celeste e quindi immagina un mondo costituito sulla base di una legge armoniosa e simmetrica. Egli cercò di provare che i rapporti fra le velocità massime e minime dei pianeti in rotazione intorno al Sole sono espressi da numeri interi, come quelli che caratterizzano i suoni. Ai pianeti viene anche attribuito un canto in cui Saturno e Giove hanno la parte di basso, Marte di tenore, Venere e Terra di contralto e Mercurio di soprano. Il fatto che noi non sentiamo questi suoni dipende dalla posizione: essi si sarebbero sentiti chiaramente solo stando sul Sole.

Sempre nel 1619 viene pubblicato il *De cometis libelli tres* in cui Keplero fornisce un resoconto della cometa apparsa nel 1607, che diventerà famosa come cometa di Halley e di altre tre comparse proprio nell'anno dello scoppio della guerra dei Trent'anni: un fenomeno che costituisce pretesto al grande pubblico di giustificare la comparsa delle comete come messaggere di sventure e di rivolgimenti sociali e politici. Come Brahe anche Keplero ritiene che le comete siano oggetti celesti e non esalazioni terrestri (come allora si credeva) che attraver-

sino indisturbate le sfere di cristallo sulle quali sarebbero incastonati i pianeti! Egli formula anche l'ipotesi originale ma molto convincente che le code delle comete che si presentano sempre rivolte in direzione opposta al Sole siano prodotte dai raggi dell'astro che, penetrando nel corpo della cometa, ne spingano lontano le particelle che la costituiscono.

Un'altra opera che merita menzione è *Epitome astronomiae copernicanae* in cui vengono generalizzate le prime due leggi che in un primo tempo erano state formulate solo per Marte ed estese, oltre che agli altri pianeti, anche al moto della Luna intorno alla Terra. In esso viene anche fornito il sistema di calcolo per la previsione delle eclissi solari e lunari.

UNA FINE TRISTE E MISERA

Dopo la morte dell'imperatore Mattia il successore, Ferdinando II, privo di interessi astronomici, trascurò di occuparsi del lavoro di Keplero il quale tuttavia mantenne il posto di Matematico imperiale ma dovette subire l'oppressione della Chiesa cattolica per cui fu costretto ad allontanarsi da Linz. Dopo aver sistemato la famiglia a Ratisbona si trasferì a Ulm per curare di persona la stampa delle *Tabulae Rudolphinae*, le tabelle attraverso le quali era possibile calcolare le effemeridi, cioè le future o passate posizioni di un certo oggetto celeste in una particolare data. Esse apparvero in una elegante edizione nel 1627 e Keplero in persona volle presentare l'opera all'imperatore dal quale ricevette l'offerta di un'alta posizione a Praga purché si fosse convertito al cattolicesimo.

Keplero naturalmente respinse sdegnato la proposta ma poi fu costretto ad allontanarsi da quella città. Proprio in quei giorni nella città si stava festeggiando il valoroso condottiero Albrecht von Wallenstein il quale aveva acquistato fama per essere riuscito a cacciare gli invasori danesi fuori dai confini dell'Impero. L'eroe già una ventina d'anni prima aveva conosciuto ed apprezzato Keplero quale provetto astrologo. In quella occasione anonimamente, attraverso un amico comune, si era anche fatto fare un oroscopo dal quale rimase particolarmente impressionato. Esso conteneva anche la previsione della sua morte per l'anno 1634: in effetti, per pura coincidenza (in realtà di queste coincidenze negli oroscopi di Keplero se ne verificarono molte), Wallenstein morì assassinato il 25 febbraio 1634.

Nel frattempo al generale Wallenstein era stato donato il ducato di Friedland e Sagan (regioni della Slesia) dove Keplero era stato invitato a risiedere a spese del duca. Ma nemmeno in quel luogo l'astronomo tedesco si sentiva sicuro e dopo qualche tempo si allontanò per andare a sistemare personalmente i suoi affari. Dopo essere passato per Ratisbona dove andò a salutare la sua famiglia si diresse a Linz e quindi di nuovo a Praga dove lo aveva preceduto la sua famiglia.

Gli ultimi anni di vita furono contrassegnati da crescente inquietudine generata da avversità che non riusciva più a gestire e da malattie e febbri continue. Dopo qualche esitazione decise di tornare a Ratisbona dove si era insediato l'imperatore Ferdinando II per cercare di ottenere

l'ingente somma di denaro che gli era stata promessa, ma mai versata. Arrivò in quella città febbricitante e pochi giorni dopo morì. Era il 15 novembre 1630.

Con Keplero scompare uno dei più grandi astronomi di tutti i tempi. Le tre leggi sul moto dei pianeti e le *Tabulae Rudolphinae*, che costituiscono l'opera più importante dell'astronomia pratica in quanto rappresenta un testo fondamentale per astronomi, compilatori di calendari e navigatori, sono lavori destinati a rimanere indelebili nel tempo.

Negli ultimi anni di vita l'astronomo tedesco si dedicò al suo libro prediletto, il *Somnium*, la cui pubblicazione, postuma, fu curata da Ludwig Kepler, figlio della prima moglie. Si tratta di un lavoro allegorico (oggi lo collocheremmo fra i romanzi di fantascienza) in cui l'autore narra di un viaggio sulla Luna fatto in sogno e vi descrive i paesaggi, i movimenti, la visione della Terra e del cielo quali egli immagina di avere contemplato da quel luogo.

La sua tomba, cancellata dal passaggio degli eserciti, non fu più ritrovata. Rimangono le sue opere spesso infarcite da speculazioni mistiche e fantastiche, in cui tuttavia lo scienziato dimostra che le cause fisiche dei fenomeni naturali possono essere espresse numericamente e geometricamente. Il suo capolavoro in assoluto è rappresentato dalle tre leggi che descrivono il moto dei pianeti e che costituiscono la base della moderna fisica celeste; esse sono applicabili sia ai moti dei pianeti del sistema solare sia alle evoluzioni di stelle in sistemi binari lontani da noi migliaia di anni luce. Anche nel giorno della sua morte non poteva mancare un segno dei cieli: fu registrata infatti un'eclissi di Luna.

6. Lavoro, Energia e Leggi di Conservazione

Prerequisiti

I vettori. Le forze elastiche. Concetto di velocità. Secondo principio della dinamica. Leggi di proporzionalità.

Sapere

Conoscere il significato della quantità di moto e della sua conservazione negli urti. Conoscere il concetto di lavoro di una forza e la potenza. Sapere che esistono diverse forme di energia, cinetica e potenziale e le leggi di conservazione con forze conservative e non conservative.

Saper fare

Saper calcolare la quantità di moto di un corpo e dell'eventuale trasmissione in urti elastici ed anelastici. Saper calcolare il lavoro di una forza tenendo conto che non tutta può contribuire a compiere lavoro m solo la componente lungo il moto. Saper calcolare, nei diversi moti quale l'energia cinetica e quale quella potenziale, laddove si tratti con forze elastiche o forze gravitazionali. Saper applicare i principi di conservazione dell'energia anche in presenza di forze dissipative come gli attriti.

6.1 Quantità di moto e impulso

L'equazione del moto di un punto materiale di massa M , soggetto ad una forza \vec{F} , si scrive:

$$M \cdot \vec{a} = \vec{F} \quad (1)$$

Limitiamoci per la nostra discussione, ad un moto in una sola dimensione. Avremo, allora, una forza che agisce sul punto materiale, per esempio, lungo l'asse positivo delle x . Lungo tale asse il punto materiale subirà delle variazioni di velocità. Se la forza non varia troppo rapidamente, si può scegliere un intervallo di tempo Δt , sufficientemente piccolo, in modo da ritenere praticamente costante la forza agente durante l'intervallo di tempo Δt scelto. L'equazione del moto del punto materiale, nell'intervallo considerato, può scriversi,

$$M \frac{\Delta v}{\Delta t} = F$$

ovvero

$$M \cdot \Delta v = F \cdot \Delta t \quad (2)$$

Esplicitando l'operatore $\Delta v = v(t + \Delta t) - v(t)$ avremo:

$$M \cdot [v(t + \Delta t) - v(t)] = F \cdot \Delta t \quad (3)$$

Si definisce quantità di moto il prodotto della massa per la velocità del corpo:

$$q = M \cdot v \quad (4)$$

Chiameremo inoltre, variazione della quantità di moto, durante l'intervallo di tempo Δt , la quantità

$$\Delta q = M \cdot v(t + \Delta t) - M \cdot v(t) = q(t + \Delta t) - q(t) \quad (5)$$

Allora, l'equazione fondamentale del moto del punto materiale, durante l'intervallo di tempo Δt , può anche scriversi :

$$\Delta q = F \cdot \Delta t \quad (6)$$

Quest'ultima equazione è una forma alternativa dell'equazione fondamentale, nell'intervallo di tempo considerato.

La quantità

$$F \cdot \Delta t \quad (7)$$

è detta **impulso della forza** F (costante) durante l'intervallo di tempo Δt e si misura in $[N \cdot s]$ (Newton per secondo).

YouTube



RICORDA

la Quantità di Moto è un concetto essenziale negli urti. Rappresenta ciò che si trasmette durante l'urto da un corpo all'altro.

Ricorda che la Quantità di Moto totale di un sistema in movimento si conserva sempre, come avrai modo di vedere nei prossimi paragrafi, indipendentemente se siamo in presenza di sistemi inerziali o meno.

6.2 Teorema dell'impulso



La variazione della quantità di moto di un punto materiale, durante l'intervallo di tempo considerato, è uguale all'impulso della forza agente sul punto materiale, durante lo stesso intervallo di tempo.

Detto I l'impulso, diremo che:

$$\Delta q = I \quad (8)$$

dove I , come anzidetto, è pari a $F \cdot \Delta t$.

• Esempio 1

Una palla di massa, $M=133g$, viene lasciata cadere da un'altezza di $22m$ con velocità nulla ($v_i = 0$). Urta il suolo e risale sino all'altezza di $7m$. Se l'urto dura $2ms$ (10^{-3} secondi) qual è il modulo della forza media esercitata dal suolo sulla palla?

ti

$$M = 133g = 0,133Kg$$

$$H = 22m$$

$$\Delta t = 2 \cdot 10^{-3} s$$

$$h = 7m$$

dove h è l'altezza di risalita. Dalla (2) abbiamo:

$$F \cdot \Delta t = M \cdot v_2 - Mv_1 \quad (a)$$

dove v_1 è la velocità con cui arriva a terra (negativa se prendiamo l'asse positivo quello delle y verso l'alto), mentre

v_2 è la velocità con cui riparte da terra (positiva)

dalla (26) dell'unità 4 sappiamo che $v_f^2 = v_i^2 + 2 \cdot a \cdot s$, dove in questo caso l'accelerazione è quella gravitazionale g , lo spazio percorso è una volta H (in discesa) e l'altra h (in risalita) e $v_i = 0$ come chiarito nel problema (il corpo parte da fermo)

avremo quindi:

$$v_1^2 = 2 \cdot g \cdot H \quad \text{e} \quad v_2^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad \text{da cui}$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \sqrt{2 \cdot 9,81m/s^2 \cdot 22m} = -20,77 \frac{m}{s}$$

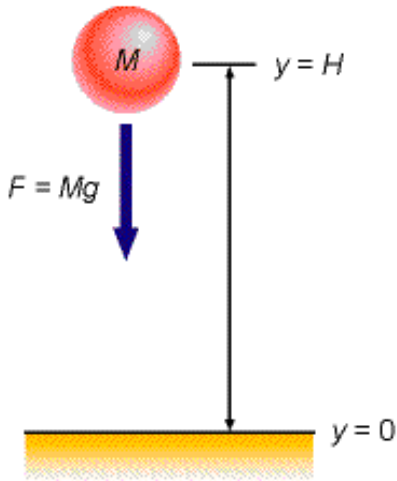
$$\text{e} \quad v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81m/s^2 \cdot 7m} = +11,71 \frac{m}{s}$$

sostituendo nella (a) otteniamo:

$$F \cdot 2 \cdot 10^{-3} s = 0,133Kg \cdot 11,71 \frac{m}{s} - 0,133Kg \cdot (-20,77 \frac{m}{s}) = 4,32N \cdot s$$

esplicitando la F , otterremo:

$$F = \frac{4,32N \cdot s}{2 \cdot 10^{-3} s} = 2160N$$



Osservazione

Potete immaginare il danno che può causare un oggetto di soli 133g lasciato cadere da un'altezza di 22m. 2160 Newton sono davvero tanti!

• **Esempio 2**

Utilizzando il teorema dell'impulso calcola quanto tempo impiega a fermarsi un corpo di massa 2 kg che affronta un piano inclinato di 30° rispetto all'orizzontale con una velocità iniziale di 16 m/s.

DATI

$$M = 2Kg$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$v_i = 16m/s$$

$$v_f = 0$$

Usando il teorema dell'impulso avremo: $F \cdot \Delta t = M \cdot v_f - Mv_i$ (b)

F è la forza che agisce, che in questo caso corrisponde alla componente parallela della forza di gravità ($F_{//}$) che sul piano inclinato è pari a:

$$F_{//} = -M \cdot g \cdot \text{sen} \alpha = 2Kg \cdot 9,81m/s^2 \cdot \text{sen}30^\circ$$

$$F_{//} = -2 \cdot 9,81 \cdot \frac{1}{2} N = -9,81N$$

Questa è la forza frenante verso il basso.

Sostituendo nella (b) otteniamo $-9,81N \cdot t = 0 - 2Kg \cdot 16m/s$ da cui

$$t = \frac{-32kg \frac{m}{s}}{-9,81Kg \frac{m}{s^2}} = 3,37s$$

6.3 Sistema isolato

In fisica un sistema isolato è un sistema che non interagisce in alcun modo con l'ambiente circostante, ovvero che non scambia massa né lavoro.

Un sistema isolato è quindi un sistema dove idealmente non vi sono forze che agiscono sui corpi, quindi non essendoci forze non potranno esserci lavori compiuti.

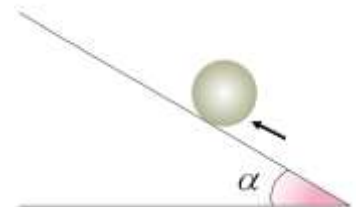


Figura 125 Sistema fisico

6.4 Principio di conservazione della quantità di moto

La quantità di moto di un sistema isolato è costante nel tempo.

Il principio deriva dall'ipotesi di omogeneità dello spazio.

La condizione di “**isolatezza**” si esprime nel fatto che sia nulla la risultante delle forze esterne.

Questa affermazione è utile nei casi in cui si abbiano sistemi in cui agiscono unicamente le forze interne, come avviene ad esempio in molti fenomeni di urto o esplosione. Più in generale, ci permette di considerare la quantità di moto di un sistema come una costante del moto.

Per la *legge di azione e reazione*, durante la **collisione** tra due corpi agiscono due forze uguali e contrarie: ognuno dei due corpi imprime una forza all'altro. Questo significa che *i due impulsi sono opposti* e che ognuno dei due corpi subisce una *variazione di quantità di moto uguale e contraria a quella dell'altro*:

$$\Delta q_1 = -\Delta q_2 \quad (9)$$

Consideriamo il sistema formato dai due oggetti entrati in collisione: se le uniche forze agenti sono quelle *interne* dovute all'urto (cioè se il sistema è *isolato*), si ha:

$$\Delta q_{tot} = \Delta q_1 + \Delta q_2 = \Delta q_1 + (-\Delta q_1) = 0 \quad (9A)$$

cioè

$$q_{tot} = \text{costante} \quad (10)$$

Naturalmente, se il sistema non è isolato, cioè se la risultante delle forze *esterne* (attrito, una spinta, la forza di gravità ...) non è nulla, la quantità di moto totale varia. Nel caso degli urti, però, le forze impulsive che si esercitano durante la collisione sono in genere così intense da rendere trascurabili eventuali forze esterne non equilibrate.

Quindi si può affermare che il **principio di conservazione della quantità di moto può essere sempre applicato agli urti, anche se il sistema non è isolato**, purché si consideri l'istante *immediatamente precedente* e quello *immediatamente successivo* all'urto.

In qualsiasi urto tra oggetti, la quantità di moto si conserva.

Se una biglia che rotola va a colpire una biglia ferma, ma libera di muoversi, la prima biglia trasmette parte della sua quantità di moto alla seconda. La quantità totale di moto delle due biglie dopo l'urto è uguale a quella della prima biglia prima dell'urto.

La quantità di moto si conserva anche se la biglia colpita è fissa, impossibilitata a muoversi: in questo la quantità di moto perduta dalla biglia mobile viene comunicata alla terra.

Esempio

Supponiamo ora di giocare a biliardo e di colpire una biglia posta ad una certa distanza sul tavolo da gioco. La biglia urtata acquista una certa velocità e procede nel suo moto non rimanendo attaccata alla biglia che ha causato l'urto. Un urto di questo tipo lo definiamo **come urto elastico**.

Inoltre, per semplicità, supponiamo sempre che entrambi i tipi di urto non provochino deformazioni o compressioni dei corpi coinvolti.

Consideriamo ora un sistema formato da due corpi qualsiasi, dei quali almeno uno di essi è in moto.

Supponiamo che dopo un certo tempo i due corpi si urtano. Possiamo definire una quantità di moto totale del sistema prima dell'urto e una quantità di moto totale del sistema dopo l'urto. L'esperienza mostra che queste due quantità restano uguali, cioè la quantità di moto totale del sistema si conserva. Ovviamente questo principio vale all'interno del sistema, cioè senza alcun condizionamento dall'esterno.

In formule abbiamo:

$$q_{totPrima} = q_{totDopo} \quad (11)$$

Se il sistema è composto da n corpi:

$$q_{i1} + q_{i2} + \dots + q_{in} = q_{f1} + q_{f2} + \dots + q_{fn} \quad (12)$$

dove con q_i abbiamo indicato la quantità di moto iniziale (prima dell'urto) e con q_f quella finale (dopo l'urto).

Inoltre **se l'urto è elastico si conserva anche l'Energia Cinetica K**, risultando:

$$K = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (13)$$

Distinguiamo adesso i due tipi di urti. Consideriamo un corpo di massa m_1 e velocità v_1 che urta un corpo di massa m_2 inizialmente fermo ($v_2 = 0$) e che dopo l'urto i due corpi procedano insieme (**urto anelastico**). In questo caso, calcolando la quantità di moto totale del sistema avremo:



Laboratorio 13 Urti tra corpi



Ministero dell'Università e della Ricerca





Prima dell'urto

$$q_{iTOT} = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1 \quad (13)$$

essendo $v_2 = 0$.

Dopo l'urto

$$q_{fTOT} = (m_1 + m_2) \cdot v_f \quad (14)$$

dove con v_f abbiamo indicato la velocità finale dei due corpi uniti $m_1 + m_2$ a seguito dell'urto anelastico subito.

Per il principio della conservazione della quantità di moto deve essere

$$q_{iTOT} = q_{fTOT}, \text{ cioè}$$

$$m_1 \cdot v_1 = (m_1 + m_2) \cdot v_f \quad (15)$$

e da quest'ultima possiamo ricavare quale sarà la velocità finale dopo l'urto anelastico:

$$v_f = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1 \quad (16)$$

Dalla (16) risulta chiaro che se i due corpi hanno la stessa massa, in caso di urto anelastico, la velocità finale sarà esattamente la metà di quella iniziale (sempre che uno dei due corpi sia fermo prima dell'urto).

Vediamo ora cosa succede nel **caso di urto elastico**.

Supponiamo di lanciare un corpo di massa m_1 contro un corpo di massa m_2 , inizialmente fermo, con velocità v_1 . Supponiamo inoltre che dopo l'urto il primo corpo resti fermo "trasferendo" completamente la propria velocità al secondo corpo.

Il nostro sistema è formato quindi da questi due corpi. Calcoliamo la quantità di moto totale del sistema prima e dopo l'urto.

Prima dell'urto

$$q_{iTOT} = m_1 \cdot v_{i1} + m_2 \cdot v_{i2} = m_1 \cdot v_{i1} \quad (17)$$

in quanto il secondo corpo è inizialmente fermo.

Dopo l'urto

$$q_{fTOT} = m_1 \cdot v_{f1} + m_2 \cdot v_{f2} = m_2 \cdot v_{f2} \quad (18)$$



dove con v_{f2} abbiamo indicato la velocità finale del secondo corpo, considerando che la velocità finale del primo corpo è nulla, dato che esso si ferma dopo l'urto.

Per il principio di conservazione della quantità di moto abbiamo che

$$q_{iTOT} = q_{fTOT}, \text{ quindi}$$

$$m_1 \cdot v_{i1} = m_2 \cdot v_{f2} \quad (19)$$

Questa uguaglianza ci permette di determinare la velocità finale del secondo corpo:

$$v_{f2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot v_1 \quad (20)$$

La (20) ci dice che la velocità finale dipende dal rapporto tra le due masse. Se i due corpi hanno la stessa massa risulta evidente che la velocità finale del secondo corpo, dopo l'urto, sarà precisamente uguale a quella iniziale del primo corpo. Se la massa del secondo corpo è maggiore del primo corpo la velocità finale sarà minore di quella iniziale, mentre se la massa del secondo corpo è minore del primo corpo la velocità finale del secondo corpo sarà maggiore di quella iniziale del primo corpo.

Ovviamente abbiamo fatto riferimento a situazioni semplici, in cui i corpi implicati erano solo due.

Il principio di conservazione della quantità di moto è comunque applicabile a qualsiasi sistema complicato caotico di corpi o particelle, ovviamente in condizioni di isolamento, cioè senza che ci siano interferenze dall'esterno.

- **Esempio 3**

Un pallone da calcio (massa 0.45 kg) arriva con una velocità pari a 25 m/s direttamente sulla testa di un difensore e, dopo la respinta, ha una velocità di 10 m/s nella stessa direzione ma nel verso opposto. Qual è l'impulso che il difensore ha conferito al pallone? Se il tempo del contatto è pari a 0.15 s, qual è la forza che il difensore ha impresso al pallone?

Soluzione: Dobbiamo applicare il **teorema dell'impulso**. La quantità di moto finale del pallone è $q_f = 0,45 \cdot \frac{Kg \cdot 10m}{s} = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, mentre la quantità di moto del pallone prima della respinta del difensore è $q_i = 0,45 \frac{Kg \cdot (-25)m}{s} = -11.25 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Il segno meno è di fondamentale importanza perché le due velocità del pallone, prima e dopo l'impatto, hanno verso opposto. La variazione della quantità di moto del pallone è $\Delta q = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s} - (-11.25 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) = 15.75 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Questa variazione coincide, per il teorema dell'impulso, con

l'impulso impresso dal calciatore al pallone. Dunque l'impulso è $I = 15.75 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Ora, $I = F \cdot \Delta t$, pertanto la forza F impressa dal calciatore al pallone sarà uguale a $F = \frac{I}{\Delta t} = (15.75 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) / (0.15 \text{ s}) = 105 \text{ N}$.

- **Esempio 4**

Un carrello A di massa $m_A = 3 \text{ Kg}$ e velocità $v_A = 4 \text{ m/s}$ urta un carrello B avente massa $m_B = 5 \text{ Kg}$, inizialmente fermo. Dopo l'urto il carrello A continua a muoversi a 2 m/s . Qual è la velocità assunta dal carrello B?

Soluzione: Gli urti di questo tipo sono tipici esempi in cui si può applicare il principio di **conservazione della quantità di moto** dal momento che si tratta di sistemi isolati. Prima dell'urto il carrello A possiede una quantità di moto pari a $q_A = m_A \cdot v_A = 3 \text{ kg} \cdot 4 \text{ m/s} = 12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$.

Poiché è fermo, il carrello B ha una quantità di moto uguale a zero. La quantità di moto totale del sistema formato dai due carrelli è perciò uguale a $12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Dopo l'urto il carrello A perde parte della sua velocità che passa da 4 m/s a 2 m/s . Dal momento che la velocità del carrello si dimezza avremo che anche la quantità di moto diventa la metà. In altre parole, dopo l'urto la quantità di moto del carrello A è $q'_A = 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Siccome la quantità di moto totale del sistema nell'urto si conserva, deve rimanere uguale a $12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Questo significa che dopo l'urto il carrello B acquista una quantità di moto pari a $q'_B = 12 \text{ kg} \cdot \text{m/s} - 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. La velocità finale del carrello B è uguale a $v'_B = \frac{q'_B}{m_B} = \frac{6 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}}{5 \text{ Kg}} = 1.2 \text{ m/s}$.

- **Esempio 5**

Due carrelli di massa 3 kg e 6 kg sono tenuti uniti da una molla e si muovono da destra a sinistra con una velocità di 10 m/s . Ad un certo punto la molla viene tagliata e si nota che il carrello di massa maggiore procede con una velocità di 15 m/s . Si stabilisca con quale velocità e in che verso si muove il carrello di massa minore.

Soluzione: Anche questo è un problema di **conservazione della quantità di moto**. La massa totale dei due carrelli è 9 kg . Pertanto la quantità di moto iniziale del sistema è $q_i = 9 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s} = 90 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Questa è la quantità di moto anche alla fine. Il carrello di massa maggiore ha quantità di moto pari a $6 \cdot 15 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 90 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. Pertanto il carrello di massa minore ha una quantità di moto uguale a zero. Questo significa che la sua velocità diventa uguale a zero. Pertanto il carrello di massa minore si ferma dopo la rottura della molla.

6.5 Urto elastico caso bidimensionale

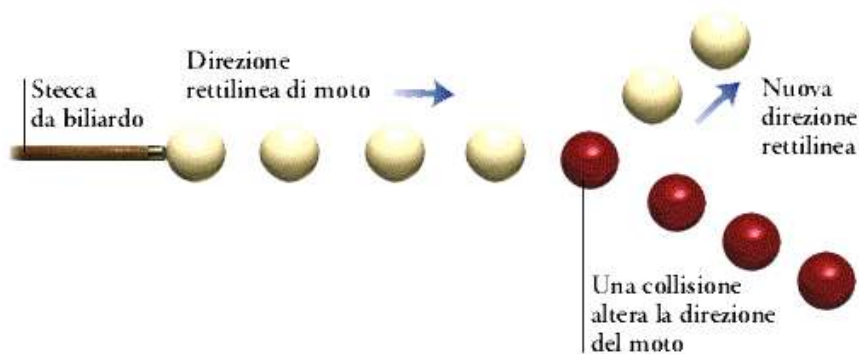


Figura 126 Urto tra biglie- caso bidimensionale

In questo caso immaginiamo che la biglia bianca sia diretta verso destra, fissato come asse positivo delle x e colpisca la biglia nera inizialmente ferma. Dopo l'urto se la biglia nera non viene colpita lungo una direzione del suo baricentro, le biglie prenderanno direzioni diverse, formando rispetto all'asse x rispettivamente gli angoli α , per la biglia bianca e β per la biglia nera.

Il Principio di conservazione della quantità di moto si scriverà così:

$$\begin{cases} m_1 v_{1i} = m_1 v_{1f} \cos \alpha + m_2 v_{2f} \cos \beta \\ 0 = -m_1 v_{1f} \sin \alpha + m_2 v_{2f} \sin \beta \\ \frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2 \end{cases} \quad (21)$$

6.6 Il lavoro

Per chiarire questo importante concetto partiamo da un problema reale. Un uomo spinge un oggetto con una forza di 100 newton in una nuova posizione distante 2 metri. Per spostare il divano l'uomo esercita una *forza* e fa percorrere all'oggetto una certa *distanza*, in direzione della forza applicata. In definitiva, per spostare l'oggetto, si compie un lavoro. L'ammontare del lavoro fatto dall'uomo dipende dall'intensità della forza applicata e dalla distanza percorsa, nella stessa direzione della forza ossia dallo *spostamento*.

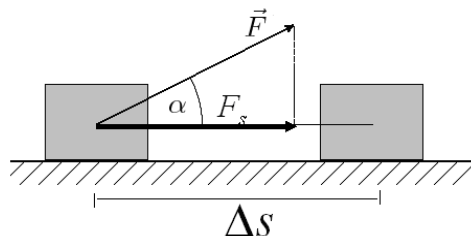


Figura 128 Lavoro di una forza

In fisica il **lavoro** si definisce come **la forza che agisce su un oggetto e ne causa lo spostamento**. In questa definizione del lavoro ci sono tre parole chiave: la *forza*, lo *spostamento* e la *causa* dello spostamen-

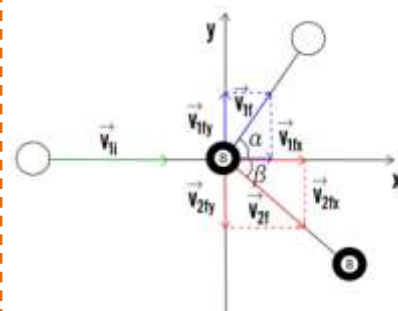


Figura 127 Urto tra biglie - caso bidimensionale. Rappresentazione dei vettori

YouTube



RICORDA

Una forza come Lavoro solo se c'è spostamento! Se su un corpo, viene applicata anche una forza di grande intensità, ma quello rimane in equilibrio (fermo) quella forza non ha compiuto alcun lavoro. Ovviamente laddove ci sia Lavoro, conta solo la componente della Forza parallela al piano di spostamento.

to. In altri termini, perché compia un lavoro su un oggetto, deve essere la forza stessa la causa dello spostamento dell'oggetto. Quindi non è sufficiente, per compiere un lavoro, applicare una forza. *Se manca lo spostamento non ci sarà lavoro.*

Data quindi una forza costante, \mathbf{F} , che, applicata a un corpo, ne provoca lo spostamento di un segmento Δs , si definisce lavoro, L , della forza il prodotto dello spostamento per la componente, F_s , della forza nella direzione dello spostamento:

$$L = \vec{F}_s \cdot \vec{\Delta s} \quad (22)$$

Il lavoro è una **grandezza scalare**, quindi non è dotato di una direzione e di un verso.

Se la forza è parallela allo spostamento, il lavoro sarà dato semplicemente dal prodotto della forza per lo spostamento; se invece la forza è perpendicolare allo spostamento, non avrà alcuna componente nella direzione dello spostamento, quindi il lavoro è nullo. Perciò, una forza perpendicolare allo spostamento non compie alcun lavoro. Il lavoro sarà massimo in valore assoluto quando la forza è parallela allo spostamento e minimo (nullo) quando la forza è perpendicolare.

A seconda della direzione relativa del vettore forza e del vettore spostamento, il lavoro si divide in lavoro motore e lavoro resistente.

Se le direzioni della forza e dello spostamento hanno il medesimo verso, il lavoro è positivo e si dice lavoro motore: quando un corpo cade da una certa altezza, la forza di gravità (diretta verso il basso) compie un lavoro motore. Se forza e spostamento hanno direzione e verso opposti, il lavoro è negativo e si dice lavoro resistente: quando una molla viene compressa, la forza elastica, che tenderebbe a riportarla alla sua lunghezza originale, compie un lavoro resistente.

L'unità di misura del lavoro è il joule (simbolo J), definito come il lavoro compiuto da una forza di 1 newton quando il suo punto di applicazione si sposta di 1 metro e dimensionalmente uguale a una forza per uno spostamento:

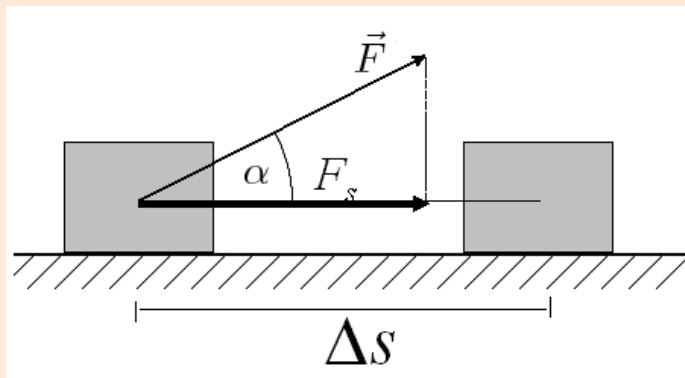
$$1J = 1N \cdot 1m \quad (23)$$

o meglio $1J = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$ che dimensionalmente è come fosse una massa per una velocità al quadrato.

6.7 C.L.I.L. Project

The work

To clarify this important concept we start from a real problem. A man pushes an object with a force of 100 newtons to a new location that is 2 meters. To move the couch man exerts a force and makes the object along a certain distance, in the direction of the applied force. Ultimately, to move the object, it does work. The amount of work done by humans depends on the intensity of the force applied and the distance traveled, ie in the same direction of the force from the **displacement**.



In physics, work is defined as the force acting on an object and causes it to move. In this definition of the work there are three key words: strength, moving, and because of the shift. In other words, why undertake a on an object, the force must be the cause of the displacement of the object. So it is not sufficient to perform a task, to apply a force. If there is no movement there will be no work. Date then a constant force, F , which, applied to a body, it causes the displacement of a segment Δs , work is defined, L , the product of the force of the movement for the component, F_s , of the force in the direction of the shift:

$$L = \vec{F}_s \cdot \vec{\Delta S} \quad (22)$$

The work is a scalar quantity, so it has a direction and a direction.

If the force is parallel to the displacement, the work will be simply the product of the force for moving, but if the force is perpendicular to the displacement, will have no component in the direction of the displacement, so the work is zero. Therefore, a force perpendicular to the displacement no work is done. The work will be maximum in absolute value when the force is parallel to the displacement and minimum (zero) when the force is perpendicular.

Depending on the relative direction of the force vector and the displacement vector, the work is divided into working engine and heavy duty work.

If the directions of the force and displacement have the same direction, the work is positive and is said to work engine: when a body falls from a certain height, the force of gravity (downward) does a work engine. If force and displacement direction and have opposite direc-

tions, the work is negative and is said duty work: when a spring is compressed, the elastic force, which would tend to bring it back to its original length, performs a job resistant.

The unit of work is the joule (symbol J), defined as the work done by a force of 1 newton when its point of application moves one meter and dimensionally the same as a force for a shift:

$$1J = 1N \cdot 1m \quad (23)$$

or better $1J = 1 \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$ that is dimensionally like a mass by velocity squared.

6.8 Il lavoro di una forza non costante

Nel caso più generale di una forza non costante (che cambia intensità mentre compie il lavoro nella direzione dello spostamento), il lavoro è definito come l'area della parte di piano sottesa dalla curva che rappresenta la forza.

Un caso di forza non costante è dato per esempio dalla forza elastica, espressa dalla legge di Hooke :

$$F = -k \cdot x$$

Per comprimere una molla di un tratto x occorre applicare una forza uguale e contraria, $F = k \cdot x$, rappresentata da una retta passante per l'origine, la cui pendenza rappresenta la costante elastica k . Il lavoro compiuto sulla forza elastica per comprimere la molla di un tratto generico x è dato dall'area del triangolo che ha per lati il segmento x e la forza kx , quindi:

$$L = -\frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (24)$$

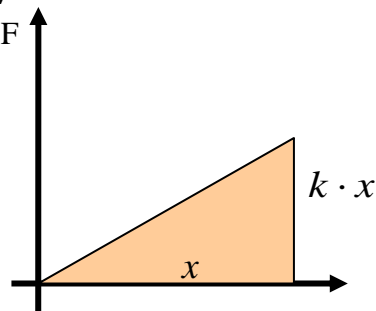


Figura 1292 Lavoro di una forza non costante

Il lavoro compiuto dalla forza elastica (lavoro resistente) avrà segno opposto.

Nel caso della forza di gravità, che è rappresentata da una retta parallela all'asse x , il lavoro che la forza compie quando un oggetto cade liberamente di un tratto h è dato dall'area del rettangolo che ha per base il segmento h e per altezza la forza mg :

$$L = m \cdot g \cdot h \quad (25)$$

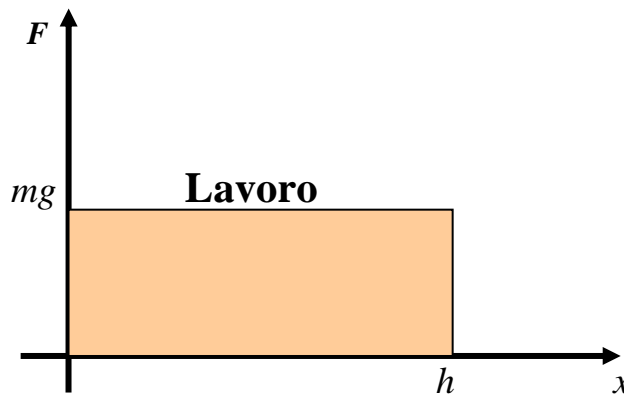
Richiamo di matematica

L'Area sottostante la retta o più in generale una curva, può essere calcolata attraverso il calcolo dell'**integrale**, nel caso del Lavoro si avrà:

$$\int_0^x k \cdot x dx$$

che calcolato restituisce la relazione (24), cambiata di segno, dovuto al fatto che quello della molla è sempre un Lavoro negativo.

Per sollevare un corpo si dovrà agire contro la forza gravitazionale e compiere un lavoro resistente, uguale e opposto.



6.9 La potenza

Il lavoro effettuato da una forza nell'unità di tempo prende il nome di **potenza**, ed è calcolato da:

$$P = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (26)$$

che si misura in $[W] = [J] \cdot [s^{-1}]$, Watt, prende il nome da James Watt, così come, in parte, la Heriot-Watt University di Edimburgo. La macchina a vapore di Watt trovò applicazione sulla prima nave a vapore moderna nel 1807.

La potenza indica quindi la **rapidità** con cui viene svolto un lavoro.

Per motivi storici, si possono incontrare ancora unità di misura diverse, nate dall'uso di misurare l'energia e il tempo con unità diverse, a seconda del campo di applicazione. Ad esempio il cavallo vapore è la potenza necessaria per sollevare 75 kg (735 N circa) all'altezza di 1 m in 1 s, e quindi $1 \text{ CV} = 735 \text{ W} = 0,735 \text{ kW}$, oppure $1 \text{ CV} = 0,9863 \text{ HP}$.

- Esempio 6

Un blocco di 100 kg è trascinato a velocità costante di 5,0m/s su un pavimento orizzontale da una forza di 122N diretta con angolo di 37° sopra il piano orizzontale. Trovare la potenza.

Soluzione: Calcoliamo la potenza applicando il prodotto scalare tra le velocità e la forza, conoscendo l'angolo che essi formano. Da $P = F \cdot v \cdot \cos \alpha$, si ha:

$$P = 122 \text{ N} \cdot 5,0 \text{ m/s} \cdot \cos 37^\circ = 487 \text{ W}$$

- Esempio 7

La cabina di un ascensore, con massa di 4500 kg e carico utile massimo di 1800 kg, sale a pieno carico alla velocità di 3,8m/s. Quale potenza occorre per tenere questa velocità?

Richiamo di matematica

In questo caso l'integrale risulta:

$$\int_0^h mg dx$$

da cui si ricava la relazione (25)





Figura 130 Energia di una turbina ad acqua



Soluzione: La potenza è il lavoro compiuto nell'intervallo di tempo, cioè $P = \frac{L}{\Delta t}$ ma $L = Fs$, da cui sostituendo si ha $P = F \cdot v$

Pertanto è possibile calcolare la potenza in questa situazione, prendendo come massa, quella complessiva a pieno carico, $m=4500+1800\text{Kg}=6300\text{Kg}$; inoltre, il lavoro viene fatto dal motore che deve contrastare la forza peso dell'ascensore

$$P = 6300\text{Kg} \cdot 9,8\text{m/s}^2 \cdot 3,8\text{m/s} = 234612\text{W} \approx 235\text{kW}$$

6.10 L'energia

Nella fisica classica l'**energia** è definita come la *capacità di un corpo o di un sistema di compiere lavoro* e la misura di questo lavoro è a sua volta la misura dell'energia.

Il concetto di energia nasce, nella meccanica classica, dall'osservazione sperimentale che la capacità di un sistema fisico di sviluppare una forza decade quando il sistema stesso stabilisce un'interazione con uno o più sistemi mediante la stessa forza. In questo senso l'energia può essere definita come una grandezza fisica posseduta dal sistema che può venire "consumata" per generare una forza. Dal momento che l'energia posseduta da un sistema può essere utilizzata dal sistema stesso per produrre più tipi di forze, si definisce una seconda grandezza, il lavoro appunto, che definisce il consumo di energia in relazione al processo fisico mediante il quale la forza è stata generata.

6.11 Energia cinetica

L'**energia cinetica** è l'energia posseduta da un corpo a causa del suo movimento. Quando un corpo di massa m varia la sua velocità, con questa varia anche la sua energia cinetica. Il lavoro rappresenta questa variazione di energia cinetica. L'energia cinetica quindi è associata alla massa e alla velocità di un corpo in movimento. L'energia cinetica di un punto materiale può essere espressa matematicamente dal semi-prodotto della sua massa per il quadrato del modulo della sua velocità; in coordinate cartesiane si esprime di consueto come:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (27)$$

6.12 Teorema dell'energia cinetica

Il **teorema dell'energia cinetica** (o **teorema delle forze vive**) afferma che il lavoro L_{AB} compiuto da una qualunque forza risultante \mathbf{F} su un corpo di massa m che si sposta dalla posizione r_A (al tempo t_A) alla posizione r_B (al tempo t_B), lungo un tratto della sua traiettoria, è dato dalla variazione dell'energia cinetica tra l'istante t_A e l'istante t_B :

$$L_{AB} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 \quad (28)$$

- Esempio 5

Determinare l'energia cinetica posseduta da un razzo, completo del suo carico, di massa complessiva $2,9 \cdot 10^5 \text{ Kg}$ quando raggiunge la velocità di fuga di $11,2 \text{ Km/s}$.

Soluzione: Basta applicare la definizione di energia cinetica, con velocità di $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{2,9 \cdot 10^5 \text{ Kg} \cdot (11200 \text{ m/s})^2}{2} = 1,82 \cdot 10^{12} \text{ J}$

- Esempio 6

Un elettrone di conduzione (massa $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$), che viaggia nel rame a una temperatura prossima allo zero assoluto, ha un'energia cinetica di $6,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Trovare la sua velocità.

Soluzione: Applichiamo la relazione che definisce l'energia cinetica, risolvendola rispetto alla velocità, abbiamo:

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}}} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

6.13 Energia potenziale gravitazionale

L'energia potenziale gravitazionale è l'energia che possiede un corpo ad una certa distanza da un altro corpo dovuta alla presenza della forza di gravità (per brevità qui sotto tralascieremo l'aggettivo *gravitazionale*). Essa è pari a:

$$U = m \cdot g \cdot h \quad (29)$$

6.14 Forza conservativa

La forza gravitazionale ha un'interessante proprietà: il lavoro da essa compiuto per portare un corpo da una quota più alta a una più bassa non dipende dal cammino percorso, ma soltanto dai punti iniziale e finale; una forza per la quale il lavoro non dipende dal particolare percorso seguito, ma solo dai suoi estremi, è detta **forza conservativa**. Il lavoro da compiere per sollevare un corpo avrà segno negativo, perché è fatto contro la forza gravitazionale (diretta verso il basso), e l'energia potenziale del corpo aumenta; quando il corpo cade, il lavoro delle forze del campo gravitazionale è positivo e la sua energia potenziale diminuisce.

YouTube



RICORDA

L'Energia potenziale, di qualunque natura sia, esprime in pieno quella capacità di compiere Lavoro, come accennato nella definizione.

Se quel corpo o quella molla, vengono lasciate libere, allora quell'Energia potenziale andrà a trasformarsi in Energia cinetica, che a sua volta potrà ritrasformarsi in Energia potenziale.



6.15 Energia potenziale elastica

Analogamente a quanto fatto per la forza gravitazionale, si può definire l'energia potenziale elastica, dovuta alla forza elastica, per esempio di una molla che, compressa in un tratto qualunque, è in grado di compiere un lavoro e ritornare alla sua posizione originaria. Poiché il lavoro da compiere su una molla contro le forze elastiche per comprimerla dal punto x_1 al punto x_2 è dato da:

$$L = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_2^2 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_1^2 \quad (30)$$

si definisce energia potenziale elastica la grandezza:

$$U_{el} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x^2 \quad (31)$$

la cui differenza, analogamente a quanto detto per la forza di gravità, è pari e opposta al lavoro da compiere sulle forze elastiche che agiscono sul corpo. L'energia potenziale elastica di una molla può essere utilizzata per muovere altri corpi, come succede per esempio negli orologi a ricarica. Anche la forza elastica è una forza conservativa.

- Esempio 7

Determinare la costante di una molla che immagazzina 25 J di energia potenziale elastica quando viene compressa di 7,5 cm rispetto alla sua posizione di equilibrio.

Soluzione: Nel momento in cui la molla viene rilasciata, la sua energia potenziale si trasforma in cinetica del corpo eventualmente ad essa attaccato. L'energia potenziale di una molla si esprime come

$$\Delta U = \frac{1}{2} k (x_f^2 - x_i^2)$$

se assumiamo come zero, il potenziale nella posizione di equilibrio, si

$$\text{ha } \Delta U = \frac{1}{2} k \cdot x^2 \text{ da cui } k = \frac{2 \cdot \Delta U}{x^2} = \frac{2 \cdot 25 J}{(0,0075 m)^2} = 8889 N/m$$

6.16 Energia meccanica

l'**energia meccanica** è la somma di energia cinetica ed energia potenziale attinenti allo stesso sistema

$$U_{tot} = E_c + U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h \quad (32)$$

In altri contesti l'energia cinetica viene spesso indicata con K, ovvero $E_c = K$

6.17 Principio di conservazione dell'energia meccanica

Il lavoro fatto da una forza su di un punto materiale produce, di norma, un aumento oppure una diminuzione della sua energia cinetica (teorema dell'energia cinetica). Ora impareremo che, per alcune forze, un aumento (una diminuzione) dell'energia cinetica avviene perché l'energia associabile alla posizione (energia potenziale) che occupa un punto materiale, è diminuita (aumentata).

Abbiamo visto che, nel caso di forze conservative, è possibile associare alla posizione che un punto materiale occupa nello spazio un'energia potenziale.

Ora vogliamo mostrare qualcosa di più preciso. La parte di energia cinetica che viene persa (guadagnata) viene esattamente trasformata in un aumento (diminuzione) di energia potenziale dello stesso punto materiale. In altre parole, durante l'azione di una forza conservativa, la somma dell'energia cinetica e di quella potenziale di un punto materiale si mantiene costante nel tempo, lungo tutta la traiettoria percorsa dal punto materiale. La prova di un tale risultato è semplice.

Il lavoro fatto da una qualunque forza \mathbf{F} per spostare un punto materiale da una posizione \mathbf{A} ad una posizione \mathbf{B} è sempre uguale alla variazione di energia cinetica subita dal punto materiale (teorema dell'energia cinetica, formula (27)):

$$L_{AB} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2$$

Nel caso di forze conservative, lo stesso lavoro può anche scriversi in termini di energia potenziale:

$$L_{AB} = U(x_A) - U(x_B) \quad (33)$$

Essendo uguali i primi membri delle (27) e (32), saranno uguali anche i secondi membri:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 = U(x_A) - U(x_B)$$

Separando i termini riferiti alla posizione A da quelli riferiti alla posizione B, avremo:



$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 + U(x_A) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 + U(x_B) \quad (34)$$

Come si vede, la somma dell'energia cinetica e potenziale nella posizione A è uguale alla somma dell'energia cinetica e potenziale nella posizione B. Poiché A e B sono arbitrari, possiamo concludere dicendo che, in presenza di sole forze conservative, il moto di un punto materiale si svolge in maniera tale che la somma dell'energia cinetica e potenziale si mantiene costante lungo tutta la traiettoria del punto materiale.

La somma dell'energia cinetica e potenziale viene chiamata energia meccanica

$$U_{tot} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + U(x) \quad (35)$$

- Esempio 8

Un uomo di 70,0 kg salta da una finestra nella rete dei vigili del fuoco tesa 11,0m più in basso. La rete, cedendo di 1,5m, riesce ad arrestarlo, per rilanciarlo subito dopo verso l'alto. Calcolare l'energia potenziale delle rete tesa al massimo se l'energia meccanica è conservata.

Soluzione: la conservazione dell'energia meccanica presuppone che l'uomo ritorni indietro con la stessa velocità con la quale aveva colpito la rete, cioè che l'energia cinetica acquisita nella caduta venga spesa per estendere la rete. La forza elastica della rete compie un lavoro di richiamo che riporta l'uomo nella posizione iniziale (conservazione energia meccanica)

$$\Delta U = mg(h_i - h_f) = 70,0 \text{Kg} \cdot 9,8 \text{m/s}^2 \cdot (11,0 + 1,5) \text{m} = 8475 \text{J}$$

6.18 Principio di conservazione con forze non conservative

Abbiamo trattato il principio di conservazione dell'energia meccanica che vale nei sistemi isolati, quando siamo in presenza di forze conservative, come la forza peso o la forza elastica; naturalmente si tratta di situazioni ideali in quanto nella realtà non si possono eliminare del tutto gli attriti e resistenze varie; tuttavia possiamo ancora applicare il teorema dell'energia meccanica:

$$L = K_f - K_i \quad (36)$$

che vale in ogni sistema, dove K_f è l'energia cinetica finale, mentre K_i è quella iniziale.

In questo contesto potremmo dire che il lavoro è dato dalla somma del lavoro fatto dalle forze conservative e da quello fatto dalle forze non conservative; d'altra parte sappiamo che la caratteristica essenziale delle forze conservative è l'esistenza di una funzione, l'energia poten-

ziale U , tale che il lavoro risulta dato dalla variazione di tale funzione, cambiata di segno. Pertanto si può scrivere:

$$L_{Conservative} + L_{nonConservative} = K_f - K_i$$

$$-\Delta U + L_{nonConservative} = K_f - K_i$$

da cui:

$$L_{nonConservative} = \Delta U + \Delta K \quad (37)$$

$$L_{nonConservative} = \text{variazione Energia Meccanica}$$

Ci chiediamo dove finisca questa energia; È facile rendersi conto che alla perdita di energia meccanica corrisponde una comparsa di calore, la quale è un'altra forma con cui l'energia si presenta; la trasformazione di lavoro in calore e viceversa è studiata da un'importante branca della fisica, la termodinamica.

6.19 Macchine e loro rendimento

Una delle attività più importanti degli scienziati ed in particolare dei tecnici è la costruzione di dispositivi atti a trasformare un tipo di energia in un'altra. Questi dispositivi sono detti **motori**. Non volendo, né potendoci addentrare sulla costituzione di siffatti dispositivi, pensiamo un motore come ad una "scatola nera" mettendo in evidenza il bilancio energetico dello stesso.

Nella sua essenza, quindi:

un motore è un dispositivo che assorbe un'energia E_a e rende dopo la trasformazione un'energia E_n .

Si osservi, però, che in base a quanto abbiamo detto $E_n < E_a$ a causa delle inevitabili resistenze passive che trasformano parte dell'energia assorbita in calore, non utilizzabile. Questa quantità di energia, pari a:

$$E_a - E_n = E_p \quad (38)$$

viene detta energia perduta e alla fine si manifesta con l'aumento della temperatura delle parti di cui è costituito il motore. È naturale considerare la bontà di un motore in base alla non elevata capacità di produrre perdite. Una misura di questa bontà è il rapporto:

$$\eta = \frac{E_n}{E_a} = \frac{E_a - E_p}{E_a} = 1 - \frac{E_p}{E_a} \quad (39)$$

detto rendimento del motore (macchina). In genere si usa il rendimento percentuale che è pari a $\eta \cdot 100$. Si osservi che a causa della inevitabilità delle perdite il rendimento di una macchina è sempre minore di 1 ovvero minore di 100 percentualmente.

6.20 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questo ultimo capitolo abbiamo introdotto nuovi concetti quale la **quantità di moto** che esprime una dipendenza tra la massa di un corpo e la sua velocità. In stretta correlazione il concetto di **impulso** che esprime la variazione della quantità di moto. In un **sistema isolato**, cioè privo di interazione con l'ambiente, accade che la quantità di moto dello stesso sistema si **conserva**, ovvero può trasferirsi da un corpo all'altro ma la sua somma rimane costante.

Abbiamo così introdotto il concetto di **lavoro** che esprime la capacità di un corpo di produrre uno spostamento, distinguendo tra la componente di una **forza costante** che produce lavoro e la componente che non lo produce. Ma è possibile calcolare il lavoro anche in presenza di **forze non costanti**, come nel caso di forze elastiche. Di qui il concetto di **potenza**, che esprime la rapidità con cui viene compiuto un lavoro, mentre l'**energia** misura la capacità che ha un corpo di compiere lavoro. Possiamo sostanzialmente scomporre l'**energia meccanica** come la somma dell'**energia cinetica**, detta anche energia di movimento e strettamente

legata al quadrato della velocità ed **energia potenziale** da imputarsi a forze gravitazionali o elastiche che dipende dalla posizione assunta dal corpo. Quando il lavoro compiuto da una forza non è dipendente dalla traiettoria percorsa ma solo dallo spostamento effettivamente misurato, siamo in presenza di **forze conservative**. Anche per l'energia vale un **principio di conservazione** che esprime il fatto che una forma di energia, ad esempio quella cinetica possa trasformarsi in energia potenziale e viceversa, rimanendo costante la loro somma, almeno finché si ha a che fare proprio con forze conservative. Tale principio rimane valido anche **in presenza di forze non conservative**, dove però è necessario tener conto del lavoro da esse prodotte, come nel caso di forze d'attrito. Infine abbiamo introdotto il concetto di **rendimento** che esprime il rapporto tra l'energia prodotta da una macchina e l'energia assorbita, dove maggiore sarà tale numero migliore sarà l'efficienza della stessa.

6.21 Problemi proposti

Quantità di moto

- 1) un corpo di massa 0.14kg cade da un'altezza di 2 m. Qual è l'intensità della sua quantità di moto prima che tocchi il suolo?
- 2) una mazza da golf esercita una forza media di 1000 N su una palla di 0.045kg inizialmente ferma. La mazza resta a contatto con la palla per 1.8 ms. Quale è il modulo della velocità della palla quando lascia la sua posizione iniziale?
- 3) in un tiro a golf, la mazza è a contatto con la palla per 0.0010s. Se la palla di massa 45g acquista una velocità di modulo 65m/s, calcola modulo della forza esercitata dalla mazza sulla palla.
- 4) un giocatore di pallavolo fa una schiacciata, cambiando così la velocità della palla da 4.5 m/s a -23 m/s. Se l'impulso rilasciato sulla palla dal giocatore è pari a $-9 \text{ Kg} \cdot \text{m/s}$, quale sarà la massa del pallone?
- 5) due pattinatori sul ghiaccio stanno in piedi fermi nel centro della pista ghiacciata. Quando si spingono l'un l'altro il pattinatore di 45 kg acquista velocità di modulo 0.65m/s. Se la velocità dell'altro pattinatore è 0.89m/s, quanto risulta essere la sua massa?

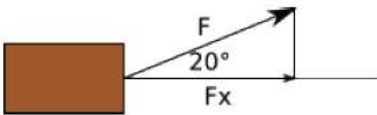
Lavoro

- 6) Definisci il lavoro totale compiuto da un sistema di forze applicate ad un corpo.
- 7) A un corpo è applicata una forza di 20 N che ha la stessa direzione e lo stesso verso del moto. Lo spostamento del corpo è di 30 m. Calcolare il lavoro compiuto dalla forza.
- 8) A un corpo è applicata una forza di 10 N che forma un angolo di 30° con la direzione del moto del corpo, che si sposta di 4 m. Calcolare il lavoro compiuto dalla forza.
- 9) Una forza di 2 N, parallela alla direzione di moto del corpo su cui agisce, compie un lavoro di 40 J. Calcolare lo spostamento del corpo.
- 10) Un corpo, cui sono applicate due forze fra loro perpendicolari di intensità $F_1 = 3\text{N}$ diretta verso l'alto e $F_2 = 4\text{N}$ diretta verso destra, subisce uno spostamento di 4 m lungo la direzione e con il medesimo verso della risultante delle forze applicate. Dopo aver ricavato graficamente la risultante delle due forze, determinare il lavoro totale compiuto dalle due forze.

- 11) Una molla, che quando è deformata è lunga 30 cm, ha costante elastica 200 N/m. Determina il lavoro necessario per allungare la molla da 35 cm a 45 cm di lunghezza.

Energia cinetica e conservazione

- 12) Determinare l'energia cinetica associata alla rivoluzione della Terra attorno al Sole, sapendo che la Terra ha una massa $m_T = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$, il raggio medio dell'orbita terrestre $R = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$ e il tempo di rivoluzione $T = 3,16 \cdot 10^7 \text{ s}$
- 13) Un oggetto di 102 kg sta inizialmente muovendosi in linea retta alla velocità di 53 m/s. Per arrestarlo con una decelerazione di 2 m/s^2 determinare l'intensità della forza necessaria, la distanza percorsa durante il rallentamento e il lavoro fatto dalla forza rallentante.



- 14) Per spingere una cassa di 50 kg su un pavimento privo di attrito un facchino applica una forza di 210N in una direzione inclinata di 20° sopra l'orizzontale. Durante lo spostamento di 3,0m trovare il lavoro fatto sulla cassa dal facchino; sulla cassa dal peso proprio della cassa e dalla forza normale esercitata dal pavimento sulla cassa. Determinare infine il lavoro totale sulla cassa.
- 15) Una manichetta antincendio viene srotolata tirando orizzontalmente l'estremo libero su una superficie senza attrito alla velocità costante di 2,3m/s. La massa di 1m di manichetta è 0,25 kg. Calcolare l'energia cinetica fornita per svolgere 12m di manichetta.

Potenza

- 16) La cabina di un montacarichi, con massa a pieno carico di $3,0 \cdot 10^3 \text{ Kg}$, sale di 210m in 23 s, a velocità costante. Determinare la potenza media sviluppata dal cavo sulla cabina.
- 17) Trovare la potenza media assorbita da una sciovia che in 60s trasporta su un dislivello di 150m, a velocità costante, 100 sciatori del peso medio di 70 kg.
- 18) La cabina di un ascensore, con massa di 4500 kg e carico utile massimo di 1800 kg, sale a pieno carico alla velocità di 3,8 m/s. Quale potenza occorre per tenere questa velocità?
- 19) Un blocco di 100 kg è trascinato a velocità costante di 5,0 m/s su un pavimento orizzontale da una forza di 122N diretta con angolo di 30° sopra il piano orizzontale. Trovare la potenza.

Energia potenziale

- 20) Su di una particella agisce solo la forza conservativa F . Se la particella si trova nel punto A, l'energia potenziale del sistema è di 40J. Se la particella si muove dal punto A al punto B, il lavoro svolto sulla particella da F è pari +25 J. Trovare l'energia potenziale del sistema quando la particella è in B.
- 21) Si lasci cadere un libro di massa 2,0 kg fra le braccia di una persona che si trova 10m più in basso. Ponendo uguale a zero l'energia potenziale a livello del suolo, trovare
- l'energia potenziale del libro all'istante in cui inizia la propria caduta;
 - l'energia cinetica del libro appena prima che la persona lo afferri con le mani tese poste a 1,5m dal suolo;
 - la velocità di caduta del libro in quel momento.

Conservazione energia

- 22) Un'autocisterna fuori controllo per un guasto ai freni sta scendendo a precipizio a 130 km/h. Vicino al termine della discesa si trova però una rampa di emergenza in contropendenza di 15° . Trovare la lunghezza minima affinché la cisterna si possa fermare almeno per un momento.
- 23) Una biglia di 5,0 g viene lanciata verticalmente verso l'alto con una molla. Affinché la biglia colpisca un bersaglio posto a 20m, la molla deve essere compressa di 8,0 cm. Calcolare la variazione di energia potenziale gravitazionale della biglia durante la fase ascensionale; trovare infine la costante della molla.
- 24) Una pallottola di 30 g, con velocità iniziale di 500 m/s, penetra per 12 cm in una parete in muratura prima di fermarsi. Determinare la riduzione dell'energia meccanica della pallottola, e, ammettendo che la forza esercitata dal muro sulla pallottola sia costante, calcolarne il valore.
- 25) Un blocco è spinto giù per un piano inclinato da un punto A ad un punto B, per una distanza di 5,0m, da una forza $F = 2,0\text{N}$ che agisce parallelamente al piano inclinato. L'intensità della forza di attrito che agisce sul blocco fra A e B è di 10N. Se l'energia cinetica del blocco aumenta di 35 J nel passaggio da A a B, trovare il lavoro sviluppato sul blocco dal suo peso nello stesso tratto.

6.22 In laboratorio

Lavoro ed energia

- 13) Verifica sperimentale della legge di conservazione dell'energia meccanica.

6.23 Approfondimento: Le fonti rinnovabili d'energia

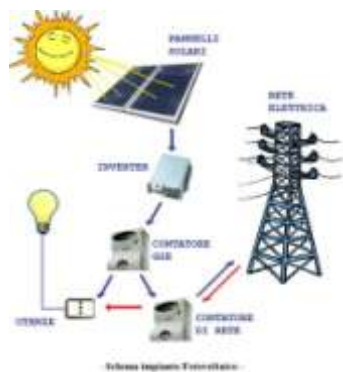


Figura 131 Pannelli fotovoltaici



Figura 132 Turbina eolica

Nel 2050 dal Sole e dal vento verrà prodotto il 75% dell'elettricità! Lo studio commissionato da Wwf a Ecofys stima il peso delle energie ternative nel prossimo futuro. Fotovoltaico ed eolico al centro del sistema.

Saranno soprattutto il **Sole** ed il **vento** a generare **energia pulita**, ma anche il calore della profondità della **Terra** darà un **apporto** significativo. Un nuovo **Rapporto del Wwf** contiene le ipotesi di scenario disegnate da **Ecofys** e sostiene che l'energia elettrica potrebbe essere garantita dalle fonte rinnovabili già nel 2050. Andando più nel dettaglio degli apporti, Ecofys stima che entro il **2050** l' **energia solare** possa fornire circa la **metà** di tutta la nostra elettricità, metà del riscaldamento degli edifici e il 15 % del calore nel settore industriale.

Per quanto riguarda il **vento**, secondo lo scenario proposto nel rapporto del Wwf, potrebbe soddisfare **un quarto** del fabbisogno mondiale di elettricità entro il 2050, se saranno confermati gli attuali tassi di crescita, con l'installazione di ulteriori generatori di cui **1.000.000** sulla **terraferma**, in mare o vicino alla costa, e **100.000** in alto **mare**.

Per l'energia **geotermica**, la prospettiva è quella di giocare un ruolo più ridotto di quello di fotovoltaico ed eolico: la potenza installata sta crescendo al ritmo di circa il 5% l'anno, l'analisi di Ecofys indica che si potrebbe sperare di raddoppiare questo tasso di crescita, fino a raggiungere il **4% circa** dell'intera **produzione elettrica** nel 2050.

Meno successo si prospetta nel 2050 per l'**energia idroelettrica** che, secondo le proiezioni contenute nel rapporto, fornirà il **12%** della produzione totale di elettricità, rispetto al **15% odierno**, mentre dal fronte della **bioenergia**, il **60%** dei combustibili e del calore necessari per l'industria proverrà dalle **biomasse**. Il **13%** del calore necessario per gli edifici verrà dalle biomasse, e le biomasse saranno ancora necessarie nell'ambito del mix per la produzione di elettricità (circa il 13%), ai fini del **bilanciamento** con altre tecnologie del settore delle **energie rinnovabili**.

7. Temperatura e calore

Prerequisiti

Il concetto di grandezza e loro misura. Utilizzo degli strumenti di misura. Concetto di modello. Principi di conservazione dell'energia. Le leggi di proporzionalità.

Sapere

Conoscere il concetto di calore e di temperatura. Quale è la struttura della materia e di come avviene la dilatazione termica dei corpi. Conoscere gli strumenti di misura della temperatura e le diverse scale utilizzate. Apprendere il significato di equivalenza tra calore ed energia. Imparare che esistono diversi stati della materia e i loro passaggi di stato. Conoscere come avviene la trasmissione del calore e come si propaga.

Saper fare

Saper utilizzare un termometro per misurare lo stato termico di un corpo o di un ambiente. Saper distinguere tra i diversi materiali e le loro dilatazioni termiche. Saper calcolare le equivalenze tra calore ed energia. Saper condurre semplici esperimenti in cui verificare i passaggi dei materiali. Saper distinguere tra i diversi modi di propagazione del calore e le loro differenze.

7.1 Temperatura e calore

Calore e temperatura sono concetti che vengono spesso confusi nell'uso comune, ma sono in realtà due grandezze fisiche ben distinte. Il concetto di temperatura, per quanto ovvio, è meno semplice di quanto si possa pensare. La **temperatura** è una proprietà. In fisica si asserisce che i sistemi (un insieme di oggetti), in equilibrio termico con altri sistemi (un altro insieme di oggetti), hanno una proprietà in comune, alla quale si dà il nome di temperatura. Se invece i sistemi non sono in equilibrio, si avrà sempre un trasferimento di calore dal corpo più caldo al corpo più (mai viceversa a meno che non si utilizzi energia, è il caso per esempio dei frigoriferi).

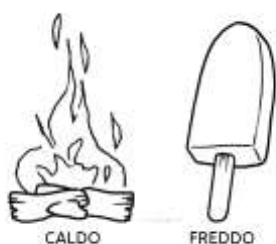


Figura 133 corpi caldi, corpi freddi

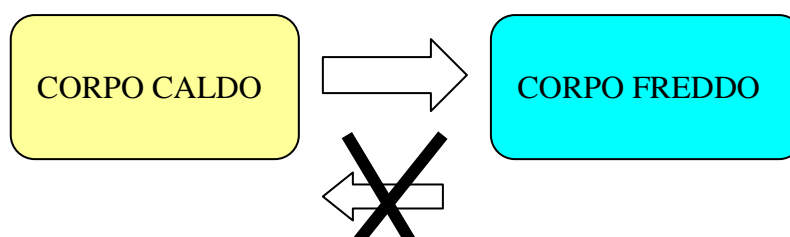


Figura 134 Scambio di calore tra corpi

Possiamo quindi definire la temperatura come la proprietà che regola il trasferimento di energia termica, ossia del calore.

Il **calore** è quindi una forma di energia che fluisce da un corpo più caldo verso un corpo più freddo, ed è la causa delle variazioni di temperatura: un corpo quando riceve calore si scalda e di conseguenza la sua temperatura aumenta, al contrario, un corpo quando perde calore si raffredda e perciò la sua temperatura diminuisce. Questi fattori sembrano elementari e conosciuti da tutti, ma in sostanza sappiamo poco su come si manifestano e come si misurano.

La distinzione tra un corpo caldo e un corpo freddo è legata alla sensazione che ci procura il contatto con il corpo o la sua vicinanza. Tuttavia, il calore e la temperatura sono due proprietà ben definite, anche se entrambe in stretta relazione con la struttura della materia.

7.2 Unità di misura del calore

Rappresenta la quantità di energia necessaria per innalzare la temperatura di 1g d'acqua distillata da 14,5 °C a 15,5 °C alla pressione atmosferica normale di 1,01. 105 Pa e si indica con **cal**, è detta calorìa.

La specificazione dell'intervallo di temperatura è dato dal fatto che il calore specifico dell'acqua distillata è rigorosamente costante, ma varia con la temperatura. Si è scelto l'intervallo di t da 14,5 a 15,5 °C perché il valore specifico dell'acqua a tali temperature è, con ottime approssimazioni, uguale al calore medio del calore specifico dell'acqua tra 0 e 100 °C.

IL FREDDO NON ESISTE!

Qualunque sia il sistema che stiamo studiando il suo essere freddo o caldo dipende solo dalla presenza o assenza di calore. Se ad un corpo o a un sistema viene sottratto calore allora diventa "freddo". Se viene fornito calore, si riscalda.

In entrambi i casi è sempre il calore l'unico vero protagonista!

7.3 La materia

La **materia** è tutto ciò che ha massa e occupa uno spazio. Questa definizione di materia è valida in un'analisi di fisica macroscopica ma non anche per analisi di fisica atomica o subatomica. A livello microscopico la materia si presenta costituita da particelle (**atomi**) che compongono un corpo in modo discontinuo, per cui lo spazio occupato da un corpo è perlopiù vuoto. La materia che costituisce qualsiasi corpo è formata da aggregati di particelle, tenute insieme da particolari forze di natura elettrica, che prendono il nome di **molecole**. Le molecole sono ulteriormente divisibili in **atomi**. Gli atomi occupano soltanto una minima parte dello spazio. Lo studio della materia è stato affrontato dall'uomo fin dalla filosofia dell'antica Grecia. Soltanto a partire dal XVII secolo diventa un oggetto di studio delle scienze sperimentali.

Proprietà della materia. Lo studio della materia si basa sull'analisi delle sue proprietà/caratteristiche microscopiche misurabili, come la massa, il volume, il peso, la densità (rapporto massa/volume), la temperatura, l'energia, la durezza, il colore, l'odore, la conducibilità elettrica, lo stato fisico (solido, liquido o aeriforme). Le proprietà della materia sono suddivise in:

- **Proprietà intensive.** Le proprietà intensive sono quelle a cui si fa più ricorso per identificare le sostanze e i diversi tipi di materia. Sono indipendenti dalla quantità del campione di materia preso come riferimento (es. colore, conducibilità, ecc.)
- **Proprietà estensive.** Le proprietà estensive sono quelle che dipendono dalla quantità (o estensione) del campione della materia preso come riferimento (es. volume, peso, massa, energia, ecc.).

Atomi. Gli atomi sono costituiti da un nucleo centrale contenente microparticelle di neutroni e protoni, intorno al quale su orbitali cosiddetti atomici si muovono altre microparticelle, gli elettroni. Gli elettroni hanno carica elettrica negativa, i protoni hanno carica elettrica positiva, i neutroni hanno carica elettrica neutra. Per questo, il nucleo atomico, avente stesso numero di neutroni e protoni, è elettricamente positivo, mentre l'atomo in cui si abbia il medesimo numero di protoni ed elettroni è elettricamente neutro. In caso diverso, se il numero degli elettroni è maggiore di quello dei protoni, l'atomo assumerà carica elettrica negativa; se il numero degli elettroni è minore di quello dei protoni l'atomo assumerà carica elettrica positiva. In ciascuno di questi due casi, l'atomo prenderà il nome di "ione"; parleremo di ione negativo o anione nel primo caso, di ione positivo o catione nel secondo.

Elementi. Tutte le molecole sono formate da atomi di un numero limitato di elementi semplici. In natura esistono 92 elementi semplici a tutt'oggi conosciuti, che sono stati ordinati in quella che ci è nota come la **tavola periodica degli elementi**. L'elemento più leggero è l'idrogeno; l'elemento più pesante è l'uranio. Le più moderne ricerche di fisica nucleare ci hanno permesso di creare altri elementi oltre quelli presenti in natura, che sono più pesanti dell'uranio e per questo motivo vengono definiti elementi transuranici. Gli **elementi transuranici** non sono stabili e tendono, dopo un intervallo di tempo in genere breve, a trasformarsi in qualcuno dei 92 elementi naturali. Gli elementi

presentano molecole formate da un numero limitato di atomi tutti uguali: la molecola di azoto è biatomica, cioè formata da due atomi di azoto, appunto, e si indica con la formula N_2 . Gli elementi si distinguono dai cosiddetti composti che sono sostanze in cui le molecole risultano costituite da più atomi diversi tra loro. Un esempio tipico di composto è l'acqua la cui molecola è costituita da due atomi di idrogeno ed uno di ossigeno. La sua formula molecolare è, perciò: H_2O . La **materia** è tutto ciò che è composto di atomi. La materia che osserviamo è generalmente nella forma di composti chimici, di polimeri, leghe o elementi puri. E' materia tutto ciò che possiamo conoscere. Può avere forma organica o inorganica. La Terra, le stelle, i pianeti, gli animali, le piante ecc. Oltre alle differenze percepite dai sensi umani la materia presenta caratteristiche individuabili soltanto mediante procedimenti di analisi. E' compito della chimica analizzare e spiegare la struttura, le proprietà della materia e le sue trasformazioni.

7.4 Termometro

Un **termometro** è uno strumento di misura per misurare la temperatura, oppure le variazioni di temperatura.

Per misurare realmente la temperatura dobbiamo utilizzare qualche fenomeno ad essa collegato ed in verità esistono molte proprietà fisiche che variano quando varia la nostra percezione fisiologica di temperatura. Tra queste possiamo citare il volume di un liquido, la lunghezza di una sbarra, la pressione di un gas mantenuto a volume costante, il volume di un gas mantenuto a pressione costante, il colore del filamento di una lampada o la resistenza elettrica di un filo. Una qualunque di queste proprietà può essere utilizzata per costruire un **termometro**, ovvero *uno strumento per misurare la temperatura*.

I termometri che utilizziamo normalmente sono *termometri a liquido*. Essi si basano sul fatto che **all'aumentare della temperatura i corpi si dilatano** e sono costituiti da un tubicino di vetro riempito di un liquido (spesso mercurio) che, al crescere della temperatura, aumenta il proprio volume salendo. Essi devono essere *tarati*, scegliendo due temperature di riferimento, in modo tale che le tacche al loro interno corrispondano a multipli di una unità di misura della temperatura da definire. Tale unità di misura venne fissata nel 1742 dall'astronomo svedese **Anders Celsius**, il quale pose arbitrariamente pari a $0^\circ C$ la temperatura del ghiaccio in fusione ed a $100^\circ C$ la temperatura dell'acqua in ebollizione (da ricordare che durante i passaggi di stato la temperatura del sistema non varia); dividendo tale intervallo in 100 parti definì infine il **grado centigrado** o **grado Celsius** ($^\circ C$).

Va fin d'ora anticipato che la misura della temperatura di un corpo o di un sistema utilizza l'equilibrio termico che si stabilisce tra due corpi o sistemi messi in contatto tra di loro, ovvero seppur inizialmente ognuno con temperatura diversa, se posti in contatto, dopo un certo tempo raggiungono entrambi la stessa temperatura, detta appunto di equilibrio. Approfondiremo questa descritto nel seguito del capitolo (paragrafo **Temperatura di equilibrio**).



Figura 135 Termometri in due scale termiche



Laboratorio 14
Taratura di un
termometro

7.5 Definizione operativa di temperatura

Una definizione operativa di temperatura potrebbe allora essere la seguente: *si definisce temperatura la grandezza fisica che indica lo stato termico di un corpo e si misura mediante il termometro, ad esempio centigrado.*

7.6 Scale termiche

Scala Celsius

Il **grado Celsius** ($^{\circ}\text{C}$) è l'unità di una scala di misura per la temperatura, così chiamata dal nome dell'astronomo svedese **Anders Celsius** (1701-1744), che la propose per la prima volta nel 1742. La scala Celsius oggi utilizzata fissa il punto di congelamento dell'acqua a 0°C e il punto di ebollizione a 100°C in condizioni standard di pressione. In origine invece la scala fu ideata da Celsius perché il punto di ebollizione dell'acqua fosse a 0°C , e il punto di congelamento a 100°C ; solo dopo la sua morte, nel 1744, la scala fu modificata in quella oggi di uso comune, cioè invertita.

Scala Fahrenheit

Nel termometro rappresentato in figura precedente, sono rappresentate sia la scala Celsius, prima descritta che la cosiddetta scala **Fahrenheit** (simbolo $^{\circ}\text{F}$) che non è particolarmente utilizzata in Italia ma è ancora molto popolare nei paesi anglosassoni e in particolare negli Stati Uniti. Nella scala Fahrenheit il congelamento dell'acqua avviene a 32°F mentre l'ebollizione avviene a 212°F . Per passare da Fahrenheit a Celsius e viceversa bisogna fare le seguenti operazioni:

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32 \quad (1)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{(^{\circ}\text{F} - 32)}{1,8} \quad (2)$$

Quindi se vogliamo sapere, ad esempio, a quanti gradi Fahrenheit corrispondono 37°C (la nostra temperatura corporea) dobbiamo fare:

$$37^{\circ}\text{C} = 37 \times 1,8 + 32 = 98,6^{\circ}\text{F}$$

quindi avere 100°F corrisponde ad avere un po' di febbre. Viceversa possiamo volere calcolare a quanti gradi centigradi corrispondono gli **zero** Fahrenheit e allora facciamo:

$$0^{\circ}\text{F} = \left(\frac{0 - 32}{1,8} \right) = -17,8^{\circ}\text{C}$$

CUORIOSITA'

Kelvin ideò questa scala termica pensando ad una scala che si rapportasse al Calore. Ovvero si chiese: esiste una temperatura in cui vi è totale assenza di calore?

Quello è lo zero assoluto, indicato appunto come 0°K

che è una temperatura decisamente rigida.

Scala Kelvin

In realtà entrambe le scale Celsius e Fahrenheit hanno un difetto e cioè che è perfettamente possibile scendere sotto gli zero gradi. Anche a temperature inferiori agli zero gradi le molecole di cui è composta la materia continuano a muoversi ed agitarsi. Ma scendendo in temperatura questi movimenti si faranno via via più piccoli, la velocità scenderà fino ad un punto in cui tutte le molecole rimarranno perfettamente immobili. E' ovvio che sotto questo livello non è possibile andare, la velocità non potrà scendere sotto zero. Questo punto di immobilità assoluta di tutti i costituenti microscopici della materia viene chiamato **zero assoluto**. La temperatura dello zero assoluto corrisponde a **zero assoluto** = -273,15° C

Ed è per questo che i fisici hanno deciso che una scala termometrica più adatta sarebbe stata una scala il cui zero corrisponde allo zero assoluto. La scala **kelvin** corrisponde proprio a questa esigenza. Un grado kelvin corrisponde esattamente ad un grado centigrado, ma lo zero è stato spostato verso il basso a -273,15 °C. Quindi per passare da centigradi a kelvin bisogna aggiungere 273,15 mentre per passare da kelvin a centigradi bisogna sottrarli:

$$^{\circ}K = ^{\circ}C + 273,15 \tag{3}$$

$$^{\circ}C = ^{\circ}K - 273,15 \tag{4}$$



Conversioni tra scale termiche

| | a Celsius °C | a Kelvin °K | a Fahrenheit °F |
|------------------|--|--|---|
| da Celsius °C | 1 | $^{\circ}K = ^{\circ}C + 273,15$ | $^{\circ}F = (^{\circ}C \times 1,8) + 32$ |
| da Kelvin °K | $^{\circ}C = ^{\circ}K - 273,15$ | 1 | $^{\circ}F = (^{\circ}K \times 1,8) - 459,67$ |
| da Fahrenheit °F | $^{\circ}C = \frac{(^{\circ}F - 32)}{1,8}$ | $^{\circ}K = \frac{(^{\circ}F + 459,67)}{1,8}$ | 1 |

7.7 Dilatazione termica

Tutti i corpi, sottoposti ad una variazione di temperatura, subiscono deformazioni più o meno evidenti. Qualitativamente questo fenomeno si può giustificare nel seguente modo: qualsiasi aumento di temperatura di un corpo materiale è accompagnato da un aumento della velocità di vibrazione delle sue molecole e conseguentemente da un numero maggiore di urti che queste subiscono. Questi fenomeni determinano un incremento della distanza media tra le molecole, per cui il risultato finale si traduce in un aumento del volume.

Nel caso di una diminuzione della temperatura la situazione risulta perfettamente simmetrica a quella appena descritta ed il risultato finale consiste in una diminuzione del volume del corpo. L'entità della deformazione subita viene calcolata confrontando le dimensioni spaziali del corpo prima e dopo la variazione della temperatura. Esistono comunque moltissimi casi in cui una o due dimensioni prevalgono in maniera così evidente sulle rimanenti da rendere trascurabili, su queste ultime, gli effetti delle deformazioni conseguenti a variazioni della temperatura.

Dilatazione lineare dei solidi

Se consideriamo, ad esempio, una barra di metallo (o ad una colonna di liquido) di qualche metro di lunghezza e sezione dell'ordine di pochi cm^2 , sottoposta ad una variazione di temperatura, l'effetto di dilatazione prende il nome di **dilatazione termica lineare**, intendendo che l'effetto prodotto è apprezzabile unicamente nella direzione della lunghezza della barra, mentre può essere trascurato nelle altre due dimensioni.

Per effettuare un'analisi quantitativa si consideri un filo o una sottile sbarra metallica di lunghezza iniziale l_0 alla temperatura di riferimento di 0°C . Se la temperatura viene portata al valore $t^\circ\text{C}$ ($t > 0$), l'esperienza mostra che il filo o la sbarra subisce un allungamento Δl il cui valore è direttamente proporzionale alla lunghezza l_0 e all'aumento della temperatura, ossia:

$$\Delta l = \lambda \cdot l_0 \cdot t \quad (5)$$

dove λ (lambda) rappresenta una costante di proporzionalità detta **coefficiente di dilatazione lineare**, che dipende unicamente dalle proprietà fisiche della sostanza di cui è fatto il filo o la barra. Dunque λ esprime la variazione di lunghezza subita da una barra di un metro in seguito ad una variazione di temperatura di un grado centigrado. La lunghezza finale l del solido sarà quindi:

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 + \lambda \cdot l_0 \cdot t = l_0(1 + \lambda \cdot t)$$

cioè

$$l = l_0(1 + \lambda \cdot t) \quad (6)$$

YouTube



Questa relazione esprime **la legge della dilatazione lineare** e dimostra che la lunghezza aumenta linearmente con l'aumento di temperatura. Questa variazione di lunghezza può essere usata per misurare una temperatura incognita, facendo riferimento ad una temperatura nota. Quando il corpo che subisce la deformazione ha due o tutte le dimensioni dello stesso ordine di grandezza, la variazione interessa rispettivamente una superficie o un volume. Per ottenere le relazioni che esprimono quantitativamente il fenomeno si procede nel seguente modo.

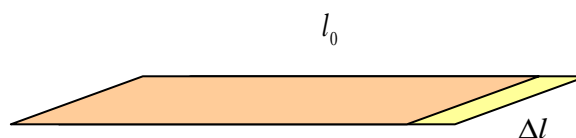


Figura 136 Dilatazione lineare dei corpi

Dilatazione superficiale dei solidi

Nel caso di **dilatazione superficiale** si consideri una lamina rettangolare di dimensioni iniziali a_0 e b_0 e superficie S_0 alla temperatura di 0°C . A seguito della variazione t della temperatura le lunghezze dei lati diventano rispettivamente:

$$a = a_0(1 + \lambda \cdot t) \quad (7)$$

$$b = b_0(1 + \lambda \cdot t) \quad (8)$$

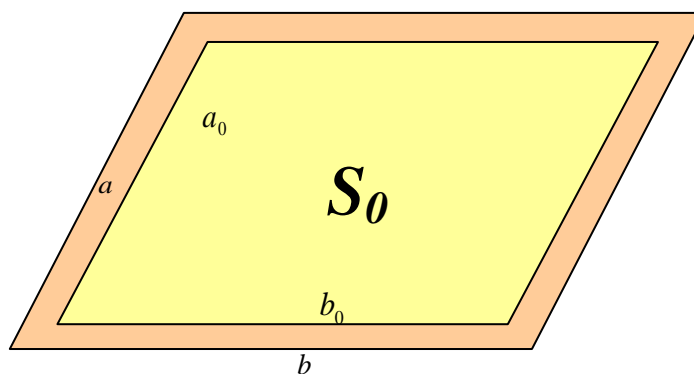


Figura 137 Dilatazione superficiale dei corpi

e conseguentemente la superficie finale sarà:

$$S = a b = a_0 b_0 (1 + \lambda t)^2 = S_0 (1 + 2 \lambda t + \lambda^2 t^2) \quad (9)$$

In questa espressione il termine contenente λ^2 può essere trascurato perché $\lambda \ll 1$ e la relazione diventa:

$$S = S_0 (1 + 2 \lambda t) \quad (10)$$

Pertanto il coefficiente di dilatazione superficiale è circa uguale al doppio del coefficiente di dilatazione lineare.

Dilatazione volumica dei solidi

Infine nel caso di **dilatazione cubica** si consideri un parallelepipedo di dimensioni iniziali a_o , b_o , c_o e volume V_o . Se t rappresenta l'incremento di temperatura rispetto al valore iniziale di 0°C , le lunghezze degli spigoli diventano:

$$a = a_o (1 + \lambda t) \quad (11)$$

$$b = b_o (1 + \lambda t) \quad (12)$$

$$c = c_o (1 + \lambda t) \quad (13)$$

e pertanto il volume risulterà:

$$V = a b c = a_o b_o c_o (1 + \lambda t)^3 = V_o (1 + 3 \lambda t + 3 \lambda^2 t^2 + \lambda^3 t^3)$$

I termini contenenti λ^2 e λ^3 si possono trascurare per considerazioni analoghe alle precedenti e quindi il volume finale diventa:

$$V = V_o (1 + 3 \lambda t) \quad (14)$$

Spesso rappresentata da questa formulazione:

$$V = V_o (1 + \alpha t) \quad (15)$$

dove evidentemente

$$\alpha = 3 \lambda \quad (16)$$

da non confondere con l' α con cui indicheremo il coefficiente di dilatazione volumica dei liquidi, numericamente molto diverso da quello di altri materiali.

Si noti che nelle relazioni che esprimono le dilatazioni lineare, superficiale e cubica sarebbe più corretto scrivere Δt invece di t , poiché la causa della dilatazione è una variazione di temperatura; in questo caso compare t perché è stata scelta come temperatura di riferimento quella di 0°C , per cui $\Delta t = t - 0 = t$.

Se la temperatura di riferimento non è 0°C , il procedimento rigoroso implicherebbe il calcolo delle varie lunghezze riferite a tale temperatura; nella pratica, poiché l'errore che si commette è trascurabile, si preferisce usare le formule prima dedotte nella forma:

$$\begin{aligned} l &= l_o (1 + \lambda \Delta t) \\ S &= S_o (1 + 2\lambda \Delta t) \\ V &= V_o (1 + 3\lambda \Delta t) \end{aligned} \quad (17)$$

qualunque sia la temperatura iniziale di riferimento, dove a questo punto l_o , S_o e V_o rappresentano rispettivamente la lunghezza iniziale o la superficie iniziale o il volume iniziale del corpo, mentre Δt rappresenta la variazione di temperatura rispetto a quella iniziale.

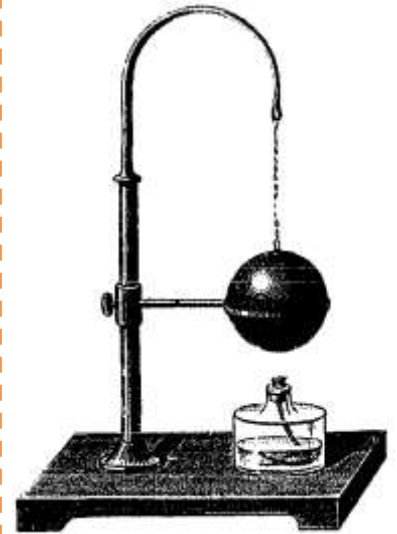


Figura 138 Sfera di Gravesande



Laboratorio 15 Sfera di Gravesande

Fisica per la scuola superiore

La relazione ottenuta per la dilatazione cubica vale anche nel caso dei liquidi, purché si tenga conto del fatto che anche il recipiente in cui è contenuto il liquido subisce una dilatazione.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i coefficienti di dilatazione per alcuni materiali solidi e liquidi. Si può notare, confrontando i coefficienti λ , che la dilatazione termica è molto più accentuata nei liquidi che nei solidi.

| Materiale | λ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) | Liquido | α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
|------------------|--|----------------|---|
| Acciaio | $11 * 10^{-6}$ | Acetone | $14,9 * 10^{-4}$ |
| Alluminio | $24 * 10^{-6}$ | Acqua | $2,1 * 10^{-4}$ |
| Argento | $19 * 10^{-6}$ | Alcool | $11,2 * 10^{-4}$ |
| Ferro | $12 * 10^{-6}$ | Benzolo | $12,4 * 10^{-4}$ |
| Ottone e bronzo | $19 * 10^{-6}$ | Glicerina | $5,1 * 10^{-4}$ |
| Rame | $17 * 10^{-6}$ | Mercurio | $1,82 * 10^{-4}$ |
| Vetro | $9 * 10^{-6}$ | Petrolio | $9,5 * 10^{-4}$ |
| Vetro pyrex | $3,2 * 10^{-6}$ | Benzina | $9,6 * 10^{-4}$ |
| Piombo | $29 * 10^{-6}$ | Aria | $3,67 * 10^{-3}$ |
| Cemento | $12 * 10^{-6}$ | Elio | $3,665 * 10^{-3}$ |
| Oro | $14,3 * 10^{-6}$ | Olio d'oliva | $0,74 * 10^{-3}$ |

Effetti della dilatazione termica nella vita pratica

La dilatazione termica dei materiali crea seri inconvenienti in molte applicazioni tecnologiche. Per esempio, la precisione di un orologio meccanico è limitata proprio dal fatto che le dimensioni delle sue parti mobili variano leggermente al variare della temperatura. Per ridurre questi inconvenienti, nella costruzione di strumenti di precisione si utilizzano leghe particolari, i cui coefficienti di dilatazione termica sono piccolissimi. Inoltre nella progettazione di macchinari, edifici, ponti occorre lasciare adeguati spazi liberi tra i diversi componenti, affinché i materiali (soprattutto i metalli) possano dilatarsi, senza deformare la struttura.

Al fenomeno della dilatazione termica è dovuto anche il fatto che gli oggetti di vetro si rompono, se vengono riscaldati in modo non uniforme. Se, per esempio si mette un bicchiere sulla fiamma del gas, il suo fondo si riscalda, e quindi si dilata, più della parte superiore, ed il vetro si rompe; ma se, invece, si riscalda il bicchiere gradualmente ed in modo uniforme, in un bagno di acqua, esso non si rompe perché tutte le sue parti si dilatano ugualmente. I vetri speciali, come il pyrex, usati per le pentole resistenti al fuoco, sono caratterizzati da coefficienti di dilatazione termica minori di quello del vetro comune.

Dilatazione termica nei liquidi

Come prima anticipato, anche **nei liquidi** è presente il fenomeno della dilatazione e si tratta ovviamente di una dilatazione cubica. La relazione è uguale a quella dei solidi:

$$V = V_0 (1 + \alpha \Delta t) \quad (18)$$

La differenza fondamentale è nell'ordine di grandezza della costante α che per i liquidi è maggiore ed è pari a $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e sono quelli indicati nella colonna di destra della tabella nella pagina precedente.

Questa differenza è spiegabile dal punto di vista microscopico per i legami atomici presenti nei liquidi, diversi dai solidi caratterizzati da una struttura cristallina più rigida.

Errore tipico: quando si dilata un liquido si dilata anche il suo contenitore

Quando un liquido si dilata un errore tipico è quello di non tener conto della corrispondente dilatazione del contenitore che è scaldato con lui. Quando per esempio si mette il latte sul fuoco, accade che questo fuoriesca proprio per la dilatazione del liquido.

Il latte uscito però non è uguale alla variazione di volume del liquido effettiva ma a quella apparente, perché si deve tenere conto del fatto che anche il bricco che lo conteneva si è dilatato. La relazione da considerare è la seguente:

$$\Delta V_{\text{effettivo}} = \Delta V_{\text{apparente}} + \Delta V_{\text{recipiente}} \quad (19)$$

7.8 L'anomalia dell'acqua

L'acqua, a differenza di altri liquidi, presenta uno strano comportamento: fra i 0°C e i 4°C , il suo volume invece di aumentare con la temperatura, diminuisce. Oltre i 4°C il comportamento degli altri fluidi.

Considerando che la massa è costante (e quindi non influenzata dalla temperatura) si può dire che l'acqua raggiunge la sua massima densità a 4°C (ovvero minimo volume a parità di massa)

Il comportamento anomalo dell'acqua dipende dalla sua struttura molecolare.

Questo comportamento ha una importanza fondamentale dal punto di vista biologico.

All'inizio dell'inverno le acque superficiali dei laghi si raffreddano, diventando più dense e scendendo verso il fondo.

Se c'è una ulteriore diminuzione di temperatura, il volume aumenta e l'acqua meno densa risale in superficie. In questo modo l'acqua che si accumula sul fondo dei laghi non può trovarsi a temperature inferiori ai 4°C . La parte di acqua che inizia a gelare è quella superficiale che, diventando ghiaccio, galleggia sulla sottostante acqua più densa.

YouTube



YouTube

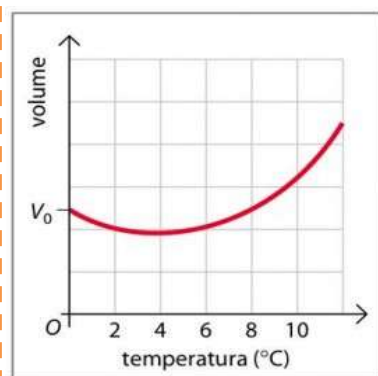


Figura 139 Anomalia dell'acqua

In questo modo la vita è possibile potendo congelare solo la superficie di mari, laghi e fiumi, mentre rimangono nei fondali condizioni adatte alla vita.



7.9 La dilatazione dei gas

Anche i gas, se scaldati, subiscono delle modifiche dal punto di vista macroscopico dovute alle loro caratteristiche microscopiche.

Nel caso dei gas, ancor più che nei liquidi, è necessario considerare le condizioni alle quali il gas subisce il riscaldamento. È necessario considerare sia il volume che la pressione, che dipendono in particolare dal contenitore in cui è racchiuso il gas.

Se per esempio il gas è contenuto in un recipiente chiuso non saranno possibili cambiamenti di volume e l'agitazione termica dovuta alla variazione di temperatura andrà ad agire sulla pressione. Se invece il contenitore è dotato per esempio di un pistone che si muove, la variazione di temperatura comporterà una variazione di volume mentre la pressione rimarrà per lo più costante.

Approfondiremo questi aspetti nel prossimo capitolo, quando descriveremo le due leggi di Gay-Lussac e la legge di Boyle.

7.10 CLIL Project

When a liquid expands a typical mistake is to not take into account the corresponding dilation of the container which is heated with him. For example, when you put the milk on the fire, it happens that this comes out because of the extension of the liquid.

The milk left however, is not equal to the change of volume of the liquid in the apparent effective but, because it must take account of the fact that even the pot that contained it is dilated. The relationship to consider is the following:

$$\Delta V_{\text{effettivo}} = \Delta V_{\text{apparente}} + \Delta V_{\text{recipiente}} \quad (19)$$

Water anomaly

The water, unlike other liquids, presents a strange behavior: between 0°C and 4°C, its volume instead of increasing with the temperature, decreases. Above 4°C the behavior of other fluids.

Considering that the mass is constant (and thus not influenced by temperature) we can say that the water reaches its maximum density at 4 °C (minimum volume for a given mass).

The anomalous behavior of water depends on its molecular structure. This behavior is of fundamental importance from the biological point of view.

At the beginning of winter surface waters of lakes cools, becoming denser and down towards the bottom.

If there is a further decrease in temperature, the volume increases and the less dense water rises to the surface. In this way the water that accumulates on the bottom of lakes can not be situated at temperatures below 4 °C. The part of the water starts to freeze is superficial, becoming ice floats on the denser water below.

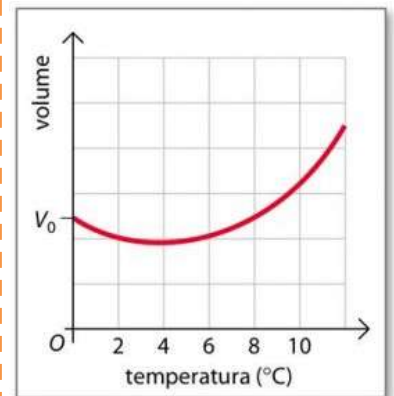
In this way life is possible only being able to freeze the surface of the seas. lakes and rivers, while they remain in the seabed conditions suitable for life.

The expansion of gases

Even the gas, if heated, undergo changes from the macroscopic point of view due to their microscopic characteristics. In the case of gas, even more than in liquids, it is necessary to consider the conditions under which the gas undergoes heating. E 'must consider both the volume and the pressure, which depend in particular from the container in which the gas is enclosed.

If for example the gas is contained in a closed container will not be possible changes of volume and the thermal agitation due to temperature variation will to act on the pressure. If the container is equipped for example with a piston that moves, the change in temperature will result in a change in volume while the pressure will remain mostly constant.

Will Discuss these issues in the next chapter, when we describe the two laws of Gay-Lussac.



7.11 Calore specifico

Il calore specifico di una sostanza è definito come la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di una unità di massa di $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ o equivalentemente $1\text{ }^{\circ}\text{K}$ e si misura in $\frac{J}{kg \cdot K}$ o in $\frac{cal}{g \cdot C}$.

Una grandezza analoga è il *calore molare*, definito come la quantità di calore necessaria per aumentare di 1 kelvin (K) la temperatura di una **mole** di sostanza, l'unità di misura **SI** (Sistema internazionale di unità di misura) è il $J / (\text{mol} \times K)$.

Esistono svariati modi per esprimere il calore specifico di una sostanza, poiché esso dipende dalla trasformazione termodinamica a cui tale sostanza è sottoposta. In generale si utilizzano due valori, riferiti a una trasformazione **isobara** (stessa pressione) oppure **isocora** (stesso volume): il calore specifico a *pressione costante*, simboleggiato con c_p , e il calore specifico a *volume costante*, c_v . Sebbene i solidi e i liquidi siano poco dilatabili, la differenza tra c_p e c_v non è trascurabile: infatti, per i solidi è

$$\frac{c_p}{c_v} \approx 1,05 \quad \text{per i solidi} \quad (20)$$

mentre per i liquidi in molti casi è

$$\frac{c_p}{c_v} \approx 1,2 \quad \text{per i liquidi} \quad (21)$$

ma si hanno anche liquidi con $\frac{c_p}{c_v} > 1,5$.

Quindi conoscendo il calore specifico a pressione costante, utilizzando la tabella di appena vista, è possibile calcolare il calore specifico a volume costante, utilizzando le formule:

$$c_v \approx \frac{c_p}{1,05} \quad \text{per i solidi} \quad (22)$$

mentre per i liquidi:

$$c_v \approx \frac{c_p}{1,2} \quad \text{per i liquidi} \quad (23)$$

| Sostanza | Stato | $C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$ | $C_p \left(\frac{cal}{g \cdot C} \right)$ |
|--|------------------|---|--|
| Alluminio | solido | 880 | 0,210 |
| Acciaio inox | solido | 502 | 0,120 |
| Acqua | liquido | 4186 | 1,000 |
| Acqua (Ghiaccio) | solido (0 °C) | 2090 | 0,499 |
| Aria (secca) | gassoso | 1005 | 0,240 |
| Aria (100% umidità relativa) | gassoso | ~ 1030 | 0,246 |
| Azoto | gassoso | 1042 | 0,249 |
| Diamante | solido | 502 | 0,120 |
| Elio | gassoso | 5190 | 1,240 |
| Etanolo | liquido | 2460 | 0,588 |
| Ferro | solido | 444 | 0,106 |
| Glicerina | liquido | 2260 | 0,540 |
| Grafite | solido | 720 | 0,172 |
| Idrogeno | gassoso | 14435 | 3,448 |
| Mercurio | liquido | 139 | 0,033 |
| Olio | liquido | ~ 2000 | 0,478 |
| Ossigeno | gassoso | 920 | 0,220 |
| Oro | solido | 129 | 0,031 |
| Ottone | solido | 377 | 0,090 |
| Piombo | solido | 130 | 0,031 |
| Rame | solido | 385 | 0,092 |
| Silice (fuso) | solido | 703 | 0,168 |
| Silice | gassoso | 2020 | 0,483 |
| Stagno | solido | 228 | 0,054 |
| Zinco | solido | 388 | 0,093 |
| Condizioni standard (salvo diversa indicazione). Per i solidi il valore coincide col calore specifico a volume costante | | | |

7.12 Capacità termica di un corpo



Si definisce **capacità termica** di un corpo il prodotto tra il calore specifico c e alla massa m del corpo:

$$C = m \cdot c \quad (24)$$

Analogamente, la capacità termica è proporzionale al calore specifico molare C_m e al numero di moli n .

È interessante notare come avremmo potuto introdurre dapprima la grandezza calore specifico C e di qui definire il calore specifico c , operando nel seguente modo:

Def. Alternativa Capacità termica: la capacità termica di un corpo è la grandezza C misura quanta energia è necessaria per aumentare di 1K (o di 1°C) la temperatura di un corpo.

$$\text{capacità termica } C = \frac{\text{quantità di calore assorbita o ceduta}}{\text{variazione di temperatura}} = \frac{Q}{\Delta T} \quad (25)$$

Def. alternativa calore specifico: il calore specifico di una sostanza è uguale alla sua capacità termica divisa per la sua massa, esprime la quantità di energia necessaria per variare di un K la temperatura di un kg di una determinata sostanza.

$$\begin{aligned} \text{calore specifico} &= \frac{\text{capacità termica}}{\text{massa}} && \text{ovvero} \\ c &= \frac{C}{m} \end{aligned} \quad (26)$$

7.13 Legge fondamentale della calorimetria



Unendo insieme le relazioni (25) e (26) è possibile ricavare la quantità di calore Q trasmessa ad un corpo, ottenendo:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (27)$$

e si misura in Joule o in calorie a seconda delle unità di misura scelte per esprimere il calore specifico (se $\frac{J}{kg \cdot K}$ o $\frac{cal}{g \cdot C}$)

che esprime il fatto che trasmettendo ad un corpo di massa m una certa quantità di calore Q , questa induce una variazione di temperatura ΔT direttamente proporzionale ad essa e dipendente comunque dalla sostanza che riceve tale calore, espressa attraverso il calore specifico c .

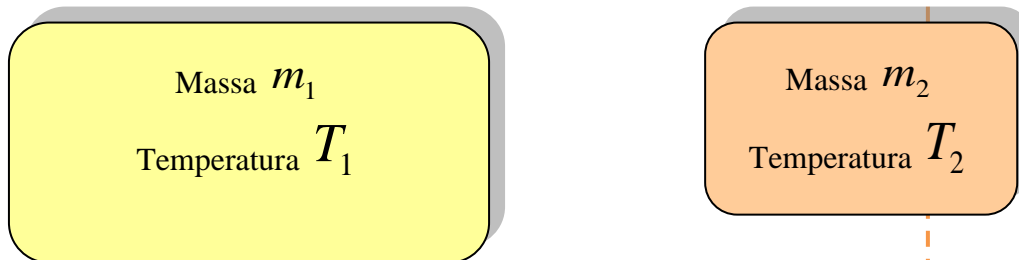
FISSARE LE IDEE

Questa è una Legge davvero importante, che ritroviamo anche in altri contesti, come ad esempio per l'elettricità, dove l'Energia dissipata da un **resistore** sarà espressa proprio in calore.

7.14 Temperatura di equilibrio

Abbiamo visto che, per poter misurare la temperatura di un corpo con un termometro, si sfrutta, oltre alla dilatazione termica, anche l'equilibrio termico. In questo paragrafo vogliamo sfruttare la legge fondamentale della termologia per andare a calcolare la temperatura d'equilibrio a cui arrivano due corpi quando li poniamo a contatto tra loro.

$$\text{con } T_2 > T_1$$



L'equilibrio termico ci dice che il corpo più caldo, inizialmente posto a una temperatura T_2 cede parte del suo calore al corpo più freddo, inizialmente a temperatura T_1 . Si arriva così a una **situazione finale** in cui entrambi i corpi si trovano alla stessa temperatura di equilibrio T_e .

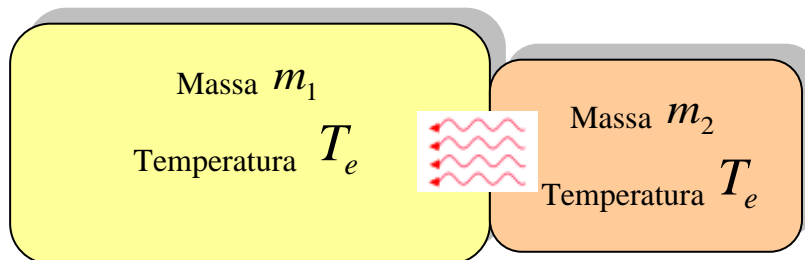


Figura 140 Temperatura di equilibrio di corpi in contatto termico

In base alla legge fondamentale della termologia il **calore ceduto** dal corpo più caldo risulta:

$$Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_e - T_2) \quad (28)$$

Siccome la temperatura di equilibrio T_e è minore rispetto alla temperatura iniziale T_2 avremo che

$$Q_2 < 0 \quad (29)$$

ossia il calore ceduto è un numero negativo.

Viceversa, il corpo più freddo passa dalla temperatura T_1 a una temperatura maggiore T_e e pertanto il **calore assorbito** è dato da:



Laboratorio 16 Temperatura di Equilibrio

$$Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1) \quad (30)$$

Siccome la temperatura di equilibrio T_e è maggiore rispetto alla temperatura iniziale T_1 avremo che

$$Q_1 > 0 \quad (31)$$

considerando che il calore ceduto dal corpo più caldo e quello assorbito da quello più freddo devono coincidere per il principio di conservazione dell'energia, deve risultare:

$$|Q_1| = |Q_2| \quad (32)$$

Dal momento che Q_2 è un numero negativo, nel calcolarne il valore assoluto dobbiamo cambiare il suo segno. Otteniamo pertanto un'equazione di primo grado nell'incognita T_e che possiamo andare a risolvere per ottenere **la temperatura d'equilibrio**:

$$m_2 \cdot c_2 \cdot (T_2 - T_e) = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_e - T_1) \quad (33)$$

da cui risolvendo otteniamo la temperatura di equilibrio:

$$T_e = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2} \quad (34)$$

Cerchiamo di analizzare ora alcuni **casi particolari** della formula ottenuta.

1° caso

Supponiamo che la massa del corpo più caldo sia molto maggiore della massa del corpo a temperatura minore, ossia

$$m_2 \gg m_1$$

In questo caso possiamo trascurare tutti i termini che contengono m_1 perché saranno molto più piccoli dei termini che contengono m_2 . Otteniamo così con buona approssimazione come temperatura di equilibrio

$$T_e \approx \frac{m_2 \cdot c_2 \cdot T_2}{m_2 \cdot c_2} = T_2 \quad (35)$$

La temperatura di equilibrio coincide pertanto con la temperatura del corpo con massa maggiore. Questo è quanto avviene nel caso della misura della temperatura di un paziente con il termometro clinico.

2° caso

Altro caso particolare è quello in cui mettiamo a contatto due masse uguali

$$m_2 = m_1$$

della stessa sostanza, quindi

$$C_2 = C_1 = C \quad \text{se stessa sostanza}$$

In questo caso ci aspettiamo che la temperatura d'equilibrio risulti essere la media aritmetica delle due temperature e infatti:

$$T_e = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2} = \frac{m_1 \cdot c \cdot T_1 + m_1 \cdot c \cdot T_2}{m_1 \cdot c + m_1 \cdot c} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Per concludere, osserviamo come la formula per la temperatura di equilibrio T_e sia una conseguenza diretta della legge fondamentale della termologia dove compaiono solo delle **variazioni di temperatura**. Ora, le variazioni di temperatura in gradi Kelvin e in gradi Celsius sono numericamente uguali tra loro, pertanto la formula per la temperatura di equilibrio è valida sia nel caso in cui le temperature sono espresse in gradi Kelvin sia nel caso in cui le temperature sono espresse in gradi Celsius.

7.15 Il calorimetro

Un **calorimetro** è un dispositivo utilizzato in calorimetria per misurare il flusso di calore durante una trasformazione, come calori specifici, calori latenti e di fusione/ebollizione. Se il calorimetro è formato da una miscela di due fasi di una stessa sostanza, esso è detto *isotermico*. Un calorimetro consiste in un termometro attaccato ad un contenitore metallico pieno d'acqua sospeso su una fonte di calore.

Il **calorimetro delle mescolanze** (o ad acqua, o di Regnault) è costituito da un vaso di Dewar in cui viene versata dell'acqua e, successivamente, la sostanza in esame; all'interno del calorimetro è posto un termometro e un agitatore. Il calore specifico della sostanza viene dedotto dalla variazione di temperatura dell'acqua: a causa della non nulla capacità termica del calorimetro è necessario introdurre un *equivalente in acqua* del calorimetro, che tenga conto del calore assorbito o ceduto da esso durante la misura.



Figura 141 Calorimetro

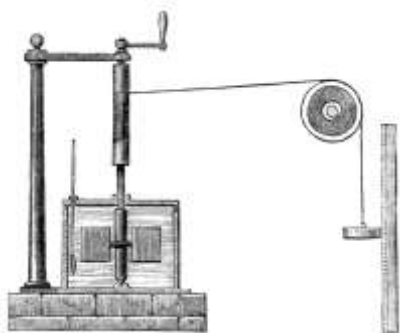


Figura 142 Macchina di Joule

YouTube



Laboratorio 17 Trasformazione di lavoro in calore

Il calorimetro delle mescolanze è il tipo di calorimetro più impiegato per scopi didattici.

Il **calorimetro a ghiaccio** (o di **Lavoisier e Laplace**) è un calorimetro isotermico formato da tre recipienti concentrici: nel più interno si colloca il corpo in esame; in quello intermedio il ghiaccio; in quello più esterno si colloca dell'altro ghiaccio che ha la funzione di **isolante**, evitando che il calore dell'ambiente esterno sciogla il ghiaccio del recipiente intermedio. In base alla quantità d'acqua che fuoriesce dal recipiente intermedio mediante un apposito condotto si può misurare il calore fornito dal corpo nel contenitore più interno, ed eventualmente calcolarne il calore specifico.

Il **calorimetro di Bunsen** è un calorimetro isotermico formato da un recipiente contenente acqua distillata, il cui fondo è connesso ad un tubo ripiegato a U contenente mercurio e terminante in un capillare. Una provetta, sulla quale è stato precedentemente fatto formare uno strato di ghiaccio, è posta all'interno del bagno d'acqua. Inserendo il corpo in esame la quantità di ghiaccio all'esterno della provetta può aumentare o diminuire in relazione al calore assorbito/ceduto dal corpo. La quantità di calore scambiato è quindi ottenuta a partire dalla variazione di volume dell'acqua, misurata dall'altezza del mercurio nel capillare.

7.16 Equivalenza tra lavoro e calore

Il fisico inglese **James Prescott Joule**, tramite una famosa esperienza (1850) con uno strumento denominato "mulinello di Joule", effettuò una misura precisa dell'equivalente meccanico della caloria, ottenendo un valore molto preciso per quei tempi (anche grazie all'ottima lavorazione dello strumento effettuata dal meccanico aiutante di Joule).

Per mezzo di tale esperimento Joule determinò un valore dell'equivalente meccanico del calore pari a **4,186 J/cal**, valore di straordinaria precisione per i tempi.

In seguito, tramite altre e più sofisticate esperienze di elettromagnetismo, si pervenne al valore di **4,1855 J/cal**.

Grazie a queste sperimentazioni Joule dimostrò che calore e lavoro meccanico potevano convertirsi direttamente l'uno nell'altro, mantenendo però costante il loro valore complessivo: nelle macchine idrauliche e meccaniche gli attriti trasformano la potenza meccanica perduta (lavoro) in calore e, viceversa, nelle macchine termiche l'effetto meccanico prodotto (lavoro) deriva da una quantità equivalente di calore.

La relazione che intercorre quindi tra calore e lavoro (energia) è quindi:

$$1kcal = 4186J \quad (36)$$

da cui è possibile esprimere la formula inversa, ovvero:

$$1J = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ kcal} \quad (37)$$

Osservazione

Non deve stupirci tale relazione! Già nel volume 1 abbiamo affrontato, nella parte finale, il problema della conservazione dell'energia meccanica in presenza di forze non conservative. L'effetto dispersivo o meglio dissipativo di tali forze non conservative, basti pensare agli attriti, sono proprio la trasformazione di parte dell'energia in calore.

7.17 Potere calorifico

Il potere calorifico può essere definito come la quantità di calore, o di energia, prodotta dall'unità di massa di un determinato combustibile, dove un combustibile è un materiale che in presenza di ossigeno è in grado di bruciare. La sua unità di misura è espressa in $[J/Kg]$ oppure in $[cal/Kg]$ tenuto conto dell'equivalenza tra le due grandezze.

$$\text{Potere calorifico} = \frac{\text{calorie}}{\text{massa}}$$

Segue una tabella con poteri calorifici di alcune sostanze:

| tipo di materiale | Potere calorifico kcal/kg |
|--------------------------|---------------------------|
| abiti | 4.998 |
| acetone | 8.092 |
| Alcool etilico | 5.950 |
| benzina | 10.370 |
| carbone | 8.330 |
| farina | 3.987 |
| idrogeno | 34.034 |
| metano | 13.328 |
| petrolio | 10.110 |
| Proteine di legumi | 10.988 |
| Zucchero di barbabietola | 2.142 |
| Legno essiccato abete | 4.665 |

Basta dare un'occhiata alla tabella di prima per capire il motivo per cui utilizziamo alcuni combustibili come la benzina o il metano per le nostre autovetture. Notate inoltre che anche i cibi hanno un loro potere calorifico (**valori nutrizionali**) che troviamo, per legge, indicati sulle confezioni dei prodotti alimentari, per consentire a chiunque di quantificare quale sarà l'apporto energetico degli alimenti ingeriti.

Per avere un'idea di quale sia l'apporto energetico di cui ha bisogno un individuo, per un adolescente il fabbisogno nutrizionale giornaliero è di circa 2600kCal, ottenibili ingerendo grassi, carboidrati e proteine. Questo fabbisogno energetico scende per un uomo di mezza età, che conduce una vita routinaria, ne-

| Valori Nutrizionali | Legumi | | Cereali | |
|---------------------------------|---------|------------|---------|------|
| | Fagioli | Lenticchie | Farro | Orzo |
| Valore Energetico kcal | 291 | 291 | 135 | 119 |
| | 1216 | 1219 | 1400 | 1333 |
| Proteine g | 20,2 | 22,7 | 15,1 | 10,4 |
| Carboidrati (di cui zuccheri) g | 47,3 | 51,1 | 47,1 | 70,5 |
| | 3,5 | 1,8 | 2,7 | 0 |
| Lipidi g | 2 | 1 | 2,5 | 1,4 |
| Fibra Totale g | 17,1 | 13,8 | 6,8 | 9,2 |
| Sodio g | 3 | 8 | 18 | 3 |

Figura 143 Alcuni valori nutrizionali ed energetici

cessitando di circa 2300kCal al giorno. Ovviamente quelle descritte sono indicazioni generiche e non costituiscono alcuna indicazione dietetica, che ogni individuo adegua, a volte con l'aiuto di un dietologo, al proprio organismo e alle proprie esigenze di vita in base alle attività svolte, al proprio peso corporeo, alle ore di sonno e ad altri fattori spesso soggettivi, evitando in ogni caso diete da fame pur di scendere di peso, con conseguenze spesso gravi per la propria salute.

YouTube



7.18 I passaggi di stato

Lo stato di aggregazione di un corpo non è una sua caratteristica immutabile ma può cambiare variando le condizioni in cui esso si trova. Osservate lo schema riportato di seguito che riassume i nomi dei differenti passaggi di stato.

È possibile osservare la rappresentazione degli stati di aggregazione anche a livello microscopico.



Laboratorio 18 Stati della Materia

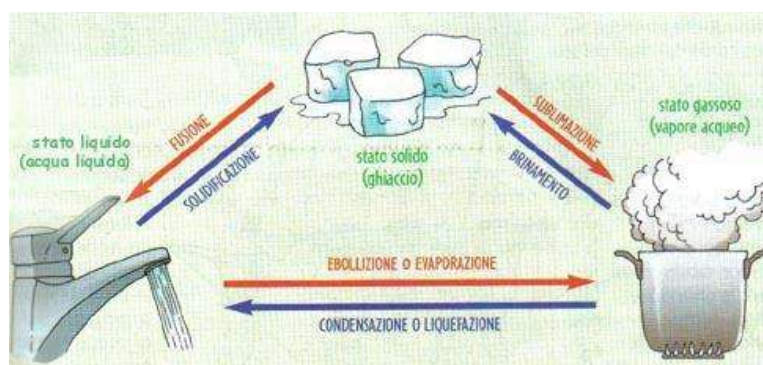


Figura 144 Passaggi di stato

Riscaldando una sostanza allo stato solido possiamo provocarne la **fusione** (es: un cubetto di ghiaccio lasciato a temperatura ambiente) e continuando il riscaldamento del liquido ne otteniamo la **vaporizzazione**. Questa può avvenire o tramite l'**evaporazione** che interessa solo la superficie del liquido ed avviene a tutte le temperature in cui la sostanza è allo stato liquido (es: l'acqua che evapora da una pozzanghera) o tramite l'**ebollizione** che coinvolge tutta la massa del liquido ed avviene ad una temperatura e pressione specifici (es: un pentolino di acqua che bolle sul fornello).

Il passaggio di stato che si verifica invece raffreddando un gas è la **condensazione** (es: il vapore acqueo che d'inverno condensa sui vetri freddi) e continuando a raffreddare il liquido ne otteniamo la **solidificazione** (es: formazione dei cubetti di ghiaccio nel freezer). Alcune sostanze hanno la capacità di passare direttamente dallo stato solido allo stato gassoso tramite la **sublimazione** e dallo stato gassoso direttamente allo stato solido tramite il **brinamento**.

Somministrando energia sotto forma di calore ad un corpo questa si trasforma in energia di movimento (energia cinetica) delle particelle

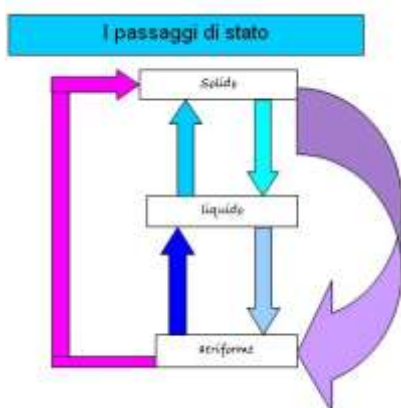


Figura 145 Schema passaggi di stato

che lo costituiscono; esiste quindi una diretta correlazione tra la **temperatura** (manifestazione macroscopica) di un corpo e il **movimento** (manifestazione microscopica) delle sue particelle. I passaggi di stato sono **trasformazioni fisiche** poiché la materia non cambia la sua composizione chimica ma solo il modo in cui ci appare (es: ghiaccio, acqua e vapore acqueo ci appaiono differenti ma sono tutti costituiti dallo stesso tipo di particelle).

7.19 Calore latente

Il **calore latente** associato a una trasformazione termodinamica è la quantità di energia necessaria allo svolgimento di un passaggio di stato. Ad esempio, il "calore latente di fusione" è l'energia corrispondente al passaggio di un sistema dallo stato solido a quello liquido.

L'unità di misura del calore latente λ nel Sistema internazionale è **J/kg**. Spesso il calore latente viene espresso per mole di sostanza come calore latente molare e nel SI si misura in J/mol.

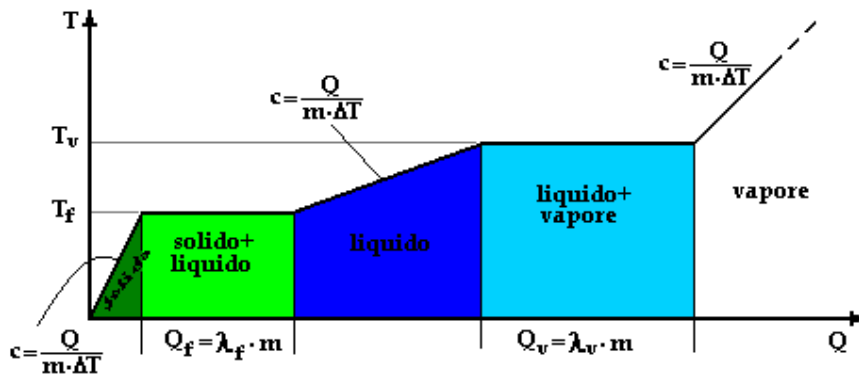


Figura 146 Passaggi di stato rapportati al calore

A seconda del tipo di transizione di fase in questione, si parla di:

- calore latente di **fusione**
- calore latente di **vaporizzazione**
- calore latente di **sublimazione**.

Il calore necessario al passaggio di fase è:

$$Q = \lambda \cdot m \quad (38)$$

cioè il calore Q fornito o sottratto al sistema non influisce sulla temperatura, ma è proporzionale alla quantità di sostanza m che ha cambiato fase, e continua fino a che tutta la sostanza non cambia fase. In assenza di transizioni di fase invece, un apporto o un prelievo di calore determina una variazione di temperatura: si parla in questo caso di calore sensibile.

| Calore latente e temperatura al cambio di stato di sostanze comuni | | | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| alla pressione atmosferica | | | | |
| Sostanza | Calore latente di fusione [kJ/kg] | Temperatura di fusione [°C] | Calore latente di ebollizione [kJ/kg] | Temperatura di ebollizione [°C] |
| Etanolo | 108 | -114 | 855 | 78,3 |
| Ammoniaca | 339 | -75 | 1369 | -33 |
| Biossido di carbonio | 184 | -57 | 574 | -78 |
| Elio | 1,25 | -269,7 | 21 | -268,93 |
| Idrogeno | 58 | -259 | 455 | -253 |
| Azoto | 25,7 | -210 | 200 | -196 |
| Ossigeno | 13,9 | -219 | 213 | -183 |
| Mercurio | 11 | -39 | 294 | 357 |
| Zolfo | 54 | 115 | 1406 | 445 |
| Acqua | 333,5 | 0 | 2272 | 100 |

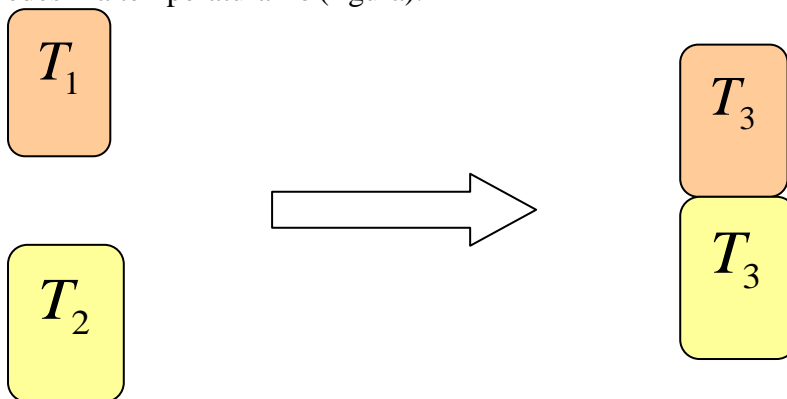
7.20 Trasmissione del calore

Per **trasmissione del calore** (o **scambio termico**) si intende il trasferimento di calore (ovvero energia termica) tra due sistemi, che è causato da una **differenza di temperatura** tra i due sistemi in questione. Se durante tale processo non viene prodotto calore (ad esempio attraverso reazioni chimiche), il calore ceduto da un sistema viene acquistato dal secondo sistema, in accordo con la legge di conservazione dell'energia.

I processi di scambio termico sono generalmente classificati in tre categorie, anche se in pratica non si presenta mai una sola modalità, ma solitamente si ha la combinazione di almeno due di esse. Si tende però di solito ad individuare il tipo di scambio predominante, trascurando, a seconda di vari fattori (dei quali sicuramente molto rilevante è la temperatura), le altre modalità di trasmissione del calore presenti. Le suddette tre categorie sono: conduzione, convezione e irraggiamento.

Conduzione

La **conduzione termica** è il processo che si attua in un mezzo solido, liquido o aeriforme nel momento in cui, a causa di una differenza di temperatura, viene provocato un trasferimento di energia cinetica da una molecola a quella adiacente che possiede una velocità di vibrazione minore, essendo la velocità di vibrazione delle particelle indice della temperatura del corpo. Si ha in questo modo un trasferimento di energia, sotto l'influenza del gradiente di temperatura (variazione della temperatura lungo una direzione), senza uno spostamento di particelle; dunque il mezzo in cui avviene conduzione rimane nella condizione di quiete. E' il caso dell'esempio sopraccitato, in cui vengono messi a contatto due corpi inizialmente a temperature differenti T_1 e T_2 , i quali, dopo un certo tempo in cui avviene conduzione termica, raggiungono la medesima temperatura T_3 (figura).



Convezione

La **convezione termica** avviene solamente in presenza di un fluido, ad esempio aria o acqua. Tale fluido, a contatto con un corpo la cui temperatura è maggiore di quella dell'ambiente che lo circonda, si riscalda e, per l'aumento di temperatura subito, si espande (nella maggior parte dei casi). A causa della spinta di Archimede, questo fluido sale, essendo meno denso del fluido circostante che è più freddo. Contemporaneamente, il fluido più freddo scende e prende il posto di quello più caldo che sale; in questo modo si instaura una circolazione convettiva.

Per esempio supponiamo di avere un sistema isolato dall'esterno costituito da due corpi aventi temperature differenti, l'uno al di sopra dell'altro, divisi da uno strato di acqua, che, come vedremo, svolgerà la funzione del sopraccitato fluido. Supponendo che venga posto in superficie il corpo più freddo, siccome l'acqua calda tende a salire a l'acqua fredda a scendere (per la diversa densità), si sviluppa un moto convettivo per cui nella zona centrale l'acqua riscaldata si contatta con il corpo caldo sale verso il corpo freddo, mentre nelle zone più esterne si ha un movimento verso il basso dell'acqua che, raffreddata per il contatto con il corpo freddo, si dirige verso quello caldo.

Dalla figura precedente, si può osservare che si avrebbe una situazione molto diversa nel caso in cui i due corpi venissero invertiti, ossia se il

YouTube

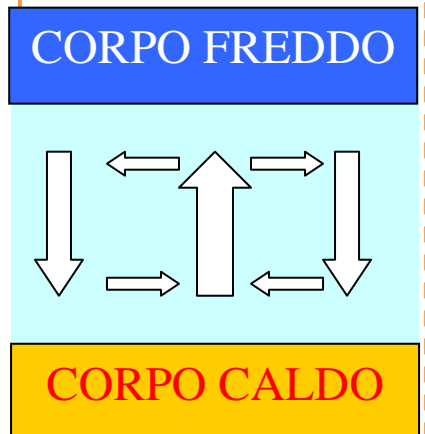


Figura 147 Moti convettivi del calore

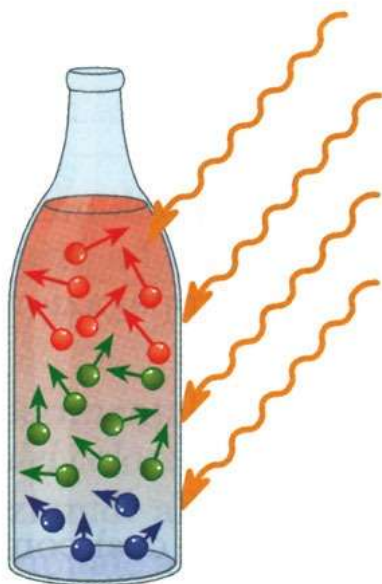


Figura 148 Irraggiamento dei corpi e dei liquidi

corpo a temperatura maggiore fosse posto in superficie ed il corpo a temperatura minore sotto lo strato d'acqua: in questo caso non si avrebbe nessun moto convettivo, ma l'acqua rimarrebbe ferma trasferendo calore dal corpo più caldo a quello più freddo solo per conduzione.

Si è fino ad ora descritta la convezione libera o naturale. La convezione può anche essere forzata, vale a dire che in alcuni casi, per scopi pratici, il moto del fluido può essere obbligato da ventole o pompe. Vi sono molteplici esempi pratici di convezione forzata, basti pensare alla caldaia di un termosifone che provoca la circolazione di un fluido, di solito acqua o aria, in modo da riscaldare le stanze della casa, oppure alla ventola atta a raffreddare la cpu di un computer.

Irraggiamento

Irraggiamento o radiazione termica è il termine usato per indicare la radiazione elettromagnetica emessa dalla superficie di un corpo che si trova ad una certa temperatura. Tutti gli oggetti emettono radiazioni elettromagnetiche, che sono frutto dell'eccitazione termica della superficie del corpo, legata alla condizione energetica dei suoi atomi (l'irraggiamento è tanto più intenso quanto maggiore è la temperatura dell'oggetto stesso), e viene emessa in tutte le direzioni; quando il mezzo trasmissivo risulta essere sufficientemente trasparente a tale radiazione, nel momento in cui essa colpisce un altro corpo, parte viene riflessa e parte assorbita. Tra i due corpi si stabilirà un continuo scambio di energia, con uno scambio netto di calore dal corpo più caldo al corpo più freddo.

Da notare è che può anche non esservi un mezzo di trasmissione, in quanto l'irraggiamento è l'unica modalità di scambio termico che avviene anche nel vuoto. Basti pensare alla radiazione solare, esempio più evidente di tale trasmissione.

Avremo modo di approfondire il concetto di radiazione elettromagnetica nell'unità 8 di questo volume.

Applicazioni della trasmissione di calore

Dal punto di vista applicativo, la trasmissione del calore è studiata per tre attività fondamentali che sono di uso comune quasi in tutti gli impianti:

- la conservazione di calore;
- la dissipazione di calore;
- il *freecooling*.

7.21 La conservazione di calore

Il calore prodotto per scaldare una casa o per generare vapore o per fondere due materiali è un calore che ha necessità di essere conservato che quindi non deve essere disperso e lo scopo dello studio delle coibentazioni è proprio quello di riuscire a trovare materiali con un coefficiente di inerzia termica adeguata al fine di contenere il calore senza disperderlo.

7.22 La dissipazione di calore

Spesso si genera del calore in alcuni sistemi che rappresenta un danno ed un problema. Questo calore infatti deve essere dissipato (smaltito) perché manda in temperatura eccessiva il sistema. Questo è il caso dei motori endotermici che si riscaldano e devono essere raffreddati, pena la fusione dei cilindri.

7.23 Il freecooling

Il principio del *freecooling* è quello del libero raffreddamento (dalla parola stessa), un esempio è l'immissione di aria esterna (non trattata ma opportunamente filtrata) che ha come compito di rinfrescare degli ambienti; un secondo esempio può essere quello di portare un fluido che viene generalmente raffreddato con gruppo frigo o radcooling in batterie esterne non ventilate che sfruttino la sola convezione naturale. Questo tipo di applicazione è l'alternativa di solo raffreddamento di fluidi o ambienti che diversamente (causa le condizioni esterne che non permettono, temperatura elevata) richiedono l'utilizzo di gruppi frigo.

7.24 Esempio di trasmissione forzata del calore

Una caldaia a gas produce del calore attraverso la combustione di un gas (ad esempio metano). Il calore prodotto all'interno della caldaia viene ceduto attraverso una serpentina all'acqua (termovettore), che viene spinta da una pompa (circolatore) attraverso le tubazioni, fino al termosifone, in corrispondenza del quale il calore viene ceduto.

7.25 Esempio di trasmissione naturale del calore

Una tazza di latte caldo lasciata riposare sul tavolo (in una stanza le cui finestre siano chiuse, in modo da diminuire gli effetti della convezione forzata) cede nel tempo il suo calore all'ambiente circostante, fino a raggiungere la stessa temperatura dell'ambiente.



Figura 149 vapore ceduto da un caffè bollente

7.26 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Abbiamo introdotto in questo capitolo il concetto di **temperatura**, inteso come la quantificazione dello stato termico di un corpo o di un sistema e di **calore**, definendola come l'energia necessaria per innalzare di un grado la temperatura di un corpo o di un sistema. Abbiamo così cercato di dare una interpretazione a livello di **materia**, definendo la stessa come tutto ciò che ha massa e occupa uno spazio, mentre a livello microscopico la materia si presenta costituita da particelle (**atomi**) che compongono un corpo in modo discontinuo, La materia che costituisce qualsiasi corpo è formata da aggregati di particelle, tenute insieme da particolari forze di natura elettrica, che prendono il nome di **molecole**.

Abbiamo poi introdotto le unità di misura della temperatura, lo strumento per quantificarla, il termometro, e le diverse scale utilizzate per rappresentarla, **Celsius**, **Kelvin** e **Fahrenheit** , che sono le più utilizzate nelle discipline sperimentali.

In seguito ci siamo soffermati sugli effetti di **dilatazione termica** cui sono soggetti praticamente tutti i corpi, anche se ognuno, in base alla materia con cui è

costituito, presenta maggiori o minori effetti di dilatazione. Abbiamo classificato le dilatazioni in base a quale grandezza fosse maggiormente coinvolta, ovvero se la lunghezza si parla di **dilatazione lineare**, se si tratta di superficie abbiamo la **dilatazione superficiale**, se legata al volume, di **dilatazione volumica** . I tre tipi di dilatazione tutte legate ad un coefficiente di dilatazione diversa per ciascun materiale.

Sempre in relazione dei diversi tipi di materiali, abbiamo introdotto il concetto di Calore specifico e di capacità termica, definendo il primo come il calore necessario per far innalzare di un grado, Celsius o Kelvin, la temperatura di un corpo o di un sistema, mentre per **capacità termica** intendiamo il prodotto tra il calore specifico di quel corpo e la sua massa. Da queste due definizioni, abbiamo ricavato la **legge fondamentale della calorimetria**, che lega la quantità di calore fornita o sottratta ad un corpo o sistema, legandolo direttamente al prodotto della massa per il calore specifico per la differenza di temperatura, potendo quantificare la quantità di calore con lo strumento del

calorimetro. Siamo così giunti ad un concetto tanto intuitivo quanto importante della termologia, ovvero **l'equivalenza tra il calore e l'energia**, o lavoro, prodotto o dissipato da un sistema. Questa relazione ci permette di dar conto dei fenomeni dissipativi di energia in sistemi non conservativi. Abbiamo in seguito introdotto il concetto di **potere calorifico**, definendolo come la quantità di calore che un corpo di una determinata massa, produrrebbe se fosse bruciato totalmente.

I fenomeni legati al passaggio di stato della materia rappresentano un ulteriore importante aspetto della termologia, dove si evidenzia che ogni corpo è in grado di assumere, in determinate condizioni, diversi stati della materia, ovvero quello liquido, quello gassoso o aeriforme e quello solido. Infine abbiamo rappresentato i diversi tipi di trasmissione del calore che avvengono essenzialmente tramite **conduzione**, con due corpi messi a contatto tra di loro, la **convezione**, possibile solo attraverso la presenza di un fluido e **l'irraggiamento**, che rappresenta la manifestazione di fenomeni elettromagnetici, come quelli della luce.

7.27 Problemi proposti

- 1) Conosci le scale termometriche?
La scala Celsius è la sola scala usate?
Dove è usata la scala Fahrenheit?
Quale scala termometria è da noi utilizzata?
Quale scala termometrica utilizzano nei laboratori i fisici?
Qual è il simbolo della scala Fahrenheit?
Qual è il simbolo della scala Celsius?
Qual è il simbolo della scala kelvin?
- 2) Ti trovi all'estero, d'inverno e su di un termometro leggi un valore 32 di temperatura.
Dove potresti trovarti?
Che scala termometrica è in uso in quel paese?
A quale temperatura Celsius corrispondono i 32 letti?
- 3) Quali delle seguenti formule sono corrette?
 $T_F = 32 + 1,8 \cdot T_C$
 $T_K = T_C - 273,15$
 $T_C = T_K - 273,15$
 $T_C = T_K + 273,15$
 $T_F = (32 + 1,8) : T_C$
 $T_C = (T_F - 32) : 1,8$
- 4) A quanti gradi Fahrenheit corrispondo 10 gradi centigradi?
- 5) La temperatura di ebollizione dell'acqua di mare è pari a 103 gradi centigradi. A quanti gradi Fahrenheit corrisponde questo valore?
- 6) A quanti gradi centigradi corrispondo 100 gradi Fahrenheit?
- 7) Per friggere nell'olio delle patatine la temperatura ideale è di circa 150 °C. Dovendo indicarla in gradi Fahrenheit che valore riporteresti?
- 8) Per friggere nell'olio cibi infarinati la temperatura ideale è 180/190 °C. Dovendo indicarla in gradi Fahrenheit che valore riporteresti?
- 9) A quanti gradi Fahrenheit corrispondono 30 gradi centigradi?
- 10) In una giornata di primavera la temperatura esterna è di 20 °C. Dovendo indicarla a un amico inglese in gradi Fahrenheit che valore diresti?
- 11) La carta brucia a 451°F. A quanti gradi Celsius corrisponde questa temperatura?

- 12)** A quanti gradi centigradi corrispondo 273 Kelvin?
- 13)** La temperatura di ebollizione dell'olio di oliva è pari a 300 gradi centigradi. A quanti gradi Kelvin corrisponde questo valore?
- 14)** In punto triplo dell'acqua, in cui coesistono la fase solida, liquida e gassosa, è posto a 273,16 K. A quanti gradi centigradi si trova il punto triplo?
- 15)** L'alluminio fonde a 868,15 K. A quanti gradi centigradi corrisponde questo valore, detto punto di fusione?
- 16)** L'acqua bolle a 100 °C alla pressione di 1 atm, a livello del mare. Ad alta quota l'acqua può bollire a 90 °C, per la minor pressione. Un termometro Fahrenheit che temperatura indicherebbe?
- 17)** Per friggere nell'olio cibi in pastella la temperatura ideale è di 338°F. Dovendo indicarla in gradi centigradi che valore riporteresti?
- 18)** In una giornata invernale la temperatura esterna è a -2 °C (sotto zero). Dovendo indicarla a un amico inglese in gradi Fahrenheit che valore diresti?
- 19)** La temperatura di ebollizione dell'olio di oliva è pari a 300 gradi centigradi. A quanti gradi Kelvin corrisponde questo valore?
- 20)** Il punto triplo dell'acqua, in cui coesistono la fase solida, liquida e gassosa, è posto a 273,15 °K. A quanti gradi centigradi si trova il punto triplo?
- 21)** L'alluminio fonde a 868,15 °K. A quanti gradi centigradi corrisponde questo valore, detto punto di fusione?
- 22)** L'acqua bolle a 100°C alla pressione di 1 atm, a livello del mare. Ad alta quota l'acqua può bollire a 90°C, per la minor pressione. Un termometro Fahrenheit che temperatura indicherebbe?
- 23)** Per friggere nell'olio cibi in pastella la temperatura ideale è di 338°F. Dovendo indicarla in gradi centigradi che valore riporteresti?
- 24)** In una giornata invernale la temperatura esterna è a 2 °C (sotto zero). Dovendo indicarla a un amico inglese in gradi Fahrenheit che valore diresti?
- 25)** La legge di variazione del volume di un corpo con la temperatura è $\Delta V = 3\alpha\Delta T$, dove il coefficiente di espansione lineare α per l'oro vale $14,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Se la densità dell'oro a 20°C è di $19,3 \text{ g/cm}^3$, 19,30 g d'oro posti a 90°C peseranno circa
 (a) 19,24 g (b) 19,27 g (c) 19,30 g (d) 19,33 g (e) 19,36 g

Fisica per la scuola superiore

26) In condizioni normali, una persona di 60 kg consuma 2300 kcal al giorno. Il calore specifico del corpo umano è di circa $0.83 \text{ cal}/^\circ\text{Cg}$; se non vi fossero perdite verso l'esterno e tutta l'energia fosse impiegata per aumentare la temperatura della persona, l'aumento di temperatura dopo un giorno sarebbe di circa :

(A) 4°C (B) 10°C (C) 20°C (D) 30°C (E) 40°C

27) Quando un grammo di vapor acqueo si condensa nell'aria succede che:

(a) l'aria circostante si raffredda sempre

(b) non vi è mai un cambio di temperatura perché il sistema è isolato

(c) l'aria circostante si scalda sempre

(d) l'aria circostante si scalda solo se a temperatura inferiore a 100°F

(e) l'aria circostante si raffredda solo se a temperatura superiore a 100°C

28) Un pezzetto di ghiaccio di 20 g posto a -50°C è convertito in vapor d'acqua a 150°C e alla pressione di una atmosfera. Il calore di fusione del ghiaccio è circa 80 cal/g ; il calore di evaporazione dell'acqua è 540 cal/g . I calori specifici di ghiaccio e vapore valgono ambedue circa $0.5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$. Il calore richiesto dalla trasformazione è di

(a) 10 kcal

(b) 330 kJ

(c) 27.5 kJ

(d) 1430 cal

(e) 15.4 kcal

29) Un filo metallico, inizialmente lungo 1,5 m, subisce un allungamento di 2,4 mm quando la sua temperatura passa da 20°C a 90°C . Qual è il valore del coefficiente di dilatazione lineare del metallo che costituisce il filo?

30) Un'asta metallica, inizialmente lunga 1 m, subisce un allungamento di 2 mm quando la sua temperatura passa da 0°C a 100°C . Di che materiale è probabilmente fatta l'asta?

31) Un lungo ponte è stato costruito in cemento armato ed è lungo 1,500 km in inverno a una temperatura di $10,0^\circ\text{C}$. In estate la temperatura raggiunge il valore di $40,0^\circ\text{C}$. Calcola la lunghezza del ponte in estate.

32) Un cilindro ha diametro 2,8 cm e lunghezza 21 cm. Quando viene riscaldato da $T_1 = 10^\circ\text{C}$ a $T_2 = 80^\circ\text{C}$ subisce una variazione di volume di $0,10 \text{ cm}^3$. Di quale materiale potrebbe essere fatto il cilindro?

33) Un sasso di 0,4 kg cade da un'altezza di 1200m su un contenitore contenente 2,5 kg di acqua. Di quanto aumenta la temperatura dell'acqua?

34) Se riempiamo una bottiglia da 1,0l fino all'orlo di olio di oliva alla temperatura di 10 °C e successivamente la poniamo a contatto con una sorgente di calore la sua temperatura aumenta fino a 35 °C. L'olio trabocca dalla bottiglia? Calcolare la quantità di olio che trabocca considerando trascurabile la dilatazione del vetro.

35) Calcolare la quantità di calore necessaria per portare la temperatura di 3Kg di alluminio da 20°C a 50°C.

36) Determinare la capacità termica di un recipiente di alluminio di 350g (calore specifico: 0,214kcal/kg°C).

37) Per portare 600g di una sostanza ignota dalla temperatura di 15°C a 40°C sono necessarie 2kcal. Calcolare il calore specifico della sostanza.

38) Un pezzo di cadmio di 50g si trova alla temperatura di 20°C. Se si forniscono al cadmio 400cal, quale sarà la sua temperatura finale?

39) Si riscaldino palline di rame, ciascuna di massa $m=1g$ alla temperatura di 100°C. Quante palline bisogna mettere a contatto con 500g di acqua inizialmente alla temperatura di 20°C affinché la temperatura finale di equilibrio sia di 25°C?

40) Calcolare la quantità di calore necessaria per innalzare la temperatura di 10Kg di ferro da 20°C a 100°C, sapendo che il calore specifico del ferro è $c=0,106cal/gC$.

41) Un recipiente di alluminio di 300g contiene 200g di acqua a 10°C. Se vi si aggiungono 100g di acqua a 100°C, quale sarà la temperatura finale di equilibrio del sistema?

42) Una massa $M_1 = 2,3Kg$ di ghiaccio a temperatura di 0°C, è messa a contatto con una massa $M_2 = 1,8Kg$ di acqua ad una temperatura $T_2 = 85°C$. Trovare la temperatura di equilibrio del sistema.

43) Si determini lo stato finale di equilibrio quando si mescolano 20g di ghiaccio a 0°C con 10g di vapor d'acqua a 100°C.

Problemi svolti

1. La pressione esercitata da un gas sulle pareti del contenitore è principalmente dovuta

- (a) all'adesione tra le molecole di gas e le pareti
- (b) alla repulsione tra le molecole di gas
- (c) alle collisioni tra le molecole di gas e le pareti
- (d) all'energia gravitazionale del gas
- (e) alle collisioni tra le molecole di gas

Soluzione

Il modello cinetico del gas spiega la pressione sulle pareti in termini dell'impulso trasferito alle pareti dagli urti delle molecole (risposta C).

2. Bruciando completamente 5 g di carbone si innalza la temperatura di 1 litro di acqua di 37 K. Il calore prodotto dalla combustione di 1 kg di questo carbone è

- (a) 0.36 Mcal
- (b) 4.8 Mcal
- (c) 5.8 Mcal
- (d) 7.4 Mcal
- (e) 10 Mcal

Soluzione

Indicando con q il calore prodotto dalla combustione di 5g di carbone, sarà $q = m \cdot c \cdot \Delta T = 37\text{kcal}$ dove le grandezze sono riferite a 1 litro d'acqua. Per ottenere il calore Q liberato dalla combustione di 1 kg di carbone, sarà sufficiente moltiplicare per $1\text{kg}/5\text{g}=200$ il valore trovato. Si ha $Q=7,4\text{Mcal}$.

3. La plastica nera è spesso usata nei manici degli utensili da cucina perché

- (a) un materiale nero irraggia molto bene
- (b) la plastica è un buon conduttore del calore
- (c) la plastica è un buon isolante
- (d) la plastica si rammollisce col calore
- (e) il materiale è facilmente lavorabile per pressofusione

Soluzione

L'utilizzo della plastica è in questo caso giustificato dalle sue proprietà isolanti (c).

7.28 In laboratorio

14) Utilizzando un termometro non tarato, effettuare la taratura dello stesso utilizzando le temperature di riferimento di congelamento e di ebollizione dell'acqua.

15) Verifica sperimentale della legge di dilatazione termica dei fluidi scaldando acqua contenuta in un becher e utilizzando un fornellino ad alcol.

7.29 Approfondimento: la scala Fahrenheit

Il grado Fahrenheit è l'unità di una scala di misura della temperatura così chiamata in onore del fisico tedesco Gabriel Fahrenheit, che la propose nel 1724.

In questa scala, il punto di congelamento dell'acqua è di 32 gradi Fahrenheit, mentre il punto di ebollizione si trova a 212 gradi, suddividendo così questo intervallo in 180 gradi. L'unità di questa scala, il grado Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) è $5/9$ di un kelvin (e anche di un grado Celsius). Una temperatura di -40°F è uguale a -40°C (unica situazione in cui i valori delle due scale coincidono)

Fahrenheit (Danzica 1686 - L'Aia 1736), stabilì che il punto ventiduemila della sua scala (0°F) doveva essere la temperatura alla quale una ugual misura di ghiaccio e sale si scioglie (alcuni sostengono che prese la mistura fissa dei due che produceva la temperatura più bassa). Fissò inoltre il punto di 96°F alla temperatura del sangue, usando inizialmente del sangue di cavallo. La sua scala conteneva originariamente solo 12 suddivisioni, ma in seguito divise ognuna di queste in 8, dando così un totale di 96 suddivisioni. Osservò successivamente che l'acqua congelava a 32°F e bolliva a 212°F .

Le sue misure non erano molto precise. Secondo la scala originale, le vere temperature di congelamento ed ebollizione dell'acqua sarebbero state piuttosto diverse. Poco dopo, fu deciso di ricalibrare la scala in modo che 32°F e 212°F corrispondessero precisamente alle temperature di congelamento ed ebollizione dell'acqua. Il risultato fu che la temperatura di un corpo umano sano passò a $98,6^{\circ}\text{F}$, invece dei 96°F originari.

La scala Fahrenheit è stata per molto tempo usata nei Paesi di lingua inglese finché non fu adottata la scala Celsius (precedentemente detta *centigrada*) negli anni sessanta e settanta. Tuttavia, molte persone, soprattutto anziane, continuano a utilizzarla. Negli Stati Uniti d'America e in Belize la scala Fahrenheit continua a essere usata dalla maggior parte della popolazione, anche se per scopi scientifici e tecnologici viene utilizzata l'unità di misura kelvin (SI).

Inoltre, la temperatura dell'aria al suolo nella maggior parte delle aree abitate del pianeta tende a rimanere tra 0°F e 110°F : perciò, la scala Fahrenheit permette quasi sempre di indicare la temperatura senza bisogno del segno.

Singolare che un gruppo di cantanti cinesi si sia ispirato al famoso fisico per dare il nome alla propria band.



Figura 150 Gabriel Fahrenheit (24 maggio 1686 - 16 settembre 1736)



Figura 151 Band di cantanti cinesi chiamati "Fahrenheit"

8. Trasformazioni termodinamiche

Prerequisiti

Concetto di modello. Definizione di pressione e di temperatura. Le leggi di proporzionalità. Il calore. I passaggi di stato. Equivalenza calore energia. La trasmissione di calore.

Sapere

Conoscere il concetto di gas e il comportamento della pressione. Le leggi che definiscono il loro comportamento. I gas perfetti e loro equazione di stato. La teoria cinetica dei gas. Le trasformazioni termodinamiche e i cicli termodinamici. Le macchine termiche. I principi della termodinamica nei suoi vari enunciati. Il concetto di entropia di un sistema.

Saper fare

Saper utilizzare le diverse leggi dei gas per comprenderne il comportamento nelle diverse situazioni. Saper utilizzare le equazioni che le caratterizzano. Saper distinguere dalle diverse trasformazioni termodinamiche, individuando i diversi tratti di un ciclo termodinamico. Saper distinguere tra le diverse macchine termodinamiche ed il loro utilizzo. Saper applicare i principi della termodinamica nella soluzione di problemi. Saper calcolare l'entropia di sistemi semplici e complessi.

8.1 Sistemi termodinamici

Un sistema termodinamico è precisamente una regione macroscopica ben definita dell'universo, spesso chiamato **sistema fisico**, che viene studiata utilizzando i principi della termodinamica.

Tutto lo spazio nell'universo al di fuori del sistema termodinamico è noto come **l'ambiente**. Un sistema è separato dall'ambiente circostante da un **limite** che può essere fittizio o reale, ma che per convenzione delimita un volume finito. Scambi di lavoro, calore, o materia tra il sistema e l'ambiente può avvenire attraverso questo confine. I sistemi termodinamici sono spesso classificati specificando la natura degli scambi che possono avvenire attraverso il loro confine.

Un sistema termodinamico è caratterizzata e definito da un insieme di parametri termodinamici associati al sistema. I parametri sono proprietà macroscopiche sperimentalmente misurabili, come il volume, pressione, temperatura ed altri.

L'insieme dei parametri termodinamici necessari per definire univocamente un sistema è chiamato stato termodinamico di un sistema. Lo stato di un sistema è espresso come rapporto funzionale, le **equazione di stato**, tra i suoi parametri. Un sistema isolato è in equilibrio termodinamico quando il suo stato non cambia con il tempo.

Originariamente, nel 1824, **S.Carnot** descrisse un sistema termodinamico come “sostanza di lavoro” in fase di studio.

Tipi di sistemi termodinamici

- **sistema aperto**: è un sistema che può interagire con l'ambiente esterno scambiando sia energia (lavoro o calore) che materia.
- **Sistema chiuso**: è un sistema che non scambia materia con l'ambiente esterno, mentre può effettuare con esso scambi di energia in tutte le sue forme, compreso il calore o il lavoro.
- **Sistema isolato**: è un sistema che non interagisce in alcun modo con l'ambiente circostante, ovvero che non scambia materia, né lavoro, né calore.
- **Sistema adiabatico**: è un sistema chiuso che non può scambiare calore con l'ambiente esterno, può invece scambiare lavoro.

Possiamo riassumere le definizioni appena viste in una tabella:

| Tipo di sistema | Scambio di materia | Lavoro | Calore |
|-----------------|--------------------|--------|--------|
| Aperto | ✓ | ✓ | ✓ |
| Chiuso | ✗ | ✓ | ✓ |
| Adiabatico | ✗ | ✓ | ✗ |
| Isolato | ✗ | ✗ | ✗ |

(✗ sta per No, mentre ✓ sta per Sì)



Figura 152 Sistema fisico termodinamico

Equazione di stato

In termodinamica, una **equazione di stato** è una equazione costitutiva che descrive lo stato della materia sotto un dato insieme di condizioni fisiche. Fornisce una relazione matematica tra due o più funzioni di stato associate alla materia, come temperatura, pressione, volume o energia interna.

Il principale uso di una equazione di stato consiste nella determinazione dei parametri di stato relativi a gas e liquidi. Una di queste equazioni, tra le più semplici e utilizzate, è la legge dei gas perfetti (anche detta Legge di Clapeyron) valida per gas in condizioni di bassa pressione e alta temperatura (comportamento ideale). Tale trattazione matematica diviene però poco accurata in condizioni lontane dall'idealità e non è in grado di predire la liquefazione di un gas.

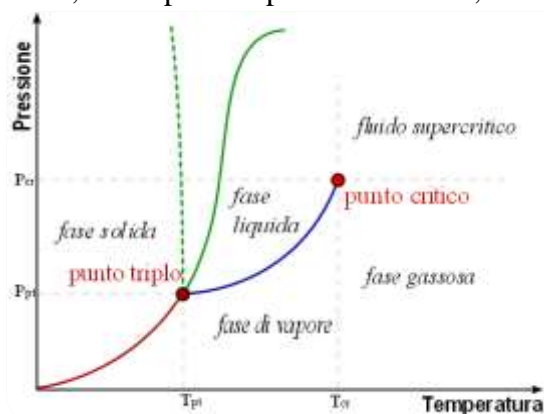


Figura 153 Stato della materia in base a pressione e temperatura

Sono state quindi sviluppate diverse equazioni di stato più accurate per gas e liquidi. Attualmente non esiste una singola equazione di stato che descriva accuratamente le proprietà di tutte le sostanze nelle diverse condizioni possibili. Quelle che considereremo in seguito sono le equazioni di stato per i gas perfetti o ideali.

Temperatura critica

Questa proprietà è generale per tutti i gas (che definiremo in seguito). Esiste cioè per ciascuno di essi una temperatura detta *temperatura critica* (31° per l'anidride carbonica) al di sopra della quale, comunque il gas sia compresso, non è possibile veder separate le due parti, liquida e gassosa, e perciò non è possibile constatarne la liquefazione.

In fisica si parla di **temperatura critica** in differenti ambiti, nel caso della transizione di fluidi si definisce critica la temperatura al di sopra della quale una sostanza non può esistere allo stato liquido. Più in generale si può chiamare temperatura critica quella temperatura alla quale avviene una transizione di fase.

Tabella delle temperature e delle pressioni critiche di alcune sostanze

| Sostanza | Temperatura critica (°C) | Pressione critica (atm) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| Argon | -122,4 | 48,1 |
| Bromo | 310,8 | 102 |
| Cloro | 143,8 | 76,0 |
| Fluoro | -128,85 | 51,5 |
| Elio | -267,96 | 2,24 |
| Idrogeno | -239,95 | 12,8 |
| Kripton | -63,8 | 54,3 |
| Neon | -228,75 | 27,2 |
| Azoto | -146,9 | 33,5 |
| Ossigeno | -118,6 | 49,8 |
| CO ₂ | 31,04 | 72,8 |
| Xenon | 16,6 | 57,6 |
| Litio | 2.950 | 65,2 |
| Mercurio | 1.476,9 | 1.587 |
| Ferro | 8.227 | |
| Oro | 6.977 | 5.000 |
| Alluminio | 7.577 | |
| Tungsteno | 15.227 | |
| Acqua | 373,936 | 217,7 |

8.2 I gas

Un **gas** è un aeriforme caratterizzato da una temperatura critica, inferiore alla temperatura ambiente; gli aeriformi per cui ciò non avviene si trovano nello stato di vapore. Un gas può anche essere definito come un aeriforme non condensabile a temperatura ambiente.

Inoltre, per estensione, tutti gli aeriformi che si trovano ad una temperatura superiore a quella critica vengono detti gas: un esempio è dato dal vapore d'acqua, caratterizzato da una temperatura critica superiore a quella ambiente (374 °C, ovvero 647 K), viene definito come "gas d'acqua" solo quando viene portato a superare questa temperatura (temperatura critica).

Il gas, come tutti gli aeriformi, rappresenta lo stato della materia in cui le forze interatomiche e intermolecolari tra le singole particelle di una sostanza sono così piccole che non c'è più un'effettiva coesione tra di esse. Gli atomi o le molecole del gas sono liberi di muoversi assumendo ciascuno una certa velocità: le particelle atomiche o molecolari del gas quindi interagiscono urtandosi continuamente l'un l'altra. Per questo un gas non ha un volume definito ma tende ad occupare tutto lo spazio a sua disposizione, e assume la forma del contenitore che lo

YouTube

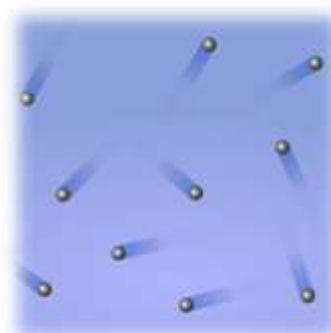


Figura 154 Moto caotico delle molecole di gas

contiene, riempiendolo. Un altro vincolo che può limitare il volume di un gas è un campo gravitazionale, come nel caso dell'atmosfera terrestre.

Nel linguaggio corrente si dice che una data sostanza "è un gas" quando la sua temperatura di ebollizione è molto al di sotto della temperatura ambiente, cioè quando si trova normalmente allo stato di gas sulla Terra. Per esempio è normale dire che "il metano è un gas mentre il ferro non lo è", sebbene il metano possa benissimo trovarsi allo stato liquido (raffreddato al di sotto di $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovvero 112 K) e il ferro allo stato gassoso (riscaldato oltre i $2750\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovvero 3023 K).

Un gas può essere approssimato ad un gas ideale quando si trova ad una temperatura "molto maggiore" della sua temperatura critica, ossia che $T \gg T_{cr}$ e convenzionalmente si intende che i due termini devono differire di almeno un ordine di grandezza, quindi di un fattore dieci). Ciò equivale a chiedere che $T > 10 \cdot T_{cr}$.

Una caratteristica distintiva dei gas, che li differenzia dagli altri fluidi, è che assumono tutto il volume disponibile nel recipiente (chiuso) che li contiene, mentre i fluidi, in generale, assumono sì la forma del recipiente senza però occupare tutto il volume qualora la quantità di materia fluida sia inferiore ad essa. I liquidi infatti non hanno una propria forma, ma un proprio volume sì.

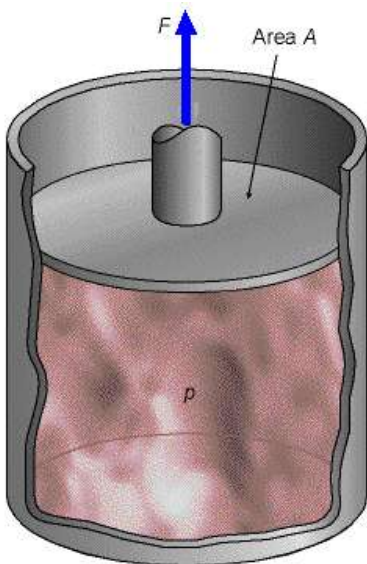


Figura 155 Compressione di un gas

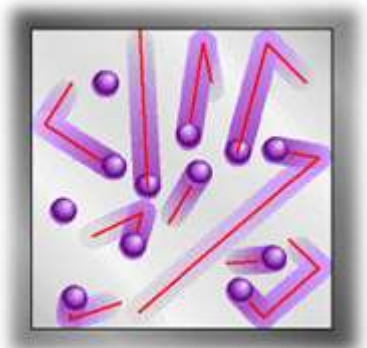


Figura 156 Esempio di moto di un gas in un ambiente isolato

La pressione dei gas

La **pressione** di un gas p è definita come la forza \vec{F} che il gas esercita su un'area A . Un gas è composto da un gran numero di molecole individuali, che a qualsiasi temperatura ragionevole, sono in continuo movimento in tutte le direzioni. È facile capire la pressione dei gas facendo un'analogia con delle palline di Ping-Pong rimbalzanti sui muri di una piccola stanza. La pallina fa contatto con il muro per un solo istante, ma così facendo, cambia la propria quantità di moto. La variazione della quantità di moto fratto il tempo risulta una forza. Questa forza è diretta contro il muro ed è una conseguenza della collisione della molecola (o della pallina di Ping Pong con la superficie del muro).

Grandezze di stato dei gas

le grandezze di stato dei gas, ovvero quelle in grado di descrivere il loro stato termico, sono:

- temperatura
- volume
- pressione

Tramite queste riusciamo a definire lo stato termico di ciascun gas e le relazioni che intercorrono tra di loro

Piano di Clapeyron

Il **piano di Clapeyron** o *piano p-V* è un piano cartesiano ad assi ortogonali nei quali compare in ascissa il valore del volume e in ordinata quello della pressione.

Il suo uso è molto frequente in vari ambiti ed in molteplici campi della fisica, dalla meccanica (per la rappresentazione del *diagramma meccanico*) alla termodinamica.

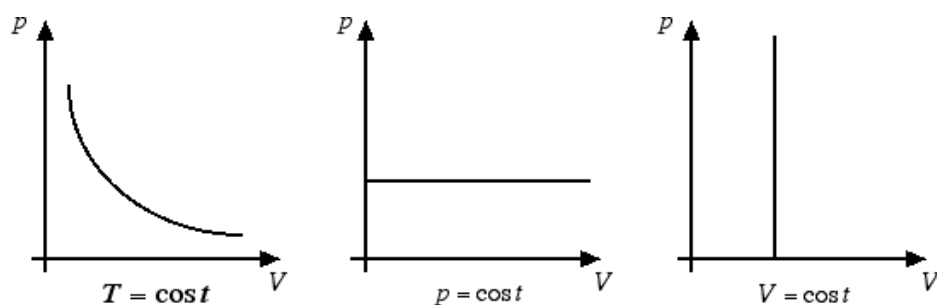


Figura 157 Diagrammi PV in diversi stati

La mole

Accanto alla pressione p e al volume V , altre grandezze fisiche che caratterizzano un gas sono la temperatura T e la **quantità di gas** che indicheremo con il simbolo n .

La **mole**, unità di misura fondamentale del Sistema Internazionale, è stata definita nel 1971 dal Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure come la **quantità di sostanza** di un sistema che contiene tante entità elementari quanti atomi sono contenuti in 0.012 kg di carbonio-12. In particolare, 1 mole corrisponde a $6.02 \cdot 10^{23}$ molecole.

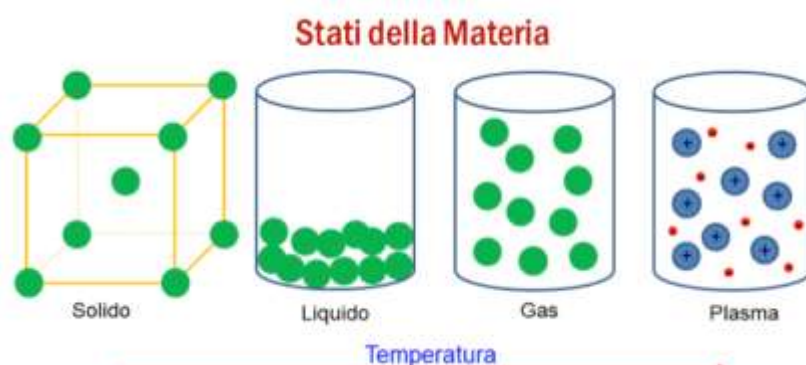


Figura 158 Diversi stati della materia e schema molecole

Quando un gas è in equilibrio la pressione p , il volume V , la temperatura T e la quantità di gas n non sono tutte grandezze fisiche indipendenti ma sono legate tra loro da certe relazioni che andremo ora ad esaminare in dettaglio.

La quantità di un gas non si misura quasi mai in unità di massa (kg o g), ma in *moli*. Il numero di moli è legato al *numero di particelle elementari* di cui il gas è composto.

Una mole di una certa sostanza è formata da un numero prefissato di particelle elementari della sostanza considerata. Questo numero (dal valore elevatissimo!) si chiama **numero di Avogadro** N_A

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (1)$$

Due moli di sostanze diverse hanno *lo stesso numero di particelle*, ma non hanno la stessa massa, perché le molecole non sono tutte uguali e la massa di una mole è proporzionale alla massa molecolare della sostanza considerata.

Una mole è una grandezza macroscopica perché comprende un altissimo numero di particelle: la massa di una mole (massa molare) si misura usualmente in grammi.

$$\text{Massa molare} = N_A \cdot \text{massa molecolare}$$

| Sostanza | Massa molecolare (u) | Massa molare (g/mol) |
|----------|----------------------|----------------------|
| idrogeno | 2 | 2 |
| elio | 4 | 4 |
| ossigeno | 32 | 32 |
| argento | 107,86 | 107,86 |
| piombo | 207,19 | 207,19 |

Come si vede dalla tabella, la massa di una molecola e la massa molare sono espresse dallo stesso numero, naturalmente con diverse unità di misura. Come mai?

La massa delle molecole (o degli atomi per le sostanze monoatomiche) si misura in *unità atomiche* (simbolo u) dove

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} \quad (2)$$

Se proviamo a calcolare la massa di una mole (per esempio di idrogeno) otteniamo:

$$\text{Massa molare idrogeno} = N_A \cdot 2 \text{ u} = 2 (6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) (1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}) = 2 \text{ g/mol}$$

L'unità di massa atomica (se espressa in grammi) è esattamente l'inverso del numero di Avogadro N_A e quindi il numero che esprime la massa di una mole si ottiene esattamente dalla massa molecolare, cambiando l'unità di misura.

8.3 Calore specifico molare

Abbiamo definito nel primo capitolo il *calore specifico* di una sostanza riferendoci all'*unità di massa*, cioè al kilogrammo. Ora possiamo definirlo riferendoci all'*unità di quantità di materia*, cioè alla mole. Puoi vedere, nella tabella seguente, una colonna con i *calori specifici molari* che sono riferiti ad una *mole* di sostanza invece che ad 1 kg di massa.

| Sostanza | Simbolo | Calore specifico (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | Calore specifico molare (J mol ⁻¹ K ⁻¹) |
|-----------|---------|---|---|
| piombo | Pb | 128 | 26,5 |
| argento | Ag | 236 | 24,8 |
| rame | Cu | 386 | 24,5 |
| alluminio | Al | 900 | 24,4 |

Nota che il valore del calore specifico molare è circa 25 J/(mol K) per tutte le sostanze. Il modo di assorbire o emettere calore infatti dipende dal numero di particelle elementari che è lo stesso a parità di moli.

Il calore specifico molare è il calore da trasferire ad una mole di una sostanza per ottenere la variazione di temperatura di 1 K. Si misura in J/(mol K)

Il calore Q assorbito o ceduto da n moli di una sostanza per variare la sua temperatura di una quantità ΔT è

$$Q = C \cdot n \cdot \Delta T \quad (3)$$

dove C rappresenta il calore specifico molare

Mentre i sistemi solidi e liquidi scambiano calore generalmente a pressione costante (la pressione atmosferica), un gas può variare la sua temperatura sia a pressione costante (trasformazione *isobara*), sia a volume costante (trasformazione *isocora*).

Per i gas esistono due diversi calori specifici (d'ora in poi ci riferiremo sempre a calori specifici molari):

C_p calore specifico a pressione costante

C_v calore specifico a volume costante

In una trasformazione *isobara* un gas assorbe o cede una quantità di calore Q

$$Q = C_p \cdot n \cdot \Delta T \quad (\text{a pressione costante}) \quad (4)$$

In una trasformazione *isocora* un gas assorbe o cede una quantità di calore Q

$$Q = C_v \cdot n \cdot \Delta T \quad (\text{a volume costante}) \quad (5)$$

Naturalmente queste trasformazioni devono avvenire *lontano dalla temperatura di liquefazione*.

8.4 Equilibrio termodinamico

Per definire lo stato di un sistema è necessario che esso sia in condizioni di equilibrio. Si dice che un sistema è in **equilibrio termodinamico** se le sue variabili (o parametri o coordinate) termodinamiche, (pressione, volume e temperatura nel caso di un fluido omogeneo), sono ben definite e non variano nel tempo.

Nei sistemi non in equilibrio le variabili termodinamiche non sono in genere definibili: ad esempio ad un gas in equilibrio in un recipiente possiamo assegnare come volume quello del recipiente che lo contiene, ma non ha senso parlare del *volume* del gas che sta uscendo da una bombola.

Affinché un sistema sia in equilibrio termodinamico devono essere verificate contemporaneamente queste quattro condizioni:

- **equilibrio meccanico:** c'è equilibrio tra tutte le forze applicate (le forze esterne agenti sul sistema sono bilanciate da quelle interne al sistema)
- **equilibrio termico:** non ci sono flussi di calore, la temperatura è costante nel tempo ed è la stessa in ogni punto del sistema
- **equilibrio chimico:** non avvengono reazioni chimiche o fenomeni di diffusione, la composizione chimica è costante nel tempo ed è la stessa in ogni punto del sistema
- **equilibrio nucleare:** non avvengono fissioni cioè reazioni nucleari in cui atomi (ad esempio di uranio²³⁵), vengono divisi in frammenti in un processo che libera energia, o fusioni nucleari dove vi è l'unione di due nuclei leggeri in un nucleo più pesante.

YouTube



8.5 La legge di Boyle e Mariotte

Quando abbiamo studiato l'equilibrio dei fluidi, abbiamo introdotto il concetto di pressione. La pressione p è data dalla forza F che si esercita su una certa superficie divisa per l'area S di tale superficie (parte I, unità 3 – equilibrio: $p = \frac{F}{S}$). In questa sezione vogliamo studiare l'e-

quilibrio dei gas e la **pressione** risulta essere una delle grandezze fondamentali in termini delle quali descrivere il comportamento di un gas ideale. Infatti quando le molecole del gas urtano contro le pareti del recipiente che le contiene esercitano una forza ed è questa forza che determina la pressione del gas.

Il **volume** V del gas invece coincide con il volume del recipiente che contiene il gas, dal momento che i gas non sono dotati di volume proprio.

Cominciamo con l'analizzare una trasformazione che avviene a **temperatura T costante** e a n costante. Se andiamo a comprimere il gas, riducendo il suo volume V , aumentano gli urti delle molecole con le pareti e conseguentemente aumenta la forza e la pressione esercitata dalle molecole sulle pareti. In questo caso la pressione p e il volume V del gas non sono grandezze indipendenti ma sono legate tra loro dalla relazione

$$P \cdot V = \text{costante} \quad (6)$$

a temperatura costante=ISOTERMA

Questa legge prende il nome di **legge di Boyle**.

Pressione e volume a temperatura costante sono inversamente proporzionali: se raddoppiamo (triplichiamo) una delle due grandezze fisiche, l'altra si dimezza (diventa uguale a $1/3$). Dal momento che nel Sistema Internazionale la pressione p si misura in N/m^2 e il volume in m^3 , la costante che compare nella legge di Boyle si misura in $\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$, ossia in joule.



Laboratorio 19
Legge di Boyle

8.6 La legge di Avogadro

Supponiamo invece di considerare un gas a **pressione p e temperatura T fissate**. Vale in questo caso la **legge di Avogadro**:

una mole di gas occupa lo stesso volume, qualunque sia il tipo di gas che prendiamo in considerazione.

Ad esempio, una mole di gas alla pressione di $p = 1 \text{ atm}$ e alla temperatura $T = 0^\circ\text{C}$ occupa un volume $V = 22.4 \text{ l} = 22.4 \text{ dm}^3$. È interessante osservare come questa proprietà sia totalmente indipendente dalla massa del gas: una mole di elio ha una massa di 4 g, una mole di ossigeno avrà invece una massa di 32 g. Ciò nonostante, entrambi i campioni di gas a 1 atm di pressione e a 0°C di temperatura occupano un volume di 22.4 l: tutte le leggi sui gas ideali dipendono dalla quantità di sostanza, intesa come numero di moli del gas, non dalla massa del campione.

8.7 Notazione sulle temperature Celsius e Kelvin

Così come usualmente accade quando si esprimono le leggi delle termodinamica, da questo punto in poi, per distinguere tra le temperature espresse in gradi Celsius ($^\circ\text{C}$) e quelle espresse in gradi Kelvin ($^\circ\text{K}$) utilizzeremo la seguente notazione:

t per i gradi Celsius T per i gradi Kelvin

senza dover di volta in volta chiarire se si stia utilizzando una scala oppure l'altra.

8.8 Prima legge di Gay-Lussac o di Charles

La prima legge di Gay-Lussac, nota anche come legge di Volta Gay-Lussac, afferma che in condizioni di **pressione costante** il volume di un gas aumenta linearmente con la temperatura.

Indicando con V_0 il volume del gas alla temperatura di 0°C (e **non** il volume iniziale come si potrebbe pensare nella notazione V_0) e con $V(t)$ il volume ad una temperatura $t > 0$, questa legge è espressa dalla relazione:

$$V(t) = V_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (7)$$

a pressione costante=**ISOBARA**

con $\alpha = \frac{1}{273,15}^\circ\text{C}^{-1}$ e t espresso in $^\circ\text{C}$

da notare che le dimensioni di α sono $^\circ\text{C}^{-1}$ perché il prodotto αT deve essere adimensionale.

È conosciuta anche con il nome di **legge di Charles** deriva invece dallo scienziato francese Jacques Charles che scoprì la legge una quindicina d'anni prima, senza tuttavia pubblicare i risultati delle sue ricerche.

Se si utilizza la **scala assoluta** di temperatura (scala **kelvin**), allora la prima legge di Gay Lussac prende la forma più semplice:

$$V(T) = V_0 \cdot \alpha \cdot T \quad (8)$$

La legge prende il nome dal chimico-fisico francese **Joseph Louis Gay-Lussac** (1778-1850), che la formulò nel 1802.

Nel 1791 il fisico italiano Alessandro Volta compì analoghe ricerche sulla dilatazione dei gas anticipando i risultati di Gay-Lussac. Per questo la legge sull'espansione dei gas è anche detta **legge di Volta Gay-Lussac**.

Si noterà che qualora la temperatura dovesse raggiungere i $-273,15^\circ\text{C}$, il **volume** diventerebbe nullo.

La legge espressa dalla relazione (8) in gradi Kelvin, se viene riferita a due diversi stati termici diversi, diventa nei due casi:

$$V_1 = V_0 \cdot \alpha \cdot T_1 \quad e$$

$$V_2 = V_0 \cdot \alpha \cdot T_2$$

ricavando sia dalla prima che dalla seconda $V_0 \cdot \alpha$, otteniamo:

$$V_0 \cdot \alpha = \frac{V_1}{T_1} \quad e$$

YouTube



Laboratorio 20
Legge di Charles

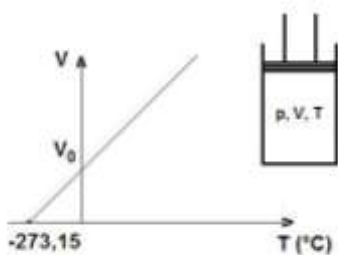


Figura 159 Legge di Charles

$$V_0 \cdot \alpha = \frac{V_2}{T_2}$$

eguagliando, si ottiene una proporzione algebrica molto utile nella risoluzione dei problemi, quando la temperatura è espressa in gradi kelvin:

$$V_1 : T_1 = V_2 : T_2 \quad (9)$$

con T in °K

8.9 Seconda legge di Gay-Lussac

La **seconda legge di Gay-Lussac** afferma che in condizioni di **volume costante** la pressione di un gas aumenta linearmente con la temperatura.

Indicando con p_0 la pressione di un gas alla temperatura di 0°C e con $p(t)$ la pressione ad una temperatura $t > 0$, questa legge è espressa dalla relazione:

$$p(t) = p_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \quad (10)$$

a volume costante= **ISOCORA**

sempre con $\alpha = \frac{1}{273,15}^\circ\text{C}^{-1}$ e t espresso in $^\circ\text{C}$.

Se la temperatura viene ridotta a valori inferiori a 0°C , allora la pressione $P(t)$ viene proporzionalmente ridotta; l'equazione prevede che essa si annulli in corrispondenza di una temperatura $t = -\frac{1}{\alpha} = -273,15^\circ\text{C}$, che corrisponde proprio allo zero assoluto, già descritto nel capitolo precedente.

In realtà la maggior parte dei gas si liquefa prima di giungere a tale temperatura: l'azoto a -196°C , l'idrogeno a -253°C . L'elio tuttavia liquefa solo a -269°C e segue la legge di Gay-Lussac più o meno fino a quella temperatura.

Se si utilizza la **scala assoluta** di temperatura (scala **kelvin**), allora la seconda legge di Gay Lussac prende la forma più semplice:

$$p(T) = p_0 \cdot \alpha \cdot T \quad (11)$$

con un ragionamento del tutto analogo a quello fatto per arrivare alla formula (9) possiamo ri-enunciare la seconda legge di Gay-Lussac nel seguente modo:

YouTube

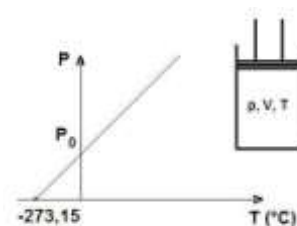


Figura 160 Legge di Gay-Lussac per le isocore



Laboratorio 21
Seconda Legge di
Gay-Lussac

$$p_1 : T_1 = p_2 : T_2 \quad (12)$$

con T espressa in °K

YouTube



8.10 Gas ideale o gas perfetto

Il *gas perfetto* o *ideale* costituisce un modello astratto del comportamento dei gas cui tendono molti gas reali a pressioni prossime a quella atmosferica. Questo modello di riferimento è costituito da un gas per il quale valgono le seguenti condizioni:

- le molecole sono immaginate come **sfere di volume pressoché nullo** e comunque trascurabile rispetto al volume del recipiente che contiene il gas;
- il **moto** delle molecole avviene in **ogni direzione** con le medesime probabilità;
- non esistono forze di attrazione e repulsione tra le molecole e gli urti tra le molecole e il recipiente e tra una molecola e l'altra sono **perfettamente elastici** (nessuna perdita di quantità di moto);
- ad ogni singola molecola possono essere applicate le **leggi della meccanica classica**.

Un **gas perfetto** è quindi un modello ideale di gas per cui varrebbero anche a basse temperature ed alte densità le tre leggi fisiche dei gas perfetti (legge di **Boyle-Mariotte**, prima legge di **Gay-Lussac**, e seconda legge di Gay-Lussac).

8.11 Equazione di stato dei gas perfetti

L'**equazione di stato dei gas perfetti**, nota anche come **legge dei gas perfetti**, descrive le condizioni fisiche di un "gas perfetto" o di un gas "ideale", correlandone le funzioni di stato: quantità di sostanza, pressione, volume e temperatura.

Viene espressa nel seguente modo:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

in cui

- p è il valore della pressione del gas;
- V è il volume occupato dal gas;
- n sono le moli del gas;
- R è la costante universale dei gas, il cui valore varia in funzione delle unità di misura adottate per esprimere le altre grandezze nell'equazione;
- T è la temperatura assoluta del gas (cioè espressa in gradi kelvin).

Il valore di R nel Sistema internazionale è:

$$R = 8,314472 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (14)$$

DEFINIZIONI

Quella dei Gas perfetti è una idealizzazione, ma non troppo!

Molti Gas si comportano praticamente in questo modo. Basti pensare agli urti tra molecole. Senella realtà non fossero perfettamente elastici, dopo un certo tempo un Gas allo stato aeriforme contenuto in un qualche recipiente, perderebbe tutta la sua Energia, costringendo tutte quelle molecole a fermarsi!

Nella realtà, sappiamo che non è mai così.

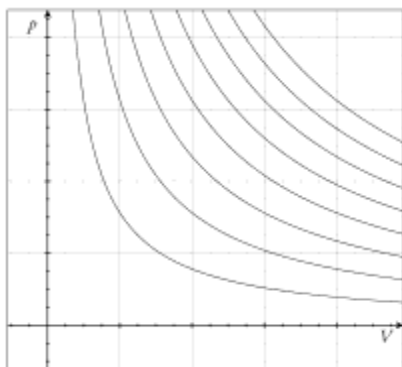


Figura 161 Piano di Clapeyron per i gas perfetti

da notare che i grafici non sono altro che dei rami di iperbole, con equazioni del tipo:

$$y = \frac{k}{x}$$

con y rappresentato dalla pressione ed x dal Volume.

Questa equazione rappresenta una generalizzazione delle leggi empiriche osservate da **Boyle** (in un gas, in condizioni di temperatura costante, il volume è inversamente proporzionale alla pressione), **Avogadro** (il volume di un gas è proporzionale alle moli n del gas) e **Charles** (in un gas a pressione costante, il volume è proporzionale alla temperatura assoluta), ottenibili rispettivamente per T costante, V costante e P costante.

L'equazione di stato dei gas perfetti descrive bene il comportamento dei **gas reali** per pressioni non troppo elevate e per temperature non troppo vicine alla temperatura di liquefazione del gas. In questi casi, una migliore descrizione del comportamento del gas è dato dall'equazione di stato di **van der Waals**. Con l'introduzione di due valori a e b (dette costanti di van der Waals) che dipendono dalla sostanza in esame.

La formulazione della legge è la seguente:

$$\left(p + a \frac{n^2}{V^2} \right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T \quad (15)$$

dove p è la pressione del gas, n la quantità di sostanza (numero di moli), V il volume occupato, R la costante universale dei gas e T la temperatura assoluta.

La tabella che segue mostra alcuni valori delle costanti di **van der Waals**:

| Sostanza | a (J·m ³ /mol ²) | b (m ³ /mol) |
|--------------------|---|---------------------------|
| Acetato di etile | 2,072 | 0,0001412 |
| Acetilene | 0,4448 | 0,00005136 |
| Acetone | 1,409 | 0,0000994 |
| Anidride acetica | 2,016 | 0,0001263 |
| Anidride solforosa | 0,6803 | 0,00005636 |
| Argon | 0,1363 | 0,00003219 |
| Azoto | 0,1408 | 0,00003913 |
| Idrogeno | 0,02476 | 0,00002661 |
| Xeno | 0,4250 | 0,00005105 |

8.12 C.L.I.L. Project

The ideal gas or perfect gas

The *perfect* or *ideal gas* is an abstract model of the behavior of gases which tend many real gases at pressures close to atmospheric pressure. This reference model is constituted by a gas for which the following conditions apply:

the molecules are imagined as **spheres of volume almost nil** and still negligible compared to the volume of the container that contains the gas;

the **motion** of molecules occurs **in every direction** with the same probability;

there are no forces of attraction and repulsion between molecules and collisions between the molecules and the container and between a molecule and the other are **perfectly elastic** (no loss of momentum);

each individual molecule can be applied to the **laws of classical mechanics**.

A **perfect gas** is therefore an ideal model of gas for which would be worth even at low temperatures and high densities the three physical laws of ideal gases (**Boyle's law**, the first law of Gay-Lussac, and the second law of **Gay-Lussac**).

Equation of state of an ideal gas

The equation of state of an ideal gas, also known as the **ideal gas law**, describes the physical condition of a "perfect gas" or gas "ideal", correlating the functions of state: amount of substance, pressure, volume and temperature.

It is expressed as follows:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

when

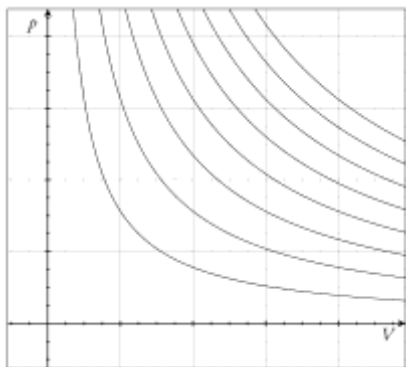
- p is the value of the gas pressure;
- V is the volume occupied by the gas;
- n is the number of moles of gas;
- R is the universal gas constant, the value of which varies according to the unit of measure taken to express the other quantities in the equation;
- T is the absolute temperature of the gas (that is, expressed in degrees kelvin).

The R-value is in the International System:

$$R = 8,314472 \frac{J}{mol \cdot K} \quad (14)$$

Note that the graphics are nothing more than the branches of hyperbole, with equations of the type:

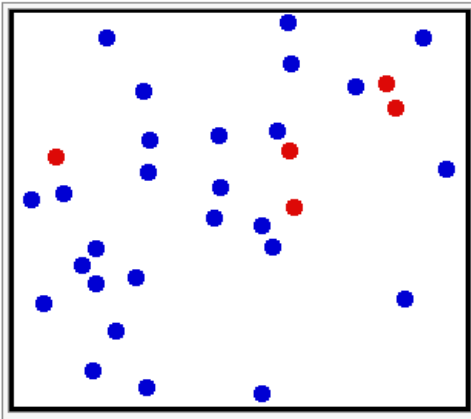
$$y = \frac{k}{x}$$



with x and y represented by the pressure from the volume. This equation represents a generalization of the empirical laws observed by Boyle (in a gas, in conditions of constant temperature, the volume is inversely proportional to the pressure), Avogadro (the volume of a gas is proportional to the moles n of the gas) and Charles (in a gas at constant pressure, the volume is proportional at the temperature absolute), , obtained respectively for constant T , P and V constant steady.

8.13 Teoria cinetica dei gas

La teoria cinetica dei gas descrive un gas come un gran numero di piccole particelle (atomi o molecole) che sono in costante movimento casuale. Le particelle muovendosi urtano tra di loro e con le pareti del contenitore. La teoria cinetica dei gas spiega le principali proprietà dei gas quali pressione, temperatura e volume.



Se potessimo fotografare il moto delle particelle, vedremo mutare, istante per istante, la loro posizione.

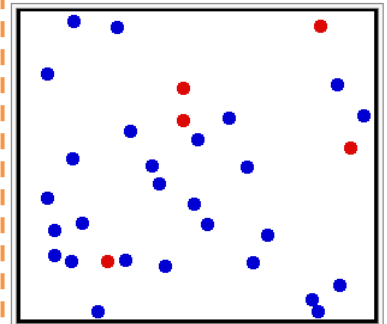


Figura 162 Teoria cinetica dei gas

Il fatto rilevante della teoria è la spiegazione che la pressione

non è dovuta alla repulsione statica delle molecole come ipotizzato da Isaac Newton, ma all'urto contro le pareti delle particelle.

Mentre le particelle che compongono i gas sono troppo piccole per essere visibili, il movimento casuale dei grani di polline o di polvere, che può essere osservato con un microscopio ottico (moto browniano), deriva direttamente dalle collisioni con le particelle elementari che compongono il gas. Nel 1905 Albert Einstein correlò il moto browniano all'esistenza di atomi e molecole che a quell'epoca erano ancora una ipotesi.

La teoria cinetica si basa sull'assunzione di **alcune ipotesi**:

- Le molecole di cui sono composti i gas sono considerate come **punti materiali in moto** casuale e a distribuzione uniforme nello spazio che seguono l'ipotesi del caos molecolare.
- Esse collidono tra loro e con le pareti del recipiente **con urti perfettamente elastici**.
- Il **numero delle molecole** è **grande** cosicché si possano usare metodi statistici.
- Il **volume totale** delle molecole dei gas è **trascurabile** rispetto al volume del contenitore.
- L'**interazione tra le molecole** è **trascurabile**, eccetto durante l'urto tra di loro che avviene in maniera impulsiva.

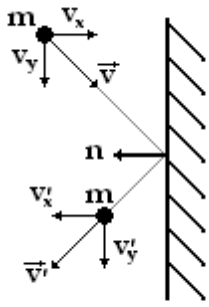


Figura 163 Urto di molecole in un gas perfetto

- Le **molecole** sono **perfettamente sferiche**

Le ipotesi precedenti descrivono accuratamente il comportamento dei gas ideali. I gas reali si avvicinano all'ideale sotto condizioni di bassa densità o alta temperatura (lontani dalla condensazione).

8.14 Pressione in un gas perfetto

La **pressione** è spiegata dalla teoria cinetica come conseguenza delle forze esercitate dalle collisioni delle molecole del gas con le pareti del recipiente. Supponiamo dunque una molecola di massa m che urta contro la parete del recipiente come in figura. Sappiamo che essa trasmette alla parete un impulso che è uguale alla differenza della quantità di moto della particella prima e dopo l'urto. Inoltre per l'ipotesi 1 l'urto è elastico e si conserva sia la quantità di moto totale del sistema che l'energia.

È possibile dimostrare che la pressione risulta:
$$P = \frac{M \cdot n \cdot v_m^2}{3V}$$

Questa equazione per la pressione mette in relazione la velocità delle molecole con la pressione che esse esercitano sul recipiente (v_m è una velocità media).

Utilizzando l'equazione di stato dei gas perfetti: $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$, possiamo estrapolare una stima della **velocità quadratica media**:

$$v_m^2 = \frac{3 \cdot R \cdot T}{M} \quad (16)$$

Da quest'ultima si deduce che la velocità delle molecole è direttamente proporzionale alla radice quadrata della temperatura e dipende ovviamente dalla massa molare delle molecole.

ricordando che $\frac{M}{m} = N_A$ e che $\frac{R}{N_A} = k_B$

dove

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (17)$$

è la **costante di Boltzmann**.

Dalla relazione (16) possiamo quantificare l'**energia cinetica media** \overline{K} di una molecola del gas, che risulta:

$$\overline{K} = \frac{3 \cdot R \cdot T}{2 \cdot N_A} = \frac{3}{2} k_B \cdot T \quad (18)$$

8.15 Energia interna di un gas perfetto

Possiamo anche determinare l'**energia interna** U del gas che rappresenta l'energia di tutte le molecole, che appare nel primo principio della termodinamica (che dovremo ancora enunciare). Essa è quindi data dall'equazione:

$$U = N \cdot \bar{K} = n \cdot N_A \frac{3}{2} k_B \cdot T \quad (19)$$

Poiché risulta $N_A \cdot k_B = R$, otteniamo:

$$U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T \quad (20)$$

valido per un gas monoatomico, poiché in generale non si è tenuto conto dei contributi dell'energia dovuti agli effetti vibrazionali e rotazionali. Ancora una volta vediamo come l'energia interna sia dipendente solamente dalla temperatura che a sua volta dipende dal tipo di molecola e dalla sua velocità.

8.16 Bernoulli e la teoria cinetica dei gas

Nel 1738 D. Bernoulli pubblicò *Hydrodynamica*, che pose le basi della teoria cinetica dei gas. In questo lavoro Bernoulli fece l'ipotesi, ancora utilizzata, che i gas consistono di un gran numero di molecole che si muovono in tutte le direzioni, che il loro impatto sulle superfici causa la pressione macroscopica e che quello che chiamiamo calore è semplicemente dovuto all'energia cinetica del loro moto. La teoria non fu immediatamente accettata, anche a causa del fatto che ancora non era stata posta le fondamenta per la conservazione dell'energia e non era ovvio ai fisici che la collisione tra le molecole fosse perfettamente elastica.

8.17 Trasformazioni adiabatiche

Si dice adiabatica una trasformazione nel corso della quale il gas non scambia calore con il mezzo ambiente

$$Q = 0 \quad (21)$$

L'energia termica, non viene, cioè, né ceduta, né assorbita. Possiamo essere sicuri che $Q = 0$ in due modi:

- effettuando una trasformazione così rapidamente da non lasciare il tempo al calore di trasferirsi da una parte all'altra del mezzo. Questo è il caso dei processi di espansione e compressione che avvengono durante la propagazione delle onde sonore e nei motori a combustione interna.
- effettuando una trasformazione lentamente in un ambiente ben isolato

YouTube

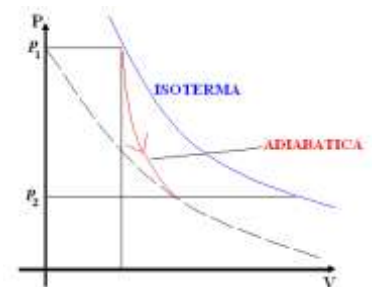


Figura 164 Confronto grafico tra isoterma ed adiabatica

Per un gas perfetto le trasformazioni adiabatiche seguono la **legge di Poisson**, espressa dalla formula:

$$p \cdot V^\gamma = \text{costante} \quad (22)$$

dove l'esponente γ è il rapporto tra il calore specifico a pressione costante C_p e il calore specifico a volume costante C_v , ovvero:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (23)$$

e risulta sempre $\gamma > 1$.

| Tipo di Gas | C_p | C_v | $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ |
|-------------|----------------|----------------|----------------------------|
| Monoatomico | $\frac{5}{2}R$ | $\frac{3}{2}R$ | $\frac{5}{3}$ |
| Biatomico | $\frac{7}{2}R$ | $\frac{5}{2}R$ | $\frac{7}{5}$ |
| poliatomico | $\frac{9}{2}R$ | $\frac{7}{2}R$ | $\frac{9}{7}$ |

$$\text{con } R = 8,314472 \frac{J}{\text{mol} \cdot K}$$

Si tenga presente che per i gas il valore del calore specifico dipende dal fatto che la pressione o il volume sia mantenuto costante mentre si fornisce o si sottrae a una sostanza energia sotto forma di calore.

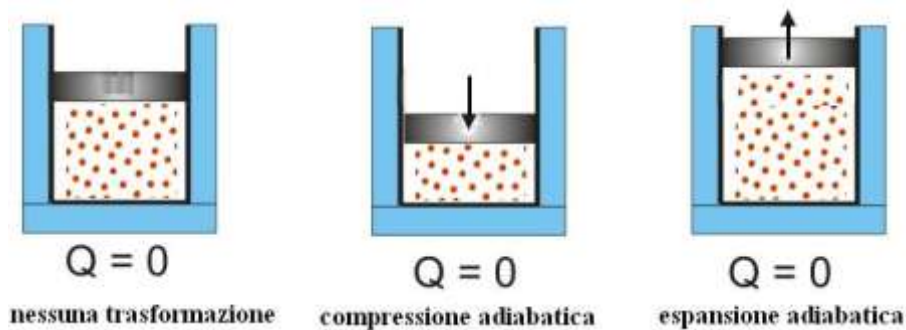


Figura 165 Trasformazioni adiabatiche

E' possibile scrivere un'equazione per una trasformazione adiabatica in funzione di T e V . Infatti se si utilizza l'equazione dei gas perfetti per eliminare p dalla (22) si ottiene:

$$\frac{n \cdot R \cdot T}{V} \cdot V^\gamma = \text{costante, da cui}$$

$$n \cdot R \cdot T \cdot V^{\gamma-1} = \text{costante} \quad (24)$$

ovvero:

$$T_i \cdot V_i^{\gamma-1} = T_f \cdot V_f^{\gamma-1} \quad (25)$$

dove T_i e T_f sono rispettivamente la temperatura iniziale e quella finale nella trasformazione.

E' anche possibile scrivere un'equazione in funzione di T e P, basta utilizzare l'equazione dei gas perfetti per eliminare T dall'equazione (24):

$$T \cdot p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{costante} \quad (26)$$

8.18 Cicli termodinamici

Si definisce **ciclo termodinamico** una successione finita di trasformazioni termodinamiche (ad esempio isoterme, isocore, isobare o adiabatiche) al termine delle quali il sistema torna al suo stato iniziale. Le proprietà termodinamiche che caratterizzano il sistema dipendono solo dallo stato termodinamico e quindi non cambiano dopo un ciclo. Vedremo in seguito che la prima legge della termodinamica impone che il calore entrante dall'ambiente al sistema sia uguale al lavoro netto compiuto in ogni ciclo dal sistema sull'ambiente. La natura ciclica del processo consente una modalità continua.

8.19 Macchina termodinamica

Una **macchina termica** è un dispositivo fisico o teorico che converte l'energia termica fornita dall'ambiente esterno (calore) in lavoro. Le macchine termiche sono tipicamente **cicliche** e sono quindi descritte fisicamente da un ciclo termodinamico. Il nome di una macchina termica di solito è quello del ciclo termodinamico associato. A volte invece hanno nomi come motori a gasolio, benzina, motori a turbina, a vapore.



Figura 166 Ciclo termodinamico



Figura 167 Macchina termodinamica

Il motore a scoppio e il ciclo Otto

YouTube



Il ciclo Otto è un ciclo di trasformazioni termodinamiche effettuate su un gas con lo scopo di trasformare Energia termica in energia meccanica.

Nikolaus August Otto (1832-1891) fu l'inventore del primo motore a combustione interna a quattro tempi, che funzionava secondo un ciclo tecnico che prese il suo nome.

Dopo aver condotto una serie di ricerche sul funzionamento del motore a fas illuminante inventato da Erienne Lenoir, Otto si dedicò alla realizzazione di esperimenti sui motori a combustione interna. Nel 1876 Otto assieme all'ingegner Eugen Langen presentarono un motore a quattro tempi che riscosse grande successo e, nella nascente industria automobilistica, divenne il modello base per la maggior parte dei motori a combustione interna.

Il termine "a 4 tempi" deriva dal fatto che la combustione avviene per quattro passaggi successivi, con alcune differenze tra motore ad accensione comandata e motore ad accensione spontanea:

1. Aspirazione: si ha l'introduzione di aria o di una miscela aria-combustibile nel cilindro.

La valvola di sinistra si apre, mentre quella di destra è chiusa. Il pistone scende verso il punto morto interno, facendo così registrare il massimo volume. Questa prima fase è una trasformazione di tipo **isobara**.

2. Compressione: Si chiude la valvola di sinistra e la miscela aria o aria-combustibile addotta viene compressa volumetricamente dal pistone che sta risalendo fino ad arrivare al punto morto esterno in cui si registra il volume minimo di miscela. Questo tipo di trasformazione è di tipo **adiabatica**.

Entrambe le valvole sono chiuse, il pistone si trova nel punto morto esterno. La candela, posta al centro della camera di combustione, fa scoccare una scintilla e la miscela brucia nella camera di combustione. Questa è una trasformazione isocora.

3. Espansione: si ha l'espansione volumetrica dei gas combusti, generalmente durante le prime fasi d'espansione si ha la fine della combustione. Vista la rapidità con cui avviene questa fase, anch'essa è di tipo **adiabatico**.

Si apre così la valvola di scarico, quella di destra, mentre il pistone è nella posizione di punto morto interno. Anche questa fase è una trasformazione di tipo **isocora**.

4. Scarico: si ha l'espulsione dei gas combusti dal motore.

Il pistone dalla posizione di punto morto interno risale fino a quella di punto morto esterno permettendo la totale fuoriuscita dei resti di combustione. Questa fase è una trasformazione di tipo **isobara**.

A questo punto il ciclo ricomincia dalla prima fase.

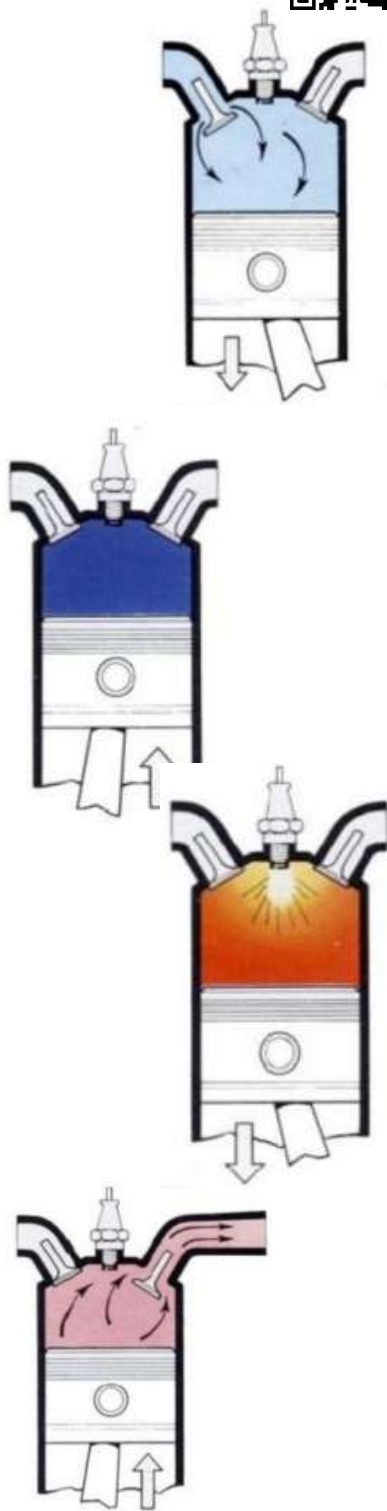


Figura 168 Motore a 4 tempi

Le fasi prima descritte possono essere rappresentate, sul piano di Clapeyron con la rappresentazione seguente, partendo dal punto 0 e tornando di nuovo a 0 a ciclo terminato.

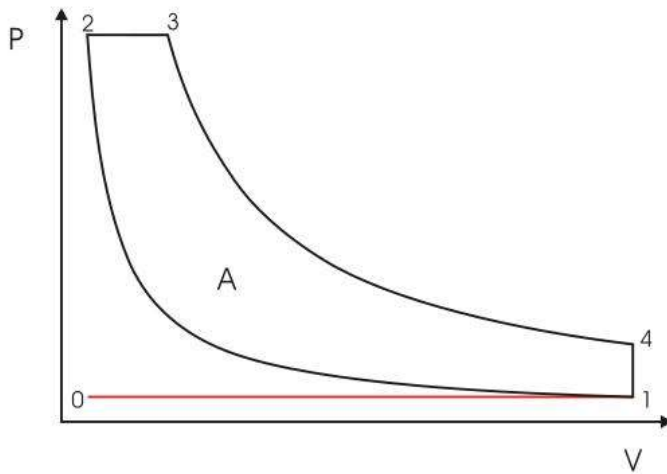


Figura 169 Fasi del motore a 4 tempi

il **lavoro utile** del ciclo è rappresentato dall'area interna al ciclo ed è il risultato della differenza tra il lavoro di espansione (positivo) e quello di compressione (negativo)

8.20 Il rendimento di una macchina termica

Il rendimento del ciclo Otto è dato dalla seguente espressione:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma+1}} \quad (27)$$

dove

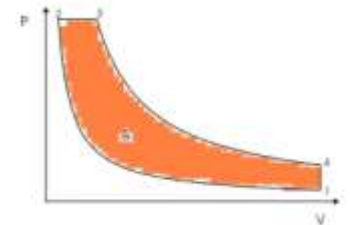
ε è il rapporto di compressione e vale $\frac{V_1}{V_2}$ dove V_1 è il volume ad ini-

zio compressione e V_2 quello a fine compressione. $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ già introdotto nella definizione di trasformazione adiabatica

8.21 Ciclo di Carnot

Il ciclo di Carnot è un ciclo puramente teorico e la sua realizzazione richiede lo studio di una macchina termica teorica in cui un gas altrettanto teorico effettua un ciclo termodinamico. È costituito, in successione ciclica dalle seguenti trasformazioni:

espansione isoterma, espansione adiabatica, compressione isoterma e compressione adiabatica che riporta il sistema alle condizioni iniziali



YouTube

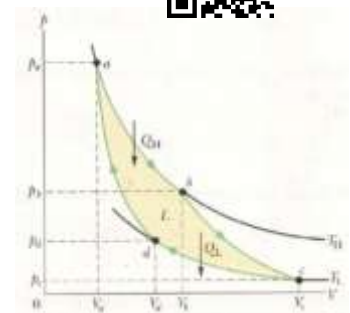


Figura 170 Ciclo di Carnot

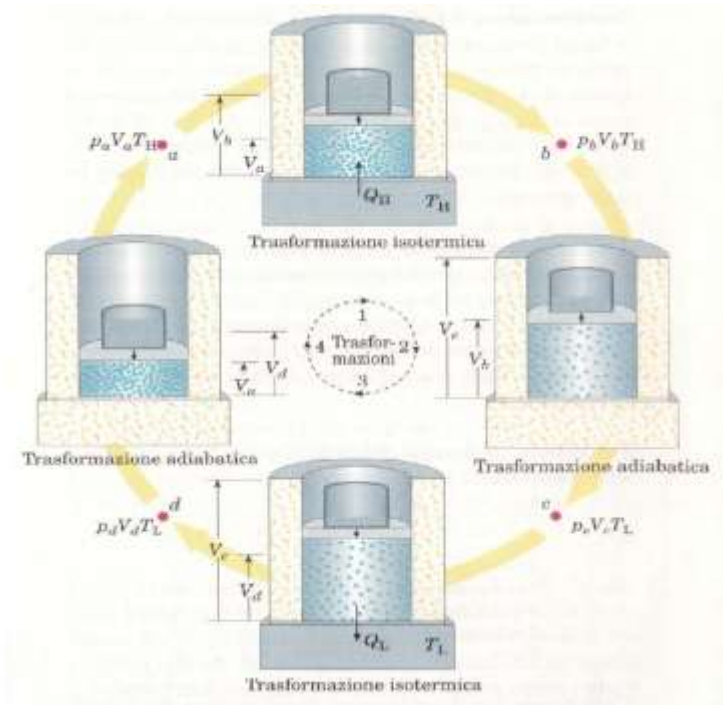


Figura 171 Esempio di ciclo di Carnot

Descrizione delle fasi

1. ESPANSIONE ISOTERMA

- ASSORBE IL CALORE Q_H
- PRODUCE IL LAVORO $L_1 = Q_H$

2. ESPANSIONE ADIABATICA

- $Q = 0$
- PRODUCE IL LAVORO $L_2 = n \cdot C_V \cdot (T_H - T_L)$

3. COMPRESSIONE ISOTERMA

- CEDE IL CALORE Q_L
- ASSORBE IL LAVORO $L_3 = Q_L$

4. COMPRESSIONE ADIABATICA

- $Q = 0$
- ASSORBE IL LAVORO $L_4 = n \cdot C_V \cdot (T_L - T_H) = -L_2$

considerando il valore assoluta, otteniamo:

$$L = L_1 + L_2 - L_3 - L_4 = L_1 - L_3 = Q_H - Q_L$$

dove abbiamo indicato:

L = lavoro prodotto dal sistema termodinamico (valore assoluto)

Q_H = calore assorbito, in valore assoluto, dal sistema termodinamico nella trasformazione 1 a temperatura T_H

Q_L = calore ceduto, in valore assoluto, dal sistema termodinamico nella trasformazione 3 a temperatura T_L

Rendimento di un ciclo di Carnot

La caratteristica fondamentale della macchina di Carnot è che il suo rendimento non dipende dal fluido impiegato nel ciclo, ma dalle sole temperature delle sorgenti con le quali scambia il calore (anzi, più precisamente, dal rapporto delle due temperature).

Il rendimento di una macchina termica è, in generale, il rapporto tra il lavoro utile che la macchina riesce a compiere e il calore totale assorbito dal sistema. Se un ciclo viene eseguito n volte, il rendimento della macchina sarà allora:

$$\eta = \frac{L}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (28)$$

8.22 Teorema di Carnot

il **teorema di Carnot** afferma che non è possibile realizzare una macchina termica operante tra due sorgenti che abbia un rendimento maggiore di quello della macchina di Carnot operante tra le stesse sorgenti. Si può esprimere il **teorema di Carnot sotto forma di una disuguaglianza** che coinvolge solamente i flussi di calore e le temperature delle sorgenti. Per una generica macchina che lavora (reversibilmente o irreversibilmente) tra due sorgenti a temperature T_H e T_L vale la seguente disuguaglianza:

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} \leq 0 \quad (29)$$

che, nel caso di cicli reversibili (di Carnot), diventa:

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = 0 \quad (30)$$

8.23 Il ciclo frigorifero

Un **ciclo frigorifero** è un ciclo termodinamico in grado di trasferire calore da un ambiente a bassa temperatura ad uno a temperatura superiore.

La macchina che compie un ciclo frigorifero può essere interpretata, e utilizzata come macchina frigorifera, con lo scopo di sottrarre calore da un ambiente esterno, raffreddandolo, rispetto alle sue condizioni naturali, (questo effetto è quindi utilizzato nei frigoriferi).

YouTube



YouTube



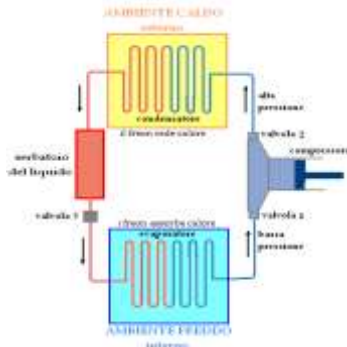


Figura 172 Ciclo frigorifero

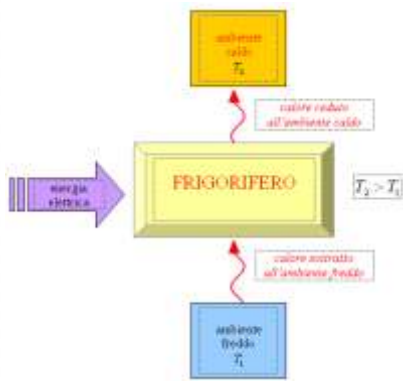


Figura 173 Schema ciclo frigorifero

Come funziona: il refrigerante, solitamente viene usato il freon o l'ammoniaca, nel momento di inizio è allo stato di vapore e viene **compresso** con una trasformazione adiabatica e con l'aumento di pressione si surriscalda. La valvola 1 è chiusa e si apre la valvola 2. Viene così spinto nel **condensatore**, dove inizia a cedere calore all'ambiente esterno e raffreddandosi il freon cambia di stato, diventando liquido. Si apre così la valvola 3 sotto il serbatoio del liquido, scendendo il liquido trova una pressione più bassa che permette una parziale vaporizzazione. Giunto nell'**evaporatore** il freon assorbe invece calore dall'ambiente in cui si trova, il frigorifero, completando la sua trasformazione in vapore e raffreddando l'ambiente stesso per via dell'assorbimento di calore adoperato. A questo punto il refrigerante, al momento allo stato gassoso, si apre la valvola 2 permettendo al vapore di ritorna nel compressore ricominciando il ciclo.

Calcolo dell'energia interna

L'energia interna U di un gas è data dalla somma di tutte le energie cinetiche delle particelle (in un gas perfetto si assume che l'energia potenziale sia nulla) e inoltre, se le molecole sono rappresentabili come punti materiali, l'energia cinetica è solo energia di traslazione.

La traslazione è un moto d'insieme in cui tutte la parti di un corpo compiono lo stesso spostamento nello spazio tridimensionale e può essere scomposta in 3 direzioni spaziali indipendenti. Si dice che la traslazione ha 3 gradi di libertà

Una molecola monoatomica può essere bene schematizzata come un punto materiale e possiede quindi 3 gradi di libertà.

Se si considerano molecole più complesse dotate di una loro struttura interna, si deve conseguentemente tener conto di altri tipi di energia cinetica legati ad altri moti come la rotazione o la vibrazione. Una molecola più complessa ha quindi più gradi di libertà.

L'energia cinetica media di traslazione è, per definizione, la media aritmetica di tutte le energie cinetiche delle particelle microscopiche. Con N particelle di massa m , dotate di velocità v_1, v_2, \dots, v_n , l'energia cinetica media di traslazione è:

$$\overline{E_c} = \frac{1}{2} m \cdot v_m^2 \quad (31)$$

e ricordando che $v_m^2 = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$ otteniamo:

$$\overline{E_c} = \frac{3}{2} k \cdot T \quad (32)$$

dove k è la costante di Boltzmann.

L'ultima relazione evidenzia un fatto importante: l'energia cinetica media traslazionale di un gas perfetto dipende solo dalla temperatura e non dal particolare tipo di gas (è scomparsa infatti la massa molare M). L'energia interna U di un gas ideale monoatomico è data dalla somma di tutta l'energia cinetica di traslazione e si ottiene quindi moltiplicando l'energia cinetica media per il numero N di particelle.

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{\frac{3}{2} N \cdot R}{N_A \cdot T} = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T \quad (33)$$

che rappresenta l'energia interna di n moli di un gas monoatomico.

Si noti che il ruolo delle due costanti k e R : la costante di Boltzmann è legata alle singole molecole mentre la costante R riguarda tutto il gas. il fattore $3/2$ dipende dai tre gradi di libertà possibili della traslazione (movimento lungo 3 direzioni spaziali).

Dal momento che l'energia interna è la stessa, la variazione di energia interna del gas per andare da uno stato a temperatura T_1 ad un altro stato a temperatura T_2 sarà sempre la stessa, indipendentemente dal tipo di trasformazione seguita.

L'energia interna varia solo se in una trasformazione c'è una variazione di temperatura. Possiamo scrivere:

$$\Delta U = \frac{3}{2} n R \Delta T \quad (34)$$

8.24 Il principio zero della termodinamica

Se un corpo A è in equilibrio termico con un corpo B, e il corpo B è a sua volta in equilibrio termico con un altro corpo C, allora A è senz'altro in equilibrio termico con il corpo C.

Anche se sembra un'ovvietà, questo principio non può essere dimostrato a partire dagli altri principi della termodinamica, e va quindi specificato a parte. Il principio zero infatti, viene utilizzato per effettuare la misura della temperatura, solo se quest'ultima viene intesa come proprietà che determina se un corpo è in equilibrio termico con altri corpi oppure no. "Due corpi in equilibrio termico fra loro sono alla stessa temperatura". Se a livello concettuale questa affermazione è elementare e basilare, la sua funzione è stata riconosciuta soltanto dopo la formulazione e la diffusione del primo e secondo principio della termodinamica, ed è stato pertanto deciso di attribuirgli il nome di "principio zero". Per comprendere meglio il significato di "contatto termico", immaginiamo di avere due oggetti posti in un contenitore isolato in modo che essi possano interagire solo fra loro, senza contatti con il resto del mondo (o meglio ancora dell'Universo). Se gli oggetti si trovano a temperature diverse essi si scambiano energia. L'energia scambiata tra gli oggetti a causa della differenza di temperatura si chiama calore. A questo punto possiamo correttamente dire che: "i due oggetti sono in contatto termico, se tra essi può esserci scambio di calore". L'equilibrio termico è la situazione nella quale due o più corpi, in contatto termico tra di loro, cessano di avere scambio di calore.

YouTube



8.25 Il primo principio della termodinamica

Il Primo Principio della Termodinamica afferma che in una trasformazione termodinamica, la quantità di calore scambiata con l'esterno del sistema è uguale alla somma della variazione di energia interna del sistema e del lavoro da esso compiuto. Si ha quindi:

$$Q = \Delta U + L \quad (35)$$

Per poter definire il primo principio, in termini di bilancio energetico, c'è bisogno di due affermazioni essenziali:

- L'energia non si genera;
- L'energia non si distrugge.

Questo determina che: In un sistema isolato (ovvero senza flussi di energia che vengono dall'esterno) l'energia in esso contenuta, è costante. L'universo è considerato un sistema isolato. È utile definire istante per istante, attraverso quali modalità è possibile scambiare energia con il sistema preso in considerazione; possiamo avere:

- **Scambio Flusso convettivo:** Se il tipo di scambio energetico è dovuto alla variazione della massa del sistema considerato a cui è associata un'energia (ad esempio se spingo 1 kg di acqua ad una certa velocità "w" in una caldaia, questa massa avrà un'energia cinetica, oppure se la lascio cadere dal fluido da una certa altezza ci sarà un contributo di energia potenziale);
- **Scambio Calore:** Se la causa della variazione di energia del sistema dipende da una variazione di temperatura. Tale scambio energetico si definisce "Potenza Termica" (energia termica fornita al sistema nell'unità di tempo) e la indichiamo con \dot{Q} . L'unità di misura nel SI (Sistema Internazionale) è, in questo caso, il Watt (W);
- **Scambio Lavoro:** Se la causa della variazione energetica è diversa da tutte quelle sopra menzionate. Chiameremo tale scambio energetico "Potenza Meccanica" e la indicheremo con \dot{L} . Anche in questo caso l'unità di misura è il W.

Osservazione

Talvolta la formula $Q = \Delta U + L$ viene utilizzata nella sua formulazione inversa per ricavare la variazione di energia interna ΔU , ottenendo banalmente:

$$\Delta U = Q - L \quad (36)$$

8.26 Secondo principio della termodinamica

Il secondo principio della termodinamica è un principio della termodinamica classica. Questo principio tiene conto del carattere di irreversibilità di molti eventi termodinamici, quali ad esempio il passaggio di calore da un corpo caldo ad un corpo freddo. A differenza di altre leggi fisiche quali la legge di gravitazione universale o le equazioni di Maxwell, il secondo principio è fondamentalmente legato alla freccia del tempo.

YouTube

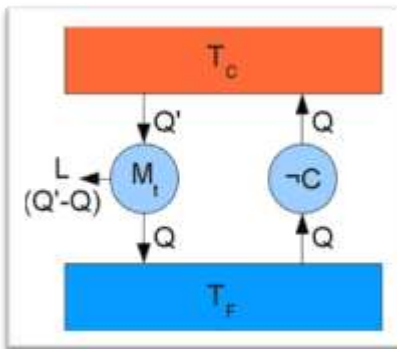


Figura 174 Secondo Principio della Termodinamica

YouTube



Enunciato di Kelvin

È impossibile realizzare una trasformazione ciclica il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore assorbito da una sorgente omogenea

Enunciato di Clausius

È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di trasferire calore da un corpo più freddo a uno più caldo senza l'apporto di lavoro esterno

Equivalenza dei due enunciati

L'equivalenza dell'enunciato di Kelvin-Planck e di quello di Clausius si può mostrare tramite il seguente ragionamento per assurdo. Nel seguito per brevità e chiarezza indicheremo con Kelvin la proposizione corrispondente all'enunciato di Kelvin, con non Kelvin la sua negazione, con Clausius la proposizione corrispondente all'enunciato di Clausius e con non Clausius la sua negazione.

Supponiamo per assurdo che l'enunciato di Clausius sia falso, ossia che esista una macchina frigorifera ciclica in grado di trasferire calore da una sorgente fredda ad una calda, senza apporto di lavoro esterno.

Sia Q la quantità trasferita per ogni ciclo della macchina dalla sorgente fredda a quella calda.

Possiamo allora far lavorare una macchina termica tra le due sorgenti, in modo tale che essa sottragga ad ogni ciclo una quantità di calore Q' dalla sorgente calda, trasferendo a quella fredda una quantità Q (uguale a quella precedentemente sottratta) e convertendo la differenza $Q' - Q$ in lavoro.

La sorgente fredda allora non subisce alcun trasferimento netto di calore e pertanto il nostro sistema di macchine termiche sta estraendo calore, globalmente, dalla sola sorgente calda, producendo esclusivamente lavoro, in violazione della formulazione di Kelvin-Planck del secondo principio.

Supponiamo ora di poter convertire integralmente il calore in lavoro, estratto per mezzo di una macchina ciclica da una sola sorgente S a temperatura costante.

Sia L tale lavoro estratto in un ciclo.

Allora possiamo prendere una seconda sorgente S' a temperatura più alta e far funzionare una macchina frigorifera tra le due sorgenti, che assorba ad ogni ciclo il lavoro L prodotto dall'altra macchina.

Si ha così un trasferimento netto di calore dalla sorgente fredda S alla sorgente calda S' , in violazione dell'enunciato di Clausius.

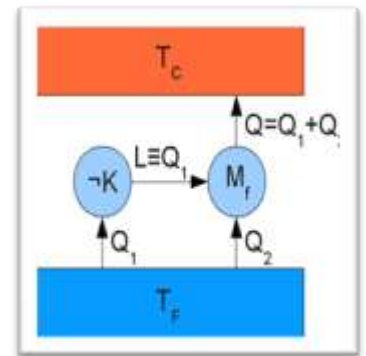


Figura 175 Equivalenza enunciati secondo principio della termodinamica

8.27 Entropia



Il concetto di entropia venne introdotto agli inizi del XIX secolo, nell'ambito della termodinamica, per descrivere una caratteristica (la cui generalità venne osservata per la prima volta da *Sadi Carnot* nel 1824) di tutti i sistemi allora conosciuti, nei quali si osservava che le trasformazioni avvenivano invariabilmente in una direzione sola, quella verso il maggior disordine.

In particolare la parola entropia venne introdotta per la prima volta da Rudolf Clausius nel suo *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie* (Trattato sulla teoria meccanica del calore), pubblicato nel 1864. In tedesco Entropie deriva dal greco $\epsilon\nu\nu$ en, “dentro”, e da τροπή tropé, “cambiamento”, “punto di svolta”, “rivolgimento”: per Clausius indicava dove va a finire l'energia fornita ad un sistema. Propriamente Clausius intendeva riferirsi al legame tra movimento interno (al corpo o sistema) ed energia interna o calore, legame che esplicitava la grande intuizione del secolo dei Lumi, che in qualche modo il calore dovesse riferirsi al movimento meccanico di particelle interne al corpo. Egli infatti la definì come il rapporto tra la somma dei piccoli incrementi (infinitesimi) di calore, divisa per la temperatura assoluta durante il cambiamento di stato.

Viene così definita la variazione di entropia ΔS come il rapporto tra la quantità di calore scambiata e la temperatura durante tale scambio, ovvero:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (37)$$

e si misura in Joule su °K, ovvero: $\frac{J}{K}$

Il concetto di **entropia** è piuttosto complesso; esistono infatti almeno due definizioni rigorose dell'entropia: una definizione macroscopica, fornita dalla termodinamica e una definizione microscopica, fornita dalla meccanica quantistica.

È possibile comunque dare una spiegazione semplicistica dell'entropia, interpretandola come il **grado di disordine** di un sistema. Quindi un aumento del disordine di un sistema è associato ad un aumento di entropia, mentre una diminuzione del disordine di un sistema è associato ad una diminuzione di entropia.

Per maggiore chiarezza, nella figura seguente sono mostrate tre configurazioni dello stesso sistema costituito da 24 oggetti, in cui si ha un aumento di disordine (cioè un aumento di entropia) andando da sinistra a destra e una diminuzione di disordine (cioè una diminuzione di entropia) andando da destra a sinistra.

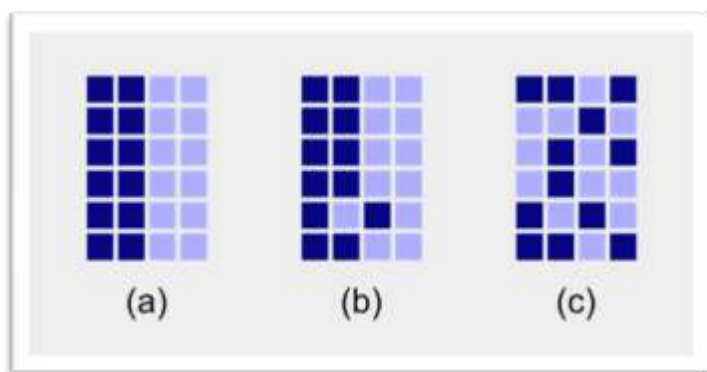


Figura 176 Entropia e disordine

Nella figura che segue è rappresentato un esempio pratico in termodinamica in cui si assiste ad un aumento di disordine (cioè un aumento di entropia). In questo caso gli "oggetti" sono delle molecole di due gas (ogni gas è contraddistinto da un colore diverso), ad esempio si supponga che le sferette blu siano molecole di ossigeno e le sferette rosse siano molecole di azoto.

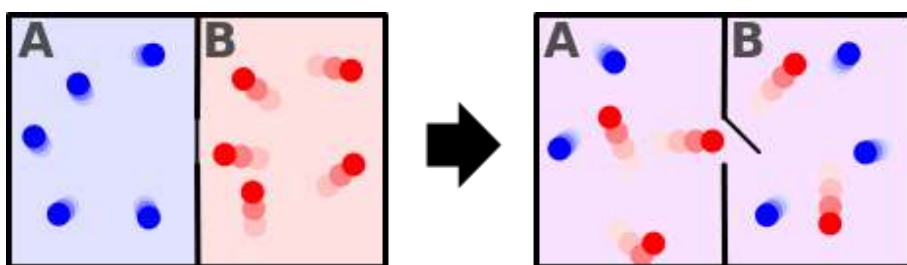


Figura 177 Entropia

Inizialmente i gas sono situati in due compartimenti stagni, per cui in ciascun compartimento sono presenti solo molecole dello stesso tipo di gas. Se i due compartimenti sono messi in comunicazione (ad esempio aprendo una valvola), i due gas si mescolano tra di loro e si ha un aumento di disordine, ovvero un aumento di entropia (che in tal caso viene detta "variazione di entropia di miscelamento"). Nell'esempio precedente si è assistito ad un aumento di entropia "spontaneo" (è bastato infatti mettere in comunicazione i due compartimenti). Tale aumento di entropia spontaneo avviene sempre in natura, mentre non avviene una diminuzione di entropia spontanea. Tale constatazione empirica si traduce nel fatto che le configurazioni "disordinate" sono le più probabili e corrisponde al cosiddetto "Secondo principio della termodinamica".

Altri sistemi che possono assumere diversi gradi di disordine sono i materiali metallici. Essi infatti possono assumere le seguenti strutture:

- struttura **cristallina** (ordinata): gli atomi sono disposti in maniera ordinata; una struttura cristallina è formata da diverse celle tutte uguali tra loro, che si ripetono nello spazio; si parla in questo caso di "ordine a lungo raggio";
- struttura **policristallina** (parzialmente ordinata): si riscontrano più cristalli (strutture ordinate) all'interno del materiale; si parla in questo caso di "ordine a corto raggio";

- struttura **amorfa** (disordinata): gli atomi sono disposti in maniera completamente disordinata; non si ha né ordine a corto raggio né ordine a lungo raggio.

Il disordine delle strutture dei materiali metallici aumenta anche in presenza dei cosiddetti "difetti cristallini" (tra cui l'inclusione di atomi

di altro tipo o la mancanza di un atomo in una posizione del reticolo), la cui presenza determina appunto

un aumento del contenuto entropico del materiale.

Per chiarire il concetto di entropia possiamo presentare alcuni esempi: Si faccia cadere una gocciolina d'inchiostro in un bicchiere d'acqua: si osserva che, invece di restare una goccia più o meno separata dal resto dell'ambiente (che sarebbe uno stato completamente ordinato), l'inchiostro inizia a diffondere e, in un certo tempo, si ottiene una miscela uniforme (stato completamente disordinato). È esperienza comune che, mentre questo processo avviene spontaneamente, il processo inverso, separare l'acqua e l'inchiostro, richiede energia esterna.

Immaginiamo un profumo contenuto in una boccetta colma come un insieme di molecole puntiformi dotate di una certa velocità derivante dalla temperatura del profumo. Fino a quando la boccetta è tappata, ossia isolata dal resto dell'universo, le molecole saranno costrette a rimanere all'interno e non avendo spazio (la boccetta è colma) rimarranno abbastanza ordinate (stato liquido). Nel momento in cui la boccetta viene stappata le molecole della superficie del liquido inizieranno a staccarsi dalle altre e, urtando casualmente tra di loro e contro le pareti della boccetta, usciranno da questa disperdendosi all'esterno (evaporazione). Dopo un certo tempo tutte le molecole saranno uscite disperdendosi. Anche se casualmente qualche molecola rientrerà nella boccetta, il sistema complessivo è ormai disordinato e l'energia termica che ha messo in moto il fenomeno è dispersa e quindi non più recuperabile (si ha un equilibrio dinamico).

Il concetto di entropia ha conosciuto grandissima popolarità nell'Ottocento e nel Novecento, grazie alla grande quantità di fenomeni che aiuta a descrivere, fino ad uscire dall'ambito prettamente fisico ed essere adottato dalle scienze sociali, nella teoria dei segnali, nell'informatica teorica e nell'economia. È tuttavia bene notare che esiste una classe di fenomeni, detti fenomeni non lineari (ad esempio i fenomeni caotici) per i quali le leggi della termodinamica (e quindi anche l'entropia) devono essere profondamente riviste e non hanno più validità generale.

Entropia nelle trasformazioni

Essendo l'entropia una funzione di stato, se conosco le grandezze relative ad un certo stato termodinamico è possibile ricavarla direttamente. In particolare, non dipende dal tipo di trasformazione o dal suo percorso: ma è sempre data dalla differenza tra i valori di entropia negli



Figura 178 Strutture atomiche

stati iniziale e finale. Essa dipende però dalle irreversibilità interne al sistema. Vediamo il comportamento di questa grandezza nell'ambito delle trasformazioni fisiche più "facili":

- **isoterme**, nei passaggi di stato (fusione ed evaporazione), T è costante
- **adiabatiche**, non viene fornito calore dall'esterno, $Q = 0$

nella trasformazione isoterma è possibile ricavare la variazione di entropia per un'isoterma, considerando Q come il calore fornito, mentre T è costante.

Per una trasformazione adiabatica, se la stessa risulta reversibile, non essendoci scambio di calore con l'ambiente, abbiamo $Q=0$ quindi non vi è alcuna variazione dell'entropia essendo:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{0}{T} = 0 \quad (38)$$

8.28 Temperatura assoluta sotto lo zero

Uno dei capisaldi della Termodinamica, è legato al fatto di non poter in alcun modo, per via termodinamica, scendere sotto lo zero assoluto, ritenuto da sempre un limite fisico invalicabile.

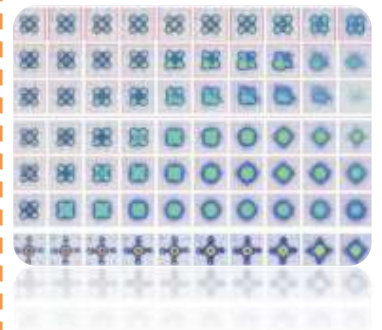
Per altro se si scendesse, per via termodinamica, sotto lo zero, i principi della Termodinamica, così come li conosciamo smetterebbero di valere. L'Entropia del sistema, tenderebbe ad avere variazione infinita!

Accade però che sfruttando le proprietà quantistiche che emergono in gas ultrafreddi portati allo stato di condensati di Bose-Einstein, un gruppo di ricerca tedesco ha raggiunto una temperatura di alcuni nanokelvin inferiore allo zero assoluto. Questi gas a temperatura assoluta negativa si comportano per alcuni aspetti come se fossero "infinitamente caldi".

Sfruttando proprietà quantistiche, un gruppo di ricercatori della Ludwig-Maximilians-Universität di Monaco di Baviera e del Max-Planck-Institut per l'ottica quantistica a Garching è riuscito per la prima volta a portare una nuvola di 100.000 **atomi di potassio** - precedentemente portata a uno stato di condensato di Bose-Einstein - a una temperatura inferiore allo zero assoluto.

fornendo energia al sistema, questo invece di diventare più disordinato diventa più ordinato: sono appunto i sistemi a temperatura (assoluta) negativa. Questa possibilità è legata al fatto che la temperatura di un sistema può essere vista come una distribuzione di probabilità delle energie a cui si trovano le sue particelle. Solitamente, gran parte delle particelle che compone un sistema ha un'energia vicina a quella media del sistema e solo poche di esse si trovano a energie elevate (o più basse). Tuttavia, in linea teorica questa distribuzione può essere invertita, portando a una situazione in cui il segno della temperatura assoluta cambia e da positivo diventa negativo.

A questa inversione di segno corrispondono altrettanti cambiamenti nei comportamenti dei sistemi a temperatura assoluta negativa:



CURIOSITA'

Per secoli si è ritenuto che quello dello zero assoluto fosse un limite invalicabile! Sotto certi aspetti rimane così, perchè è ampiamente dimostrato che per via termodinamica non si potrà mai giungere sotto lo zero assoluto.

Per altre vie, come quella elettromagnetica invece si è riusciti a scendere al di sotto di tale terribile temperatura.

Come si comporti la materia in tale situazioni è tutto da scoprire!

per esempio, mentre normalmente un gas riscaldato si espande, in questi singolari sistemi si contrae, e mentre di solito il calore fluisce da un corpo più caldo a quello più freddo, qui avviene l'opposto. Dal punto di vista matematico, un sistema a temperatura assoluta negativa si comporta come se fosse un sistema a temperatura infinita!

Sfruttando atomi ultrafreddi racchiusi trappole ottiche e una serie ben calibrata di raggi laser e campi magnetici per controllare con precisione il comportamento degli atomi, i ricercatori tedeschi hanno raggiunto una temperatura di alcuni nanokelvin inferiore allo zero assoluto per il loro gas ultrafreddo. Finora sistemi di questo tipo erano stati prospettati solo in via teorica; la dimostrazione che possano venire effettivamente creati apre la strada allo sviluppo di apparecchiature dotate di un'efficienza impensabile, pur dovendo essere di dimensioni nanoscopiche ossia a scale a cui si manifestano gli effetti quantistici.

Lo studio dello strano comportamento dei sistemi a temperature negative, osservano Schneider e colleghi, potrebbe anche essere utile alla creazione di nuovi modelli cosmologici, e per comprendere meglio il comportamento dell'energia oscura, ovvero della misteriosa forza che si ipotizza contrastare la forza di gravità, agendo così da motore dell'espansione dell'universo

(tratto da un articolo de "Le Scienze" del 08/01/2013, dal titolo: Oltre lo zero assoluto, una temperatura negativa "scottante")

8.29 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questo capitolo abbiamo trattato i diversi tipi di **trasformazioni termodinamiche** intendendo per esse i cambiamenti di stato di un corpo o un sistema. Per studiare al meglio le diverse situazioni termodinamiche facciamo uso di equazioni che esprimono il cambiamento delle **funzioni di stato**, pressione, volume e temperatura, e le dipendenze tra di loro. Spesse volte, per meglio rappresentare le trasformazioni in atto, utilizziamo un sistema di assi cartesiani indicando alle ascisse il volume e alle ordinate la pressione. Tale sistema di assi prende il nome di **Piano di Clapeyron**.

Considerando che i gas non hanno un proprio volume o forma si è reso necessario introdurre il concetto di mole piuttosto che parlare di massa del gas, potendo così esprimere grandezze infinitesime come molecole ed atomi.

Abbiamo introdotto il concetto di **calore specifico molare**, estensione del concetto di calore specifico già affrontato nel primo capitolo.

In particolare abbiamo studiato come avvengono alcuni di questi fenomeni quando siamo in presenza di **gas**, o meglio in gas che consideriamo ideali, **perfetti**, enunciando le diverse leggi. **La legge di Boyle Mariotte** che esprime la relazione tra pressione e volume quando la temperatura rimane costante (**isoterma**). La prima **legge di Gay Lussac** che esprime il legame tra volume e temperatura a pressione costante (**isobara**)

e la seconda legge di Gay Lussac che esprime il legame tra pressione e volume a volume costante (**isocora**). Di qui si è considerata l'accreditata teoria cinetica dei gas perfetti, intendendo che le molecole di gas, in un recipiente, percorrono moti con traiettorie casuali e con urti perfettamente elastici, arrivando così a calcolare l'energia interna di un gas perfetto.

Un altro tipo di trasformazione è possibile con i gas, ovvero quelle **adiabatiche**, in cui non avviene alcuno scambio di calore o energia con l'esterno.

Le trasformazioni, però, possono essere viste anche non solo singolarmente ma in combinazioni tra di loro e laddove più trasformazioni riescono a riportare il sistema ad una situazione iniziale siamo in presenza di un **ciclo termodinamico**.

Mentre il calore fluisce spontaneamente da una sorgente calda verso una sorgente fredda (a temperatura inferiore alla prima), per poter invertire tale processo è necessario utilizzare apposite macchine termiche, in grado di compiere lavoro meccanico o di trasformare lavoro meccanico in calore. Un classico esempio di macchina termica è il **motore a scoppio**. Quando abbiamo a che fare con una macchina, termica o meccanica, ha senso parlare di rendimento, intendendo rappresentare con esso quanta di quella energia meccanica (o termica) viene realmente trasformata in calore (o in lavoro) rispetto a quella fornita al sistema. Un

altro esempio di ciclo, puramente teorico però, è il **ciclo di Carnot** che rappresenta una soluzione ottimale per il rendimento di una macchina e a cui tutte le macchine termiche reali vengono in qualche modo confrontate. Le macchine in grado di sottrarre calore ad un sistema prendono il nome di **macchine frigorifere**, atte ad invertire quel naturale passaggio di calore da sorgente calda a sorgente fredda.

Abbiamo così introdotto i tre **principi della termodinamica**, di cui il principio zero riferito all'equilibrio termico tra corpi o sistemi, il primo riferito allo scambio di calore che avviene

in una trasformazione termodinamica ed il suo legame con il lavoro compiuto o assorbito, mentre il secondo principio, con i due enunciati, ove si chiarisce l'impossibilità di realizzare macchine termiche il cui unico scopo sia quello di trasformare calore in lavoro o viceversa.

In ultimo il concetto di **entropia**, che in qualche modo esprime il grado di disordine di un qualunque sistema termodinamico, legando tra di loro il calore fornito ad un sistema e la temperatura assunta durante tale scambio.

8.30 Problemi proposti

- 1) Per aumentare la temperatura di 350g di piombo da 0°C a 20°C occorrono 880J . Quanto vale il calore specifico del piombo?
- 2) 300g di liquido vengono riscaldati fornendogli 1,5Cal e la sua temperatura passa da 10°C a 20°C . Quanto vale il calore specifico?
- 3) Di quanto aumenta la temperatura di 1l di acqua a cui vengono forniti sotto forma di calore 10kJ ?
- 4) Di quanto varia l'energia interna di un gas in una trasformazione in cui gli vengono fornite 5Cal sotto forma di calore mentre il gas compie un lavoro di 10kJ .
- 5) Quanto calore è necessario fornire a 10l di acqua per innalzarne la temperatura di 20°C ?
- 6) Di quanto è variata l'energia interna dell'acqua nell'esercizio precedente?
- 7) 300g di liquido vengono riscaldati fornendogli 1,5Cal e la sua temperatura passa da 10°C a 20°C . Quanto vale il calore specifico?
- 8) In un calorimetro delle mescolanze vengono miscelati 100g di acqua inizialmente a 18°C e 30g di olio inizialmente alla temperatura di 30°C . La temperatura finale della sospensione vale 25°C . Quanto calore cede l'olio all'acqua?
- 9) dal problema precedente, assumendo che il calore ceduto dall'olio sia di pari a 700Cal , quanto vale il calore specifico dell'olio?
- 10) Un sasso di 0,4kg cade da un'altezza di 1200m su un contenitore contenente 2,5kg di acqua. Di quanto aumenta la temperatura dell'acqua?
- 11) In un bicchiere si trovano 300g di acqua e 100g di ghiaccio (alla temperatura di 0°C). Con un cucchiaino si agita il contenuto del bicchiere finché 50g di ghiaccio fondono. A quanto ammonta la variazione di energia interna del sistema acqua ghiaccio? (calore latente di fusione del ghiaccio: $\lambda=80\text{cal/g}$)
- 12) 3l di elio alla pressione di 15atm si trovano alla temperatura iniziale di 549K . Il gas viene fatto espandere a pressione costante fino al volume di 6l e successivamente raffreddato a volume costante fino a tornare al valore iniziale di temperatura.
 - (a) Quanto vale la pressione finale?
 - (b) Descrivere la trasformazione sopra indicata nel piano PV;
 - (c) Quanto vale la variazione totale di energia interna del gas nell'intera trasformazione;

8.31 *In laboratorio*

Dilatazione termica

16) Utilizzando un termometro non tarato, eseguire la sua taratura dello stesso utilizzando le temperature di riferimento di congelamento e di ebollizione dell'acqua.

17) Verifica sperimentale della legge di dilatazione termica dei fluidi scaldando acqua contenuta in un becher e utilizzando un fornellino ad alcol.

Esperienze virtuali (con applet)

Legge di Boyle

18) Verifica sperimentale della legge di Boyle.

Prima legge di Gay-Lussac

19) Verifica sperimentale della prima legge di Gay-Lussac.

Seconda legge di Gay-Lussac

20) Verifica sperimentale della seconda legge di Gay-Lussac.

8.32 **Approfondimento: William Thomson Kelvin**

William Thomson, conosciuto anche come Lord Kelvin, fisico e matematico, nato il 26 giugno 1824 a Belfast, Irlanda. È il secondo di quattro fratelli; quando la madre muore, nel 1830, si trasferisce con la sua famiglia a Glasgow, dove il padre, James Thomson, viene assunto come professore di matematica all'Università.

William si rivela un bambino prodigio in matematica: ricevuti gli insegnamenti del padre, a 17 anni si iscrive all'Università di Glasgow; spinto dall'interesse del padre nei confronti della sua educazione, Thomson si trasferisce a studiare all'università di Cambridge nel 1845 e inizia a lavorare dopo la laurea a Parigi con Regnault, con il quale studia, tra le altre cose, nuove tecniche di dimostrazione scientifica. Lungo tutto il percorso della educazione, Thomson dimostra eccellenti capacità e pubblica il primo a 16 anni? diversi scritti a scopo scolastico inerenti la matematica.

Diventa professore di Filosofia Naturale all'Università di Glasgow nel 1846 e mantiene questa cattedra per circa mezzo secolo; crea il primo laboratorio di fisica di tutta la Gran Bretagna nel 1846. Nello stesso anno stima l'età della terra, basandosi sul fatto che sia stata creata alla temperatura del Sole e calcolando quindi la velocità di raffreddamento della superficie: deduce una stima di 100 milioni di anni, fatta però senza calcolare gli effetti di riscaldamento della radioattività del nucleo terrestre. Difende testardamente questa teoria, contestando le conclusioni di Darwin sulla teoria dell'evoluzione, in quanto incompatibili con i tempi da lui calcolati.

A differenza di questo primo studio, i suoi successivi studi sul calore si rivelano corretti e produttivi: nel 1847 infatti definisce per la prima volta la scala di temperatura assoluta, che verrà successivamente ridenominata con il suo nome; nello stesso anno, a neanche trent'anni, diventa membro della Royal Society.

Nel 1851 pubblica le idee alla base del secondo principio della termodinamica e sostiene la validità dell'equivalente meccanico del calore del suo amico James Joule, il quale, tramite i suoi esperimenti deduce la correlazione tra calore ed energia molecolare dei fluidi. Kelvin introduce il termine "energia cinetica" nel 1856; il nome di questi due scienziati passa alla storia anche grazie alla famosa legge di Joule-Kelvin che permette il funzionamento dei sistemi frigoriferi.

Mentre Thomson è a Cambridge pubblica "Il moto uniforme del calore in corpi solidi omogenei e la sua connessione con la teoria matematica dell'elettricità": applicando l'analogia del flusso di calore al flusso elettrico, nel 1854 si associa agli sforzi di Cyrus Field per creare una linea telefonica transatlantica, migliorando il progetto dei cavi, addirittura supervisionando la posa di questi viaggiando sulle navi responsabili di tale attività.

Questa esperienza spinge Kelvin ad inventare il galvanometro a specchio (brevettato nel 1858) sotto forma di un ricevitore telegrafico da lunga distanza, il quale possa riconoscere anche segnali particolarmente flebili



Figura 179 William Thomson Kelvin (26 giugno 1824 – 17 dicembre 1907)

9. Le onde

Prerequisiti

Il concetto di velocità. Utilizzo delle funzioni goniometriche

Sapere

Conoscere il concetto di onda e i diversi tipi di onda. In particolare si tratterà l'onda sonora con tutte le sue caratteristiche. Conoscere come avviene la trasmissione di un'onda e come si propaga.

Saper fare

Saper distinguere tra i diversi tipi di onda. Saper distinguere tra le diverse caratteristiche dei fenomeni ondulatori, quali la riflessione, la rifrazione, l'interferenza e la diffrazione

9.1 Cos'è un'onda

In fisica con il termine **onda** si indica una perturbazione che nasce da una sorgente e si propaga nel tempo e nello spazio, trasportando energia o quantità di moto senza comportare un associato spostamento della materia. Le onde possono propagarsi sia attraverso un materiale, sia nel vuoto. Ad esempio la radiazione elettromagnetica (di cui parleremo nel capitolo 10), ed a livello teorico la radiazione gravitazionale, possono esistere e propagarsi anche in assenza di materia, mentre altri fenomeni ondulatori esistono unicamente in un mezzo, che deformandosi produce le forze elastiche di ritorno in grado di permettere all'onda di propagarsi.

Ad esempio un sasso cade in uno stagno, delle onde si formano sulla sua superficie partendo dal punto di impatto. Si propagano in tutte le direzioni con una simmetria circolare. Quello che è successo è che il sasso ha ceduto energia cinetica all'acqua, questa energia tende a propagarsi e disperdersi in tutte le direzioni. Il meccanismo più efficiente con cui lo fa è quello di un'onda.

Si definisce onda la propagazione di una perturbazione.

Alla base di un fenomeno ondoso, vi è un moto oscillatorio che si genera quando una particella si muove periodicamente intorno ad una posizione di equilibrio. Nelle onde non si ha alcun trasporto di materia ma soltanto di energia.

Una fondamentale classificazione delle onde le suddivide in:

- **onde meccaniche** (come le onde del mare, il suono) generate da un fenomeno meccanico e necessitano di un mezzo di propagazione.
- **onde elettromagnetiche** (come la luce e le onde radio) che hanno alla base una variazione del campo elettromagnetico e si propagano nel vuoto. Le onde possono propagarsi lungo una sola direzione (es. onda su una corda tesa), nel piano (es. onde provocate da un sasso lasciato cadere in uno stagno) o in tutto lo spazio (es. onde sonore generate da sorgenti puntiformi). Un'onda viene sempre generata da una sorgente che produce una perturbazione nello spazio che la circonda. Alcuni semplici oggetti, oscillando possono diventare sorgenti di onde meccaniche. Per ciascuno di essi esiste una posizione di equilibrio stabile. Se uno di essi viene spostato dalla posizione di equilibrio, comincia ad oscillare fra due punti, con un proprio periodo di oscillazione. Responsabile del moto è una forza di richiamo elastica, che, per piccole oscillazioni, è proporzionale allo spostamento dalla posizione di equilibrio. Durante l'oscillazione l'oggetto perturba il mezzo circostante cedendogli energia: in tal modo genera un'onda.
- **onde di materia**: comunemente noi siamo portati a pensare elettroni, protoni, atomi e molecole come i costituenti della materia, in realtà esse si comportano come vere e proprie onde, ecco perché parliamo di onde di materia.



Laboratorio 22
Generare Onde

Caratteristiche di un'onda

Fronte d'onda

Si definisce fronte d'onda, il luogo dei punti caratterizzati dall'aver in ogni istante lo stesso valore dello spostamento dalla posizione di equilibrio. La forma che assume la superficie del fronte d'onda è anche detta superficie d'onda.

A seconda della **forma** che può assumere la superficie d'onda, possiamo avere:

- **Onda piana**, cioè un'onda in cui il fronte è una superficie piana perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.
- **Onda circolare**, cioè un'onda la cui superficie d'onda è una circonferenza che va allargandosi al propagarsi dell'onda.
- **Onda sferica**, cioè quando la superficie d'onda sono delle sfere, questo è il caso di onde che si propagano nello spazio. La direzione lungo la quale un'onda si propaga è detta raggio dell'onda ed è definita come la semiretta uscente dalla sorgente e perpendicolare alla superficie del fronte d'onda.

A seconda del modo in cui le onde possono propagarsi possiamo avere:

- **onde trasversali**, quando la direzione della vibrazione (o perturbazione) è perpendicolare a quella di propagazione del fronte;
- **onde longitudinali**, quando la direzione della vibrazione (o perturbazione) è parallela a quella di propagazione del fronte. Esistono anche onde nelle quali le particelle del mezzo subiscono spostamenti sia longitudinali che trasversali (come ad es. le onde marine).

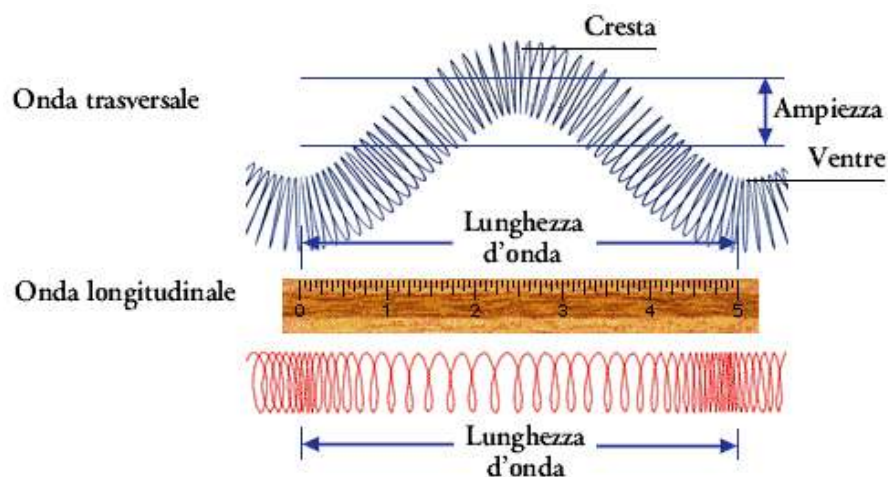


Figura 180 Tipi di onda: trasversali e longitudinali

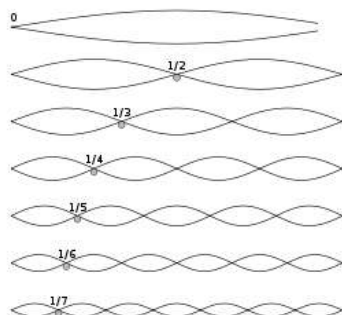


Figura 181 Onde su corde vincolate

come è possibile vedere dalla figura, una cresta rappresenta uno dei punti in cui l'onda raggiunge un valore massimo, mentre la gola è quello in cui raggiunge in valore minimo. La lunghezza d'onda è la distanza tra due creste (o tra due gole) successive.

Altre caratteristiche di un'onda di tipo armonico, sono:

• **Periodo T** : è il più piccolo intervallo di tempo (quello di un'oscillazione completa) dopo il quale il moto riassume le stesse caratteristiche in ogni punto del mezzo in cui si propaga l'onda.

• **Frequenza f** : rappresenta il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo. La relazione fra periodo e frequenza è la seguente:

$$f = \frac{1}{T}$$

L'unità di misura della frequenza rappresentata da un'oscillazione al secondo, si chiama hertz (Hz).

• la **lunghezza d'onda λ** , che in questo contesto può essere vista come la distanza percorsa dall'onda in un periodo;

• **Ampiezza A** : rappresenta il massimo spostamento dalla posizione di equilibrio ed è uguale sia per gli spostamenti positivi che per quelli negativi.

Onde stazionarie

Un'onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello spazio: in pratica non c'è propagazione lungo una certa direzione nello spazio, ma solo un'oscillazione nel tempo. Pertanto, è soltanto il profilo dell'onda stazionaria a muoversi, oscillando "su e giù" in alcuni punti. I punti ove l'onda raggiunge ampiezza massima sono detti antinodi (o ventri), i punti che invece rimangono fissi (ove l'onda è sempre nulla) sono detti nodi.

Una fune ancorata ai suoi capi che viene tirata in un suo punto rappresenta un esempio di come si propaghi un'onda stazionaria.

Se consideriamo una corda di lunghezza L , e supponendo che la stessa abbia un certo numero di nodi n , la lunghezza d'onda verrà calcolata come:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \tag{1}$$

dove è evidente che la corda ha $n + 1$ nodi (minimo 2).

Comportamento delle onde

Tutte le onde hanno un comportamento comune in situazioni standard e possono subire i seguenti effetti o fenomeni:

1. **Riflessione**: è quel fenomeno per cui un'onda che incontra lungo il suo cammino, riflette parte della sua componente luminosa in maniera diffusa o meno;

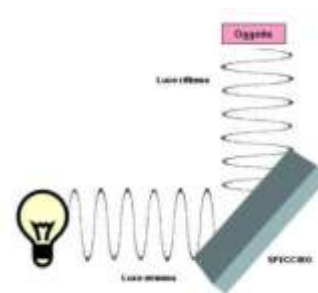


Figura 182 Onda luminosa riflessa



Laboratorio 23 Onde generate con una corda

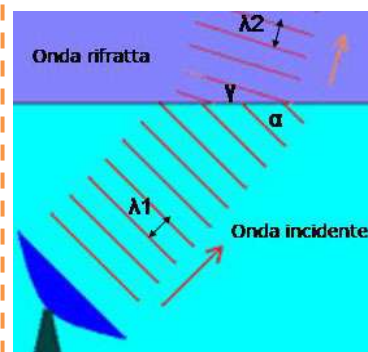


Figura 183 Rifrazione di un'onda

2. **Rifrazione:** è il fenomeno per cui un'onda subisce una deviazione quando questa passa da un mezzo fisico ad un altro, cambiando la velocità di propagazione;
3. **Diffrazione:** è il fenomeno per cui un'onda, dopo aver incontrato un ostacolo lungo il suo cammino, devia il suo percorso;
4. **Interferenza:** è il fenomeno per cui la sovrapposizione due fasci luminosi in un dato punto, porta ad un comportamento distruttivo o additivo delle stesse onde.

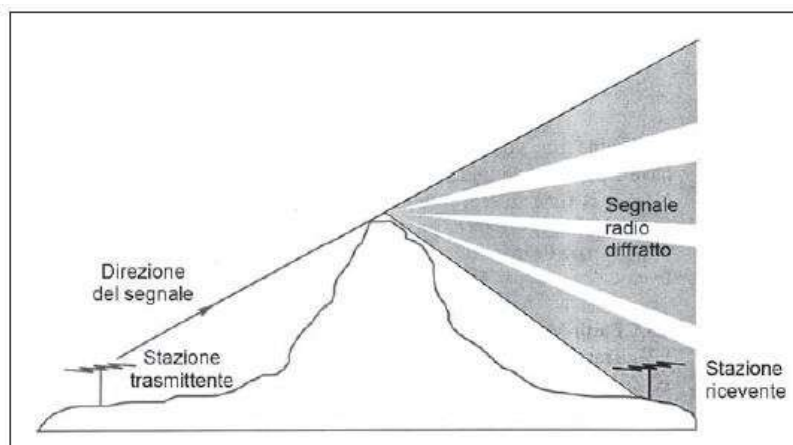


Figura 184 Diffrazione di un'onda

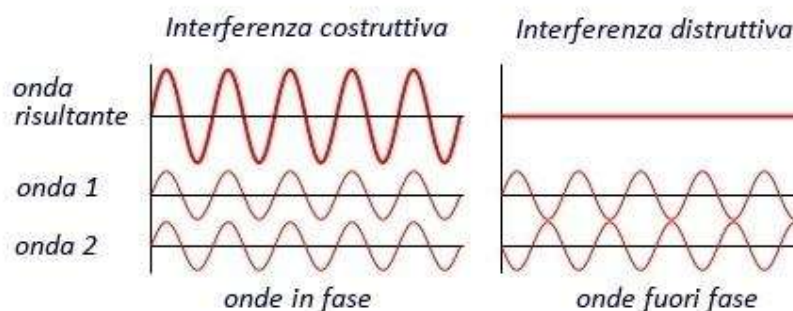


Figura 185 Interferenza: Onde in fase e in contro fase



9.2 Onde Armoniche

Un'onda di tipo sinusoidale è detta onda armonica. La sua rappresentazione è quindi attraverso il seno o coseno goniometrici. L'equazione di onda armonica è data da:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Da cui è possibile ricavare la velocità di propagazione, che si ottiene derivando rispetto al tempo. Si ottiene:

$$v(t) = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

Mentre l'accelerazione è data dalla derivata della velocità

$$a(t) = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x(t) \quad (4)$$

Le onde armoniche sono importanti perché rappresentano un numero notevole di onde, tra cui quelle elettromagnetiche, che si comportano come onde armoniche.

9.3 Il suono

Le onde acustiche (o sonore) sono onde meccaniche longitudinali, che si possono muovere attraverso solidi, liquidi o gas.

Un corpo vibrante immerso nell'aria produce in essa delle onde elastiche, dando luogo a quel fenomeno che viene chiamato **suono**. Per questo le onde elastiche vengono chiamate onde acustiche o onde sonore. Il modo più semplice di produrre un suono è quello di porre in vibrazione un corpo, quale, ad esempio, la corda di una chitarra o una membrana di un tamburo.

Suoni semplici

Consideriamo un tubo cilindrico immerso nell'aria, con una estremità libera, mentre nell'altra è inserito un pistone che vibri con moto sinusoidale; cioè, se $x(t)$ indica la profondità del pistone dentro il cilindro all'istante t , si ha:

$$x(t) = x_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t) \quad (5)$$

dove ν indica la frequenza (in altri contesti avevamo indicato la frequenza con f) di vibrazione del pistone.

Questo, nel suo moto, comprime l'aria del cilindro nei pressi del pistone, cioè aumenta la sua densità; quando il pistone va indietro produce rarefazione su essa, cioè ne diminuisce la densità; per effetto dell'elasticità dell'aria le variazioni di densità si propagheranno nel cilindro come un'onda sinusoidale avente la stessa frequenza ν della vibrazione che la produce.

La velocità di propagazione dipende dal mezzo e dalla sua temperatura.

Nel nostro caso, in cui il mezzo è l'aria, tale velocità è di 343 m/s a 20°C di temperatura.

La tabella seguente fornisce i valori della velocità del suono nei vari mezzi:

| Mezzo in cui si propaga il suono | Temperatura ($^\circ\text{C}$) | Velocità (m/s) |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Aria | 20 | 343 |
| Acqua | 15 | 1450 |
| Piombo | 20 | 1230 |
| Ferro | 20 | 5130 |
| Granito | 20 | 6000 |



Figura 186 Onda sonora percepita dall'uomo

quello che abbiamo appena considerato è un esempio di **suono semplice**. E' detto semplice un suono di tipo **sinusoidale**.

9.4 Caratteristiche di un suono semplice

Altezza di un suono

Abbiamo già parlato della frequenza. Essa è definita come il numero di oscillazioni nell'unità di tempo in un punto fissato. Se come unità del tempo di misura si usa il secondo, allora la frequenza si misura in Hz (s^{-1})

L'orecchio umano medio riesce a percepire i suoni che hanno una frequenza compresa tra 16 e 20.000Hz .

I suoni alti o acuti, sono quelli la cui frequenza è prossima a 16.000Hz , quelli bassi sono quelli con frequenza più vicina ai 16Hz . Quando si parla dell' altezza di un suono, ci si riferisce appunto alla frequenza di un suono udibile.

Gli **infrasuoni** sono i suoni con frequenza inferiore a 16Hz ; Gli **ultrasuoni** sono quelli con frequenza superiore ai 20.000Hz ; ultrasuoni e infrasuoni sono entrambi oltre la **soglia dell'udibilità**.

Lunghezza d'onda

Come per ogni onda, il periodo T di un suono semplice è il tempo impiegato per compiere un'intera oscillazione. Naturalmente, il periodo non è altro che l'inverso della frequenza ν :

$$T = \frac{1}{\nu} \quad (6)$$

L'onda che si propaga nel tempo può essere descritta come onda di densità δ , o meglio di variazione di densità rispetto alla densità media. La legge di una tale onda sarà:

$$\delta(x;t) = \delta_0 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - 2\pi\nu t\right) \quad (7)$$

dove λ rappresenta la lunghezza d'onda . Se indichiamo con v_A la velocità di propagazione del suono nell'aria avremo

$$\lambda = v_A \cdot T = \frac{v_A}{\nu} \quad (8)$$

dove la velocità di propagazione del suono $v_A = 343 \text{ m/s}$, all'incirca.

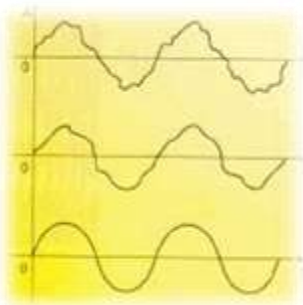


Figura 187 Ampiezza d'onda

Intensità del suono

L'intensità di un suono in un punto P è la quantità di energia sonora che attraversa una superficie unitaria posta nel punto P perpendicolarmente alla direzione di propagazione del suono durante un certo lasso di tempo. Naturalmente, un suono sarà tanto più energico quanto più grande sarà la differenza di densità da esso provocato; cioè essa è legata all'**ampiezza**.

$$I = \frac{E}{A \cdot t} \quad (9)$$

dove E è l'energia sonora, A la superficie attraversata dall'onda sonora e t il tempo in cui avviene.

Banalmente, un suono intenso è detto un suono forte; un suono poco intenso è detto suono debole.

Nell'esempio del tubo che abbiamo considerato, l'intensità non cambia lungo il tubo. In genere, comunque, l'intensità diminuisce allontanandosi dalla sorgente; ciò accade quando il suono può diffondersi nello spazio circostante la sorgente, cosicché l'energia da essa trasmessa attraverso il suono deve distribuirsi su una superficie sempre maggiore man mano che ci si allontana dalla sorgente.

Timbro

Finora abbiamo considerato suoni semplici, quelli, cioè, la cui forma d'onda è di tipo sinusoidale. In realtà, il profilo di un'onda sonora può assumere diverse forme.

Il carattere del suono che dipende dalle forme dell'onda si chiama timbro. Pertanto, suoni con la stessa frequenza e la stessa intensità possono presentarsi differenti perché hanno timbro diverso.

Riflessioni del suono, eco e rimbombo

Quando un suono incontra una parete che non lo assorbe, esso viene riflesso. Un ascoltatore posto nei pressi della sorgente riuscirà a distinguere i suoni riflessi, e a riconoscerne i suoni emessi, se il tempo impiegato dal suono per arrivare alla parete e tornare è abbastanza lungo. Se la distanza dalla sorgente alla parete è d , tale tempo è

$$t = \frac{2 \cdot d}{v_A} \quad (10)$$

La riflessione delle onde sonore avviene sempre, e in alcune circostanze genera il fenomeno dell'**eco**. Nell'aria, l'eco si forma quando la distanza tra la sorgente sonora e l'ostacolo è maggiore di 17 m . Perché questo fenomeno abbia luogo, in ogni caso, è necessario che la superficie riflettente sia sufficientemente vasta e liscia, costituita di materiale poco assorbente. Un'eco molto chiara si può avere, ad esempio, nei pressi di una roccia in montagna o di un muro di una casa.



Figura 188 Effetto sonar

Quando l'ostacolo che riflette l'onda sonora è troppo vicino (a meno di 17 m), le onde riflesse giungono all'orecchio quasi contemporaneamente a quelle dirette e vi si sovrappongono: il nostro orecchio non riesce a distinguere il suono che gli giunge direttamente dalla sorgente e il suono riflesso. E il fenomeno del **rimbombo**.

Se i suoni sono delle parole, il tempo necessario per distinguerle sarà di qualche frazione di secondo. Pertanto la distanza necessaria affinché si verifichi l'eco sarà di alcune decine di metri.

Il fenomeno dell'eco sonora trova applicazione nel sonar, un apparecchio utile per misurare la profondità del mare, scandagliare i fondali, localizzare banchi di pesci, sommergibili, o relitti di navi. Le riflessioni del suono hanno molte applicazioni. Esse possono essere usate per risalire al profilo della barriera riflettente. Ciò è quanto fa il **sonar!**

Un suono emesso verso il fondo da un'imbarcazione, viene riflesso dal fondo. L'onda riflessa viene rivelata ed elaborata da opportune apparecchiature per trovare la profondità ed altre caratteristiche del fondo.

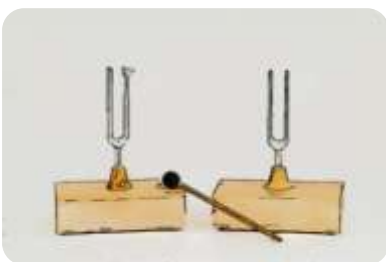
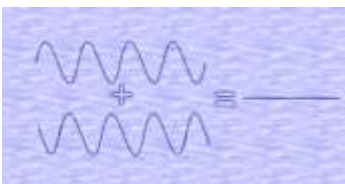
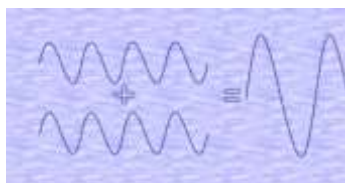


Figura 189 Diapason



YouTube

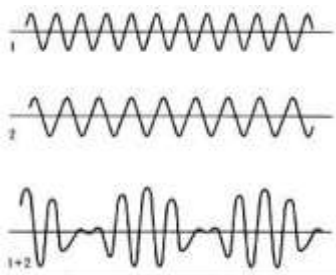


Figura 190 Interferenza tra onde

Risonanza

Abbiamo visto che un corpo vibrante può produrre un suono. Può naturalmente, accadere anche il contrario, cioè, un suono può indurre vibrazioni su un corpo; ciò accade quando la frequenza del suono è molto vicina, meglio se uguale, alla frequenza propria di vibrazione del corpo. Uno strumento che mette in evidenza tale fenomeno è il **diapason**.

Il diapason è uno strumento, generalmente in metallo, costituito da una **U** sostenuta da un manico.

I due rami della U sono detti rebbi. Se uno dei rebbi viene colpito, il diapason comincia a vibrare producendo un suono di frequenza ben

determinato V_f .

Se invece il diapason si trova in una regione sede di un suono con frequenza V_0 , il diapason, sollecitato dal suono, incomincia a vibrare. Questo fenomeno viene detto **risonanza**.

Interferenza

Quando due onde sonore si incontrano, esse si sovrappongono in maniera tale che l'onda sonora risultante è la somma delle due onde. Questo fenomeno si chiama **interferenza**.

Se le onde hanno la stessa frequenza e sono in fase, l'ampiezza dell'onda risultante è la somma delle ampiezze, dando luogo all'interferenza **costruttiva**.

Quando invece le due onde sono sfasate di mezzo periodo, le ampiezze si sottraggono; abbiamo così l'interferenza **distruttiva**.

Battimenti

Quando le due onde che interferiscono hanno la stessa ampiezza e frequenza V_1 e V_2 molto vicine, l'onda risultante da una frequenza che

è la media delle due $\frac{v_1 + v_2}{2}$; invece l'ampiezza oscilla con una fre-

quenza che è la differenza tra le due $v_1 - v_2$

Questo fenomeno si chiama **battimento**.

Nella figura che segue, sono rappresentate due onde in fase. I punti in rosso, sono quelli dove si verifica interferenza costruttiva (incontro di due creste o di due gole). Mentre in punti segnati in blu, rappresentano nodi dove l'interferenza è distruttiva (si incontra una cresta ed una gola)

Sorgenti in fase e in opposizione di fase

Due onde provenienti da due diverse sorgenti che immaginiamo propagarsi alla stessa frequenza, risultano **in fase** se la distanza tra le stesse risulta un multiplo pari di metà lunghezza d'onda, ovvero

$d = 2k \frac{\lambda}{2}$ con k intero a piacere. Risulteranno invece in **opposizione di fase** qualora la loro distanza risulti un multiplo dispari di metà lunghezza d'onda, ovvero $d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$.

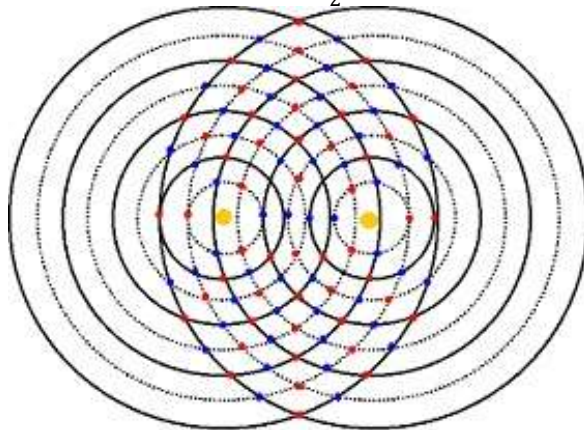


Figura 191 Interferenza costruttiva e distruttiva

Supposto di avere due sorgenti S_1 ed S_2 **in fase**, Se un osservatore è posto ad una certa distanza d_1 dalla sorgente S_1 e ad una distanza d_2 dalla sorgente S_2 , in quel punto ci sarà un effetto di interferenza:

- **costruttiva** se $d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$ con k intero.
Quindi un multiplo pari di $\frac{\lambda}{2}$
- **distruttiva** se $d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ con k intero.
Quindi un multiplo dispari di $\frac{\lambda}{2}$

dove λ è il valore della lunghezza d'onda ($\lambda = v \cdot f$)

Se le sorgenti sono in **opposizione di fase** (in contro fase) le situazioni si scambiano:

- **distruttiva** se $d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$ con k intero.



Laboratorio 24 Interferenza tra onde

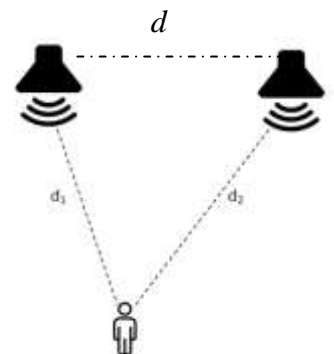


Figura 192 Interferenza con sorgenti in fase

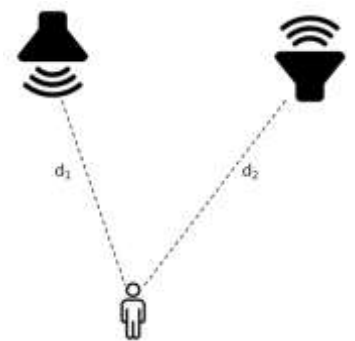


Figura 193 Interferenza con sorgenti in opposizione di fase

Quindi un multiplo pari di $\frac{\lambda}{2}$ (12)

- **costruttiva** se $d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ con k intero.

Quindi un multiplo dispari di $\frac{\lambda}{2}$

Osservazione

immaginando che le due sorgenti fossero sorgenti sonore, nei punti in cui si manifesta interferenza distruttiva, l'osservatore presente in quell'esatto punto, non udirebbe nulla! Nella realtà è chiaro che è estremamente difficile ottenere un tale effetto per via di interferenze dovute al mezzo o al fatto che le stesse onde sonore potrebbero rimbalzare contro una parete ed annullare così quell'interferenza distruttiva nel punto d'ascolto.

Fonografo

Uno dei primi strumenti usati per la registrazione e la riproduzione dei suoni è il **fonografo di Edison**.

Esso è costituito da un cilindro che ruota con velocità angolare costante. I suoni che si vogliono registrare fanno vibrare una membrana che trasmette la vibrazione ad un ago che incide dei solchi sul cilindro che riproducono le vibrazioni sonore.

Affinché i solchi non si sovrappongano il cilindro si sposta lentamente in avanti man mano che ruota.

Per riprodurre il suono così registrato basterà far ruotare il cilindro. L'ago, seguendo il solco, vibrerà allo stesso modo che all'atto della registrazione, ponendo in vibrazione la membrana che trasmetterà il suono nell'ambiente circostante. In realtà, affinché il fonografo funzioni, occorre che il cilindro sia incidibile all'atto della registrazione e duro all'atto della riproduzione.

Oggi esistono mezzi più sofisticati per la registrazione e la riproduzione dei suoni, quali dischi e grammofoni, che usano lo stesso principio del fonografo, nastri magnetici, video-dischi. Essi permettono una grande qualità e fedeltà dei suoni riprodotti.

9.5 C.L.I.L. Project

Interference

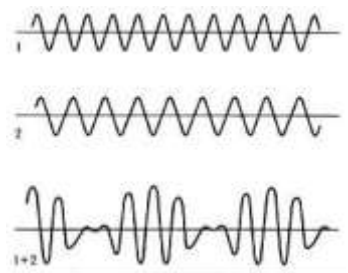
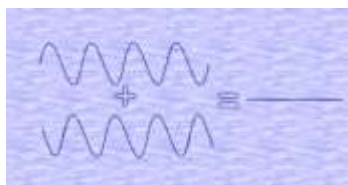
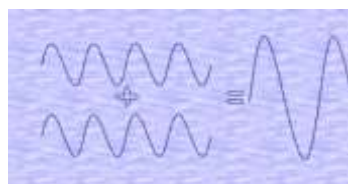
When two sound waves meet, they overlap in such a way that the resulting sound wave is the sum of the two waves. This phenomenon is called **interference**.

If the waves have the same frequency and are in phase, the amplitude of the resultant is the sum of the amplitudes, giving rise to **'constructive** interference.

However, when the two waves are out of phase by half a period, the amplitudes are subtracted, so we have the **'destructive** interference.



Figura 194 Fonografo di Edison



Beats

When the two interfering waves have the same amplitude and frequency ν_1 e ν_2 very close, the wave resulting from a frequency that

is the average of the two $\frac{\nu_1 + \nu_2}{2}$; instead the amplitude oscillates

with a frequency that is the difference between the two $\nu_1 - \nu_2$

This phenomenon is called **Beat**.

Phonograph

One of the first tools used to record and playback sounds **Edison's phonograph**.

It consists of a cylinder which rotates with constant angular velocity. The sounds that you want to record vibrate a membrane that transmits the vibration to a needle that affects the grooves on the cylinder that reproduce the sound vibrations.

So that the grooves do not overlap the cylinder moves slowly forward as it rotates.

To play the recorded sound so simply rotate the cylinder. The needle, following the groove, will vibrate in the same way that the time of registration, by placing the membrane in vibration that will broadcast the sound in the surrounding environment. In reality, so that the phonograph functions, it is necessary that the cylinder is engravable at registration and hard at the time of reproduction.

Today, there are more sophisticated means for recording and playing sounds, such as gramophones and records, which use the same principle of the phonograph, magnetic tapes, video discs. They allow great quality and fidelity of sound reproduced.

Today, there are more sophisticated means for recording and playing sounds, such as gramophones and records, which use the same principle of the phonograph, magnetic tapes, video discs. They allow great quality and fidelity of the sounds played.



9.6 Effetto Doppler



Christian Doppler
(1803-1853)

laddove udendo un suono continuo siamo noi in movimento o lo è la sorgente sentiamo l'effetto Doppler. Quel suono viene percepito come più intenso o meno a seconda se ci avviciniamo o allontaniamo, ma in realtà la frequenza di emissione rimane la stessa. Cambia solo la percezione che l'osservatore ha.



Figura 195 Sorgente in movimento

L'effetto Doppler è un **cambiamento apparente** della frequenza o della lunghezza d'onda di un'onda percepita da un osservatore che si trova in movimento rispetto alla sorgente delle onde, o di un osservatore fermo con sorgente in movimento. Per quelle onde che si trasmettono in un mezzo (ad esempio: aria, acqua, etc) come le onde sonore, la velocità dell'osservatore e dell'emettitore vanno considerate in relazione a quella del mezzo in cui sono trasmesse le onde. L'effetto Doppler totale può quindi derivare dal moto di entrambi, ed ognuno di essi è analizzato separatamente.

L'effetto fu analizzato per la prima volta da **Christian Andreas Doppler** nel 1845. Per verificare la sua ipotesi effettuò un famoso esperimento: si piazzò accanto ai binari della ferrovia e ascoltò il suono emesso da un vagone pieno di musicisti mentre si avvicinava e poi mentre si allontanava. L'esperimento confermò che: l'altezza del suono era più alta quando l'origine del suono si stava avvicinando, e più bassa quando si stava allontanando.

Hippolyte Fizeau scoprì indipendentemente lo stesso effetto nelle onde elettromagnetiche nel 1848. Oggi è molto facile constatare l'effetto Doppler: basta ascoltare la differenza nel suono emesso dalla sirena di un mezzo di soccorso quando si avvicina e quando si allontana.

Prima di avventurarci nella spiegazione, è importante far notare che la frequenza del suono emesso dalla sorgente non cambia.

Per comprenderne il principio su cui si basa il funzionamento dell'effetto doppler, possiamo considerare la seguente analogia: qualcuno lancia una serie di palle ogni secondo nella nostra direzione. Assumiamo che le palle viaggino con velocità costante. Se colui che le lancia è fermo, riceveremo una palla ogni secondo. Ma, se si sta invece muovendo nella nostra direzione, ne riceveremo un numero maggiore perché esse devono percorrere uno spazio minore rispetto a noi, quindi abbiamo la sensazione che arrivino più velocemente. Al contrario, se il tiratore si sta allontanando ne riceveremo man mano di meno avendo la sensazione che siano lanciate con una velocità sempre minore.

Ciò che cambia è quindi la distanza (definita propriamente lunghezza d'onda); come conseguenza, l'altezza del suono percepito cambia.

Se una **sorgente in movimento** sta emettendo onde con una frequenza f , allora un osservatore stazionario (rispetto al mezzo di trasmissione) percepirà le onde con una frequenza f' data da:

$$f' = \frac{v}{v - u_s} f \quad (13)$$

dove v è la velocità delle onde nel mezzo e u_s è la velocità della sorgente rispetto al mezzo (considerando solo la direzione che unisce sorgente ed osservatore), positiva se verso l'osservatore, e negativa se nella direzione opposta).

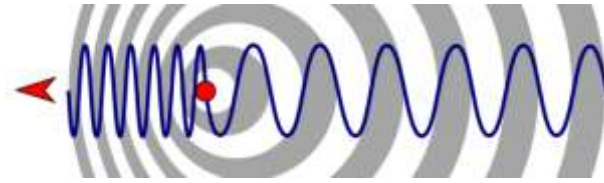


Figura 196 Sorgente che si muove verso un osservatore, verso sinistra

Un'analisi simile per un **osservatore in movimento** e una sorgente stazionaria fornisce la frequenza osservata (la velocità dell'osservatore è indicata come u_o):

$$f' = \left(1 + \frac{u_o}{v}\right) f \quad (14)$$

In generale, la frequenza percepita dall'osservatore, quando sorgente ed osservatore vanno **uno nel verso dell'altro**, è data da:

$$f' = \left(\frac{v + v_m + u_o}{v + v_m - u_s}\right) f \quad (15)$$

dove u_o è la velocità dell'osservatore, u_s è la velocità della sorgente, v_m è la velocità del mezzo.

Mentre se osservatore e sorgente **si allontanano** (dopo essersi incontrati), la frequenza percepita dall'osservatore sarà:

$$f' = \left(\frac{v + v_m - u_o}{v + v_m + u_s}\right) f \quad (16)$$

Nel caso in cui l'osservatore **'insegua'** la sorgente, avremo:

$$f' = \left(\frac{v + v_m + u_o}{v + v_m + u_s}\right) f \quad (17)$$

Applicazioni

Nella vita quotidiana, un classico esempio di effetto Doppler, è dato dalla sirena di un'ambulanza. Questa infatti inizierà ad essere percepita più alta del suo tono effettivo, si abbasserà mentre passa accanto all'osservatore, e continuerà più bassa del suo tono effettivo mentre si allontana dall'osservatore. In altre parole: se la sirena si stesse avvicinando direttamente verso l'osservatore, il tono sarebbe rimasto costante (anche se più alto dell'originale) fino a raggiungere l'osservatore, e salterebbe immediatamente ad un tono inferiore una volta che lo avesse oltrepassato (sempre che l'osservatore sia ancora in grado di sentirla).

YouTube



YouTube



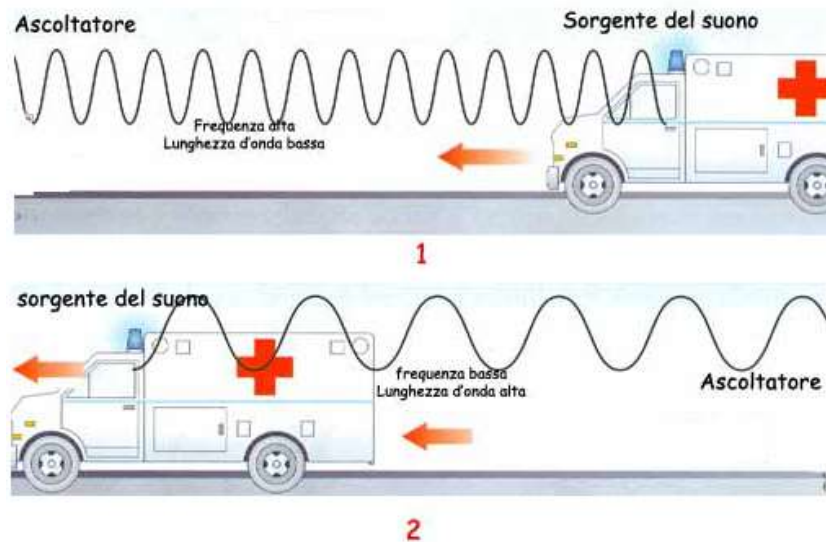


Figura 197 la sorgente in movimento rispetto all'osservatore

Poiché però, normalmente, la sirena passa ad una certa distanza dall'osservatore, la sua **velocità radiale** cambia continuamente, in funzione dell'angolo tra la linea di vista dell'osservatore e la velocità vettoriale della sirena:

$$v_{s,r} = v_s \cdot \cos \theta \quad (18)$$

dove v_s è la velocità della sirena rispetto al mezzo di trasmissione, e θ è l'angolo tra la direzione di moto della sirena e la linea di vista tra la sirena e l'osservatore.

In **astronomia**, l'uso dell'effetto Doppler, si basa sul principio che lo spettro elettromagnetico emesso dagli oggetti celesti non è continuo, ma mostra delle linee spettrali a frequenze ben definite, associate alle energie necessarie ad eccitare gli elettroni dei vari elementi chimici. L'effetto Doppler è riconoscibile quando le linee spettrali non si trovano alle frequenze ottenute in laboratorio, utilizzando una sorgente stazionaria. La differenza in frequenza può essere tradotta direttamente in velocità utilizzando apposite formule. Poiché i colori posti ai due estremi dello spettro visibile sono il **blu** (per lunghezze d'onda più corte) e il **rosso** (per lunghezze d'onda più lunghe), l'effetto Doppler è spesso chiamato spostamento verso il rosso se diminuisce la frequenza della luce, e spostamento verso il blu se l'aumenta.

L'effetto Doppler ha condotto allo sviluppo delle teorie sulla nascita ed evoluzione dell'Universo come il **Big Bang**, basandosi sul sistematico spostamento verso il rosso mostrato da quasi tutte le galassie esterne.

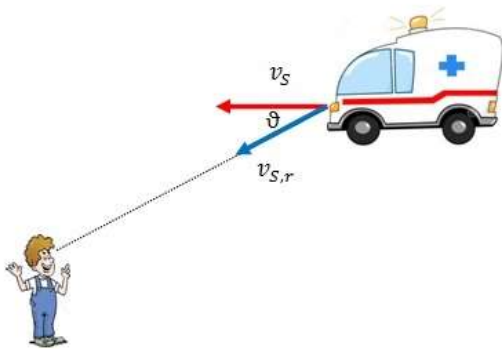


Figura 198 Osservatore posto ad un certo angolo rispetto alla direzione della sorgente

9.7 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questo capitolo abbiamo introdotto il concetto di **onda**, intesa come perturbazione che si propaga nel tempo e nello spazio distinguendo tra i diversi tipi di onda, **meccaniche**, **elettromagnetiche** e di **materia**. Abbiamo così evidenziato le sue caratteristiche, quali il **fronte** d'onda e il periodo, la **frequenza**, la **lunghezza** d'onda e l'**ampiezza** e a seconda della forma che può assumere, distinguendo tra onde **piane**, **circolari** e **sferiche**. In relazione al modo in cui possono propagarsi le onde, le abbiamo distinte tra onde **trasversali** e **longitudinali**.

Abbiamo così introdotte le onde stazionarie, intese come oscillazioni nel tempo e non nello spazio. Con la **riflessione**, la **rifrazione**, la **diffrazione** e l'**interferenza** abbiamo potuto distinguere i diversi tipi di comportamento delle onde.

Uno dei tipi di onda più studiati è il **suono**, trattando così i suoni semplici, intesi come onde sinusoidali. Tra le diverse caratteristiche del suono vi è il **timbro**, che rappresenta un carattere specifico di un

onda anche a parità di frequenza ed intensità. Sono stati introdotti i concetti di **eco** e di **rimbombo**, come esempi di riflessione del suono.

Un altro effetto molto interessante per le onde è quello della **risonanza**, osservato con un dispositivo metallico come il **diapason**. Nel considerare la sovrapposizione di due onde diverse, abbiamo così introdotto il concetto di **interferenza**, che può avere caratteristiche **costruttive**, le onde si sommano, o **distruttive**, le onde si compensano in qualche modo. Un altro interessante aspetto legato alle onde, in particolar modo a quelle sonore, è l'**effetto doppler**, dove frequenza e lunghezza d'onda percepite da un osservatore possono variare quando o l'osservatore o la sorgente (o entrambi) sono in movimento. Un classico esempio è osservabile con il suono di un'ambulanza nella fase in cui va incontro all'osservatore e nella fase in cui si allontana.

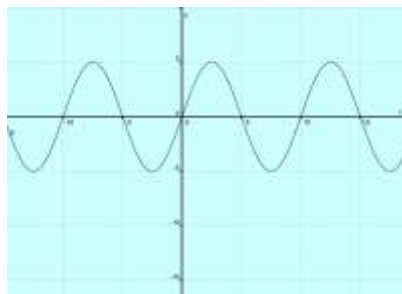
Problemi proposti

Le onde

1) Un'onda piana si propaga alla velocità $v=6,0\text{m/s}$. Se l'ampiezza è $A=50\text{cm}$ e la frequenza è $f=5\text{Hz}$

- (a) scrivere l'equazione dell'onda.
- (b) scrivere l'equazione del moto di un punto che si trova a una distanza $d=0,6\text{m}$ dalla sorgente e tracciarne il grafico

2) La figura seguente rappresenta una <<istantanea>> di una porzione di una corda vibrante molto lunga (l'unità di misura è il centimetro) Scrivere l'equazione dell'onda sapendo che la sua velocità è 2cm/s



3) Un nastro trasportatore si muove verso destra con velocità $v = 300\text{ m/min}$. Un velocissimo pasticcere poggia torte sul nastro alla frequenza di 20 al minuto, ed esse vengono ricevute all'altra estremità da un mangiatore di torte.

- (a) Se il pasticcere è fermo si trovi lo spazio λ tra le torte e la frequenza f con cui esse vengono ricevute dal mangiatore, anch'egli fermo.
- (b) ora il pasticcere si muove con la velocità di 30 m/min verso il mangiatore, mentre continua a poggiare sul nastro 20 torte al minuto. Si trovi la distanza tra le torte e la frequenza con cui esse vengono ricevute dal mangiatore (fermo)
- (c) Si ripeta il calcolo per un pasticcere fermo e un mangiatore di torte che si muove verso di lui con la velocità di 30 m/min [Risultati: a) 15 m ; 20 torte/min b) $13,5\text{ m}$; $22,2\text{ torte/min}$ c) 15 m ; 22 torte/min]

4) Un agente stradale, fermo sul ciglio di una strada, avente un limite di velocità di 80 Km/h , misura con un frequenzimetro la frequenza del rombo del motore di un'automobile quando si avvicina e quando si allontana. I valori rilevati sono rispettivamente 155 e 130 hertz . Sapendo che la velocità del suono nell'aria può variare da 320 m/s a 340 m/s , l'agente stradale deve multare o no l'automobilista per eccesso di velocità?

$$f_1 = \frac{v_{suono}}{v_{suono} - v} f \quad ; \quad f_2 = \frac{v_{suono}}{v_{suono} + v} f$$

5) Un treno si avvicina ad una stazione con velocità $v=100\text{Km/h}$ ed emette un fischio di lunghezza d'onda $0,170\text{ m}$. a) Quale frequenza

udrà un osservatore fermo nella stazione? b) Quale frequenza udrà quando il treno è passato? c) Quale frequenza udrà un osservatore che si trova su un altro treno che si avvicina al primo con uguale velocità? (La velocità del suono è di 343 m/s). *Spiega brevemente perché la frequenza è diversa nei tre casi.*

6) La frequenza del suono emesso dalla voce umana varia da un valore minimo di circa 82 hertz (basso) ad un valore massimo di circa 1044 hertz (soprano). È possibile che un ascoltatore, muovendosi verso un uomo (fermo rispetto all'aria) che canta da basso, arrivi a recepire la sua voce come quella di un soprano? Con quale velocità dovrebbe muoversi? Spiegare.

7) Una serie di fronti d'onda rettilinei, che si muovono su una superficie liquida, passano da una zona in cui hanno una velocità $v_1 = 10,4 \frac{cm}{s}$ a un'altra in cui hanno velocità $v_2 = 7,6 \frac{cm}{s}$. Nella prima zona la lunghezza d'onda è di 3,8 cm. Determina la lunghezza d'onda nella seconda zona e l'angolo che i fronti d'onda rifratti formano con la superficie di separazione delle due zone, sapendo che tale angolo nella prima zona risulta di 45 gradi.

Suggerimento: utilizzando la formula $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{\lambda_1 v_1}{\lambda_2 v_2}$

8) Una sorgente sonora emette un suono di frequenza 620 Hz. Calcolare la frequenza percepita da un uditore nel caso in cui:

a) si avvicina alla sorgente (considerata immobile) con velocità di $38,0 \frac{m}{s}$.

Suggerimento: Usando la formula $f_p = f_0 \frac{v + v_u}{v}$ con

$$v = 340,0 \frac{m}{s};$$

b) La sorgente si allontana dall'osservatore (immobile) con velocità di $45,0 \frac{m}{s}$.

Suggerimento: Usando la formula $f_p = f_0 \frac{v}{v + v_s}$ con

$$v = 340,0 \frac{m}{s};$$

9) Una corda di violino, lunga 36 cm e avente la massa di 10,5 g è tesa con una forza F di 140 N. Determina la velocità di propagazione delle onde sulla corda e la lunghezza d'onda nei casi in cui la frequenza risulta di:

a) 650 Hz

b) 1350 Hz.

Suggerimenti a) Siccome la densità lineare è definita come

$\mu = \frac{m}{l}$ si ricavi μ , mentre usando la formula $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ si ricavi v .

Infine poiché $\lambda = \frac{v}{f}$ si ricavi λ .

10) In un esperimento di misura della velocità della luce, eseguito con il metodo di **Fizeau**, si dispone di una ruota dentata di 720 denti che raggiunge la velocità angolare di $86,0 \frac{rad}{s}$ quando sull'oculare scompare del tutto il segnale luminoso. Assumendo per la velocità della luce $c = 3,0 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, calcola a quale distanza dalla ruota dentata deve essere posto lo specchio per ottenere una corretta misura di c .

Suggerimento: Possiamo ricavare α dividendo i gradi della circonferenza per il numero di denti moltiplicato per due. A questo punto invertendo la formula $c = \frac{2d\omega}{\alpha}$, si ottiene d .

9.8 Approfondimento: I terremoti

In geofisica i **terremoti** (dal latino *terrae motus*, cioè "movimento della terra"), detti anche **sismi** o **scosse telluriche** (dal latino *Tellus*, dea romana della Terra), sono vibrazioni o oscillazioni improvvise, rapide e più o meno potenti, della crosta terrestre, provocate dallo spostamento improvviso di una massa rocciosa nel sottosuolo.

Tale spostamento è generato dalle forze di natura tettonica che agiscono costantemente all'interno della crosta terrestre provocando la liberazione di energia in una zona interna della Terra detto ipocentro, tipicamente localizzato al di sopra di fratture preesistenti della crosta dette **faglie**; a partire dalla frattura creatasi una serie di onde elastiche, dette **onde sismiche**, si propagano in tutte le direzioni dall'ipocentro, dando vita al fenomeno osservato in superficie; il luogo della superficie terrestre posto sulla verticale dell'ipocentro si chiama **epicentro** ed è generalmente quello più interessato dal fenomeno. La branca della geofisica che studia questi fenomeni è la sismologia.

Quasi tutti i terremoti che avvengono sulla superficie terrestre sono concentrati in zone ben precise ossia in prossimità dei confini tra **una placca tettonica** e l'altra dove si originano le faglie: queste sono infatti le aree tettonicamente attive, ossia dove le placche si muovono più o meno lentamente sfregando le une rispetto alle altre. Raramente i terremoti avvengono lontano dalle zone di confine tra placche (terremoti intraplacca).

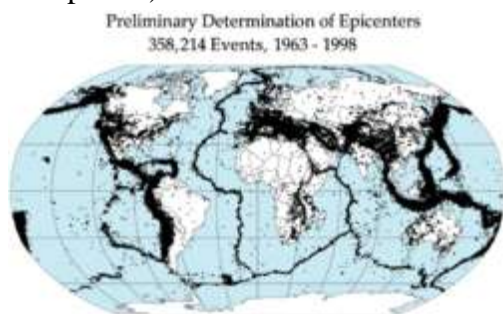


Figura 200 Globo terrestre

(pressioni, tensioni e attriti) tra le masse rocciose, tali modellamenti si arrestano e la superficie coinvolta accumula tensione ed energia per decine o centinaia di anni fino a che, al raggiungimento del carico di rottura, l'energia accumulata è sufficiente a superare le forze resistenti causando l'improvviso e repentino spostamento della massa rocciosa coinvolta. Tale movimento improvviso (che in pochi secondi rilascia energia accumulata per decine o centinaia di anni) genera così le onde sismiche e il terremoto associato.

Oggi definiamo **terremoto (sisma)** qualunque rapida vibrazione della crosta terrestre, indipendentemente dagli effetti che provoca. Ogni giorno sulla Terra si verificano migliaia di terremoti: sperimentalmente si osserva che la stragrande maggioranza di terremoti al mondo, così come di eruzioni vulcaniche, avviene lungo la cosiddetta cintura di fuoco Pacifica e quindi interessando spesso la **crosta oceanica** come zona di innesco o fratturazione. Solo qualche decina sono percepiti dalla popolazione e la maggior parte di questi ultimi causano poco o

Secondo il modello della **tettonica delle placche** il movimento delle placche è lento, costante e impercettibile (se non con strumenti appositi), ma modella e distorce le rocce sia in superficie che nel sottosuolo. Tuttavia in alcuni

momenti e in alcune aree, a causa delle forze interne



Figura 199 Terremoto

nessun danno. La durata media di una scossa è molto al di sotto dei 30 secondi; per i terremoti più forti può però arrivare fino a qualche minuto.

La sorgente del sisma è generalmente distribuita in una zona interna della crosta terrestre - *nel caso dei terremoti più devastanti questa può avere un'estensione anche dell'ordine di un migliaio di chilometri* -

ma è idealmente possibile identificare un punto preciso dal quale le **onde sismiche** hanno avuto origine; questo si chiama **ipocentro** e qui si è originato il movimento a partire dalla frattura preesistente (*faglia*) o la sua improvvisa generazione. La proiezione verticale dell'ipocentro sulla superficie terrestre viene invece detta **epicentro**, ed è il punto in cui di solito si verificano i danni maggiori. Le **onde elastiche** che si propagano durante un terremoto sono di diverso tipo e in alcuni casi possono risultare in un movimento prevalentemente orizzontale o verticale del terreno (scossa ondulatoria o sussultoria).

Alcuni terremoti si manifestano o sono preceduti da **sciame sismici** (*foreshocks*) più o meno lunghi e intensi, caratterizzati da più terremoti ripetuti nel tempo e particolarmente circoscritti in una determinata area, altri invece si manifestano subito e improvvisamente con una o più scosse principali (*main shock*); un'altra forma sono le *sequenze sismiche*, caratterizzate ciascuna da più terremoti sprigionati in successione ravvicinata e non circoscritti in una determinata zona. I terremoti di

maggiore **magnitudo** sono di solito accompagnati da eventi secondari (non necessariamente meno distruttivi) che seguono la scossa principale e si definiscono *repliche* (*aftershocks*, spesso definite *scosse di assestamento*). Quando più eventi si verificano contemporaneamente o quasi, può trattarsi di *terremoti indotti* (il sisma innesca la fratturazione di altra roccia che era già prossima al punto critico di rottura).

Un terremoto, inoltre, può essere accompagnato da forti **rumori** che possono ricordare boati, rombi, tuoni, sequenze di spari, eccetera: questi suoni sono dovuti al passaggio delle onde sismiche **all'atmosfera** e sono più intensi in vicinanza dell'epicentro.

L'Italia è da sempre considerata una nazione a rischio sismico e tranne pochissime zone, mostra una uniforme distribuzione territoriale di tale rischio. Molti ricorderanno, in occasione del terremoto nell'aquilano del 2009 le esternazioni del sig. Giampaolo Giuliani, un ex tecnico dell'Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario distaccato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, divenuto noto per le dichiarazioni rilasciate dopo il terremoto che il 6 aprile 2009 ha colpito la città dell'Aquila, in merito a sue presunte previsioni delle scosse sismiche. Sosteneva che il flusso di **Radon** nel terreno – quindi la maggiore presenza o meno – potesse essere utile a stabilire l'arrivo di una scossa sismica. Peccato che manifestazioni importanti di Radon non siano stati seguiti (fortunatamente!) da scosse sismiche, mentre eventi

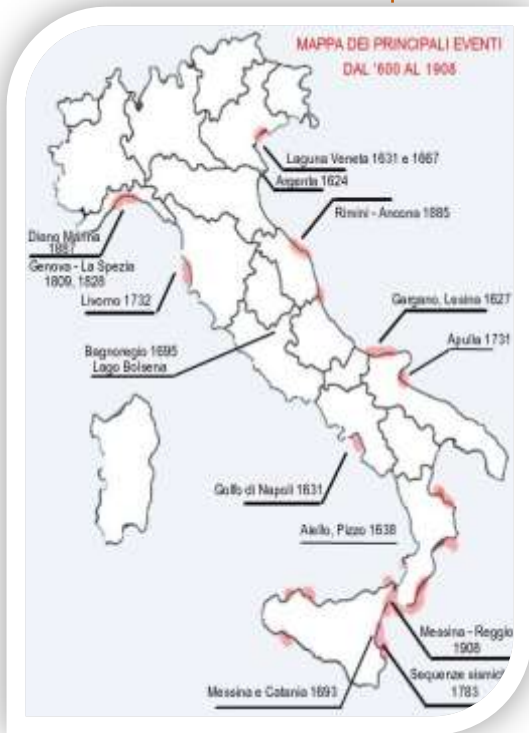


Figura 201 Mappa di eventi sismici dal '600 al 1908

sismici non abbiano fatto registrare alcuna variazione del flusso di Radon in quel punto!

Rimane però il fatto che malgrado non possiamo in alcun modo prevedere dove e quando, sappiamo, come anzi detto, che ci sia la quasi certezza di un ripetersi di eventi sismici negli stessi luoghi dove questi si sono già manifestati in passato. Potremmo, spero, giungere a miglior vita, noi tutti, senza assistere ad alcuna scossa sismica importante, ma rimane il fatto che la riduzione dei rischi, per i danni causati dal terremoto siano da tenere bene in considerazione, senza affidarci sempre e solo ai dovuti scongiuri.

10. Luce e ottica

Prerequisiti

Il concetto di onda. La velocità di propagazione di un'onda.

Sapere

La luce e la sua propagazione. I fenomeni della rifrazione, dispersione e riflessione della luce. Le lenti e gli strumenti ottici

Saper fare

Sapere che vi sono due diverse concezioni della natura della luce. Saper distinguere i diversi modi in cui essa si propaga anche attraverso delle fenditure. Saper riconoscere i diversi tipi di lenti e gli strumenti ottici utilizzati.

10.1 La natura della luce: onda o particella?

Di cosa è fatta la luce? È una domanda semplice, che però nasconde una serie di implicazioni scientifiche molto complesse. La risposta viene dalla meccanica quantistica, la branca della fisica che studia il comportamento di oggetti microscopici come fotoni ed elettroni, ormai consolidata da più di un secolo, che per certi versi è assolutamente contro-intuitiva. Per esempio, predice che una particella come il fotone possa trovarsi in diverse (o addirittura infinite) posizioni nello stesso istante, esattamente come se fosse un'onda. Com'è possibile? La risposta sta nella cosiddetta dualità onda-particella, secondo la quale ogni oggetto quantistico è contemporaneamente un'onda e una particella.

Cerchiamo di vedere come questo concetto si è evoluto con il passare dei secoli.

Partiamo considerando il modello corpuscolare sostenuto da Newton, il quale sosteneva che la luce è un insieme di corpuscoli dotati di massa che seguono le leggi della dinamica e sentono gli effetti della forza gravitazionale.

In seguito **Christiaan Huygens** avanzò la possibilità di un **modello ondulatorio**, secondo cui la luce è una perturbazione ondulatoria di un qualche mezzo materiale che pervade i corpi trasparenti e l'intero spazio.

Entrambi i modelli spiegano bene i fenomeni luminosi allora conosciuti: la propagazione rettilinea della luce, la riflessione, la rifrazione e la dispersione; le diverse argomentazioni si traducono, per quanto riguarda la rifrazione, in due previsioni contrapposte: la velocità della luce aumenta nel passaggio da un mezzo meno rifrangente ad uno più rifrangente (modello corpuscolare); la velocità della luce diminuisce nel passaggio da un mezzo meno rifrangente ad uno più rifrangente (modello ondulatorio). Queste due diverse previsioni teoriche non possono essere verificate sperimentalmente, quindi i due modelli coesistono, anche se c'è una prevalenza dell'ipotesi corpuscolare per il prestigio e l'autorità scientifica di Newton.

Ai primi anni dell'Ottocento, gli esperimenti di Young mettono in evidenza che la luce presenta il fenomeno dell'interferenza, tipico delle onde. La luce che passa attraverso due fenditure genera sullo schermo una figura con massimi di interferenza costruttiva e minimi di interferenza distruttiva. Alcuni scienziati modificano la loro opinione a favore del modello ondulatorio. Verso la metà Ottocento gli esperimenti di Fizeau mostrano che la luce si propaga meno velocemente in un mezzo più rifrangente:

$$v = \frac{c}{n} \quad (1)$$

dove c = velocità della luce nel vuoto, v = velocità della luce in un mezzo avente indice di rifrazione n , con $n \geq 1$.

Affermazione del modello ondulatorio!

Solo a fine Ottocento si registrò il successo dell'interpretazione ondulatoria, estesa anche ai fenomeni elettrici e magnetici, con la previsio-



Figura 202 Luce solare



Figura 203 Christiaan Huygens
(14 aprile 1629 - 8 luglio 1695)

NATURA DELLA LUCE

È stato a lungo dibattuto sulla natura della Luce: corpuscolo o onda?

Si è scoperto che la Luce ha in sé entrambe queste caratteristiche ed in base ai contesti, si comporta come onda o come particella

ne teorica di Maxwell e la scoperta sperimentale Hertz delle onde elettromagnetiche.

Con l'espressione dualismo onda-particella (o dualismo onda-corpuscolo) ci si riferisce al fatto, espresso all'interno del principio di complementarità, che le particelle elementari, come l'elettrone o il fotone, mostrano una duplice natura, sia corpuscolare sia ondulatoria.

Tale evidenza nasce dall'interpretazione di alcuni esperimenti compiuti all'inizio del XX secolo: ad esempio l'**effetto fotoelettrico** suggeriva una natura corpuscolare della luce, che, d'altra parte, manifestava proprietà chiaramente ondulatorie nel fenomeno della diffrazione.

Effetto fotoelettrico \Rightarrow **natura corpuscolare**

Diffrazione della luce \Rightarrow **natura ondulatoria**

Quale delle due è giusta? Sembrerebbe proprio che lo siano entrambe.

Einstein stesso tentò in tutti i modi, elaborando sofisticati esperimenti mentali, di contrastare questa visione dualistica della realtà fisica, in particolare il *probabilismo* insito nella teoria quantistica, che precludeva l'idea, tipica della fisica classica, del determinismo assoluto (celebre la sua frase "Dio non gioca a dadi"). Si dovette però arrendere all'evidenza dei fatti sperimentali e alla potenza predittiva della meccanica quantistica nel mondo microscopico, cui indirettamente diede comunque contributi notevoli.

Lo stesso Einstein dimostrò in maniera definitiva che comunque la luce non poteva possedere massa, come affermato da Newton, neppure piccolissima, altrimenti non sarebbe potuto accadere che si potesse spostare senza diventare infinita.

Il paradosso rimase fino alla formulazione completa della meccanica quantistica, quando finalmente si riuscì a descrivere i due aspetti in maniera unificata.

10.2 La propagazione della luce

La luce, come il suono si propaga attraverso onde dette onde luminose. Al contrario delle onde sonore, però, essa **si propaga anche nel vuoto**: la luce del Sole infatti giunge sulla Terra dopo aver percorso ben 150 milioni di chilometri nello spazio.

Per capire come si propaga la luce cerchiamo di capirlo da diverse osservazioni sperimentali.

Avendo a disposizione una fonte luminosa di piccole dimensioni S per possiamo quindi considerare puntiforme, essa genera attraverso un foro circolare O , una macchia luminosa nettamente delineata su uno schermo V .



Figura 204 Albert Einstein

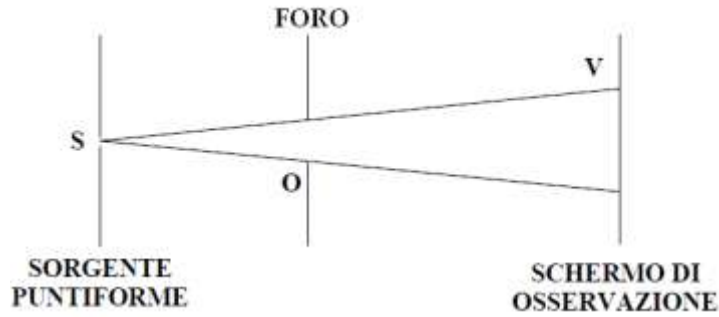


Figura 205 Luce attraverso una fenditura

La macchia corrisponde alla sezione del cono avente S per vertice e che si appoggia sul contorno di O .

Se sostituiamo l'apertura con un ostacolo opaco, otteniamo un'ombra netta, sempre nel caso di una sorgente puntiforme:

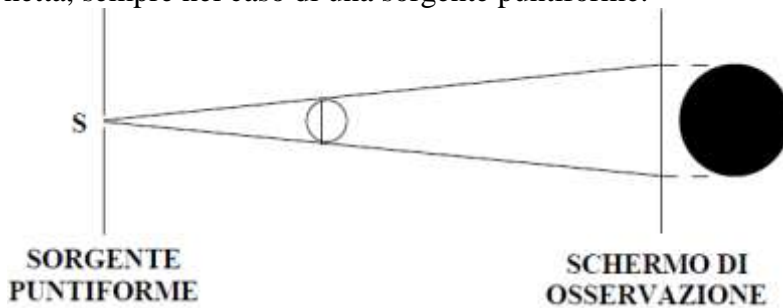


Figura 206 Luce oltre un ostacolo opaco – Sorgente puntiforme

Se la sorgente luminosa non è puntiforme ma estesa abbiamo gli effetti di penombra:

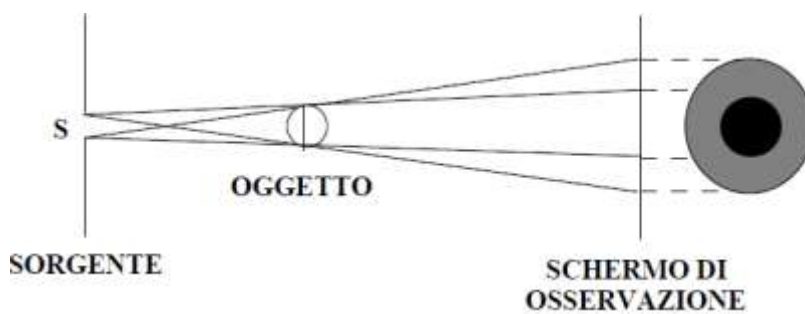


Figura 207 Luce oltre un ostacolo opaco - Sorgente estesa

Sempre in questa situazione l'ombra netta può essere cancellata del tutto laddove la sorgente è più grande dell'oggetto e V si trova abbastanza lontano, perché tutti i punti dello schermo possono essere raggiunti direttamente dalla luce (tratto AP).

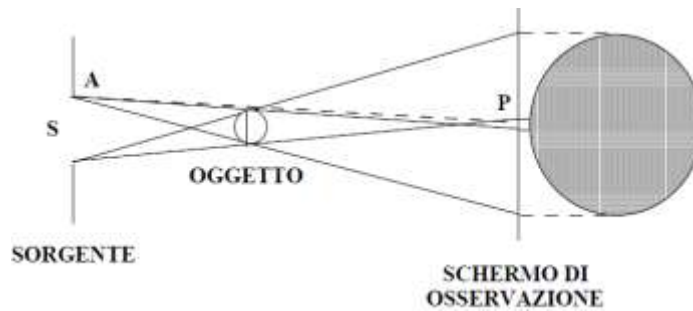


Figura 208 Luce oltre un ostacolo opaco - Sorgente estesa più grande dell'ostacolo

Una situazione analoga la possiamo osservare quando c'è un'eclissi. Tali esperimenti, ma se ne potrebbero fare molti altri, suggeriscono che la luce si propaga, almeno in un ambiente trasparente e omogeneo, seguendo rette uscenti dalla sorgente, dette **raggi luminosi**. L'insieme dei raggi che passano per le aperture forma un **fascio**. Se i raggi provengono tutti da un unico punto si parla di **pennello**.

10.3 La velocità della luce

All'inizio del XVII secolo, molti scienziati erano convinti che non esistesse una cosa come "la velocità della luce"; pensavano che la luce potesse percorrere qualsiasi distanza senza impiegare tempo. Galileo non era d'accordo, e ideò un esperimento per misurare la velocità della luce: insieme ad un assistente, presero una lanterna schermata e andarono sulla cima di due colline che distavano un miglio. Galileo scoprì la sua lanterna, e l'assistente, non appena vide la luce, scoprì a sua volta la lanterna. Galileo avrebbe quindi dovuto misurare il tempo necessario per vedere la luce dall'altra collina.

A quel punto, dividendo la distanza per il tempo, si sarebbe potuta ottenere la velocità della luce. Il problema è che la velocità della luce è semplicemente troppo grande per poter essere misurata così; per percorrere un miglio, la luce impiega un tempo così piccolo (circa 0.000005 secondi) che non poteva certo venire misurato dagli strumenti di cui disponeva Galileo.

Negli anni intorno al 1670, l'astronomo danese Ole Roemer compì osservazioni estremamente precise della luna di Giove Io. Da queste osservazioni che risultavano di volta in volta diverse a seconda di come la Terra si trovava rispetto a Giove intuì che le sue osservazioni fossero condizionate dalla luce che ovviamente non poteva avere velocità infinita, seppur molto elevata. Sapendo di quanto sembrava variare l'orbita di Io e di quanto varia la distanza fra la Terra e il Sole, Roemer fu in grado di calcolare la velocità della luce. Il suo calcolo diede il valore di 186,000 miglia al secondo, ovvero

$$c \approx 300.000 \text{ Km/s} \quad (2)$$

Negli anni che seguirono, con lo sviluppo di migliori tecniche e strumenti, molte altre persone furono in grado di calcolare la velocità della luce più accuratamente. Con le risorse della tecnologia odierna, possiamo misurarla con una precisione incredibilmente alta. Per esempio, alcuni astronauti hanno attaccato uno specchio ad una roccia sulla Luna; dalla Terra, gli scienziati inviano un raggio laser verso lo specchio e misurano il tempo di viaggio dell'impulso laser, circa 2 secondi e mezzo per il viaggio di andata e ritorno. E tutti coloro che misurano la velocità della luce, in ogni momento, con qualsiasi metodo, ottengono lo stesso risultato: poco meno di 300.000 km al secondo.

Dovremo aspettare la teoria della relatività generale di Einstein per comprendere il limite invalicabile della velocità della luce per un qualunque tipo di particella nell'universo e cosa accadrebbe se fosse possibile, per i corpi aventi una determinata massa, avvicinarsi solo alla velocità della luce.

Recentemente (nel 2011) gli scienziati del CERN di Ginevra sembravano aver scoperto che tale limite non valesse per i neutrini; ahimè dovettero presto rinunciare a tali convincimenti dopo aver ricontrollato le misurazioni effettuate rendendosi conto di un errore nelle misurazioni effettuate, avendo rilevato una velocità, per i neutrini, superiore a quella con cui realmente si muovono.

La luce può vantare ancora il suo primato, almeno per ora!

10.4 Corpi trasparenti, opachi e traslucidi

La luce emessa da una sorgente luminosa, si propaga, come detto, in linea retta in tutte le direzioni e va a colpire gli oggetti che, a seconda del materiale di cui sono fatti, si comportano in modo diverso quando vengono illuminati. Alcuni, come il vetro, lasciano passare la luce; altri, come il legno, costituiscono una barriera impenetrabile alla luce visibile; altri infine, come un foglio di carta velina, manifestano un comportamento intermedio. I corpi illuminati possono quindi essere:

- **trasparenti**, se lasciano passare la luce e permettono così di vedere gli oggetti che stanno dietro di loro (ad. esempio un vetro);
- **opachi**, se non lasciano passare la luce e nascondono completamente gli oggetti che stanno dietro di loro (ad esempio un pezzo di legno);
- **traslucidi**, se lasciano passare solo in parte la luce e non permettono di distinguere nitidamente gli oggetti dietro di loro (ad esempio un foglio di carta velina).

10.5 La riflessione della luce

Si ha il fenomeno della **riflessione** ogni volta che un fascio di luce, dopo aver colpito un corpo non trasparente lucido e levigato, rimbalza sulla sua superficie e viene deviato in un'altra direzione.

Il raggio di luce che arriva sulla superficie lucida e levigata (raggio incidente) viene "rimandato indietro" (raggio riflesso) in una direzione diversa, secondo regole ben precise. Il fenomeno della riflessione ha le seguenti leggi:

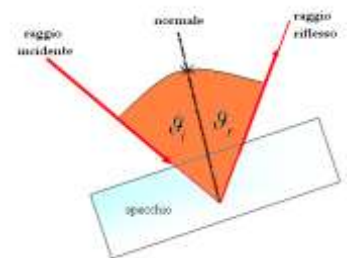


Figura 209 Riflessione della luce contro uno specchio

- **1^a LEGGE** - Il raggio incidente, la perpendicolare allo specchio nel punto di incidenza e il raggio riflesso sono complanari, cioè **giacciono tutti nello stesso piano**;
- **2^a LEGGE** - Il raggio incidente forma, con la perpendicolare allo specchio condotta nel punto di incidenza, un angolo \mathcal{G}_i (**angolo di incidenza**) uguale all'angolo formato dal raggio riflesso e dalla perpendicolare stessa \mathcal{G}_r (**angolo di riflessione**):

$$\mathcal{G}_i = \mathcal{G}_r$$

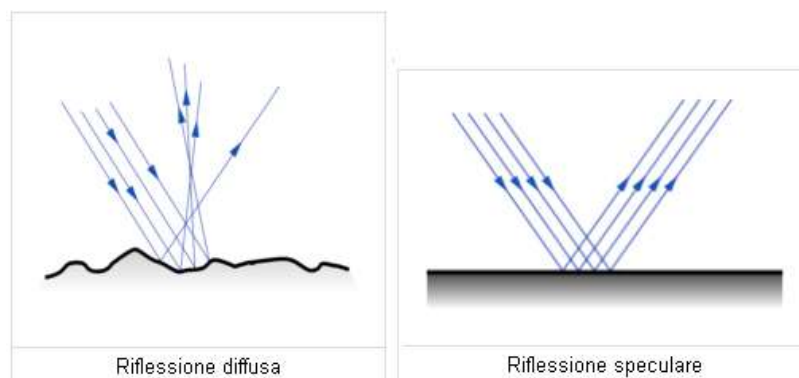


Figura 210 Riflessione di un raggio incidente

Se la superficie di un corpo opaco è chiara e non levigata, la luce viene respinta in tutte le direzioni e attorno al corpo si crea una debole luminosità. Tale fenomeno è detto **diffusione**.

Le leggi appena enunciate possono essere ricavate a partire dai seguenti due principi fisici:

10.6 Principio di Fermat

Un raggio di luce, propagandosi da un punto fisso ad un altro, segue un percorso tale che il tempo impiegato a percorrerlo, confrontato con quello dei percorsi vicini, è il minimo.

10.7 Principio di Huygens-Fresnel

Tutti i punti di un fronte d'onda possono essere considerati come sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie in fase con la primaria ed hanno la stessa velocità dell'onda.



Figura 211 Principio di Huygens-Fresnel

10.8 La rifrazione della luce

Se osserviamo un oggetto di una certa lunghezza immerso in parte in una vasca piena d'acqua, essa sembra spezzata nel punto in cui entra nell'acqua. Il fenomeno è un'illusione ottica. Ma da cosa è provocata? Sappiamo che i raggi luminosi nell'aria si propagano in linea retta e che nell'acqua si propagano nello stesso modo. Tuttavia la velocità della luce nei due mezzi trasparenti è diversa perché diversa è la loro densità. I raggi luminosi, perciò, nel passaggio da un mezzo meno denso (l'aria) ad uno più denso (acqua) rallentano e vengono deviati: questo fenomeno è detto **rifrazione** della luce.

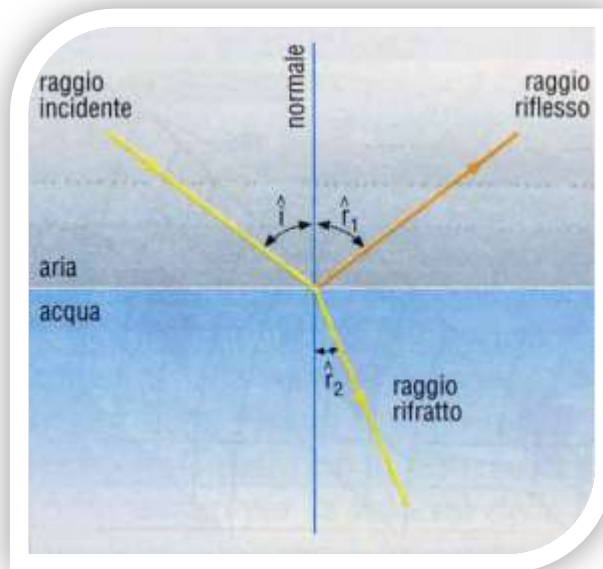


Figura 212 Rifrazione di un raggio incidente attraverso un mezzo

Vediamo come varia la direzione dei raggi luminosi nel passaggio da un mezzo trasparente meno denso ad uno più denso e viceversa. Il raggio incidente propagandosi nell'aria raggiunge la superficie di separazione dei due mezzi trasparenti (aria e acqua) e forma, con la perpendicolare a questa superficie, un angolo che prende il nome di angolo di incidenza \hat{i} . Il raggio luminoso prosegue nell'acqua, deviando bruscamente dalla direzione che aveva nell'aria e prende così il nome di **raggio rifratto** \hat{r}_2 . Il raggio rifratto forma, con la perpendicolare alla superficie di separazione, un angolo più piccolo detto angolo di rifrazione, che si avvicina alla perpendicolare dell'angolo di incidenza. Angolo di incidenza e angolo di rifrazione sono sempre diversi ma giacciono, insieme alla perpendicolare, sullo stesso piano:

$$\hat{i} \neq \hat{r}_2 \quad (3)$$



Laboratorio 25 Rifrazione della luce

10.9 Indice di rifrazione

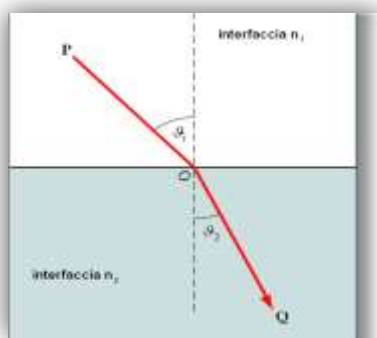


Figura 213 Indice di rifrazione

L'indice di rifrazione di un materiale è un parametro macroscopico, solitamente indicato col simbolo n , che rappresenta il fattore numerico per cui la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica viene rallentata, rispetto alla sua velocità nel vuoto, quando questa attraversa un materiale.

Essendo funzione della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica e della natura del materiale attraversato, la sua misura in condizioni controllate può essere usata per identificare il materiale stesso.

10.10 Legge di Snell-Cartesio

La figura mostra due mezzi trasmissivi con indice di rifrazione n_1 (sopra) e n_2 (sotto) in contatto tra loro attraverso una superficie, che viene chiamata interfaccia (linea verticale in figura). Nel caso $n_2 > n_1$, la luce ha una velocità di fase più bassa nel secondo mezzo. Il raggio luminoso PO proveniente dal mezzo di sinistra colpisce l'interfaccia nel punto O .

A partire da tale punto O tracciamo una retta perpendicolare all'interfaccia stessa, che viene chiamata normale all'interfaccia (linea verticale in figura). L'angolo tra la normale e il raggio luminoso PO viene chiamato angolo d'incidenza ϑ_i .

Il raggio attraversa l'interfaccia e prosegue nel mezzo di sotto, indicato come OQ . L'angolo che tale raggio (rifratto) forma con la normale si chiama angolo di rifrazione, ϑ_r .

La legge di Snell fornisce la relazione tra gli angoli ϑ_i e ϑ_r :

$$n_1 \cdot \text{sen } \vartheta_i = n_2 \cdot \text{sen } \vartheta_r \quad (4)$$

Si noti che nel caso $\vartheta_i = 0^\circ$ (ovvero il raggio risulta perpendicolare all'interfaccia) la soluzione è $\vartheta_r = 0^\circ$ per qualunque valore di n_1 e n_2 . In altri termini, un raggio che entra in un mezzo in modo perpendicolare alla sua superficie non viene mai deviato.

Quanto detto sopra vale anche nel caso di un raggio luminoso che passa da un mezzo più denso a uno meno denso; la simmetria della **legge di Snell** mostra che gli stessi percorsi luminosi sono validi anche nella direzione opposta.

Una regola di carattere qualitativo per determinare la direzione della rifrazione è che il raggio luminoso è sempre più vicino alla normale dal lato del mezzo più denso.

10.11 La dispersione della luce: i colori

Il fenomeno della rifrazione può dare origine a situazioni e fenomeni particolari, quale ad esempio la dispersione della luce; tale fenomeno si può osservare quando una radiazione non monocromatica, come ad esempio quella bianca, incide su di un prisma di vetro con un angolo



di incidenza \hat{i} diverso da zero.

La dispersione della luce si verifica solo in queste condizioni particolari, perché solo la luce bianca è data dalla composizione dei vari colori che quindi, nel passaggio dal vetro all'aria (ovviamente nel caso del prisma), avendo velocità e lunghezze d'onda differenti, deviano il loro cammino e compiono un percorso differente.

Ogni componente viene rifratta con un angolo di rifrazione \hat{r} diverso ed osserviamo così la distribuzione delle componenti monocromatiche dal rosso, il meno deviato e con velocità e lunghezza d'onda maggiore, fino al violetto il più deviato, con frequenza maggiore. La dispersione della luce si verifica anche in natura con il fenomeno dell'arcobaleno.

Esperimenti con i prismi e la luce erano già stati fatti da Cartesio, Hooke e Boyle che avevano posto uno schermo vicino alla faccia del prisma da cui usciva la luce colorata e avevano osservato il miscuglio di colori. Newton pensò di allontanare notevolmente lo schermo sfruttando tutta la lunghezza della sua stanza, dalla finestra al muro opposto. Ipotizzò che non fosse il prisma a colorare la luce e mise a punto un esperimento decisivo: Sul percorso dello spettro ottenuto, mise uno schermo in cui aveva tagliato una sottile fenditura in modo da far passare solo il raggio verde. Questo raggio verde venne fatto passare in un secondo prisma ipotizzando che, se fosse stato il prisma a colorare la luce, il raggio verde avrebbe dovuto uscirne di colore diverso! Il raggio invece non venne modificato dal prisma e rimase verde. Facendo altre prove con gli altri colori che uscivano dal primo prisma, dimostrò che i colori sono le varie componenti della luce e che il prisma semplicemente li separa. Facendo passare tutto lo spettro ottenuto in un secondo prisma messo in modo opportuno riuscì ad ottenere di nuovo la luce bianca.

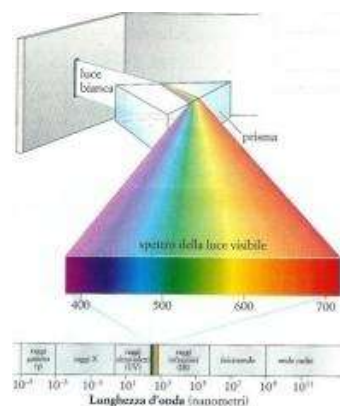


Figura 214 Scomposizione della luce su un prisma ottico



Figura 215 Arcobaleno

Dopo aver raccolto moltissimi dati, Newton concluse che i raggi di luce vengono rifratti, cioè “piegati”, nel passaggio dall’aria al vetro e viceversa e che l’angolo di rifrazione è diverso a seconda del colore, mentre è costante per due determinati mezzi attraversati, qualunque sia l’angolo di incidenza della luce.

Adesso è più semplice spiegare il motivo dei colori dell’arcobaleno. Un **arcobaleno** infatti è il risultato di un prisma naturale in grande scala: le goccioline d’acqua sospese in aria possono comportarsi in modo simile ad un prisma, separando i colori della luce per produrre quel tipico spettro luminoso. La luce viene rifratta nel passaggio da un materiale (aria) ad un altro (acqua) e viceversa. Oggi sappiamo che i differenti colori corrispondono a differenti frequenze dell’onda luminosa e vengono rifratti in modo diverso. Il rosso ha frequenza più bassa e viene deviato di meno, il violetto ha frequenza più alta e viene “piegato” di più. A causa di questa differente rifrazione, i raggi di colori diversi escono separati. Perciò in una giusta posizione riusciamo a vedere l’arcobaleno.

10.12 La diffrazione della luce

Il modello geometrico della luce, vale a dire il modello di raggio che si propaga in linea retta, permette di descrivere un’ampia gamma di fenomeni e strumenti ottici quali gli specchi curvi, le lenti e i sistemi composti di specchi e lenti. Tuttavia tale modello risulta del tutto inadeguato a interpretare altri fenomeni come la diffrazione, l’interferenza e la polarizzazione dove risulterà indispensabile introdurre il modello ondulatorio.

Se un fascio di luce, attraversa una fenditura di larghezza d , avente dimensioni molto maggiori della lunghezza d’onda ($d \gg \lambda$), prosegue indisturbato il suo cammino proiettando sullo schermo un’immagine uniformemente illuminata che riproduce fedelmente i contorni della fenditura. Se però la fenditura viene ridotta notevolmente ($d \approx \lambda$), l’immagine cambia drasticamente dando luogo sullo schermo, distante L , ad un’alternanza di zone luminose (di diversa luminosità e di diversa larghezza) e di zone buie. E’ il fenomeno della **diffrazione**.

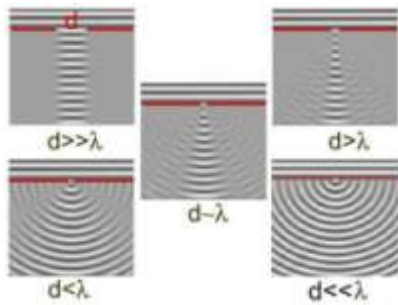
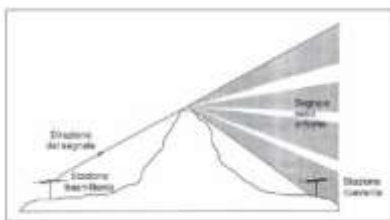


Figura 216 Diffrazione della luce

L’ennesima zona buia si trova ad una distanza x dal punto centrale dello schermo definita dalla relazione seguente:

$$x = \frac{n \cdot \lambda \cdot L}{d} \quad (5)$$

L’intensità delle zone luminose decresce molto rapidamente ai lati del massimo centrale. In particolare se l’intensità al centro vale I_m , in un punto distante angularmente θ l’intensità vale:



$$I = I_m \left(\frac{\text{sen} \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (6)$$

dove

$$\alpha = \frac{\pi \cdot d}{\lambda} \text{sen} \vartheta \quad (7)$$

10.13 L'interferenza

Se si sdoppia la luce emessa da una sola sorgente di luce per mezzo di due sottili fenditure sullo schermo non si osserva solo le immagini delle due fenditure ma una successione di frange luminose equidistanti alternate a frange oscure. Avviene che, passando attraverso ciascuna fenditura la luce subisce la diffrazione, inoltre, la luce diffratta da una delle due fenditure si sovrappone a quella diffratta dall'altra. Nella regione di sovrapposizione le onde luminose interferiscono costruttivamente (luce intensa) nei punti in cui esse giungono in fase mentre interferiranno distruttivamente (buio) là dove giungono sfasate di mezza lunghezza d'onda. L'ennesima zona luminosa si trova ad una distanza x dal punto centrale dello schermo, dove, questa volta d rappresenta la distanza tra i centri delle due fenditure (vedi figura)

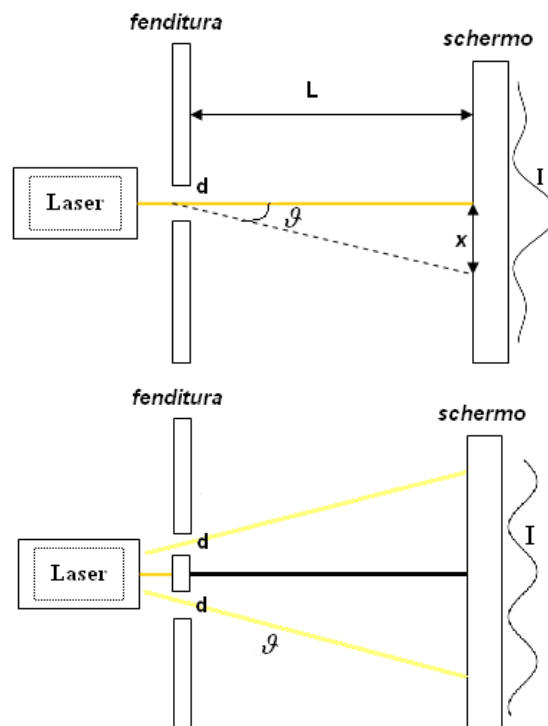


Figura 217 Interferenza con doppia fenditura

A differenza della figura di diffrazione da una singola fenditura, nella figura di interferenza le frange luminose hanno tutte la stessa intensità essendo descritte dalla funzione:

(8)

$$I = I_m \cdot \cos^2 \vartheta$$

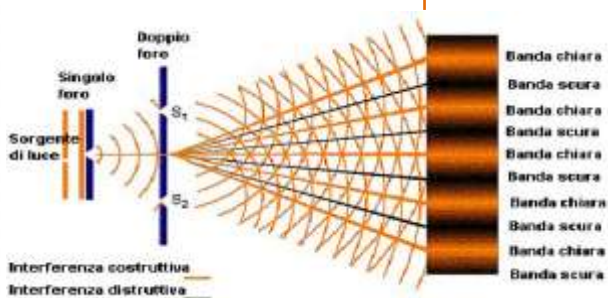


Figura 218 Sorgente che emette un'onda che attraversa prima una fenditura e poi una doppia fenditura

L'interferenza è dunque un fenomeno dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde, secondo un principio chiamato appunto **principio di sovrapposizione**. Il risultato, in termini di ampiezza ovvero di intensità, di questa interazione fra le onde può essere diverso rispetto alla semplice somma delle caratteristiche associate ad ogni singola onda di partenza. In particolare l'intensità risultante può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, ed un massimo, coincidente con la somma delle singole intensità: in generale, si dice che l'interferenza è distruttiva nel primo caso (buio) e costruttiva nel secondo (luce). Questo diverso comportamento è legato alla distanza percorsa dalle due onde.

osserva alcun fenomeno ondulatorio, ed un massimo, coincidente con la somma delle singole intensità: in generale, si dice che l'interferenza è distruttiva nel primo caso (buio) e costruttiva nel secondo (luce). Questo diverso comportamento è legato alla distanza percorsa dalle due onde.



Figura 219 Interferenza costruttiva e distruttiva

L'esperienza descritta va sotto il nome di **Esperimento di Young**, tra i primi a dare conferma sperimentale della natura ondulatoria della luce e a riuscire a misurare con accuratezza la sua lunghezza d'onda.

Osservazione

Se l'interferenza è prodotta da due fenditure la cui larghezza sia notevolmente più piccola rispetto alla distanza che le separa si avrà la tipica alternanza di zone di luce e buio propria dell'interferenza, ma l'intensità delle zone di luce risulterà modulata dall'effetto concomitante della diffrazione. Da notare che l'effetto modulato della diffrazione è unico poiché le due fenditure si trovano vicinissime e pertanto il profilo delle due figure di diffrazione risulta praticamente sovrapposto.

10.14 Le lenti

Una **lente** è un mezzo trasparente, limitato da due superfici ben levigate di cui almeno una è curva.

Come è composta:

- **asse ottico**: retta che congiunge i centri di curvatura delle due facce della lente;
- **centro ottico**: punto dell'asse ottico che divide a metà lo spessore della lente;
- **fuoco**: punto in cui convergono tutti i raggi paralleli all'asse ottico;

Si chiama lente quindi un qualsiasi corpo trasparente avente due superfici curve non parallele, oppure una superficie piana ed una curva. Per ogni lente l'asse che passa per i centri delle due superfici sferiche è detto **asse ottico**. Il comportamento di una lente è dovuto al fenomeno della rifrazione, ovvero al cambiamento di direzione che subisce un raggio luminoso nel passaggio da un mezzo ad un altro con diverso indice assoluto di rifrazione, come accade nel passaggio aria - vetro e vetro - aria attraverso una lente.

Classificazione delle lenti

Le lenti sono classificate secondo la curvatura delle due superfici:

- biconvessa o semplicemente convessa se entrambe sono convesse,
- biconcava o concava se entrambe sono concave,
- piano-convessa se una è piatta e l'altra convessa,
- piano-concava se una è piatta l'altra è concava,
- concavo-convessa se sono una concava e una convessa.

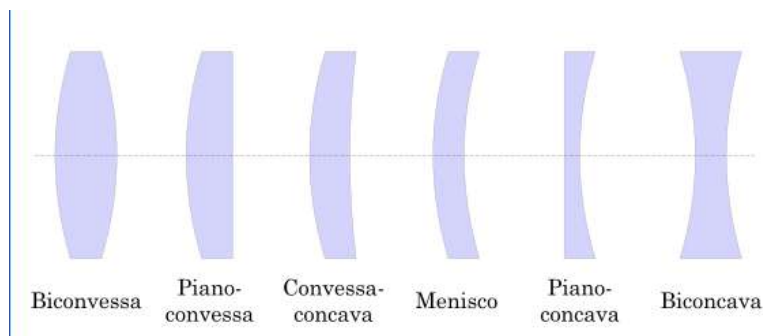


Figura 220 Tipi di lenti

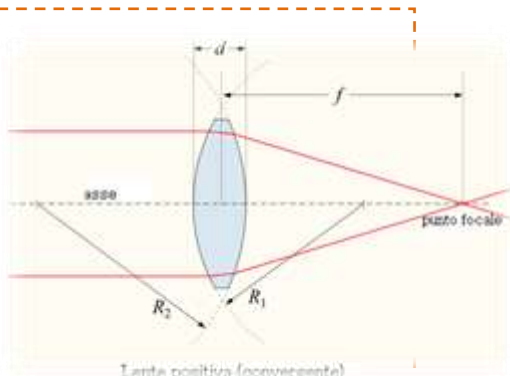
Lenti sferiche

Il tipo più comune è rappresentato dalle lenti **sferiche**, caratterizzate dall'averle le due superfici opposte costituite idealmente da porzioni di superfici sferiche con raggi di curvatura R_1 e R_2 .

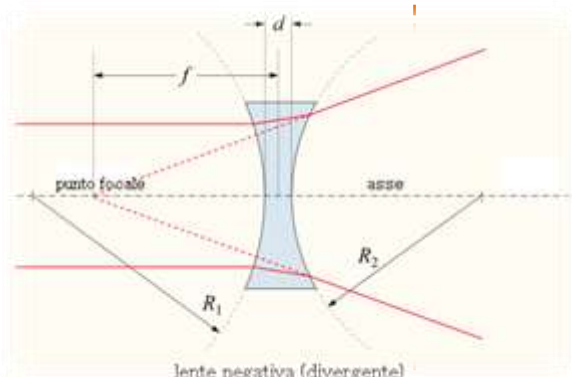
Il segno di R_1 determina la forma della superficie: se R_1 è positivo la superficie è convessa, se negativo la superficie è concava, se R_1 è zero la superficie è piatta.



Laboratorio 26
Ottica geometrica



Lente positiva (convergente)



Lente negativa (divergente)

Lo stesso vale per la superficie opposta lungo il cammino ottico, ma con i segni invertiti. La linea passante per i centri delle sfere ideali e generalmente passante anche per il centro geometrico della lente è detta asse.

Lente convergente

Se la lente è biconvessa o piano-convessa un fascio di raggi paralleli all'asse che attraversa la lente viene “focalizzato” (cioè viene fatto **convergere**) su un punto dell'asse a una certa distanza oltre la lente, nota come distanza focale. Questo tipo di lente è detta **positiva**.

Lente divergente

Se la lente è biconcava o piano-concava, un fascio collimato è fatto **divergere** e la lente è perciò detta **negativa**.

Il raggio uscente dalla lente sembra provenire da un punto dell'asse antecedente la lente. Anche questa distanza è chiamata distanza focale, ma il suo valore è negativo.

Nella lente concavo-convessa, la convergenza o divergenza è determinata dalla differenza di curvatura delle due superfici. Se i raggi sono uguali il fascio luminoso idealmente non converge né diverge.

Il valore della distanza focale può essere calcolato con l'equazione:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n}{n'} - 1 \right) \cdot \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (9)$$

dove:

- n è l'indice di rifrazione del materiale con cui è costituita la lente,
- n' è l'indice di rifrazione dell'ambiente in cui la lente è immersa,

a patto che la distanza d tra le due superfici sia piccolo rispetto a R_1 e R_2 , si ha la condizione di **lente sottile**.

Il valore di f è positivo per le lenti convergenti, negativo per le divergenti e “infinito” per le lenti a menisco.

Il reciproco della distanza focale ($\frac{1}{f}$) è detto potere diottrico, è espresso in diottrie con dimensioni metri⁻¹.

Le lenti sono reversibili, ovvero le distanze focali sono le stesse sia che la luce le attraversi in un senso sia che le attraversi nell'altro.

10.15 Formazione delle immagini

Come si è detto una lente positiva o convergente focalizza un fascio collimato parallelo all'asse in un punto focale, a distanza f dalla lente. Specularmente, una sorgente luminosa collocata nel punto focale produrrà attraverso la lente un fascio di luce collimato.

Questi due casi sono esempio di immagini formate dalla lente. Nel primo caso un oggetto posto a distanza infinita è focalizzato in una immagine su un piano posto alla distanza focale, chiamato piano focale. Nel secondo caso un oggetto posto nel punto focale forma una immagine all'infinito.

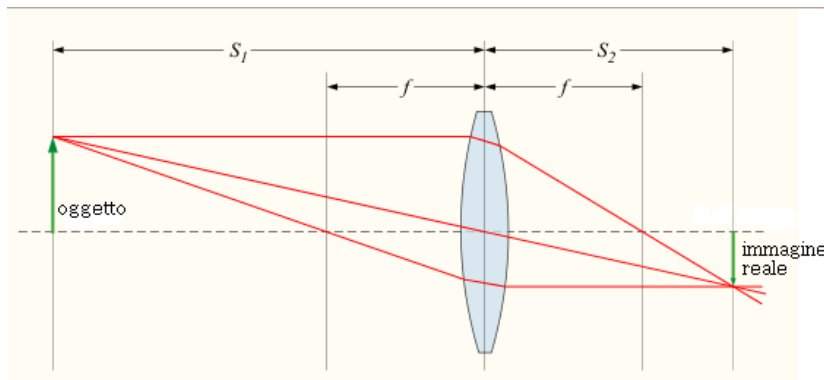


Figura 221 Formazione dell'immagine

Date le distanze S_1 tra lente e oggetto e S_2 tra lente e immagine, per una lente di spessore trascurabile vale la formula:

$$\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f} \quad (10)$$

da cui deriva che se un oggetto è posto a distanza S_1 sull'asse della lente positiva di focale f , su uno schermo posto a distanza S_2 si formerà l'immagine dell'oggetto.

Questo caso, che vale per $S_1 > f$ è alla base della **fotografia**. L'immagine così formata è detta immagine reale.

Si noti che se $S_1 < f$, allora S_2 diviene negativo, e l'immagine si forma apparentemente dallo stesso lato dell'oggetto rispetto alla lente. Questo tipo di immagine, detta immagine virtuale, non può essere proiettata su uno schermo, ma un osservatore vedrebbe attraverso la lente una immagine in quella posizione.

Una lente da ingrandimento genera questo tipo di immagine e il fattore di ingrandimento M (detto anche magnificazione) è dato da:

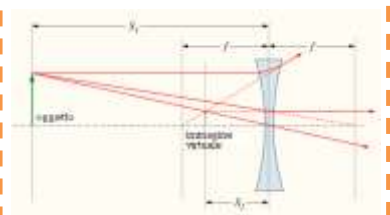


Figura 222 Fotografia

$$M = -\frac{S_2}{S_1} = \frac{f}{f - S_1} \quad (11)$$

Se $|M| > 1$ l'immagine è più grande dell'oggetto. Si noti che il segno negativo, come è sempre per le immagini reali, indica che l'immagine è capovolta rispetto all'oggetto. Per le immagini virtuali M è positivo e l'immagine è diritta.

La formula precedente può essere applicata anche a lenti divergenti indicando la distanza focale con segno negativo, ma queste lenti possono dare solamente immagini virtuali.

10.16 Aberrazioni ottiche

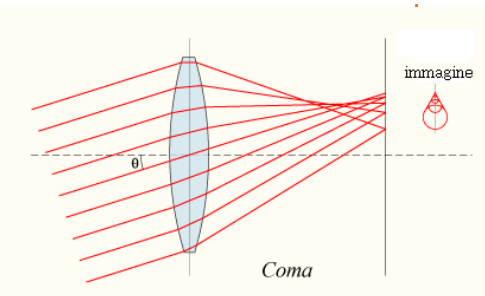
L'aberrazione di un sistema ottico è la differenza tra l'immagine effettiva, reale o virtuale, formata dal sistema e l'immagine che si voleva ottenere, immagine che di solito è bidimensionale e consiste in una proiezione geometrica della scena reale sul piano focale del sistema secondo i principi dell'ottica geometrica ideale. Le aberrazioni possono dare (di solito più sulla periferia dell'immagine che al suo centro) scarsa nitidezza, deformazioni dell'immagine, differenze tra le immagini corrispondenti ai diversi colori, non uniformità della luminosità.

Oltre che a imperfezioni dei componenti o dei materiali che costituiscono il sistema ottico, le aberrazioni possono essere dovute, in maniera più essenziale, al fatto che il sistema si allontana dalle condizioni dell'ottica parassiale, quando raccoglie raggi ad angoli grandi o li devia di molto (cosa che succede p.es. in ottiche grandangolari o con grande rapporto diametro/distanza focale). Possono essere ridotte, a volte quasi completamente eliminate, utilizzando materiali migliori, lavorando in modo particolare le ottiche, accoppiando molti componenti, ecc. In generale la correzione comporta un aumento dei costi di produzione.

In pratica un'immagine formata da un insieme di onde elettromagnetiche visibili può essere deviata, ridotta o aumentata o altro senza modificare le disposizioni relative delle singole onde. Ad esempio una foto può essere definita come una visione trasposta di una scena reale che rimane identica proporzionalmente e relativamente a sé stessa ma che poi può essere spostata in relazione all'esterno. Quando questo tipo di immagine "riportata" non è perfetta, congruente, fedele, non svolge al meglio la sua funzione di trasposizione spesso è perché sono presenti delle aberrazioni (anche intenzionali). Un po' come quando parlando al telefono la voce è distorta.

Un elemento influenzante lo sviluppo dell'aberrazione è lo spessore del mezzo ottico attraversato dalla luce, dalla scomposizione di quest'ultima legata al fenomeno della rifrazione ed alla suddivisione nelle diverse lunghezze d'onda dei colori percepiti nel visibile.

La **coma** è una aberrazione ottica che deriva il suo nome dal caratteristico aspetto a cometa delle immagini create dai sistemi ottici che presentano tale difetto.



La coma si ha quando l'oggetto ripreso è spostato lateralmente rispetto all'asse del sistema di un angolo ϑ . I raggi che passano per il centro di una lente con distanza focale f , sono focalizzati alla distanza $f \cdot \tan \vartheta$. I raggi che passano in periferia sono focalizzati invece in un punto diverso sull'asse, più lontano nel caso della coma positiva e più vicino nella coma negativa.

In generale, un fascio di raggi passanti per la lente ad una certa distanza dal centro, è focalizzato in una forma ad anello sul piano focale. La sovrapposizione di questi diversi anelli origina una forma a V, simile alla coda di una cometa (da cui il nome: in Latino coma = **chioma**), la cui punta è rivolta verso l'asse del sistema ottico. Si dimostra che l'angolo di apertura della figura è sempre pari a 60° . Come per l'aberrazione sferica, la coma può essere ridotta (e in alcuni casi eliminata) scegliendo opportunamente la curvatura delle lenti in funzione dell'uso.

10.17 Gli strumenti ottici

Gli strumenti ottici sono sistemi ottici progettati allo scopo di aumentare il potere risolutivo dell'occhio. Trattiamo per primo, come strumento ottico proprio l'**occhio**.

Le capacità visive dell'occhio umano risiedono nel globo oculare. Si tratta di una sfera irregolare composta da tre membrane, la più esterna delle quali (sclerotica) presenta una parte trasparente (cornea) all'interno della quale risiede una membrana (iride) provvista di un'apertura (pupilla) che può dilatarsi o restringersi in modo da regolare la luce entrante.

Dietro l'iride si trova una lente biconvessa (cristallino) costituita da un liquido denso e gelatinoso, la cui curvatura è regolabile per mezzo del muscolo ciliare che la circonda. La membrana sensibile sulla quale si formano le immagini (retina) si trova sul fondo dell'occhio. La retina è formata da milioni di cellule (coni e bastoncelli), collegate con le terminazioni del nervo ottico, per mezzo delle quali l'energia della radiazione viene raccolta ed elaborata. Lo spazio fra cornea e cristallino (camera anteriore) è occupato da un liquido rifrangente (umore acqueo). Lo spazio tra cristallino e retina (camera posteriore) è occupato da un altro liquido rifrangente (umore vitreo). Cornea, camera anteriore, cristallino e camera posteriore nel loro complesso formano una lente convergente (provvista di una distanza focale variabile fra 2,4 e 1,7 cm) che proietta le immagini sulla retina, rimpicciolite e capovolte. È poi il cervello a rielaborare tali immagini per farle apparire diritte e in dimensione originale.

Potere di accomodazione dell'occhio

L'occhio può regolare la percezione di oggetti situati a distanze diverse mediante un processo (accomodazione) di modifica della curvatura del cristallino. Le distanze limite alle quali l'accomodazione è possibile vanno da 10 cm (per i giovani) o 25 cm (per gli adulti) (Punto Prossimo) all'infinito (Punto Remoto). Il Potere di accomodazione dell'occhio è la massima variazione del potere diottrico del cristallino.

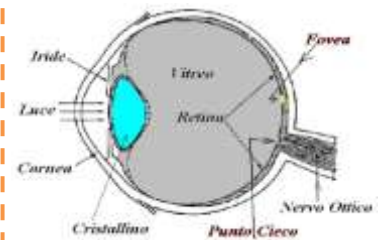


Figura 223 Occhio umano

Potere risolutivo dell'occhio

Il potere risolutivo è la capacità dell'occhio di vedere separati due punti molto vicini, quindi dipende dal rapporto fra la distanza dei due punti e la distanza dall'occhio dell'osservatore. Mediamente si calcola in un primo l'angolo minimo sopra il quale l'occhio è in grado di risolvere due punti vicini.

10.18 Difetti della vista

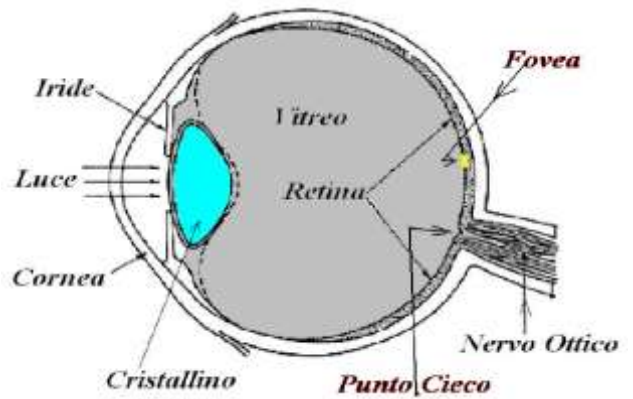
- **miopia:** La miopia è un difetto della vista caratterizzato dalla visione sfocata delle immagini di oggetti posti a distanza e la visione nitida e distinta di oggetti posti a distanza sempre più ravvicinata quanto più elevata la miopia. L'errata focalizzazione delle immagini dipende perlopiù da una eccessiva lunghezza del bulbo oculare.
- **ipermetropia:** L'ipermetropia è un difetto della vista caratterizzato dalla visione sfocata delle immagini di oggetti posti a distanza ravvicinata e spesso una visione distinta da lontano. L'errata focalizzazione delle immagini dipende perlopiù da una ridotta lunghezza del bulbo oculare.
- **astigmatismo:** L'astigmatismo è un difetto della vista che si caratterizza per la visione sfocata o distorta delle immagini di oggetti posti a tutte le distanze. La maggioranza delle volte l'errata focalizzazione delle immagini dipende da una curvatura disomogenea della cornea.

10.19 CLIL Project

The optical instruments

Optical instruments, optical systems are designed in order to increase the resolving power of the eye. We treat first, such as optical instrument just the **eye**.

The visual capabilities of the human eye reside in the eyeball. It is an irregular sphere composed of three membranes, the outermost of which (sclerotic) has a transparent part (cornea) within which resides a diaphragm (iris) provided with an aperture (pupil) that can expand or shrink in order to regulate the incoming light. Behind the iris is a biconvex lens (crystalline) consists of a dense liquid and gelatinous, whose curvature is adjustable by means of the ciliary muscle that surrounds it. The sensitive membrane on which images are formed (retina) is located on the bottom of the eye. The retina is composed of millions of cells (rods and cones), connected with the optic nerve endings, by means of which the energy of the radiation is collected and processed. The space between the cornea and lens (anterior chamber) is occupied by a refracting fluid (aqueous humor). The space between the lens and retina (posterior chamber) is occupied by another liquid refractive (vitreous humor). Cornea, anterior chamber, posterior chamber lens and together form a converging lens (equipped with a variable focal length between 2.4 and 1.7 cm) that projects images on the retina, shrunken and inverted. It is then the brain to restate these images to make them appear straight and in original size.



Power of accommodation of the eye

The eye can adjust the perception of objects at different distances by a process (accommodation) to change the curvature of the lens. Distances limit to which the accommodation can range from 10 cm (for young people) or 25 cm (for adults) (Next Step) to infinity (Point Remote). The power of accommodation of the eye and 'the maximum variation of the dioptric power of the lens.

Resolving power of the eye

The resolving power is the ability of the eye to see separate two points are very close, then depends on the ratio between the distance of the two points and the distance from the eye of the observer. Average is calculated in a first the minimum angle above which the eye is unable to resolve two nearby points.

10.20 Defects of vision

- Myopia: Myopia is a defect of vision characterized by blurred vision images of objects at close and clear and distinct vision of objects at close range as more and more high myopia. The wrong

focus of the images depends largely by an excessive length of the eyeball;

- Hyperopia: Hyperopia is a defect of vision characterized by vision blurred images of objects at close range and often a distinct vision from afar. The wrong focus of the images depends mostly by a reduced length of the eyeball;
- Astigmatism: Astigmatism is a defect of vision that is characterized by blurred vision or distorted images of objects at all distances. The majority of times the incorrect focusing of the images depends on an uneven curvature of the cornea.

10.21 Illusioni ottiche

Una illusione ottica è una qualsiasi illusione che inganna l'apparato visivo umano, facendogli percepire qualcosa che non è presente o facendogli percepire in modo scorretto qualcosa che nella realtà si presenta diversamente.

Le illusioni ottiche possono manifestarsi naturalmente o essere dimostrate da specifici trucchi visuali che mostrano particolari assunzioni del sistema percettivo umano.

Un **miraggio** è un esempio di illusione naturale dovuta a un fenomeno ottico.

Esso si verifica quando i raggi del Sole incontrano uno strato d'aria più calda rispetto agli strati sovrastanti dove l'aria più fredda è di densità maggiore. Così i raggi di luce subiscono una riflessione totale ed è possibile vedere le immagini come se fossero veramente riflesse al suolo.

Anche quella della luna che a volte ci appare più grande è un'illusione ottica e capita quando è vicina all'orizzonte più di quando è alta nel cielo. Questa illusione si ha anche per il sole e le costellazioni. È conosciuta sin dall'antichità in numerose culture differenti. La spiegazione di questa illusione è ancora in dibattito.

Anche quella della luna che a volte ci appare più grande è un'illusione ottica e capita quando è vicina all'orizzonte più di quando è alta nel cielo. Questa illusione si ha anche per il sole e le costellazioni. È conosciuta sin dall'antichità in numerose culture differenti. La spiegazione di questa illusione è ancora in dibattito.

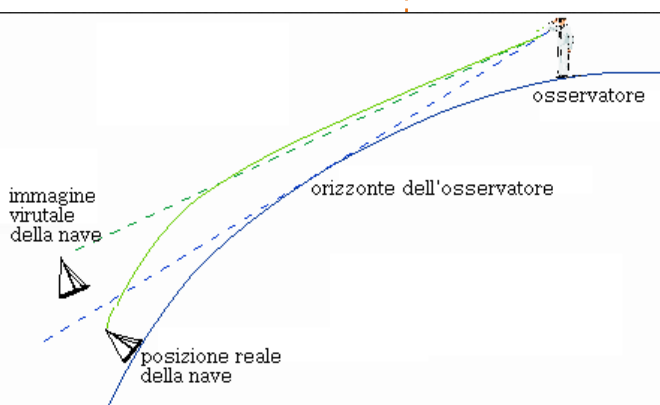


Figura 224 Illusioni ottiche:
miraggio

10.22 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questo capitolo abbiamo imparato che per la **luce** sono state ipotizzati due diversi modelli: uno di tipo **ondulatorio**, che vede la luce come un'onda elettromagnetica ed un altro di tipo **corpuscolare**, coerente con l'effetto fotoelettrico. Di fatto entrambi vengono oggi accettati perché ognuno coerente con diversi fenomeni che non potrebbero essere spiegati con uno solo di essi. Abbiamo poi visto come la luce si propaghi nel **vuoto** ad una velocità limite di 300.000 km/s. successivamente abbiamo studiato come avviene il passaggio della luce attraverso i diversi corpi, dando origine agli effetti di **riflessione**,

diffrazione e di **rifrazione**, da cui, proprio per la rifrazione, si ha la possibilità di una scomposizione dell'onda stessa dando origine ai **colori**. Abbiamo poi studiato i fenomeni di **interferenza**, con il passaggio della luce attraverso una o più fenditure. Di qui siamo passati alla classificazione dei diversi **tipi di lenti** e le diverse forme che possono assumere, **sferiche**, **convergenti** e **divergenti**. Di qui la trattazione delle aberrazioni ottiche e lo studio degli strumenti ottici, quale l'**occhio**, potendone inoltre studiare i diversi **difetti della vista**.

10.23 Problemi proposti

1) Consideriamo una lente convergente avente distanza focale 30 cm e un oggetto di altezza 20 cm. Si trovi la distanza alla quale si forma l'immagine dell'oggetto quando quest'ultimo viene posto a una distanza di 40 cm dalla lente e quando viene posto a una distanza di 15 cm dalla lente. Si calcoli anche l'altezza dell'immagine nei due casi.

2) Consideriamo una lente divergente avente distanza focale di 30 cm e un oggetto di altezza 20 cm. Si trovi la distanza alla quale si forma l'immagine dell'oggetto quando quest'ultimo viene posto a una distanza di 40 cm dalla lente e quando viene posto a una distanza di 15 cm dalla lente. Si calcoli anche l'altezza dell'immagine nei due casi. Qual è il numero di diottrie della lente?

3) Si consideri una lente divergente di distanza focale 20 cm. Dove dobbiamo posizionare l'oggetto affinché la sua immagine risulti rimpicciolita di un terzo?

4) Il diagramma seguente mostra un raggio di luce che passa da un mezzo trasparente all'aria.

Qual è l'indice di rifrazione del mezzo trasparente?

- a) 1.2 b) 1.3 c) 1.8 d) 1.9 e) 2.3

5) Un raggio di luce passa dall'aria al vetro come mostrato in figura: Qual è la migliore stima della velocità della luce nel vetro?

- (a) $2.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$; (b) $2.12 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$; (c) $3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
 (d) $4.24 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$; (e) $4.50 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

6) La Luna ha un diametro di 3 480 km e la sua distanza media dalla Terra è di 386 000 km. Qual è il diametro dell'immagine reale della Luna formata da un telescopio il cui specchio sferico ha un raggio di curvatura di 3.2 m?

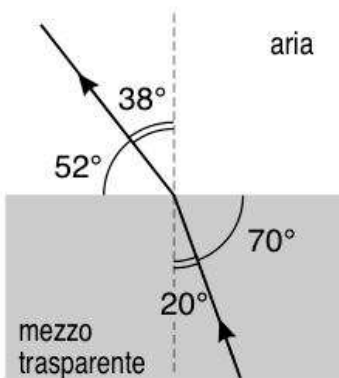
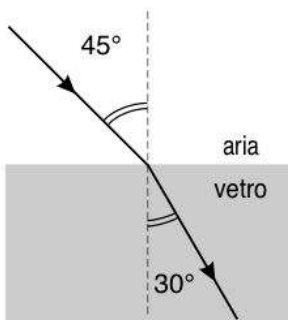
- (a) 1.4 cm (b) 2.8 cm (c) 3.6 cm (d) 14 cm
 (e) 36 cm

7) Un fascio di raggi paralleli giunge su una lente convergente di distanza focale 25 cm. A che distanza da questa lente deve essere portata una seconda lente convergente di distanza focale 10 cm affinché i raggi emergenti siano ancora paralleli?

- (a) 35 cm (b) 25 cm (c) 15 cm (d) 10 cm (e) Non esiste una posizione possibile.

8) Un oggetto alto 2 cm è posto a 30 cm da una lente convergente. La lente forma un'immagine reale di 4 cm di altezza. Determinare la lunghezza focale della lente.

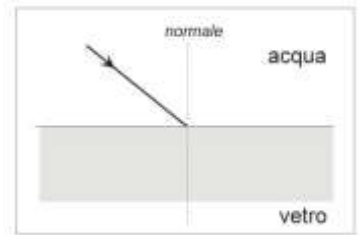
9) Un fascio di luce incide dall'aria in un blocco di materiale trasparente. L'angolo di incidenza è 49° , e quello di rifrazione è 30° . Qual è la velocità della luce nel materiale trasparente, in m/s ?



10) Il disegno schematizza un raggio di luce monocromatica che già in acqua e incide sulla superficie di separazione tra l'acqua e il vetro del contenitore.

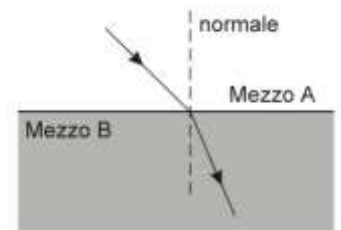
Che cosa accade al raggio di luce nel passaggio dall'acqua al vetro?

- (a) La velocità della luce diminuisce per cui il raggio si avvicina alla normale.
- (b) La velocità della luce diminuisce per cui il raggio si allontana dalla normale.
- (c) La velocità della luce non diminuisce ma il raggio si avvicina alla normale
- (d) La velocità della luce aumenta per cui il raggio si avvicina alla normale.
- (e) La velocità della luce aumenta per cui il raggio si allontana dalla normale.



11) Che cosa accade al raggio di luce nel passaggio dall'acqua al vetro?

- La velocità della luce diminuisce per cui il raggio si avvicina alla normale.
- La velocità della luce diminuisce per cui il raggio si allontana dalla normale.
- La velocità della luce non diminuisce ma il raggio si avvicina alla normale
- La velocità della luce aumenta per cui il raggio si avvicina alla normale.
- La velocità della luce aumenta per cui il raggio si allontana dalla normale.



12) La figura mostra un raggio di luce che passa da un mezzo ad un altro.

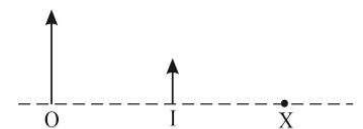
Quando la luce passa dal mezzo A al mezzo B:

- (a) sia la velocità sia la frequenza diminuiscono.
- (b) la velocità diminuisce, la frequenza non cambia.
- (c) sia la velocità sia la frequenza restano inalterate.
- (d) sia la velocità sia la frequenza aumentano.
- (e) la velocità aumenta, la frequenza non cambia.

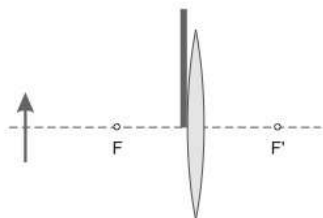
13) In figura sono illustrati un oggetto, O, e la sua immagine, I, formata da un dispositivo ottico collocato nel punto X.

Il dispositivo potrebbe essere:

- (a) una lente convergente.
- (b) una lente divergente.
- (c) uno specchio piano.
- (d) uno specchio concavo.
- (e) uno specchio convesso.



14) Una lente convergente sottile forma un'immagine reale, posta a 16 cm dalla lente, che è quattro volte più grande della sorgente. Quale, tra quelle proposte, potrebbe essere la distanza focale della lente?



- (a) 3.2 cm (b) 4.0 cm (c) 6.4 cm (d) 16.0 cm
 (e) 64.0 cm

15) Uno studente alto 1.6 m sta in piedi a 5.0 m da una lente convergente; questa ne forma un'immagine su uno schermo posto a 50 cm oltre la lente. Quanto è alta l'immagine dello studente sullo schermo?

- (a) 0.016 m (b) 0.16 m (c) 0.80 m (d) 1.6 m
 (e) 8.0 m

16) Una lente convergente forma in un certo punto l'immagine di un oggetto. Cosa succede dell'immagine se la metà superiore della lente viene coperta con un cartoncino completamente opaco?

- (a) Metà dell'immagine scompare
 (b) L'immagine rimane intera ma di dimensioni dimezzate.
 (c) L'immagine scompare.
 (d) L'immagine appare più sbiadita.
 (e) L'immagine si forma sul cartoncino.

17) Nel fenomeno della riflessione della luce:

- (a) l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione
 (b) l'angolo di incidenza è la metà dell'angolo di riflessione
 (c) l'angolo di incidenza e quello di riflessione sono supplementari
 (d) l'angolo di incidenza e di riflessione sono complementari

18) La lente è uno strumento che sfrutta il fenomeno fisico della:

- (a) riflessione
 (b) riflessione totale
 (c) rifrazione
 (d) rifrazione parziale

19) Il principio di Huygens afferma che:

- (a) la luce è un fenomeno ondulatorio
 (b) il fronte di un'onda è il risultato della composizione di onde elementari
 (c) la luce si comporta come le onde del mare
 (d) il fronte d'onda della luce è sempre circolare

20) La relazione che lega l'indice di rifrazione assoluto n , la velocità c della luce nell'aria e la velocità v della luce nel mezzo è:

- (a) $n=c/v$
 (b) $n=v/c$
 (c) $c=v/n$
 (d) $v=c n$

21) La luce diffrange quando:

- (a) riesce ad aggirare l'ostacolo proseguendo nella stessa direzione originaria

- (b) riesce ad aggirare l'ostacolo proseguendo in una direzione diversa da quella originaria
- (c) attraversa l'ostacolo
- (d) alterna frange luminose a frange d'ombra

22) La dispersione della luce avviene nel caso in cui l'indice di rifrazione del mezzo attraversato:

- (a) dipende dalla lunghezza d'onda della luce
- (b) dispersa dipende dalla frequenza della luce incidente
- (c) è costante
- (d) è una funzione lineare della frequenza della luce

10.24 In laboratorio

Riflessione della luce

21) Verifica sperimentale della legge di riflessione della luce, utilizzando uno specchio e due candele.

Rifrazione della luce

22) Verifica sperimentale della legge di rifrazione della luce.



Figura 225 Telescopio spaziale

10.25 Approfondimento: Il telescopio spaziale

Un telescopio spaziale è un satellite oppure una sonda spaziale lanciata con l'espresso scopo di osservare pianeti, stelle, galassie e altri oggetti celesti, esattamente come un telescopio basato a terra. Sono stati lanciati numerosi telescopi spaziali, che hanno contribuito enormemente alla nostra conoscenza del cosmo.

Il motivo che spinge all'osservazione dallo spazio è che essa non soffre di numerosi problemi che ha invece l'osservazione dalla superficie della Terra, in ordine crescente di importanza:

un telescopio nello spazio non soffre dell'inquinamento luminoso causato da paesi e città vicine, l'atmosfera terrestre introduce una considerevole distorsione nelle immagini (propriamente chiamata aberrazione ottica). La capacità risolutiva dei grandi telescopi terrestri è perciò notevolmente ridotta. Un osservatorio nello spazio non deve guardare attraverso chilometri di atmosfera, ed ha sempre prestazioni vicine al suo massimo teorico. Questo problema è oggi parzialmente risolto anche a terra da tecniche di ottica adattiva, che però sono complesse e non risolvono del tutto il problema. L'atmosfera inoltre assorbe una grande porzione dello spettro elettromagnetico, impedendo alla radiazione di molti oggetti celesti di raggiungerci. Molte osservazioni sono quindi semplicemente impossibili da terra, e occorre spostarsi fuori dall'atmosfera per poterle condurre.

L'ultimo problema è quello che ha causato il lancio di quasi tutti i telescopi spaziali, e in parte anche del telescopio spaziale Hubble (Hubble Space Telescope o HST), che cercava principalmente di aggirare il problema della distorsione atmosferica. I telescopi terrestri possono osservare solo le lunghezze d'onda ottiche (la cosiddetta finestra ottica) e radio, più alcune porzioni molto limitate della banda infrarossa. Tutto il resto (raggi ultravioletti, raggi X, raggi gamma e la maggior parte dell'infrarosso) deve essere osservato dallo spazio.

I telescopi spaziali soffrono però di alcuni svantaggi rispetto ai loro cugini terrestri. I costi sono elevatissimi, soprattutto per il lancio: l'affitto di un razzo medio può costare 200 milioni di euro, e lo Shuttle costava più del doppio. impossibilità di manutenzione (tranne che per l'HST): se il telescopio si guasta non può essere sostituito.

Breve vita operativa

molti telescopi devono essere raffreddati, e quando il liquido di raffreddamento finisce, il serbatoio non può essere riempito di nuovo. Inoltre, anche i telescopi che non necessitano di manutenzione periodica finiscono per soccombere alle dure condizioni dell'ambiente spa-

ziale (caldo e freddo intensissimi, radiazioni dure che rovinano l'elettronica, etc). Un'altra causa molto comune è l'esaurirsi dei fondi disponibili per la missione, che servono a pagare il personale di terra e le costosissime antenne del Deep Space Network che mantengono l'effettivo contatto col satellite.

Le missioni spaziali osservative possono essere divise in due grandi classi: quelle che cercano di mappare l'intero cielo (*survey*) e quelle osservano solo piccole porzioni selezionate, ma a risoluzione molto maggiore.

Molti osservatori hanno già completato la loro missione, la maggior parte con successo, e sono stati spenti oppure fatti ricadere nell'atmosfera. Molti altri sono attualmente attivi, ed di altri ancora è previsto il lancio nei prossimi anni. Le quattro agenzie spaziali attive in questo campo sono la NASA, l'ESA e quelle del Giappone e del Canada.

11. Elettrostatica

Prerequisiti

Modello atomico della materia. Concetto di forza. Energia. Energia Potenziale. Principi della Dinamica.

Sapere

Sapere che esistono fenomeni elettrostatici naturali o indotti. Distinguere dai diversi tipi di cariche. Tipi di Elettrizzazione. Conoscere la Legge di Coulomb in tutte le sue formulazioni. Concetto di Flusso, applicato al Teorema di Gauss e alle dirette conseguenze. Concetto di campo. Campo conservativo. Energia potenziale elettrica e differenza di potenziale. Tipi di condensatore e polarizzazione di un dielettrico. Condensatori in serie ed in parallelo e capacità equivalente nei due casi.

Saper fare

Saper distinguere tra fenomeni elettrici e fenomeni di altra natura. Saper utilizzare strumenti come l'elettroscopio. Saper come avviene l'elettrizzazione di un materiale. Saper applicare opportunamente la Legge di Coulomb e quella generalizzata. Saper calcolare la direzione del campo elettrico generato da due o più cariche. Saper riconoscere un condensatore. Saper calcolare la capacità di un condensatore, note le sue caratteristiche costruttive. Individuare se due o più condensatori sono collegati in serie o in parallelo.

11.1 Elettizzazione

Se si strofina con un panno di lana un pezzo di plastica, questo diviene capace di attirare dei piccoli pezzi di carta ovvero di esercitare delle forze. Tale fenomeno è detto **elettizzazione** per strofinio (dal nome greco antico elektron di un radice resinosa che mostra questo comportamento) e le forze che si manifestano sono dette forze elettriche.

Elettizzazione per strofinio

Facciamo delle osservazioni sperimentali:

1. strofiniamo una sferetta di vetro su lana ottenendo una elettizzazione di tipo A
2. strofiniamo una sferetta di plexiglass su lana ottenendo una elettizzazione di tipo B

Trattandosi di materiali diversi è lecito supporre che il tipo A ed il tipo B siano diversi fra loro e notiamo che le due sferette, opportunamente sospese, si attraggono. Due sferette identiche elettizzate allo stesso modo invece si respingono.

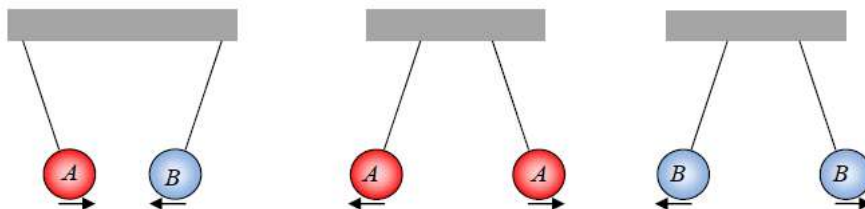


Figura 226 Sfere cariche che si respingono o si attraggono

Elettizzando per strofinio sferette diverse su materiali diversi, si nota che:

1. se una di esse è attratta dal tipo A, è respinta dal tipo B,
2. se una di esse è attratta dal tipo B, è respinta dal tipo A,

e ciò ci permette di concludere che ci sono solo e soltanto due tipi di elettizzazione. Per convenzione l'elettizzazione di tipo A è detta **positiva** (+) ed associata ad una “carica positiva”, l'elettizzazione di tipo B è detta **negativa** (-) ed associata ad una “carica negativa”, intendendo la “carica” una nuova proprietà della materia.

L'unità di misura della carica è il Coulomb e si indica con C .

YouTube



Laboratorio 27
Elettività statica

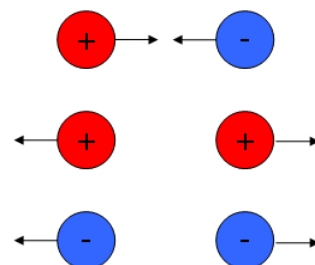


Figura 227 Attrazione o respingimento di cariche

E' solo in base a questa convenzione storica che oggi diciamo che gli elettroni sono negativi e protoni positivi.

Si può quindi affermare che cariche dello stesso segno si respingono, cariche opposte si attraggono.

L'elettrizzazione è quindi un fenomeno (o anche un processo) che conduce ad una sovrabbondanza di cariche di uno stesso segno nel corpo precedentemente neutro.

Elettrizzazione per contatto

Un altro metodo per elettrizzare un corpo neutro, è farlo a contatto con un corpo carico. Per esempio, se supponiamo di tenere sospesa una bacchetta di metallo elettricamente neutra, tramite un supporto isolante, e poi la mettiamo a contatto con un'altra bacchetta di metallo che impugniamo attraverso un manico isolante e che abbiamo precedentemente elettrizzata per strofinio, noteremo che: la bacchetta elettricamente neutra si elettrizzerà della stessa carica della bacchetta già elettrizzata in precedenza (questo accade perché, se per esempio supponiamo di lavorare con un corpo carico positivamente, noteremo che, non appena questo sarà posto a contatto con il corpo elettricamente neutro, quest'ultimo si caricherà dello stesso segno del corpo già caricato in precedenza, poiché gli elettroni del corpo elettricamente neutro si sono trasferiti in quello carico positivamente, così i due corpi formano un sistema e la somma delle cariche sarà la stessa)

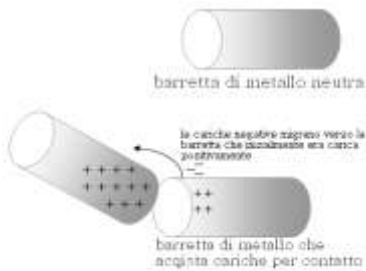


Figura 228 Elettrizzazione per contatto

E' importante sottolineare che nel moto delle cariche elettriche, le uniche a muoversi sono quelle di segno negativo, ovvero gli elettroni. Quando un corpo risulta carico positivamente non è perché le cariche positive sono giunte in quel punto, ma solo perché c'è stata una migrazione di cariche negative, lasciando il corpo carico positivamente.

Elettrizzazione per induzione elettrostatica

Avviene quando un corpo carico viene posto vicino ad un conduttore. In questo caso le cariche che si trovano su di esso si ridistribuiscono. Le cariche di segno opposto a quelle del corpo inducente sono da esso attratte, le altre allontanate. Il conduttore quindi è attratto dal corpo inducente e le sue cariche sono in totale nulle ma distribuite vicine e lontane dal corpo inducente, pertanto se il conduttore si può dividere in due parti, è sufficiente separarle affinché risultino elettrizzate con cariche uguali e di segno opposto.

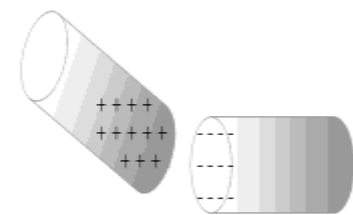


Figura 229 Elettrizzazione per induzione

È un'elettrizzazione per induzione quella degli scaffali metallici in un ipermercato, quando l'involucro esterno dell'edificio metallico è elettrizzato per strofinio dal vento.

In alternativa, anziché dividere il corpo "indotto" in due parti si può metterlo a terra (cioè collegarlo elettricamente col terreno: in questo modo le cariche di segno uguale a quello del corpo carico "inducente" si spostano nel terreno) e poi staccare il collegamento a terra prima di allontanare il corpo "inducente". Così sul corpo "indotto" rimangono

solo le cariche di segno opposto al corpo "inducente", anche quando questo viene allontanato.

11.2 Conduttori e isolanti

Oggi sappiamo che la materia è fatta di atomi ovvero di particelle cariche (elettroni e protoni) e possiamo dire che l'elettrizzazione per strofinio avviene perché alcuni elettroni passano da un corpo all'altro durante lo strofinio; il materiale che acquista elettroni diviene negativo mentre l'altro, che li cede, diviene positivo.

Lo studio dei fenomeni elettrici generati da configurazioni di cariche stabili nel tempo (stazionarie) è detto **elettrostatica** ed è qui di seguito affrontato.

Elettrizzando per strofinio un'asticella di vetro (bachelite, plexiglass) si trova che solo l'area strofinata si carica. Se invece elettrizziamo per strofinio un'asticella di metallo (rame, alluminio, argento), mantenuta tramite una impugnatura di legno, si nota che tutta l'asticella si carica; la carica prodotta nell'area strofinata si muove nelle altre zone del metallo. Dobbiamo concludere che ci sono materiali che permettono alle cariche di muoversi liberamente al loro interno, che **chiameremo conduttori elettrici**, e materiali che non permettono alle cariche di spostarsi facilmente dalla posizione in cui sono poste, che chiameremo **isolanti elettrici** o **dielettrici**. Questa proprietà sarà quantificata in seguito introducendo il concetto di resistività.

Il legno è un isolante, il nostro corpo un conduttore; questo fa sì che se cerchiamo di elettrizzare per strofinio un'asticella di metallo tenendola direttamente con una mano non si osserva l'elettrizzazione. La carica dell'asticella "si scarica" attraverso il nostro corpo.

I migliori conduttori sono tutti i metalli proprio in conseguenza del legame chimico con cui essi si costituiscono: il **legame metallico**.

Gli atomi del metallo hanno in genere pochi elettroni di valenza che sono facilmente delocalizzabili in un reticolo di atomi metallici caricati positivamente.

Si può immaginare un metallo come un reticolo di ioni positivi tenuti uniti da una nuvola di elettroni di valenza in comune a tutto il reticolo. Di conseguenza si hanno elettroni liberi di muoversi all'interno di tutto il reticolo.

11.3 Elettroscopio

L'elettroscopio è uno strumento che permette di riconoscere se un corpo è carico elettricamente, ma a differenza dell'elettrometro non può quantificarne la carica elettrica. Si tratta di un rivelatore di carica di tipo qualitativo (presenza o meno di cariche) e non quantitativo (la misura di quante cariche ci sono).

L'apparecchio fu messo a punto da Alessandro Volta verso il 1780.

come funziona

Esso è costituito da un pomello metallico collegato, tramite un'asta metallica, a due sottili lamine metalliche chiamate "foglioline". Que-

YouTube

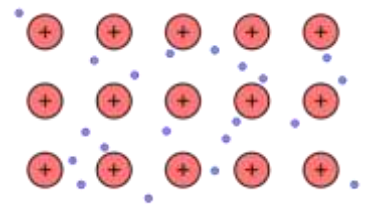


Figura 230 Struttura atomica e legame tra elettroni e protoni

YouTube

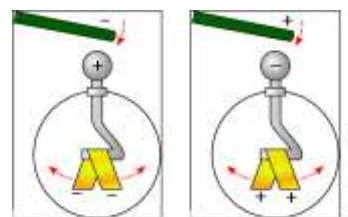


Figura 231 Elettroscopio a foglioline d'oro



Laboratorio 28 Costruire un elettroscopio a foglie

ste ultime sono racchiuse in un recipiente di vetro per evitare il disturbo da parte di correnti d'aria. Avvicinando al pomello metallico, senza toccarlo, un corpo caricato elettricamente, ad esempio una bacchetta di plastica strofinata con un panno di lana, si vedranno le due lamine divergere. La vicinanza del corpo elettricamente carico produce il fenomeno fisico dell'induzione elettrostatica: sul pomello, la parte dell'elettroscopio più vicina alla bacchetta, si concentrerà della carica di segno opposto rispetto alla carica della bacchetta, mentre sulle foglioline si concentrerà della carica di segno uguale a quella della bacchetta. Le due lamine saranno pertanto cariche dello stesso segno e si respingeranno.

Allontanando il corpo carico, detto anche corpo induttore, le due lamine tornano ad avvicinarsi. Se col corpo induttore si tocca il terminale superiore, le due foglie rimarranno divise anche dopo il suo allontanamento perché in questo modo una parte della carica del corpo induttore si trasferisce all'elettroscopio. Le foglioline si riavvicineranno e poi a poco a poco perderanno la carica



11.4 Legge di Coulomb

nel paragrafo 11.1 abbiamo accennato alla presenza di forze tra cariche cui abbiamo dato il nome di forze elettriche. *Charles Augustine de Coulomb* (1736-1806) riuscì a quantificare l'entità di tale forza, indicando per altro anche direzione e verso nei diversi casi.

Coulomb determinò la legge che esprime la forza elettrica tra due cariche in funzione della distanza e della grandezza delle cariche.

Operò con delle sferette aventi una determinata carica e le pose a varie distanze, dalle misure fatte ricavò che se la distanza raddoppia la forza diviene quattro volte più piccola, se la distanza triplica la forza diviene nove volte più piccola, se la distanza si dimezza la forza diviene quattro volte più grande ecc...

Quindi la forza di interazione tra due cariche puntiformi è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. Ricavò inoltre che non variando la distanza, la forza è direttamente proporzionale a ciascuna delle due cariche, quindi al loro prodotto.

Possiamo così enunciare la legge di Coulomb, che afferma che:

Se poniamo in vicinanza due cariche puntiformi q e Q posti ad una certa distanza r , si attraggono o si respingono con una forza \vec{F} il cui modulo dipende dal prodotto delle stesse cariche ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza:

$$F = k \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad (1)$$



Laboratorio 29 Legge di Coulomb

ovvero:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad (2)$$

ove $\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$ viene detta **costante di Coulomb** e vale:

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \quad (3)$$

ed ϵ_0 è chiamata **costante dielettrica nel vuoto** ed assume il valore:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2} \quad (4)$$

La sua unità di misura è evidentemente quella appena indicata, sotto l'aspetto dimensionale, visto che il valore di k , nel prodotto con le due cariche fratto una distanza al quadrato, deve restituire come risultato Newton.

In seguito chiariremo il significato di dielettrico.

Per quanto riguarda **direzione** e **verso** delle reciproche forze di attrazione e repulsione, vale quanto rappresentato di seguito:

Quando le cariche hanno lo stesso segno, le cariche puntiformi sono soggette ad una forza che si muove lungo la direzione della retta congiungente entrambi i punti e con verso uscente da ciascuna di esse (forza repulsiva).

Se invece le cariche sono di segno opposto, la direzione è sempre quella della congiungente, ma il verso delle forze è diretto verso l'altra carica (forza attrattiva).

Notazione

Nella figura di prima abbiamo utilizzato, la notazione \vec{F}_{Q-q} per indicare la forza che la carica Q esercita sulla carica q . In maniera analoga \vec{F}_{q-Q} per indicare la forza che la carica q esercita sulla carica Q .

11.5 Dipolo elettrico

In elettrostatica un dipolo elettrico è un sistema composto da due cariche elettriche uguali e opposte di segno e separate da una distanza costante nel tempo.

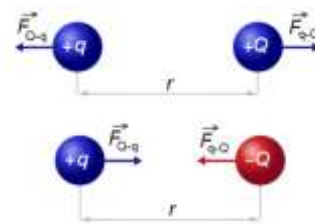
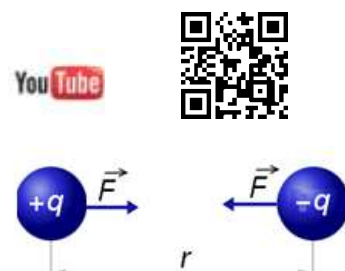


Figura 232 Direzione dei vettori forza tra cariche elettriche



È uno dei più semplici sistemi di cariche che si possano studiare.

Figura 233 Dipolo

11.6 I materiali dielettrici

Si chiamano isolanti o **dielettrici** i materiali che non hanno cariche libere e quindi non conducono l'elettricità. Essa dipende dal materiale di cui è fatto il dielettrico stesso e viene chiamata **costante dielettrica** relativa ed è una grandezza adimensionale che si indica con il simbolo ϵ_r .

| Materiale | Costante dielettrica ϵ_r |
|------------|-----------------------------------|
| Aria | 1,0006 |
| Carta | 3,7 |
| Gomma | 7 |
| Vetro | 4,7 |
| Porcellana | 6,5 |
| Acqua | 80 |

YouTube



11.7 Legge di Coulomb generalizzata

Laddove tra le due cariche puntiformi venga posto un materiale dielettrico, la forza espressa con la formula (2) assume la forma:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad (5)$$

con ϵ_r , come anzidetto, costante dielettrica relativa al materiale.

YouTube



11.8 Concetto di campo

Il concetto di **campo** è fondamentale per la fisica e la sua introduzione ha rappresentato una delle più grandi rivoluzioni avvenute nella fisica. E' stato introdotto e usato in modo esplicito per la prima volta da *Eulero* per descrivere il comportamento dei fluidi. Tale concetto venne applicato ad innumerevoli situazioni a partire dal XVIII sec. Ma solo con *Faraday* e *Maxwell* si affermò definitivamente. Secondo la teoria dei campi ogni effetto fisico si propaga nello spazio con velocità finita e lo spazio è un luogo perturbato che può essere descritto in funzione di alcune grandezze. Un campo indica l'insieme dei valori che una grandezza assume in ogni punto di una regione di spazio. quindi:

in una certa regione dello spazio esiste un campo se ad ogni punto dello spazio, si può associare il valore di una determinata grandezza fisica.

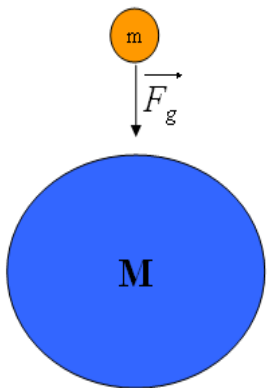


Figura 234 Concetto di Campo

I campi possono essere **scalari** o **vettoriali**. I primo sono quelli caratterizzati in ogni punto dal valore assunto in quel punto da una grandezza scalare (ad esempio la temperatura). Quelli vettoriali sono quelli descritti da una grandezza vettoriale (ad esempio la velocità).

Un campo si dice **uniforme** se esso è costante nello spazio, **stazionario** se è costante nel tempo.

Vettore intensità del campo

Dato un campo di forze, poniamo in un suo generico punto P un ente fisico esploratore, capace di sperimentare le forze di tale campo senza però perturbarlo con la sua presenza; consideriamo quindi il rapporto tra la forza che agisce sull'ente fisico esploratore ed il valore di tale ente.

Si chiama vettore intensità del campo in P il vettore che si ottiene come rapporto tra la forza che nel punto P agisce sull'ente fisico esploratore ed il valore dell'ente fisico stesso.

Un esempio di campo è quello gravitazionale \vec{g} , dato dalla formula:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m} \quad (6)$$

dove \vec{F}_g è la forza che il corpo di massa M esercita sul corpo di massa m .

il vettore intensità di campo gravitazionale in un punto P non dipende quindi dalla massa esploratrice m , ma dipende unicamente dalla massa M che crea il campo e dalla distanza da M del punto P considerato.

Le linee di forza di un campo

Sono linee orientate disegnate in modo tale che in ogni punto la tangente alla linea di forza fornisca la direzione del campo in quel punto, mentre il verso del campo è indicato dall'orientamento della linea.

Campo elettrico generato da una carica puntiforme

In analogia con quanto accade tra due masse poste ad una certa distanza, di cui una presa come massa di prova e l'altra molto più grande in modo da far sì che la presenza della massa di prova non produca alcuna perturbazione, anche la presenza di una carica elettrica puntiforme è in grado di produrre nell'ambiente circostante un campo elettrico.

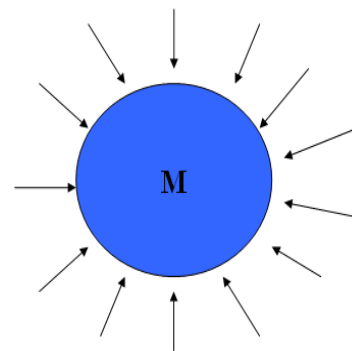


Figura 235 Linee di forza del Campo gravitazionale

Consideriamo quindi due cariche Q e q poste ad una certa distanza r , per la legge di Coulomb avremo:

$$F = k \frac{q \cdot Q}{r^2} \quad (7)$$

Se adesso consideriamo $+q$ come *carica di prova positiva*, che viene portata all'infinito, alla stessa distanza r in cui si trovava inizialmente, il campo generato dalla carica Q sarà definito come:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (8)$$

da cui sostituendo nella (7) possiamo ricavare il modulo del campo elettrico \vec{E} , ottenendo:

$$E = \frac{k \frac{q \cdot Q}{r^2}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (9)$$

Il campo elettrico è quindi un campo vettoriale rappresentato attraverso linee di campo: una carica puntiforme positiva produce le linee di campo radiali uscenti da essa, ed è definita sorgente delle linee di forza, mentre per una carica puntiforme negativa le linee di campo sono radiali ed entranti verso la carica, che è così definita pozzo di linee di forza. Le linee di livello a potenziale elettrico costante sono dette superfici equipotenziali, e sono perpendicolari alle linee di flusso del campo elettrico.

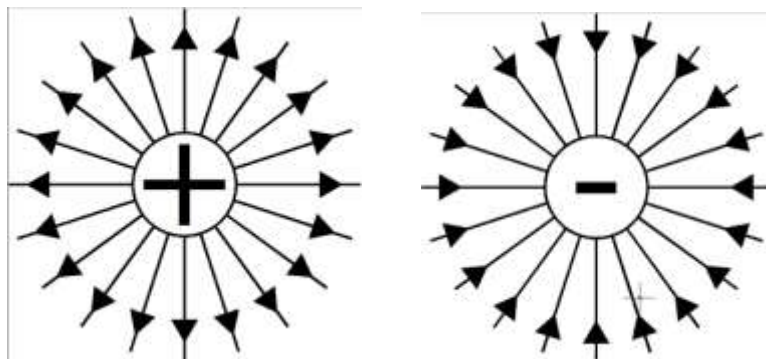


Figura 236 Linee di forza generate da cariche positive e negative

da notare che essendo q una grandezza scalare, il vettore \vec{E} avrà stessa direzione. Per quanto riguarda il verso esso sarà lo stesso della forza \vec{F} se la carica generatrice Q è positiva, mentre sarà opposto a quello di \vec{F} se la carica generatrice Q è di segno negativo.

Campo elettrico generato da più cariche puntiformi

Supponiamo ora che intorno alla carica di prova $+q$ siano presenti più cariche elettriche, di intensità molto più grande di quella della carica di prova $+q$. La forza che agisce su una carica $+q$ posta in un punto P è la risultante delle forze dovute ad ogni singola carica:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n \quad (10)$$

per cui il campo elettrico generato dalle n cariche è la risultante delle intensità dei campi generati dalle singole cariche:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (11)$$

Nella figura (a) possiamo osservare il vettore campo elettrico \vec{E} generato da due cariche positive $+Q_1$ e $+Q_2$ che agiscono su una carica puntiforme $+q$ posta nelle loro vicinanze.

Situazioni analoghe, ma con cariche di segno diverse, per le figure (b) e (c).

Le linee di forza del campo elettrico

Se prendiamo in considerazione un dipolo elettrico, ovvero una coppia di cariche elettriche aventi stessa intensità ma segno opposto, le linee di forza avranno la seguente forma:

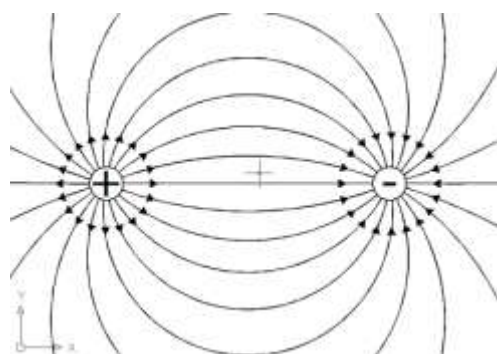


Figura 240 Linee di campo nel dipolo elettrico

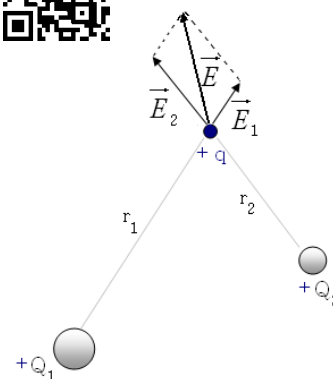


Figura 237 (a) cariche positive

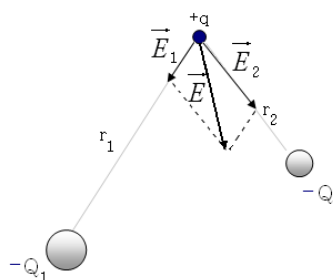


Figura 238 (b) cariche entrambi negative

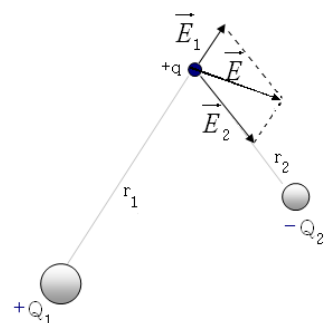
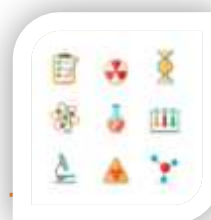


Figura 239 (c) una carica positiva ed una negativa



Campo conservativo

Una forza si dice conservativa se il lavoro che essa compie in un percorso chiuso è nullo.

In simboli:

$$\sum \vec{F}_i \cdot \vec{s}_i = 0 \quad (12)$$

Un'altra definizione di forza conservativa: una forza è detta conservativa se il lavoro compiuto per portare una carica da un punto **A** ad un punto **B**, non dipende dalla traiettoria, ma solo dalla distanza.

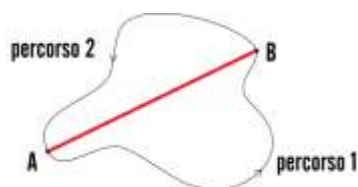


Figura 241 Traiettorie nei campi conservativi

Un campo di forze è conservativo se le forze del campo sono conservative.

Infatti, il campo elettrostatico è un campo conservativo perchè se una carica si sposta lungo un percorso chiuso, il lavoro totale fatto dalle forze del campo (cioè dalla forza elettrica) è nullo.



11.9 Flusso di un vettore

Supponiamo di avere un campo elettrico \vec{E} uniforme (figura a), Consideriamo poi una superficie piana S la cui orientazione positiva sia definita dalla normale \vec{n} uscente da essa (figura b).



figura (a)

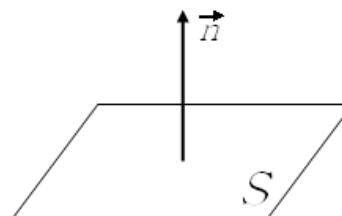


figura (b)

Figura 242 Flusso di un vettore

Se disponiamo la superficie S all'interno del campo \vec{E} , un certo numero di linee di forza attraverserà questa superficie e questo numero

dipenderà dall'orientazione della superficie stessa rispetto al verso delle linee di forza.

Quando S è perpendicolare alle linee di forza (quando cioè \vec{n} è parallelo ad esse) allora la superficie sarà attraversata dal maggior numero possibile di linee di forza. Quando S è parallela alle linee di forza (quando cioè \vec{n} è perpendicolare ad esse) allora il numero di linee di forza che attraverserà la superficie sarà uguale a zero.

Il numero di linee di forza che attraversa una superficie si definisce **flusso** e si indica con Φ_s .

Se le linee di forza sono originate, come nel nostro caso, da un campo elettrostatico \vec{E} , si avrà un flusso di linee di forza di un campo \vec{E} attraverso una superficie S e si indicherà con $\Phi_s(\vec{E})$.

E' facile convincersi che questo flusso è tanto più grande quanto più grande è E (in questo caso sono più numerose le linee di forza secondo la convenzione di Faraday), quanto maggiore è l'estensione della superficie S e quanto più essa si trova vicina alla posizione perpendicolare rispetto ad esse.

Tutto ciò si può riassumere nella relazione:

$$\Phi_s(\vec{E}) = \vec{E} \times \vec{n}S = E \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (13)$$

dove α è l'angolo formato tra la normale \vec{n} ed il verso delle linee di forza e il segno " \times " indica il prodotto vettoriale (vedi par. 2.9) tra i vettori \vec{E} ed $\vec{n}S$.

Si vede subito che quando (vedi tabella par. 2.17) $\alpha = 0$, risultando $\cos\alpha = 1$ (la superficie è perpendicolare alle linee di forza), il flusso è massimo e vale $E \cdot S$.

Altro caso limite è quando $\alpha = 90^\circ$, essendo $\cos\alpha = 0$ (la superficie è parallela alle linee di forza), il flusso è nullo. L'ultimo caso limite che va considerato è quando la superficie è perpendicolare alle linee di forza, ma i versi di \vec{n} e delle linee di forza sono opposti (questo fatto è rappresentato da $\alpha = 180^\circ$, da cui $\cos\alpha = -1$); in questo caso il flusso assume un massimo negativo e vale $-E \cdot S$.

Nel caso più generale, quando la superficie S non è piana, supponiamo ad esempio che sia sferica, bisognerà considerare su di essa svariate piccole superfici (con buona approssimazione piane) di area ΔS e per ciascuna di esse calcolarsi il flusso elementare $\Delta\Phi_{\Delta S}(\vec{E})$.

In questo caso, riferendosi alla figura affianco, il flusso totale sarà la somma di tutti i flussi elementari.

Otterremo così:

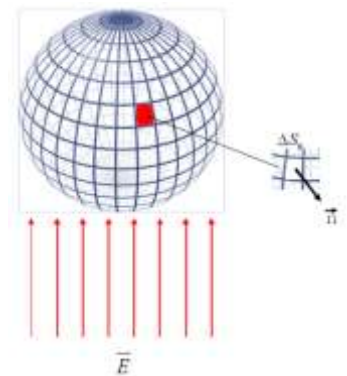


Figura 243 Flusso lungo una superficie sferica

$$\Phi_S(\vec{E}) = \sum \Delta\Phi_{\Delta S_1}(\vec{E}) + \Delta\Phi_{\Delta S_2}(\vec{E}) + \dots + \Delta\Phi_{\Delta S_n}(\vec{E})$$

da cui ricaviamo:

$$\Phi_S(\vec{E}) = \sum_i E \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (14)$$

11.10 Teorema di Gauss

Se supponiamo che la carica generatrice del campo sia tutta concentrata nel centro della sfera, essendo il campo radiale, in ogni punto della superficie sferica esso risulterà perpendicolare alla superficie, per cui l'angolo formato tra \vec{n} e la linea di forza sarà $\alpha = 0$ (da cui $\cos\alpha = 1$). Il flusso su ogni singolo elemento di superficie sarà allora:

$$\Phi_S(\vec{E}) = \sum (E \cdot \Delta S) \quad (15)$$

Osservando che S è costante (in quanto la distanza a cui è calcolato il campo elettrico è sempre la stessa) si può mettere in evidenza E , ottenendo:

$$\Phi_S(\vec{E}) = E \cdot \sum \Delta S \quad (16)$$

La superficie che noi consideriamo è una sfera e quindi la somma di tutte le superfici elementari ΔS darà la superficie della sfera $S = 4\pi r^2$. Si ha quindi:

$$\Phi_S(\vec{E}) = E \cdot 4\pi r^2 \quad (17)$$

Ricordando che in un campo radiale, nel vuoto, risulta:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (18)$$

sostituendo otteniamo:

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (19)$$

Questo risultato è in realtà molto più generale. Si può infatti dimostrare che esso è valido per una *qualsunque superficie chiusa* che contenga al suo interno una carica elettrica Q e va sotto il nome di **teorema di Gauss**.

Il teorema si può completare affermando che:

nei punti di un campo elettrostatico nei quali non vi sono cariche, il flusso di \vec{E} attraverso una superficie chiusa e, non contenente nessuna carica, è nullo.

Ciò significa che, mentre nel caso di una carica posta all'interno di una determinata superficie, tutte le linee di forza uscenti dalla carica

YouTube

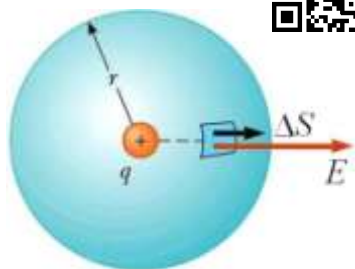


Figura 244 Teorema di Gauss

dovranno attraversare questa superficie dando un contributo al flusso pari a Q/ϵ_0 , nel caso invece di una superficie chiusa non contenente la carica, le linee di forza entranti da un qualunque lato della superficie, essendo radiali e non chiuse in sé, dovranno necessariamente uscire dall'altro lato della superficie, di modo che il flusso totale risulta nullo.

Una conseguenza di quanto detto è che il teorema di Gauss è equivalente alla legge di Coulomb con la differenza che il primo, noto il campo in ogni punto dello spazio, permette il calcolo della carica che si trova all'interno di una data zona di tale spazio, mentre il secondo, note le cariche, permette di calcolare il campo. In definitiva il teorema di Gauss per l'elettrostatica si esprime con la seguente relazione:

$$\Phi_S(\vec{E}) = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0} \quad (20)$$

Il Teorema di Gauss ci informa su una caratteristica importante del campo elettrostatico: le linee di campo nascono e muoiono in certi punti dello spazio dove sono poste le cariche sorgenti. Possiamo dire che il campo elettrostatico ha delle sorgenti.

Vedremo che questo non è valido per il campo magnetico: una legge analoga (Teorema di Gauss per il magnetismo) dice che il campo magnetico non ha sorgenti.

Con il Teorema di Gauss è possibile determinare il valore del campo elettrico in un punto, in funzione delle cariche sorgenti. Noi analizzeremo questo problema in due casi di particolare simmetria: una distribuzione uniforme di cariche (simmetria piana) e una singola carica puntiforme o sferica (simmetria sferica).

11.11 Gabbia di Faraday

Il funzionamento della gabbia di Faraday è spiegabile in funzione del teorema di Gauss che permette di descrivere la distribuzione di carica elettrica in un conduttore.

Intuitivamente, poiché le cariche di segno uguale si respingono, esse tendono a portarsi alla massima distanza reciproca, che corrisponde alla situazione in cui esse sono concentrate alla periferia del conduttore. Se la superficie è approssimabile ad un conduttore ideale (quale una superficie metallica chiusa), su di essa si determina una superficie equipotenziale, ovvero una superficie in cui il potenziale elettrico è identico in ogni punto.

Ne consegue che, in conseguenza del teorema di Gauss e della divergenza, non essendo presenti cariche all'interno, il campo elettrostatico

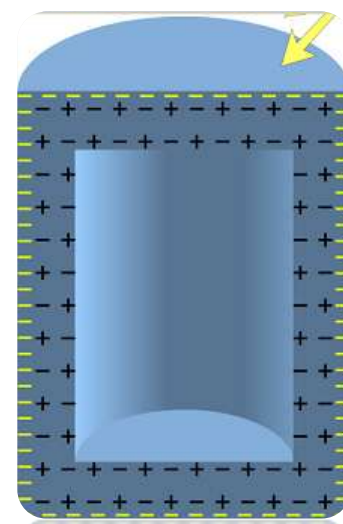


Figura 245 Gabbia di Faraday

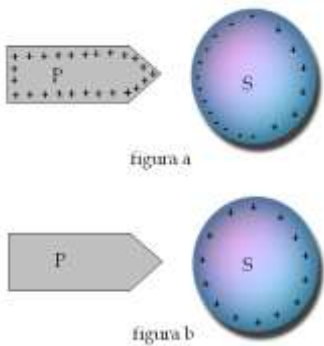


Figura 246 Potere delle punte

interno alla gabbia deve essere nullo, se la gabbia è immersa in un campo elettrico di molti kV/m .

Dal medesimo teorema di Gauss, deriva anche il principio di funzionamento del parafulmine a punta.

Il **potere delle punte** è la tendenza delle cariche elettriche ad accumularsi dove la superficie è più piccola, essendovi il campo elettrico più intenso.

È facile verificare che se avviciniamo ad un conduttore S inizialmente neutro un conduttore appuntito P, carica positivamente, il conduttore sferico si carica negativamente dal lato dove abbiamo avvicinato il conduttore P, mentre si carica positivamente dal lato opposto (figura a). Facendo trascorrere un po' di tempo, per via della ionizzazione dell'aria il conduttore P si scarica totalmente, mentre il conduttore S risulta caricato positivamente su tutta la sua superficie (figura b).

Il modello precedentemente descritto si applica a campi statici.

11.12 Applicazioni della gabbia di Faraday

Ogni volta che si ha necessità di proteggere un ambiente da campi elettrostatici viene utilizzata la Gabbia di Faraday, a volte anche inconsapevolmente, o perlomeno non è la causa primaria di tali costruzioni. Basti pensare ad alcuni esempi comuni: l'automobile o l'aereo. Essendo costruiti con materiali metallici, laddove anche detti veicoli vengono colpiti con un fulmine, che crea una scarica elettrica di intensità enorme, eppure se il passeggero rimane nel veicolo non subisce al suo interno alcun campo elettrostatico, avvalendosi del fatto che le cariche elettriche si distribuiranno sulla superficie esterna, mentre il campo elettrico all'interno rimarrà nullo.

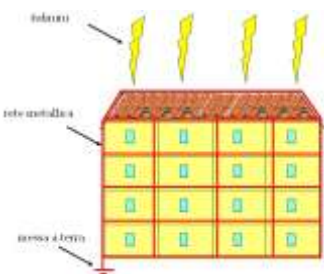


Figura 247 Schermatura in un edificio

Per lo stesso motivo gli edifici pubblici, quando sono costruiti a norma, intorno alla struttura esterna vengono provvisti con una fitta rete metallica, poi collegata a terra - che ha un potenziale minore rispetto al metallo - creando una vera e propria gabbia, in modo che un fulmine che colpisse l'edificio o che cadesse nelle immediate vicinanze, non produrrebbe alcun danno per chi si fosse posto al suo interno essendo nullo il campo elettrostatico provocato, fuori, dalla scarica elettrica del fulmine, in grado di produrre una differenza di potenziale compresa tra 1 e $10 \cdot 10^9 V$ (10 miliardi di Volt!).

Sempre riguardo all'evento atmosferico dei fulmini, va considerato che per ripararsi va sempre evitato di porsi sotto un albero, che si potrà anche proteggere dall'acqua, ma essendo il legno bagnato un conduttore, seppure pessimo, se colpito da un fulmine viene attraversato dallo stesso fino a terra, creando un campo elettrico nelle sue vicinanze. Chiunque sia posto nelle sue immediate vicinanze, anche a pochi metri, rischia la folgorazione con conseguenze che possono far giungere anche alla morte.



Figura 248 Fulmine

11.13 Energia potenziale elettrica

L'energia elettrostatica è definita come il lavoro necessario per portare un sistema di cariche elettriche, o più in generale una distribuzione di carica, in una data configurazione spaziale.

In analogia con quanto già studiato nel paragrafo 6.9 - Energia potenziale gravitazionale- anche il campo elettrico possiede una propria energia potenziale, indicata con U e nella stessa analogia espressa tramite una forza per uno spostamento. Avremo quindi:

$$U = F \cdot d \quad (21)$$

ponendo quindi come forza F quella espressa dalla legge di Coulomb e la distanza indicata con r , avremo:

$$U = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot r$$

da cui

$$U = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r} \quad (22)$$

11.14 Il potenziale elettrico

Il **potenziale elettrico** è una grandezza scalare di campo: ad ogni punto di un campo elettrico possiamo associare, oltre al vettore campo elettrico, anche un valore di potenziale, funzione della posizione spaziale del punto, ma indipendente dalla presenza o meno di cariche particolari in quel punto.

Anche per l'Energia potenziale gravitazionale avremmo potuto parlare di **potenziale gravitazionale**, rappresentato dal termine $g \cdot h$ che dipendeva quindi solo dall'altezza dal suolo e non dalla massa.

Si chiama quindi potenziale elettrico in un punto P di un campo elettrico il rapporto, indicato con $V(P)$, tra l'energia potenziale elettrica $U(P)$ che avrebbe una carica positiva q posta in quel punto e la carica stessa:

$$V(P) = \frac{U(P)}{q} \quad (23)$$

Il potenziale elettrico si misura in **volt** (simbolo V), dove

$$1V = \frac{1J}{1C}$$

avremo quindi che il potenziale elettrico è esprimibile dalla relazione:

YouTube



$$V = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (24)$$

dove Q è la carica generatrice del campo elettrico, mentre r è la distanza da detta carica.

Differenza di potenziale

La **differenza di potenziale** tra due punti immersi in un campo vettoriale conservativo corrisponde al lavoro necessario per spostare un elemento di valore unitario dal punto potenziale più basso al punto con maggior potenziale. Essa è univocamente definita: infatti, mentre il valore attribuito al potenziale dipende dalla scelta (arbitraria) di un punto a potenziale zero, la differenza di potenziale tra due punti non risente di questa scelta.

$$V_A - V_B = \frac{L}{q} \quad (25)$$

Spesso la differenza di potenziale viene indicata come **d.d.p.** .

E' possibile anche ricavare il lavoro compiuto dalla forza elettrica per spostare una carica dalla posizione A alla posizione B:

$$L = q \cdot (V_A - V_B) \quad (26)$$

CLIL Project

From the same theorem of Gauss, also derives the principle of operation of the lightning rod tip.

The **power of the tips** is the trend of the electric charges to accumulate where the surface is smaller, there being the electric field more intense.

It 'easy to verify that if you approach a terminal S initially neutral conductor pointed P. positively charged, the spherical conductor becomes negatively charged side where we approached the conductor P, while a positive charge on the opposite side (see picture). When you spend a bit 'of time, due to the ionization of the conductor P is completely discharged, while the terminal S is positively charged on the entire surface (Figure b).

The model described above applies to static fields.

Applications of the Faraday cage

Whenever you need to protect environment by electrostatic fields is used Faraday cage, sometimes even unconsciously, or at least it is not the primary cause of such constructions. Just think of some common examples: the car or plane. Being made of metallic materials, where such vehicles are also hit with a lightning bolt, which creates an electrical discharge of enormous intensity, yet if the passenger in the vehicle is not subject to any electrostatic field inside it, making use of the fact that the electric charges will be distributed on the outer surface, while the electric field inside will remain zero.

For the same reason the public buildings, when they are constructed in accordance with, around the outer structure are provided with a dense mesh, then connected to the ground - which has a lower potential than the metal - creating a real cage, so that a lightning strike or the building that would fall in the immediate vicinity, would not produce any damage to those who had placed inside being nothing the electrostatic field caused out by electrical discharge of lightning, capable of producing a potential difference of between $1 \text{ e } 10 \cdot 10^9 \text{ V}$ (10 billion Volt !).

Still on atmospheric event of lightning, should be considered not only for protection should always be avoided to place themselves under a tree, you can also protect the water, but as the wet wood a conductor, albeit bad, if struck by lightning is crossed by the same down to the ground, creating an electric field in its vicinity. Anyone who is placed in its immediate vicinity, only a few meters, risks electrocution with consequences that can be reached even death.

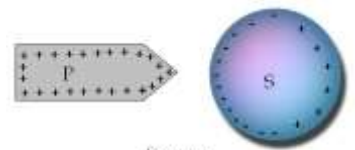


figura a

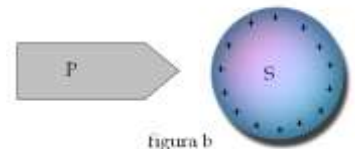
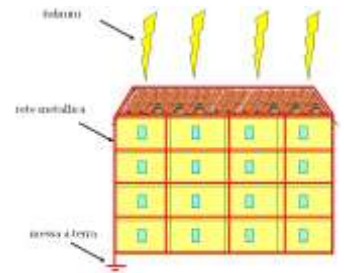


figura b



11.15 Distribuzione di cariche su un conduttore

la carica elettrica in un conduttore carico in equilibrio elettrostatico si distribuisce sulla superficie esterna del conduttore

Se posizionassimo un elettroscopio all'interno della superficie carica, ponendolo in contatto con la superficie interna, constateremmo che lo strumento non rileverebbe alcuna presenza di cariche, segno che non solo non vi è presenza di cariche all'interno della gabbia, ma neppure sulla superficie interna.



11.16 Densità superficiale di carica

La densità superficiale di una grandezza è l'espressione di come sia concentrata quella grandezza per l'unità di superficie. Trattandosi di cariche elettriche, se abbiamo una carica elettrica Q distribuita lungo una superficie S , avremo:

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (27)$$

la cui unità di misura risulta essere quindi C/m^2 .

Se la superficie considerata è piana ed infinita, conoscendo la densità di carica σ possiamo ricavare la quantità di carica ΔQ di una piccola porzione di piano ΔS , risultando:

$$\Delta Q = \sigma \cdot \Delta S \quad (28)$$

Se consideriamo una superficie cilindrica chiusa avente base S ed appoggiata sul piano attraversata al campo elettrico \vec{E} , tenuto conto la superficie laterale è perpendicolare alla superficie piano, non produrrà alcun flusso, mentre attraverso le due superfici di base, potremo esprimere il flusso come:

$$\Phi = E \cdot S \cdot 2 \quad (29)$$

Confrontata con la formula (22), otteniamo:

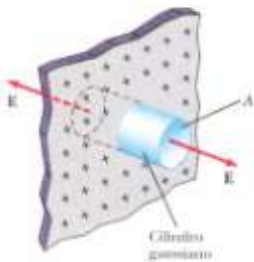
$$2 \cdot E \cdot S = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

da cui ricavando il modulo del campo elettrico otteniamo:

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot S} \quad (30)$$

È possibile così esprimere il campo elettrico in funzione della densità superficiale di carica σ , tenuto conto della formula (27), ottenendo:

Campo di una distribuzione di carica piana uniforme indefinita



Sia σ la densità superficiale di carica

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Figura 249 Distribuzione superficiale di carica

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0} \quad (31)$$

In questo modo il campo elettrico è espresso non più come generato da una singola carica puntiforme, ma generato da una distribuzione piana di cariche.

11.17 Campo elettrico generato da un filo carico

Utilizzando il teorema di Gauss dimostreremo che un filo infinito uniformemente carico da origine ad un campo elettrico il cui vettore di intensità è direttamente proporzionale alla densità di carica per unità di lunghezza ed inversamente proporzionale alla distanza dal filo.

Prendiamo per superficie su cui calcolare il flusso totale uscente un cilindro con l'asse di simmetria coincidente con il filo e le basi perpendicolari al filo stesso.

Sperimentalmente osserviamo che le linee di forza sono tutte semirette perpendicolari al filo, uscenti dallo stesso, ed inoltre il valore di E (per simmetria, anche ruotando il filo, il campo non si modifica) ad uguale distanza dal filo assume sempre lo stesso valore.

Il flusso totale è uguale alla somma dei flussi uscenti dalle superfici di base più quello uscente dalla superficie laterale. Il flusso uscente dalle superfici di base vale 0 essendo di 90° l'angolo che si forma tra la normale alla superficie e la direzione della linea di forza e pertanto il loro prodotto scalare vale zero.

Per determinare il flusso uscente dalla superficie laterale la suddividiamo in n superfici elementari ΔS così piccole che siano praticamente piane, per cui il campo elettrico uscente risulti essere sempre costante in modulo, direzione e verso, in ogni punto di ΔS .

Ricordiamoci che la normale a ciascuna superficie è sempre parallela alle linee del campo in ogni punto della stessa superficie. Sappiamo che il flusso attraverso ciascuna superficie ΔS è dato dal prodotto del campo elettrico per la superficie per il coseno dell'angolo formato dal vettore campo elettrico e la normale alla superficie che, essendo paralleli, il coseno vale sempre uno ($\cos 0 = 1$). Perciò il flusso totale sarà dato dalla somma dei flussi parziali, ovvero di ciascun flusso attraverso ciascuna superficie cioè:

$$\Phi = E \cdot \Delta S_1 + E \cdot \Delta S_2 + \dots + E \cdot \Delta S_n + \dots$$

ma risultando:

YouTube

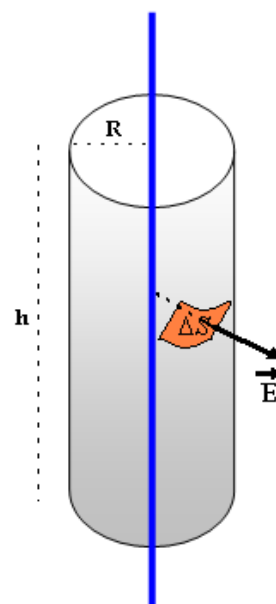


Figura 250 Campo generato da una distribuzione lineare di cariche

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_1 + \dots = S$$

e ricordando dalla geometria che la superficie laterale di un cilindro risulta $2 \cdot \pi \cdot R \cdot h$, otteniamo:

$$\Phi = E \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h \quad (32)$$

In analogia a quanto già considerato per la distribuzione superficiale di cariche, nel paragrafo precedente, è possibile considerare una distribuzione lineare di cariche, distribuite lungo un filo conduttore di lunghezza h , dove indicata con λ tale densità lineare, otteniamo:

$$\lambda = \frac{Q}{h} \quad (33)$$

Da questa, considerato che $Q = \lambda \cdot h$ e ricordando che $\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$, sostituendo nella (32) otteniamo:

$$\Phi = E \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h = \frac{\lambda \cdot h}{\epsilon_0} \quad (34)$$

da cui semplificando h da ambo i membri ed esplicitando il modulo del campo, otteniamo:

$$E = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \epsilon_0} \quad (35)$$

che rappresenta il modulo del campo elettrico generato da un filo conduttore carico ad una distanza R da esso.

Dalla stessa si potrà notare come non vi sia alcuna dipendenza dalla lunghezza del conduttore.

Possiamo così affermare che

il campo elettrico \vec{E} , uguale ad una certa distanza dal conduttore, è indipendentemente dalla lunghezza del filo.

11.18 Campo elettrico generato da una distribuzione di cariche su una sfera isolante

In maniera del tutto analoga di quanto appena visto, solo considerando la densità volumica di carica $\rho = \frac{Q}{V}$ e che il volume di una sfera è pari a $V = \frac{4}{3}\pi \cdot R^3$, otteniamo che il campo elettrico generato ad una distanza r , con $r < R$ (quindi nella sfera) risulta:

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^3} \cdot r \quad (36)$$

Nel suo centro (quando $r = R$) il campo risulta massimo, ottenendo quindi:

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^2} \quad (37)$$

Se ci poniamo invece al di fuori della sfera ($r > R$), il campo elettrico risulterà valere:

$$E = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (38)$$

11.19 Campo elettrico generato da una distribuzione di cariche su una sfera conduttrice

Su una sfera conduttrice, anche in conseguenza del Teorema di Gauss, le cariche si distribuiscono tutte lungo la superficie esterna. Anche se immaginassimo che all'interno ci fossero cariche, queste tenderebbero ad allontanarsi il più possibile le une dalle altre, distribuendosi appunto lungo la superficie esterna, che rappresenta la massima distanza che potranno avere tra di loro su quella superficie.

Detto R il raggio di tale sfera ed r una possibile distanza dal centro della stessa, avremo quindi che

- per $r < R$ il campo elettrico sarà $E = 0$
- per $r = R$ il campo elettrico sarà $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2}$
- per $r > R$ il campo elettrico sarà $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$

come se tutta la carica fosse concentrata nel suo centro.

YouTube

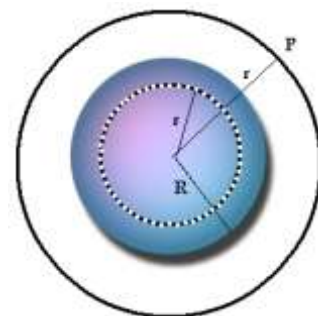


Figura 251 Campo generato da una distribuzione sferica di cariche su una sfera isolante

YouTube

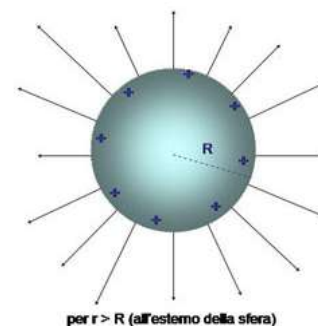


Figura 252 Campo generato da una distribuzione sferica di cariche su una sfera conduttrice

11.20 I condensatori

Quando poniamo due lastre metalliche in vicinanza tra di loro elettizzate con cariche elettriche di segno opposto, siamo in presenza di un dispositivo che prende il nome di **condensatore piano**.

Un condensatore è costituito, in linea di principio, da due conduttori isolati e posti a distanza finita, detti **armature**. Caricando i due conduttori con carica opposta, si forma tra di essi un campo elettrico, e si produce quindi una differenza di potenziale.

Il simbolo grafico per rappresentare un condensatore in un circuito è il seguente:

In realtà per caricare la seconda armatura, sarà sufficiente collegarla a terra e per induzione elettrostatica verrà così caricata con una carica $-Q$.

Le linee di forza del campo elettrico generato dalla differenza di potenziale tra le due armature, al suo interno, sarà perpendicolare alle stesse e con verso proveniente dall'armatura carica positivamente verso quella carica negativamente.

Esso risulta uniforme all'interno delle armature, man mano che ci avviciniamo ai bordi però inizia a deviare, non risultando più uniforme. In ogni caso, possiamo assumere che il campo elettrico è uniforme, malgrado questa deformazioni ai bordi.

E' interessante rilevare cosa accada **al di fuori delle armature**, sia dal lato di quella caricata positivamente che dall'altra.

I campi elettrici generati da ciascuna distribuzione superficiale di carica risultano essere, esternamente al condensatore, di pari modulo ma segno sempre opposto, in modo che la risultante del campo risulta nulla.

Al suo interno, invece i campi sovrappongono i loro effetti, risultando doppio rispetto a quello prodotto dalla singola armatura.

Rispetto all'armatura 1 caricata positivamente, il campo elettrico è uscente dalla stessa, mentre per l'armatura 2 il campo elettrico è sempre entrante (da ambo i lati). Questo fa sì che al di fuori dell'armatura di sinistra i due campi, come si vede dalla figura, sono uguali in modulo ma opposti in verso, quindi la loro somma vettoriale è nulla. Stessa cosa accade al di fuori dell'armatura 2.

All'interno invece, i campi elettrici prodotti da ciascuna distribuzione superficiale di carica, risultano avere lo stesso verso, oltre che stesso modulo e direzione, quindi la somma vettoriale risulta produrre un vettore con stessa direzione, stesso verso ma modulo doppio rispetto ad ognuno.

Ricordando la formula (31), la distribuzione superficiale di cariche

risulta $E_i = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon_0}$, e considerato che $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, considerando i

loro moduli ed il fatto che sono vettori concordi, otteniamo:

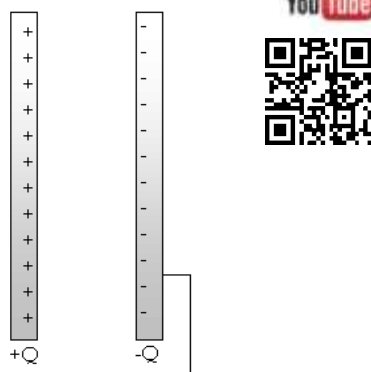


Figura 253 Condensatore elettrico

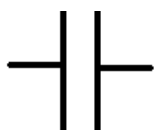


Figura 254 simbolo del condensatore utilizzato nei circuiti



Laboratorio 31 Condensatori

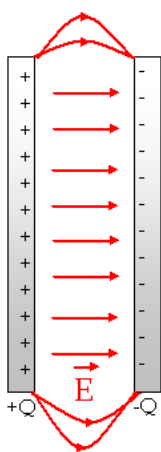


Figura 255 Campo tra le armature di un condensatore ed effetto di bordo

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (39)$$

che rappresenta l'intensità del campo elettrico tra le armature di un condensatore piano.

11.21 La capacità elettrica

La capacità è una grandezza caratteristica del condensatore. Normalmente si identifica il dispositivo con la sua capacità, anche se evidentemente sono concetti diversi.

La capacità dipende dalle caratteristiche geometriche del condensatore (forma, estensione e distanza delle armature) e dal tipo di dielettrico interposto tra le armature.

I condensatori possono avere varie forme: piani, cilindrici con armature concentriche o con armature arrotolate strettamente.

La legge di Gauss (vedi paragrafi 11.10 e 11.16) permette di determinare facilmente la capacità di un condensatore piano (con armature piane e parallele).

Partiamo dalla definizione di capacità come rapporto tra la carica Q che accumulata sulle piastre e la differenza di potenziale ΔV tra di esse:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (40)$$

ovvero, la formula inversa:

$$Q = C \cdot \Delta V \quad (41)$$

È possibile dimostrare come la differenza di potenziale ΔV è data dal prodotto del campo elettrico E che si forma all'interno delle piastre e la distanza d tra di esse:

$$\Delta V = E \cdot d \quad (42)$$

da cui sostituendo nella formula (40) otteniamo:

$$C = \frac{Q}{E \cdot d} \quad (43)$$

Ricordando inoltre la relazione (31), possiamo esprimere la capacità di un condensatore piano come:

$$C = \frac{Q \cdot \epsilon_0}{\sigma \cdot d} \quad (44)$$

dove la densità superficiale di carica σ è esprimibile come $\sigma = \frac{Q}{S}$,

da cui si ottiene:

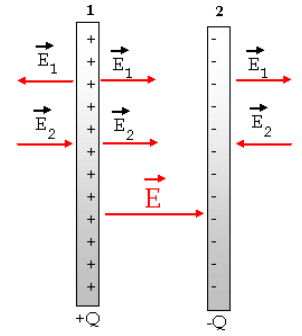


Figura 256 Campo elettrico dentro e fuori le armature



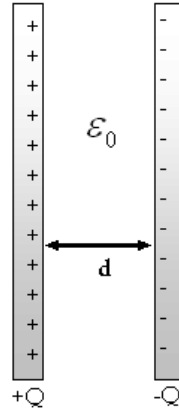
Figura 257 Alcuni condensatori che troviamo normalmente nei circuiti elettrici

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (45)$$

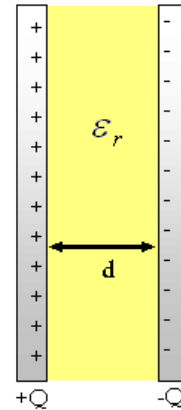
Per un condensatore piano la capacità è direttamente proporzionale alla superficie delle piastre e inversamente proporzionale alla loro distanza.

Figura 258
Condensatore
con e senza
materiale die-
lettrico

Se all'interno
del dielettri-
co viene
immeso un
mezzo iso-



nel vuoto



con un dielettrico

lante diverso dal vuoto, bisogna sostituire ad ϵ_0 la costante dielettrica del mezzo $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ (con ϵ_r costante dielettrica relativa al materiale - tabella del paragrafo 11.5):

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad (46)$$

L'unità di misura della capacità è il **farad**, il quale risulta:

$$1F = 1C \cdot 1V^{-1} = m^{-2} \cdot Kg^{-1} \cdot s^2 \cdot C^2$$

Nella pratica si verifica che il farad è un'unità troppo grande e quindi si usano i sottomultipli come il μF (*micro Farad*) e il pF (*pico farad*).

11.22 Tipi di condensatori

Oltre a quelli piani esistono anche condensatori cilindrici e sferici. Per i **condensatori cilindrici** la capacità vale:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{h}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (47)$$

dove h è la lunghezza del cilindro, R_1 il raggio esterno ed R_2 il raggio interno del cilindro pieno, mentre **ln**, nella formula, indica il logaritmo naturale (logaritmo in base e) del rapporto indicato.

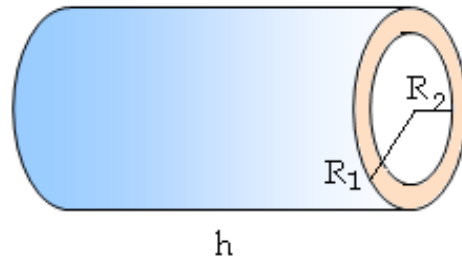


Figura 259 Condensatore cilindrico

Per i **condensatori sferici** la capacità vale:

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2} \quad (47)$$

dove R_1 è il raggio esterno mentre R_2 il raggio interno della sfera piena.

Si pensi che la Terra può essere vista come un grosso condensatore sferico, la cui Capacità è di $1mF$, che è una capacità elevatissima rispetto a quella dei condensatori elettrici, che si costruiscono.

11.23 La polarizzazione di un dielettrico

All'interno di un condensatore può esserci semplicemente uno spazio vuoto oppure un mezzo costituito a sua volta da molecole: alcune molecole (dette **apolari**) sono dotate di una simmetria interna in modo tale che il centro delle cariche positive coincide con quello delle cariche negative.

Per altre molecole (come quella dell'acqua), dette **polari**, questo non avviene: i centri delle cariche positive e negative si trovano ad una certa distanza d . La molecola dell'acqua (H_2O) è polare perché il centro della carica positiva è spostato verso gli atomi di idrogeno, mentre quello della carica negativa è spostato verso l'atomo di ossigeno.

Le molecole polari si comportano come microscopici dipoli elettrici caratterizzati dal valore assoluto della carica q e dalla distanza d tra le due cariche opposte.

Si chiama **momento di dipolo elettrico** una grandezza vettoriale \vec{p} che ha direzione e verso dalla carica negativa a quella positiva e modulo

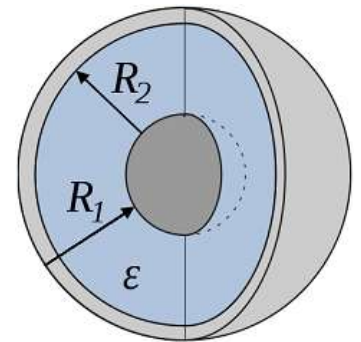


Figura 260 Condensatore sferico

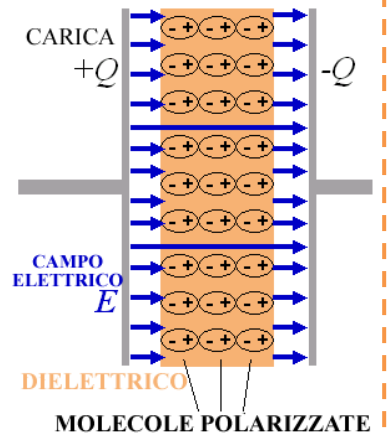


Figura 261 Molecole polarizzate tra le armature di un condensatore

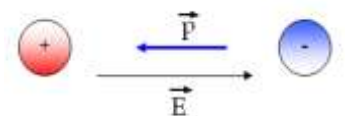


Figura 262 Momento di dipolo elettrico

$$p = q \cdot d \quad (48)$$

L'unità di misura nel sistema SI del momento di **dipolo elettrico** sono:

$$[p] = [\text{Coulomb}] \cdot [\text{metro}]$$

Spesso una molecola polare viene rappresentata schematicamente per mezzo del vettore \vec{p} : si noti che \vec{p} ha la punta rivolta verso la carica negativa, quindi ha verso contrario a quello del campo elettrico \vec{E} di dipolo (le linee del campo elettrico creato dal dipolo vanno dalla carica positiva a quella negativa).

Tra le piastre di un condensatore carico viene inserito un mezzo formato da molecole polari il cui momento di dipolo p è orientato a caso rispetto alle linee del campo elettrico E esistente tra le piastre. Le molecole tendono ad allineare i momenti di dipolo nello stesso verso del campo.

Il dipolo è sottoposto ad una coppia di forze (uguali e opposte). La forza risultante sul dipolo è pertanto nulla, ma non è nullo il momento meccanico (o momento torcente) e quindi la molecola è sottoposta ad una rotazione. La molecola ruota fin quando si annulla il momento meccanico, cioè quando si annulla il braccio della coppia.

Le molecole polari immerse in un campo elettrico tendono quindi ad allinearsi alle linee di campo, con il momento di dipolo concorde con il verso del campo: si dice che il dielettrico subisce una **polarizzazione per orientamento**.

In realtà, a causa della agitazione termica disordinata, solo una piccola percentuale delle molecole riesce ad orientarsi.

In un condensatore carico, come detto, si crea un campo elettrico E costante. L'inserimento di un mezzo polare (cioè composto da molecole polari) sul campo elettrico E ha come effetto la diminuzione dell'intensità del campo E .

Per capire cosa succede, dobbiamo pensare che ad ogni molecola polare corrisponde un microscopico campo elettrico rivolto in senso contrario al momento di dipolo.

Tutte le molecole orientate sommano i loro campi elettrici, in modo da creare un campo elettrico E' contrario al campo E pre-esistente nel vuoto.

Anche se la percentuale di molecole orientate non è alta a causa dell'agitazione termica, la loro disposizione ordinata riesce a far diminuire il campo elettrico preesistente.

Cosa accade in presenza di un mezzo non polare?

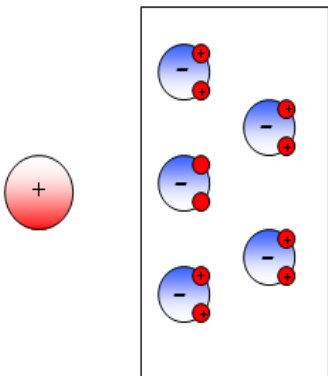


Figura 263 Polarizzazione per orientamento

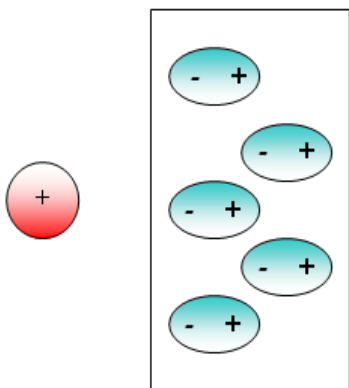


Figura 264 Polarizzazione per deformazione

Le molecole apolari hanno una simmetria spaziale e non posseggono un proprio momento di dipolo, ma il campo elettrico esterno provoca uno stiramento della molecola e quindi un successivo orientamento. Questo fenomeno si chiama **polarizzazione per deformazione**.

Gli effetti di questo secondo tipo di polarizzazione sono meno forti del primo. In ogni caso possiamo affermare che la presenza di un mezzo isolante (o dielettrico) tende a indebolire il campo elettrico preesistente.

11.24 Energia accumulata nei condensatori

L'energia immagazzinata in un condensatore è pari al lavoro fatto per caricarlo. Si consideri, ora, un condensatore con capacità C , con carica $+q$ su una piastra e $-q$ sull'altra. Per muovere un piccolo elemento di carica Δq da una piastra all'altra sotto l'azione della differenza di potenziale $\Delta V = q/C$, il lavoro necessario è ΔW :

$$\Delta W = \Delta V \cdot \Delta q = \frac{q}{C} \cdot \Delta q \quad (49)$$

Sommando tutti i singoli lavori elementari ΔW , si può determinare l'energia potenziale U immagazzinata dal condensatore. Gli estremi dell'integrazione saranno 0 , ovvero un condensatore scarico, e Q , ovvero la carica immessa sui piatti del condensatore:

$$W = \sum \frac{q}{C} \cdot \Delta q_1 + \frac{q}{C} \cdot \Delta q_2 + \dots + \frac{q}{C} \cdot \Delta q_n = \frac{q}{C} \sum (\Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots + \Delta q_n) = \frac{q^2}{C}$$

che rappresenta l'area del rettangolo di base q e altezza q/C .

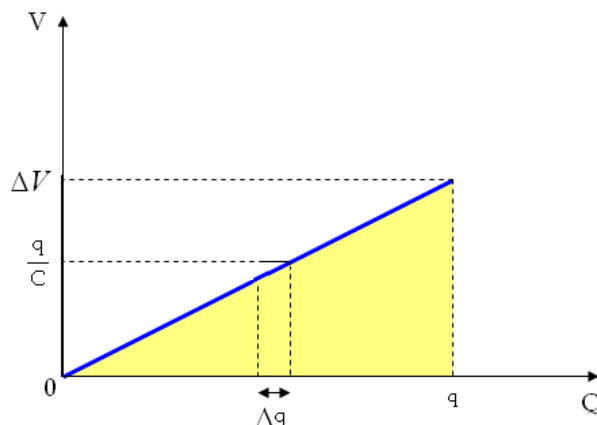


Figura 265 Grafico dell'energia accumulata da un condensatore

Il lavoro compiuto è invece rappresentata dall'area del triangolo di base q ed altezza q/C , per cui otteniamo:

Richiamo di matematica

L'Area sottostante la retta o più in generale una curva, può essere calcolata attraverso il calcolo dell'**integrale**, nel caso del Lavoro si avrà:

$$\int_0^q \frac{Q}{C} dQ$$

che calcolato restituisce la relazione (50)

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{q^2}{C} \quad (50)$$

oppure considerando che $q = \Delta V \cdot C$, otteniamo:

$$L = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \Delta V^2 \quad (51)$$

Per un condensatore piano, è possibile esprimere il lavoro in relazione alle caratteristiche del condensatore e del campo elettrico in esso generato:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot d \cdot E^2 \quad (52)$$

Spesso l'unità di misura utilizzato per l'energia è l'**elettronvolt** (simbolo eV), molto usata in ambito atomico e subatomico, definito come l'energia cinetica acquistata da un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale elettrico di 1 volt nel vuoto. Risulta quindi:

$$1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J \quad (53)$$

11.25 Sistemi di condensatori

I componenti elettrici di un circuito elettrico, come i condensatori possono essere collegati fra loro in **serie** oppure in **parallelo** per mezzo di un conduttori elettrici (ad esempio fili metallici) che trasportano al loro interno gli elettroni per il funzionamento del circuito.

YouTube



Condensatori in parallelo

Due condensatori sono quindi collegati in parallelo se lo schema di collegamento risulta del tipo:

I condensatori collegati in parallelo condividono la stessa differenza di potenziale ΔV , mentre le cariche accumulate su ciascuno saranno Q_1 e Q_2 se le rispettive capacità risulteranno essere C_1 e C_2 , solitamente diverse.

Risulterà infatti che $C_1 = \frac{Q_1}{\Delta V}$ e $C_2 = \frac{Q_2}{\Delta V}$ da cui ricavando rispettivamente Q_1 e Q_2 otteniamo:

$$Q_1 = C_1 \cdot \Delta V \text{ e } Q_2 = C_2 \cdot \Delta V$$

Sommando membro a membro otteniamo:

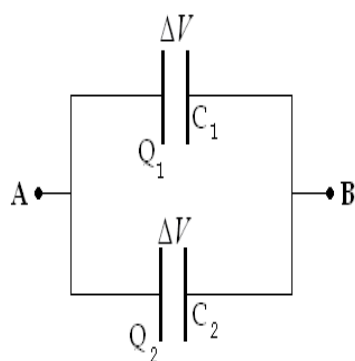


Figura 266 Condensatori in parallelo

$$Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot \Delta V + C_2 \cdot \Delta V = (C_1 + C_2) \cdot \Delta V$$

da cui se indichiamo con Q la carica totale $Q_1 + Q_2$, otteniamo:

$$Q = (C_1 + C_2) \cdot \Delta V \quad (54)$$

Questa formula ci dice che se sostituissimo i due condensatori collegati in parallelo, sottoposti alla differenza di potenziale ΔV , con un condensatore di capacità $C_1 + C_2$, otterremmo gli stessi effetti nel circuito:

Risulta quindi:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \quad (55)$$

Risulta alquanto agevole dimostrare che se il numero di condensatori è maggiore di due, comunque la formula rimane analoga, risultando:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (56)$$

Condensatori in serie

Nel caso di condensatori collegati in serie, gli stessi non avranno più la stessa differenza di potenziale ai loro capi, essendo il primo condensatore soggetto al potenziale V_A e V_D , con differenza di potenziale (d.d.p.) pari a ΔV_{AD} , mentre il secondo condensatore sarà posto al potenziale V_D e V_B , con d.d.p. pari a ΔV_{BD} . Ciò che invece rimarrà uguale sui due condensatori è la carica totale Q .

La d.d.p. totale del circuito sarà:

$$\Delta V = \Delta V_{AD} + \Delta V_{BD} \quad (57)$$

Ricavandole singolarmente, su ciascun condensatore, risulta:

$$\Delta V_{AD} = \frac{Q}{C_1} \quad \text{e} \quad \Delta V_{BD} = \frac{Q}{C_2}$$

che sostituite nella formula (57) ci permette di esprimere ΔV in funzione delle singole capacità, risultando:

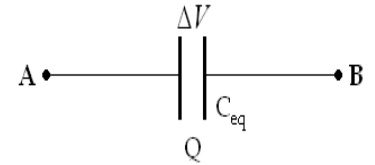


Figura 267 Capacità equivalente in un circuito

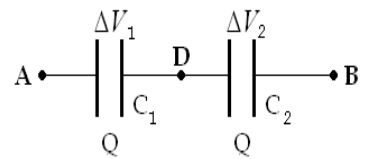


Figura 268 Condensatori in serie

$$\Delta V = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \cdot Q \quad (58)$$

Anche in questo caso se volessimo sostituire i due condensatori con uno equivalente, risulterebbe:

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{eq}} \quad (59)$$

che confrontata con la formula (58) permette di ricavare la **capacità equivalente**:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (60)$$

ovvero:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (61)$$

CONSIGLI UTILI

Se in un problema è necessario calcolare la Capacità equivalente di vari condensatori in serie, nella formula (62) sostituisci subito le singole capacità da C_1 a C_n . Calcola da lì la somma di tutti i reciproci e per sapere la capacità equivalente fa il reciproco di quella somma.

Anche in questo caso risulta semplice verificare che se il circuito è composto da n condensatori collegati in serie, la capacità equivalente è esprimibile dalla relazione:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (62)$$

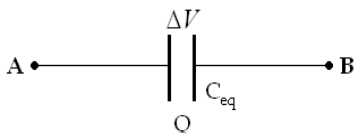
Se nei problemi proposti dovesse capitare di trovare circuiti con più di due condensatori in serie, appare evidente che, piuttosto di cercare di estrapolare la formula risolutiva per C_{eq} converrà piuttosto sostituire i

valori di ciascuna capacità, trovarne i reciproci $\frac{1}{C_1}, \frac{1}{C_2}, \dots, \frac{1}{C_n}$,

sommarli $\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)$ ed infine facendo il reciproco della somma, ottenendo così la capacità equivalente:

$$C_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad (63)$$

che se risolta algebricamente darebbe qualche difficoltà di complessità che diventa superfluo affrontare per arrivare al risultato.



11.26 Moto di una carica in un campo elettrico uniforme

Come già detto, un condensatore è un oggetto composto da due piastre (o armature) conduttrici separate da un mezzo isolante o dielettrico (che può essere anche lo spazio vuoto).

Esso serve ad accumulare energia elettrica per utilizzarla quando serve. Se il condensatore viene collegato tramite fili elettrici ad un generatore di corrente (come una normale pila elettrica), nei fili passa per un breve tempo una corrente (cioè un flusso di elettroni) che si blocca rapidamente a causa del materiale isolante presente fra le piastre. Sulla piastra dove si sono addensati gli elettroni ci sarà una carica $-Q$ negativa, sull'altra piastra ci sarà una carica uguale e opposta $+Q$.

All'interno del condensatore carico si è generato un campo elettrico E abbastanza uniforme (tranne ai bordi come abbiamo avuto modo di chiarire nel par.13), con linee di campo parallele di densità uniforme che vanno dalla piastra positiva a quella negativa.

Se in un condensatore viene immessa una particella carica di massa m e carica q , il moto della particella nel caso in cui essa sia inizialmente ferma o abbia una velocità iniziale parallela alle linee di campo risulta essere di tipo uniformemente accelerato nella direzione del campo.

Il comportamento di una particella carica in un campo uniforme è molto semplice da studiare: se il campo E è costante, lo è anche la forza elettrica F agente sulla particella e quindi la sua accelerazione a .

Il moto della particella è quindi un moto con accelerazione costante a diretta come il campo e di intensità:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{q \cdot E}{m} \quad (64)$$

Il verso dell'accelerazione sarà concorde con le linee del campo se la carica della particella è positiva, discorde in caso contrario.

Se v_0 è la velocità iniziale della particella, le equazioni del moto sono:

$$s(t) = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \frac{q \cdot E}{m} \cdot t^2 \quad (65)$$

dove s è lo spazio in funzione del tempo t , mentre:

$$v(t) = v_0 + \frac{q \cdot E}{m} \cdot t \quad (66)$$

con v velocità in funzione del tempo t , che può essere anche espressa in funzione della d.d.p., risultando:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot \Delta V + mv_0^2}{m}} \quad (67)$$

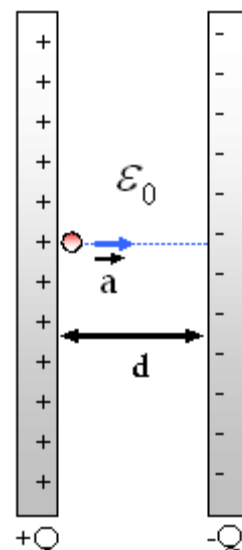


Figura 269 Moto di un elettrone in un campo elettrico uniforme

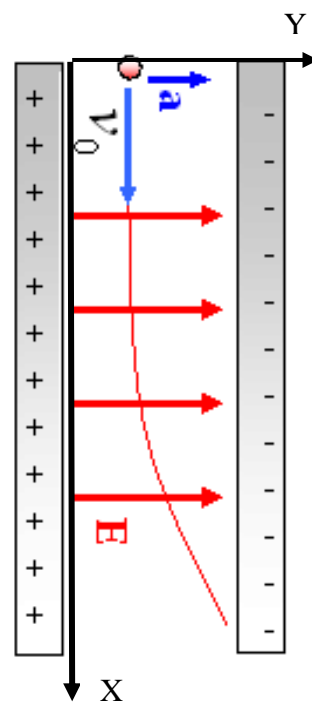


Figura 270 Carica che entra in un campo elettrico, non proveniente da un'armatura

Nel caso in cui la carica abbia una velocità iniziale non parallela alle linee di forza, entrando tra le armature subisce una accelerazione, dovuta alla forza $F = q \cdot E$ diretta verso l'armatura negativa.

Risulta così soggetta a due moti: uno di moto rettilineo uniforme nella direzione e verso di \vec{v}_0 e l'altro uniformemente accelerato con verso tra l'armatura positiva e quella negativa. Il moto non risulta difforme da quello di un proiettile sparato orizzontalmente, ove dimostrammo come la traiettoria assunta da corpo era di tipo parabolico.

Se consideriamo un sistema di assi cartesiani con asse delle x positivo nel verso di \vec{v}_0 e asse y positivo nel verso di \vec{a} , otteniamo le leggi del moto per le due coordinate che in questo caso risulteranno:

$$x(t) = v_0 \cdot t \quad (68)$$

dove x è l'ascissa di ciascun punto della traiettoria in funzione del tempo t , mentre:

$$y(t) = \frac{1}{2} \frac{q \cdot E}{m} \cdot t^2 \quad (69)$$

rappresenta l'ordinata degli stessi punti.

11.27 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questa unità abbiamo introdotto i fenomeni dell'elettricità, partendo dalle prime osservazioni dei fenomeni elettrostatici legati alla **elettrizzazione** di corpi nei diversi modi possibili, ovvero per **strofinio**, per **contatto** e per **induzione elettrostatica**. In base al comportamento dei materiali, circa la possibilità che ciascuno offre di permettere o meno il passaggio di elettroni, abbiamo classificato i corpi in **conduttori** ed **isolanti**. Avendo introdotto una nuova grandezza, la **carica elettrica**, è apparso subito necessario introdurre non solo una unità di misura ma anche uno strumento in grado di rilevarne la presenza, tra cui figura l'**elettroscopio** a foglie, utilizzato proprio per la rilevazione di cariche elettriche. Il fisico che tra i primi cercò di dare rigore agli studi dei fenomeni elettrostatici fu **Charles Augustin Coulomb**, il quale enunciò la propria **legge** in cui vengono espresse le forze di natura elettrica esercitate reciprocamente da due cariche poste in vicinanza. Tra i più semplici dispositivi elettrici troviamo il **dipolo elettrico**, costituito da due cariche di uguale intensità ma di segno opposto, poste da una fissata distanza. Le prime considerazioni circa la presenza di cariche erano tutte espresse in considerazione che tra di esse non vi fosse un qualche materiale, un **dielettrico**, ma il vuoto. Quando siamo quindi in presenza di un qualche materiale posto tra le cariche, le leggi subiscono degli aggiustamenti, introducendo la

costante dielettrica del materiale e la stessa legge di Coulomb, assume una forma diversa, potendo così generalizzare ciò che accada in ogni situazione.

Abbiamo di seguito introdotto il concetto di campo con le sue caratteristiche generali ed in particolare quelle riferite al **campo elettrico**, indicante ciò che possa accadere ad una certa distanza da una carica, indipendentemente se a quella distanza vi fosse o meno una ulteriore carica. Riguardo al Campo elettrico abbiamo sottolineato la **natura conservativa** del campo elettrico, ovvero il fatto che il lavoro compiuto dalla forza elettrica, lungo una curva chiusa è nullo.

Avendo considerato la presenza di forze, abbiamo introdotto, anche per le **forze elettriche**, il concetto di **energia potenziale** e conseguentemente di **potenziale elettrico** e di **differenza di potenziale**, concetti analoghi seppur profondamente diversi dalla energia potenziale gravitazionale.

Successivamente abbiamo introdotto il concetto di flusso di un vettore, potendo così applicare tale concetto al flusso del vettore Campo elettrico con la quantificazione data dal **Teorema di Gauss**. Tra le più importanti applicazioni di tale teorema non si poteva non citare uno dei più importanti: la **gabbia di Faraday** che trova a tutt'oggi notevoli applicazioni nella pratica quotidiana e nelle scelte tecnologiche di taluni materiali.

Riguardo il campo elettrico abbiamo considerato diverse situazioni che potessero manifestare la sua presenza, ovvero quella di un **filo carico** e quello dovuto ad una **distribuzione sferica** di cariche.

Tra i dispositivi elettrici più semplici troviamo i **condensatori**, costituiti da due armature poste ad una certa distanza e caricate di segno opposto. Una caratteristica fondamentale dei condensatori è la **capacità** elettrica. I condensatori possono essere di tipi diversi passando da quelli piani a quelli sferici o cilindrici. I dielettrici assumono anche per i condensatori un ruolo importante, perché può essere posto tra le armature dello stesso modificando così l'intensità della capacità. Abbiamo così discusso della loro **polarizzazione** e dell'energia accumulata da un condensatore. Infine abbiamo trattato i due diversi sistemi di collegamento elettrico tra due o più condensatori, ovvero **in parallelo** ed **in serie** e per ciascuno dei casi abbiamo calcolato come cambia la **capacità equivalente** del circuito, intesa come quella capacità, eventualmente restituita da un unico condensatore, mostrando nel circuito gli stessi effetti del sistema di condensatori in serie o in parallelo.

11.28 Problemi proposti

- 1) Una sfera è stata elettrizzata per strofinio e ha assunto la carica di $+10 \mu\text{C}$. Quanti elettroni ha perduto?
- 2) Due cariche rispettivamente di $+4 \mu\text{C}$ e $-3 \mu\text{C}$ si trovano nel vuoto a 2 m di distanza. Con quale forza si attraggono?
- 3) Un campo elettrico è dovuto alla carica $Q = +0,02 \text{ C}$. Calcola:
 - (a) L'intensità del vettore campo elettrico nel punto **A** a 5 m di distanza da Q .
 - (b) L'intensità, la direzione ed il verso della forza che subirebbe una carica di $3 \mu\text{C}$ messa a 3 m di distanza da Q .
 - (c) Quanto vale il campo elettrico in **A** se, oltre alla carica Q , si trova, sulla linea di forza passante per **A**, a 2 m di distanza da Q un'altra carica Q' di $+12 \mu\text{C}$
- 4) In un punto P il campo elettrico creato da una carica di $6 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ vale 60 N/C . Qual è la distanza dal punto P dalla carica che genera il campo ?
- 5) In un punto a 3 m da una carica $Q=0,2 \text{ C}$, è posta una carica $q=3\mu\text{C}$. Calcola:
 - (a) L'intensità del vettore campo elettrico in quel punto del campo;
 - (b) Il potenziale in quel punto del campo;
 - (c) L'energia potenziale elettrostatico del sistema formato dalle due cariche.
- 6) Calcola l'energia del sistema formato da due cariche elettriche puntiformi, una di $+8 \mu\text{C}$, l'altra di $-4 \mu\text{C}$ che si trovano nel vuoto alla distanza di 6 cm.
- 7) All'interno di un nucleo di un certo elemento chimico, la forza di repulsione tra due protoni vale circa 4,2 N. A che distanza l'uno dall'altro si trovano i due protoni all'interno del nucleo? (carica del protone = $+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
- 8) Due cariche elettriche puntiformi, rispettivamente di $+8 \mu\text{C}$ e $-20 \mu\text{C}$ si attirano nel vuoto con una forza di intensità pari a 20 N. Calcola:
 - (a) La distanza tra le due cariche elettriche;
 - (b) Il valore che assumerebbe la forza dimezzando la distanza;
 - (c) Il valore che assumerebbe la forza raddoppiando la distanza.
- 9) Una carica $Q = 3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ crea intorno a sé un campo elettrico. Calcola:
 - (a) Il potenziale del campo in un punto che si trova a 2 m di distanza da Q

(b) La forza che agirebbe su un protone che si trovasse in quel punto (carica del protone = $+1,6 \cdot 10^{-19} C$).

10) Determinare la forza elettrostatica che si esercita fra due protoni alla distanza di $2 \cdot 10^{-15} m$.

[57,7N]

11) Due cariche $q_1 = 3nC$ e $q_2 = 12nC$ sono fisse a $12cm$ di distanza.

(a) In che posizione fra le due cariche si deve mettere una carica $q_3 = -4nC$ affinché sia in equilibrio? [4cm da q_1]

(b) Mostrare che la posizione non dipende da q_3 e calcolare il valore q_3 affinché le tre cariche siano in equilibrio.

12) Quattro cariche identiche, $q = 6nC$ si trovano ai vertici di un quadrato di lato $l = 10cm$. Quanto deve valere una carica q_f posta al centro del quadrato affinché il sistema sia in equilibrio?

[-5.74nC]

13) Due cariche q_1 e q_2 , a distanza $d = 20cm$ si respingono con una forza F .

A che distanza si devono porre in un olio di costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 5$ perche interagiscano con la medesima forza?

[8.94cm]

14) Una massa $m = 2mg$ (milli grammi) e carica $q = 100nC$ e sospesa mediante un filo inestensibile in un campo elettrico $E = 500V/m$ uniforme e orizzontale. Determinare l'angolo del filo con la verticale. Se il campo elettrico è generato da un piano conduttore infinito uniformemente carico, determinare la densità di carica σ .

[68.6°,

4,43nC/m²]

15) Due sferette identiche, di massa $63mg$, sono appese a fili di lunghezza $l = 12cm$. In equilibrio, l'angolo fra i due fili è di 38° . Quanto vale la carica delle palline? [12nC in modulo]

16) Se le sferette del problema **15** sono di alluminio (densità $2,7 g/cm^3$), come cambia l'angolo fra i due fili se il tutto è immerso in benzina (densità $0,73 g/cm^3$, $\epsilon_r = 2,2$)?

17) Una gocciolina di olio ($\rho = 0,8 g/cm^3$) e raggio $r = 0,5\mu m$ è in equilibrio fra le armature di un condensatore piano orizzontale. Se il

campo elettrico vale $E = 8546V/m$, determinare la carica sulla goccia ($1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$).

$$[4,8 \cdot 10^{-19} C = 3e]$$

18) In condizioni di bel tempo sussiste un campo elettrico in prossimità della superficie terrestre, e diretto verso di essa, pari a circa 100V/m. Poiché la terra è conduttrice, determinare la densità di carica elettrica sulla superficie terrestre e la carica totale della terra (facendo finta che ci sia bel tempo ovunque).

19) Una gocciolina d'acqua, presso la superficie terrestre, possiede una carica elettrica pari a $-5e$. Calcolare il diametro della goccia affinché resti in equilibrio nel campo elettrico terrestre.

20) Due cariche elettriche, $q_1 = 1\mu C$ e $q_2 = 2\mu C$ si trovano a 20cm di distanza. Calcolare il campo elettrico ed il potenziale elettrico nel punto medio. Come varia la risposta se $q_2 = -2\mu C$?

21) Due cariche $q_1 = 3\mu C$ e $q_2 = 12nC$ sono inizialmente alla distanza di 8cm. Che lavoro si deve fare per portarle ad una distanza di 12cm?
[0.79J]

22) Una particella di massa $m = 0,1mg$ e carica $q = 1nC$ parte dal punto **A**, in cui il potenziale elettrico vale $V_A = 3000V$ con velocità $v_A = 10m/s$. Che velocità possiede in un punto **B** se $V_B = 800V$ (**Suggerimento:** si utilizzi la formula (67))
[12m/s]

23) Due cariche fisse, $q_1 = 8nC$ e $q_2 = 12nC$, distano fra loro 12cm. Che lavoro si deve fare per portare una terza carica $q_3 = 20nC$ a metà fra q_1 e q_2 ?
[$6,0 \cdot 10^{-5} J$]

24) L'energia di ionizzazione dell'atomo di idrogeno è di $13,6eV$.

Determinare il raggio atomico. [$0,53 \cdot 10^{-10} m$]

25) Dimostrare che il campo generato da una superficie sferica uniformemente carica, di raggio R è nullo per $r \ll R$ mentre per $r > R$ è uguale al campo che genererebbe una carica puntiforme, pari alla carica totale, posta nel centro della sfera.

26) In condizioni di tempo buono, in prossimità della superficie terrestre sussiste un campo elettrico di circa 100V/m diretto verso la stessa. A 3km di altezza il campo elettrico si riduce a soli 10V/m, sempre diretto verso la superficie. Determinare la carica elettrica atmosferica

contenuta in un cilindro di base 1km^2 a livello del suolo e altezza 3km .

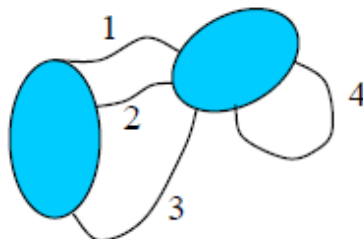
27) Due superfici sferiche concentriche hanno raggio $R_1 = 5\text{cm}$ ed $R_2 = 10\text{cm}$. Sulla prima superficie è posta una carica $Q_1 = 20\text{nC}$ mentre sulla seconda si trova una carica $Q_2 = -15\text{nC}$, uniformemente distribuite. Calcolare il campo elettrico

- in un punto a distanza $r = 4\text{cm}$,
- a distanza $r = 8\text{cm}$,
- a distanza $r = 12\text{cm}$ dal centro comune.

[0V/m, 28.1kV/m uscente, 3.1kV/m uscente]

28) Una carica $q = 20\text{nC}$ è uniformemente distribuita nel volume di una sfera di raggio $r = 3\text{cm}$. Calcolare il campo elettrico a 2cm e a 5cm dal centro della sfera. [133kV/m, 72kV/m]

29) I due corpi rappresentati in figura sono conduttori in equilibrio elettrostatico. Sono state tracciate alcune linee di forza, ma ci sono degli errori. Individuarli e spiegare.



30) Le armature di un condensatore piano vengono allontanate fra loro. Spiegare come variano C , Q e V nei due casi seguenti:

- il condensatore è isolato
- le armature del condensatore sono tenute ad una d.d.p. costante.

[a) C diminuisce, V aumenta; b) C diminuisce, Q diminuisce]

31) Fra le armature di un condensatore piano si introduce un dielettrico di costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 2$. Come variano C , Q , V rispetto al vuoto nei due casi:

- condensatore isolato (Q costante);
- V costante?

[a) C raddoppia, V dimezza; b) C raddoppia, Q raddoppia]

32) Un condensatore piano ha parametri $S = 1\text{m}^2$, $d = 1\text{mm}$, senza dielettrico. Le armature sono caricate con carica $Q = 200\text{nC}$ e il

condensatore è isolato. Che lavoro si deve fare per portare la distanza fra le armature fino a 2mm ?

[$2,26 \cdot 10^{-6} J$]

33) Le proprietà elettriche della terra e della sua atmosfera si possono schematizzare con un condensatore piano di superficie pari alla superficie terrestre alla distanza di circa 3km . Calcolare la capacità di tale condensatore.

34) Un condensatore è caricato con $5\mu\text{C}$. Si osserva che la differenza di potenziale fra le armature è $V=250\text{V}$. Quanto vale la capacità?
[20nF]

35) Un condensatore di capacità $C = 1,5\mu\text{F}$ è collegato ad una d.d.p. di 80V . Quanto vale la carica sulle armature?
[120μC]

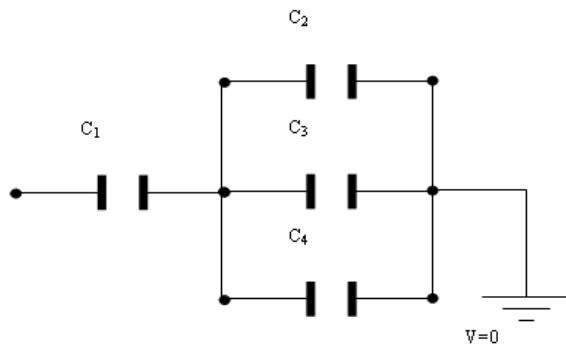
36) Quanto vale l'energia immagazzinata nei due condensatori dei problemi precedenti?
[$6,25 \cdot 10^{-4} J$,
 $4,5 \cdot 10^{-3} J$]

37) Si vuole immagazzinare un'energia di $1J$ in un condensatore, la cui d.d.p. non deve superare i 1000V . Quanto vale la capacità minima del condensatore?
[2μF]

38) Fra le armature di un condensatore piano si introduce un dielettrico di costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 2$. Come variano C , Q , V rispetto al vuoto nei due casi:

- a) condensatore isolato (Q costante);
- b) V costante? [a) C raddoppia, V dimezza;
- b) C raddoppia, Q raddoppia]

39) È data la rete di condensatori in figura, con $C_1 = C_4 = 3\mu\text{F}$, $C_2 = 2,6\mu\text{F}$ e $C_3 = 1,4\mu\text{F}$. Il punto P si trova ad un potenziale di $+45,3\text{V}$ rispetto al potenziale di terra.



Determina la capacità totale del sistema, la carica e la differenza di potenziale per ogni condensatore.

$$[C_{eq} 2,1 \mu F; Q_1 = 9,51 \cdot 10^{-5} F; Q_2 = 3,54 \cdot 10^{-5} F; Q_3 = 1,90 \cdot 10^{-5} F; Q_4 = 4,08 \cdot 10^{-5} F;$$

$$V_1 = 31,7V; V_2 = V_3 = V_4 = 13,6V]$$

40) Un condensatore piano è realizzato con due lastre circolari di raggio 11cm, poste in aria, a una distanza di 2,5mm. Il campo elettrico tra le armature è $8,02 \cdot 10^4 V/m$. Calcola:

- (a) la capacità del condensatore [135pF]
- (b) la carica di ogni armatura [27nC]
- (c) la d.d.p. fra le armature [200V]

41) Come variano i risultati precedenti se fra le armature si interpone un materiale con $\epsilon_r = 4$?

[quadruplicano, eccetto la d.d.p.]

42) Le armature parallele di un condensatore piano nell'aria sono a distanza 4cm l'una dall'altra e hanno area pari a $60cm^2$. Sulle armature è presente una carica di 5,6nC. Un elettrone entra nel campo elettrico, attraverso un foro posto nel centro dell'armatura positiva, con velocità v_0 perpendicolare alle armature. Quale valore deve avere v_0 perché la velocità dell'elettrone si annulli a metà fra le armature? Il risultato ottenuto dipende dalla direzione di \vec{v}_0 ? [$2,72 \cdot 10^7 m/s$; no]

43) Lo spazio tra le armature di un condensatore piano da $55 \mu F$ è stato riempito inserendovi una sottile lastra di materiale isolante, di costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 4,5$. Il condensatore viene caricato alla differenza di potenziale di 24V e successivamente isolato. Quanto lavoro occorre per estrarre la lastra di materiale isolante? [$25 \cdot 10^{-2} j$]

(Suggerimento: se le armature del condensatore vengono isolate dal generatore utilizzato per caricarle, da quel momento in poi non varierà più la carica su esse depositata...; il lavoro da compiere è pari alla differenza di energia immagazzinata nel condensatore con e senza lastra isolante)

44) Vuoi accumulare una carica di $20 \mu C$ collegando in parallelo dei condensatori identici di capacità pari a $5 \cdot 10^{-8} F$. La differenza di potenziale ai capi del parallelo è 50V. Quanti condensatori bisogna utilizzare?

[8]

45) Un condensatore ha la capacità di $50 pF$ che aumenta a $175 pF$ con un dielettrico tra le sue armature. Qual è la costante dielettrica del materiale?

46) Tre condensatori uguali di $0,25\mu F$ sono connessi in parallelo a un generatore di tensione da $12V$. Quanta carica viene ceduta dal generatore? Quanta energia?

47) Quando una combinazione in serie di due condensatori viene connessa a un generatore di tensione di $12V$, il generatore cede $173\mu J$ di energia. Se uno dei condensatori ha una capacità di $4,0\mu F$, qual è la capacità dell'altro condensatore?

48) A parità di tensione, quante volte maggiore è l'energia immagazzinata in un condensatore con un dielettrico di carta ($\epsilon_r = 3,5$) rispetto a un condensatore di uguali dimensioni con un dielettrico di polietilene ($\epsilon_r = 2,3$)

49) Un generatore da $12 V$ è collegato a un condensatore piano le cui armature, separate da aria, hanno una superficie di $0,20m^2$ e distano tra di loro $5,0mm$.

(a) Qual è la carica che si accumula sul condensatore?

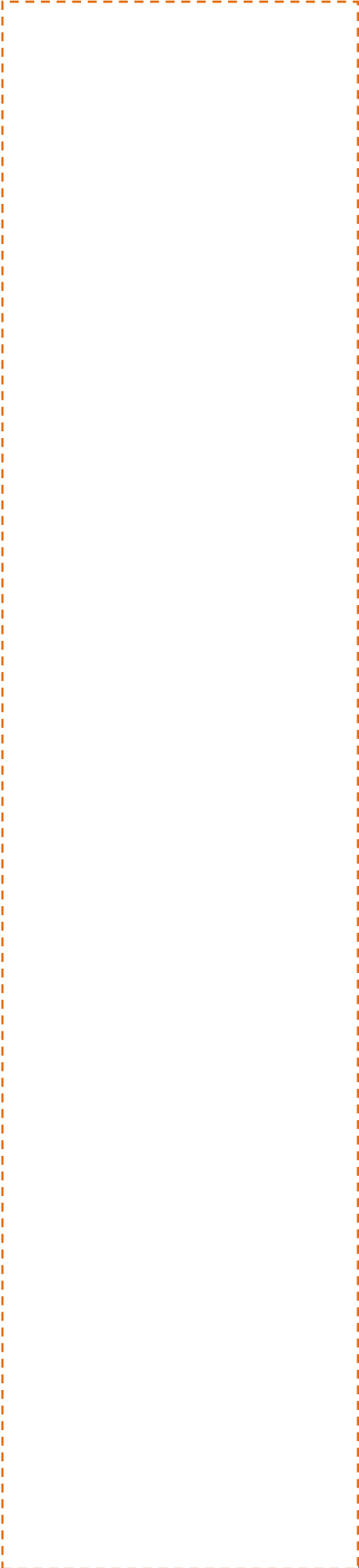
(b) quanta energia viene immagazzinata in esso?

(c) Se, dopo che la batteria è stata sconnessa, la distanza tra le armature diventa $10,0mm$ come cambia il risultato? E se la distanza viene portata a $10,0mm$ mantenendo il contatto con la batteria?

11.29 In laboratorio

24) utilizzando un generatore di cariche elettrostatiche, verificare la presenza;

25) costruzione di un elettroscopio a foglie



11.30 Approfondimento: Charles Augustin de Coulomb

Charles Augustin de Coulomb è stato un ingegnere e fisico francese. Con la sua legge di Coulomb, è considerato il fondatore della teoria matematica dell'elettricità e del magnetismo: l'unità di misura della carica elettrica, il coulomb, fa riferimento al suo nome. Diede anche fondamentali contributi nel campo della meccanica teorica (il concetto di tensione tangenziale e le leggi dell'attrito) ed applicata (di resistenza dei materiali e di geotecnica). Indice

La vita e i contributi scientifici

Charles Augustin Coulomb fu figlio di Henry Coulomb, ispettore del demanio reale, e di Catherine Bajet, appartenente ad una ricca famiglia di commercianti. Completò i suoi studi a Parigi dove divenne nel 1761 Ingénieur du Roy, cioè ingegnere militare. In tale veste, nel 1764 fu inviato nell'isola della Martinica nelle Indie Occidentali, dove rimase per nove anni svolgendo un'intensa attività professionale, che fu per lui anche preziosa fonte per il suo lavoro di ricerca componendo in questo periodo un'importante memoria sui temi della meccanica applicata.

Rimpatriato col grado di capitano, presentò nel 1773 all'Académie des sciences di Parigi il (suo primo) lavoro *Essai sur une application des règles de maximis et de minimis à quelques problèmes de Statique relatifs à l'Architecture* dove fece uso dell'avanzato strumento del calcolo delle variazioni per studiare la flessione delle travi, la spinta delle terre sui muri di sostegno e l'equilibrio delle volte in muratura. In tale lavoro definì le leggi dell'attrito, diede per primo formalizzazione al concetto di tensione tangenziale ed introdusse il metodo di Coulomb per la valutazione della resistenza dei materiali.

Negli anni successivi continuò il suo lavoro di ingegnere a Cherbourg (1774-76), a Besançon (1777-79) e a Rochefort-Rochelle (1779-1780) dove si occupò della riparazione del forte dell'Île-d'Aix. Qui, in collaborazione con l'arsenale di Rochefort, riprendendo lo studio dell'attrito e della coesione, fece realizzare diverse esperienze sull'attrito fra due superfici e dell'attrito fra funi: il lavoro *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages* gli valse nel 1781 il premio dell'Académie des sciences, seguito dalla sua elezione a tale istituzione scientifica. Questo trattato è stato il primo saggio scientifico fondamentale dedicato alle leggi fisiche dell'attrito statico e dinamico (vedi figura a lato con la descrizione meccanica delle forze meccaniche di attrito e di pressione presenti fra due superfici di due corpi a contatto). Effetto d'attrito studiato da Coulomb

Nel 1781 fece ritorno definitivamente a Parigi, dove iniziò ad interessarsi del nuovo settore di ricerca fisica che stava prendendo terreno tra i maggiori scienziati dell'epoca: l'elettricità. Nel 1784 pubblica la sua memoria *Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de metal* [1] dove sviluppò un tema di meccanica (la torsione della trave) per lo studio di uno strumento (la



Figura 271 Charles Augustin de Coulomb (14 giugno 1736 –23 agosto 1806)

bilancia di torsione) fondamentale per le sue indagini sperimentali sulla carica elettrica delle superficie e sulle leggi dell'elettricità e del magnetismo, della cui teoria matematica è considerato il fondatore. Tra il 1785 ed il 1791 pubblicò, sempre presso l'Académie, le sue sette memorie su tali temi che gli valsero la sua perdurante notorietà. In tali lavori Coulomb spiegò le leggi di attrazione e repulsione tra cariche elettriche e poli magnetici (la legge di Coulomb), benché egli non avesse trovato la connessione tra i due fenomeni: egli pensava che l'attrazione e la repulsione fossero due differenti tipi di fluidi.

Tali memorie furono solo una parte del lavoro da lui prodotto in diversi campi di ricerca: tra il 1781 ed il 1806 egli pubblicherà venticinque memorie, collaborando anche con Bossut, Borda, de Prony e Laplace.

Con lo scoppio della Rivoluzione Francese nel 1789 rassegnò le sue dimissioni del corpo del Genio Militare e dalla sua carica di intendant des eaux et fontaines. Nel periodo del Terrore, abbandonò Parigi ritirandosi nel 1793 in una piccola tenuta che possedeva a Blois per continuare ad occuparsi della sua ricerca scientifica. Rientrò nella capitale sotto il regime del Direttorio quando, nel dicembre 1795, fu tra i primi membri eletti dell'Institut de France che aveva sostituito dopo la rivoluzione l'Académie des sciences. Prese parte alla nuova determinazione di pesi e misure, che era stata decretata dal governo rivoluzionario e venne nominato nel 1802, sotto Bonaparte, ispettore dell'istruzione pubblica. In tale veste, fondò diversi licei in Francia. Ma la sua salute era già compromessa e morì quattro anni dopo, a Parigi.

12. La corrente elettrica

Prerequisiti

Modello atomico della materia. Fenomeni elettrostatici. Energia potenziale elettrica. Campo elettrico. Condensatori e capacità. Condensatore come accumulatore. Differenza di potenziale. Legge di Coulomb. Conduttori ed isolanti. Gabbia di Faraday.

Sapere

Conoscere il concetto di corrente elettrica in un conduttore. Sapere come si dispongono le cariche in movimento. Concetto di circuito elettrico. Conoscere gli strumenti di misura amperometro e voltmetro. Generatori di tensione e f.e.m. . Concetto di resistività e Resistenza elettrica e i codici colori. conoscere le due leggi di Ohm. Fenomeni dissipativi quale l'effetto Joule. Energia e potenza elettrica. Maglie e nodi. Le leggi di Kirchoff. I circuiti in serie ed in parallelo con resistenze e i circuiti RC. Conoscere il significato di accumulatore e i tipi di pila elettrica. Conoscere il comportamento dei fenomeni elettrici nei gas. Conoscere i semiconduttori, i diodi e i circuiti integrati.

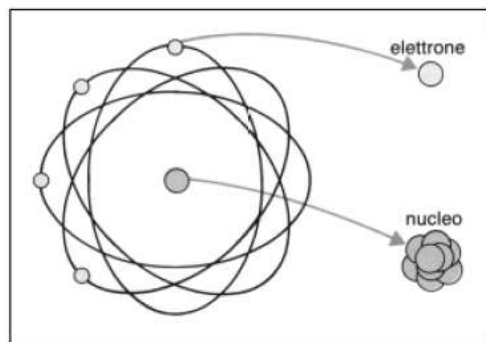
Saper fare

Saper come avviene il passaggio di elettroni attraverso un conduttore. Saper utilizzare gli strumenti di misura e come collegarli in un circuito. Saper trovare il valore di una resistenza in base al codice colori. Saper distinguere tra i tipi di generatore e gli accumulatori. Saper applicare le leggi di Ohm e di Kirchoff alle maglie ed ai nodi. Saper riconoscere un circuito integrato.

12.1 La corrente elettrica



Come già detto nell'atomo i protoni hanno una carica elettrica di segno positivo e gli elettroni di segno negativo. Questi ultimi inoltre non sfuggono alle loro orbite ellittiche a causa dell'attrazione su di essi esercitata dai protoni, che essendo in numero pari a quello degli elettroni fanno sì che l'atomo, in condizioni normali, sia in equilibrio elettrico.



L'elettricità quindi non è altro che la "colla" che tiene insieme l'atomo e poiché tutta la materia esistente è composta di atomi tutti i corpi dell'Universo possiedono elettricità.

Tuttavia ogni atomo si presenta elettricamente neutro, poiché il numero dei protoni (+) è uguale al numero degli elettroni (-).

Un atomo di rame è costituito da un nucleo contenente 29 protoni (+) e 29 neutroni (neutri), circondato da un guscio di 29 elettroni (-). Nel suo insieme l'atomo è neutro.

Esistono comunque vari tipi di elettricità: quella **statica**, cioè quella concentrata sulla superficie dei corpi sottoposti a strofinio (è quella già studiata nello scorso capitolo) e quella **dinamica**, cioè quella che attraversa i corpi ed in particolare i conduttori elettrici, e la vibrante, cioè quella che, mediante rapide vibrazioni di speciali conduttori, produce onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio.

La corrente elettrica

Come dice la parola stessa, **corrente** è qualcosa che scorre, che fluisce. La corrente elettrica è un movimento continuo di cariche elettriche elementari, cioè un flusso ordinato di elettroni, che ha luogo all'interno di alcuni materiali. I materiali, proprio perché permettono agli elettroni liberi di spostarsi da un atomo ad un altro e alle cariche di distribuirsi lungo tutto il corpo e alla corrente di attraversarli, vengono definiti **conduttori**, per altro già trattati nel paragrafo 5.2. Altri materiali, attraverso i quali la corrente non riesce a passare perché gli elettroni si muovono con lentezza e di conseguenza le cariche tendono a rimanere localizzate dove sono state prodotte, vengono definiti **isolanti**.

I materiali possono essere così suddivisi:

- **buoni conduttori** sono i metalli (ad esempio il rame, l'argento e l'alluminio, che vengono usati per costruire i cavi elettrici), i gas ionizzati (come quelli presenti all'interno dei tubi fluorescenti), le

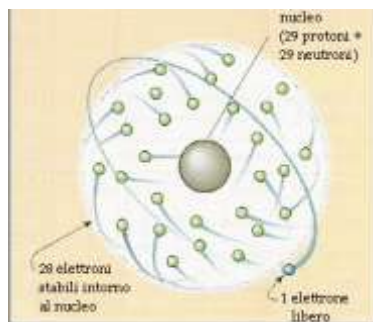


Figura 272 Nube elettronica nell'atomo

soluzioni elettrolitiche (acqua e sale) ed i tessuti organici, vale a dire il nostro corpo (purtroppo anche noi siamo dei conduttori!);

- **cattivi conduttori**, ovvero conduttori meno buoni, isolanti deboli sono il legno e la carta;
- **buoni isolanti** come le ceramiche, il vetro, il marmo, la porcellana;
- **isolanti buonissimi** come l'ambra, la gomma.

Da cosa dipende il diverso comportamento delle cariche nei conduttori e negli isolanti? Le cariche elettriche non presentano sempre una distribuzione uniforme: negli isolanti sono generalmente distribuite sia sulla superficie sia all'interno, nei conduttori si distribuiscono tutte sulla superficie esterna. Se un conduttore è cavo, le cariche si distribuiscono tutte sulla superficie esterna. Se la superficie esterna di un conduttore è regolare, esse si distribuiscono in modo uniforme; se la forma è irregolare, si addensano soprattutto sugli spigoli e sulle punte.

I fenomeni di cui ci siamo occupati finora riguardano cariche elettriche che rimangono pressoché ferme sulla superficie di un corpo. Cerchiamo ora di capire le cariche in movimento e per comprendere la differenza tra elettricità e corrente elettrica immaginiamo di ingrandire fortemente un filo di rame, per vedere, in modo schematico, cosa accade al suo interno.

Il filo di rame è formato dai nuclei degli atomi (pallini bianchi), ognuno dei quali va immaginato con il suo guscio di 28 elettroni + 1 elettrone libero. Per semplicità è disegnato il solo elettrone libero che si sposta in qua ed in là intorno ai vari nuclei di rame; vedremo tra breve che è lui, insieme con gli altri elettroni liberi presenti nel filo, il responsabile della corrente elettrica: in un filo di rame lungo 1 metro e di diametro 0,3 millimetri ci sono circa 500 milioni di miliardi di elettroni liberi! Ma in questa situazione non accade nulla, non c'è corrente.

Quantità di elettricità

La quantità di elettricità (simbolo Q) dovrebbe essere la carica elementare posseduta dall'elettrone. Tuttavia poiché essa è troppo piccola per essere usata praticamente, si impiega il coulomb (simbolo C) definito come la carica di $6,2 \cdot 10^{18}$ elettroni.

Collegiamo ora il filo di rame con un generatore di corrente (**pila**) e con un apparecchio utilizzatore (**lampadina**): in altre parole, adesso il filo è inserito in un **circuito elettrico**.

Nella figura affianco, come vediamo nella parte centrale, fortemente ingrandita, l'elettrone libero si muove a *zig zag* verso il morsetto positivo della pila, dal quale viene attratto. Dentro la pila c'è infatti uno

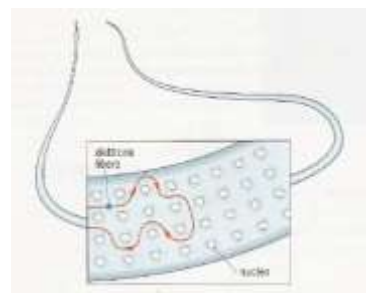
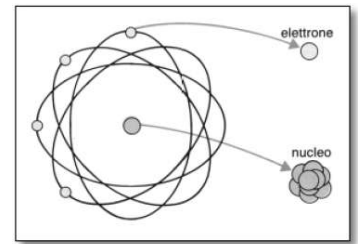


Figura 273 Percorso degli elettroni lungo un conduttore

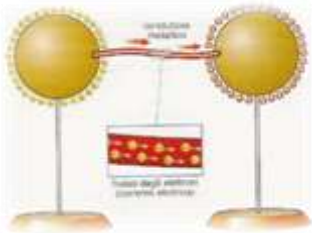


Figura 274 Passaggio di elettroni tra sfere cariche

sbilanciamento di cariche, con gli elettroni accumulati presso il morsetto negativo (-) e le cariche positive accumulate presso il morsetto positivo (+). Miliardi di elettroni liberi, come quelli del disegno, si muovono verso il morsetto positivo da cui vengono attratti; il loro posto viene occupato dagli elettroni che escono dal morsetto negativo, da cui vengono pompati. Si ha così un movimento circolare di elettroni liberi, cioè una corrente elettrica.

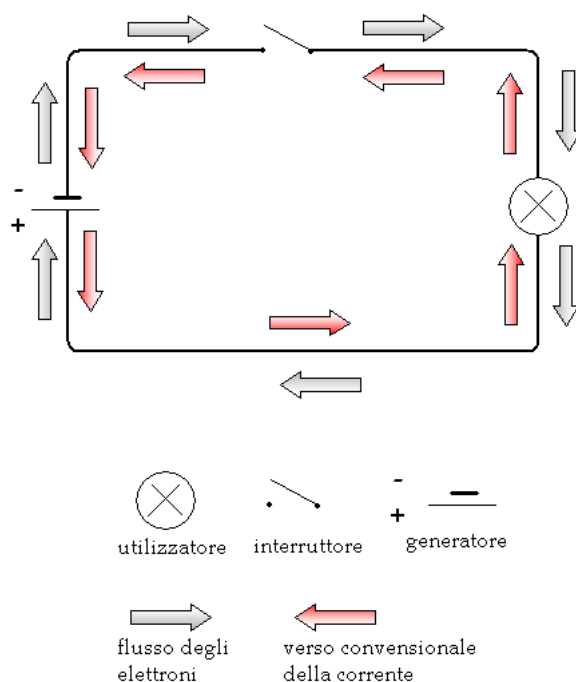
Una curiosità.

Mentre circola la corrente, ogni elemento conserva le proprie caratteristiche senza consumarsi. Infatti la corrente è solo un trasferimento di cariche elettriche, **senza trasferimento di materia**. In altre parole, tutti gli atomi del generatore, del filo conduttore e della lampada restano al loro posto, e si muovono solo gli elettroni liberi.

La corrente elettrica è determinata da un movimento di cariche, tutte dello stesso segno, gli elettroni, che si muovono in modo ordinato, sempre nello stesso verso, attraverso un conduttore. Il movimento degli elettroni ha bisogno di un dislivello, la differenza di potenziale esistente alle due estremità del conduttore. Il flusso di carica elettrica è quello dall'estremo del conduttore con eccesso di cariche negative, indicato come polo negativo (-), a quello con eccesso di cariche positive, detto polo positivo (+), ma per convenzione si è stabilito che esso sia opposto, cioè dal polo positivo a quello negativo.

Verso convenzionale della corrente elettrica

Abbiamo visto che la corrente elettrica consiste in un flusso di elettroni che va dal **catodo**



(o polo negativo) all'**anodo** (o polo positivo). Bisogna però tener presente che la scoperta dell'elettrone fu compiuta alla fine del XIX secolo, mentre l'invenzione della pila da parte di Alessandro Volta avvenne nel XVIII secolo. Poiché i fisici del primo '800 non conoscevano ancora la struttura elettrica della materia, essi ipotizzarono che la corrente elettrica fosse dovuta al movimento di cariche positive.

Figura 275 Flusso degli elettroni in un circuito e verso convenzionale della corrente

Tutte le leggi che vennero enunciate in seguito si fondarono su questo

presupposto, per cui, per convenzione, ancora oggi si usa dire che la corrente elettrica consiste in un flusso di cariche positive dall'anodo (+) al catodo (-).

Quanto più grande è la differenza di potenziale tra i capi dell'utilizzatore e quindi del generatore, tanto maggiore è la quantità di corrente che attraversa il conduttore che li collega.

12.2 Intensità della corrente elettrica

Immaginiamo di essere sul bordo di un'autostrada per misurare l'intensità del traffico in quel punto: usando come traguardo una linea immaginaria, trasversale alla corsia, conteremo il numero di autoveicoli che la oltrepassano in un certo intervallo di tempo. Con lo stesso metodo possiamo misurare l'intensità della corrente elettrica, che consiste nello spostamento di elettroni liberi all'interno di un circuito.

Come la quantità d'acqua che nell'unità di tempo attraversa una sezione di un tubo si chiama "portata" e si misura in m^3/s , e la portata d'acqua aumenta in relazione alla sezione del tubo e al dislivello ai capi del tubo, così la quantità di elettroni che nello stesso tempo attraversa una sezione di un conduttore si definisce **intensità della corrente elettrica** se la quantità di corrente si esprime in coulomb ed il tempo in secondi, abbiamo:

$$I = \frac{\Delta Q}{t} \quad (1)$$

L'unità di misura della intensità di corrente elettrica è l'**ampere** (simbolo **A**), dal nome del fisico francese **André Marie Ampère** (1775-1836) e si misura con gli **amperometri** e, per piccole intensità, con i **galvanometri**.

Osservazione

E' importante osservare che la corrente che scorre all'interno di un corpo, non è qualcosa che viene dall'esterno: ogni corpo è fatto di atomi, e sono proprio gli elettroni degli atomi che, per effetto di una forza applicata dall'esterno (chiamata forza elettromotrice o tensione o differenza di potenziale), cominciano a spostarsi da un atomo all'altro, dando origine al flusso di cariche chiamato corrente elettrica. La corrente elettrica può essere debolissima, come quella che, all'interno degli organismi viventi, trasmette gli impulsi nervosi; può essere abbastanza forte, come quella che accende la lampadina della nostra stanza, e può essere fortissima, come quella che fonde i metalli in un altoforno o fa camminare un treno a 150 km all'ora.

Sappiamo bene che oggi senza la corrente elettrica si fermerebbe tutto. Dove troviamo la corrente in casa nostra? Naturalmente nelle prese, le comunissime prese di corrente. Occorre però fare una precisazione: nelle prese non c'è la corrente, ma c'è la tensione, ovvero quella forza che spinge gli elettroni a muoversi, dando origine alla corrente. Questa

YouTube



Figura 276 Intensità di corrente misurata da un Amperometro



forza ha un valore ben preciso, che nelle civili abitazioni misura 220 volt.

12.3 Il circuito elettrico

Il circuito elettrico è un percorso chiuso in cui circola corrente elettrica, costituito dall'insieme degli apparecchi elettrici e dei loro collegamenti, destinati a essere attraversati dalla corrente.

I componenti di un circuito elettrico sono:

- il **generatore di corrente**, che può essere l'alternatore, la pila o l'accumulatore;
- gli **apparecchi utilizzatori**, come la lampada, il frullatore elettrico, il ferro da stiro, cioè gli apparecchi che trasformano la corrente in altra forma di energia;
- i **fili conduttori**, che collegano il generatore agli apparecchi utilizzatori e che trasportano la corrente elettrica;
- gli **interruttori**, che interrompono oppure lasciano passare la corrente elettrica. Sono in genere una lamina di metallo posta ai due capi del circuito, che si solleva per interrompere il circuito, si abbassa per chiudere il circuito e far passare la corrente elettrica.

Tipologia di circuiti elettrici: circuiti in serie e in parallelo

Esistono due tipi di **circuiti** profondamente diversi tra loro: quello **in serie** e quello **in parallelo**.

Gli utilizzatori di un circuito, per esempio le lampadine, possono essere collegati sia in serie che in parallelo, come si può notare in figura. Nel caso del collegamento in parallelo (B) le lampadine sono più luminose; infatti, ognuna fruisce di un'uguale differenza di potenziale. Nel collegamento in serie (A) lo stesso valore di differenza di potenziale va suddiviso fra tutte le lampadine. Nel collegamento in serie infatti, la tensione occorrente per far accendere normalmente le lampadine è uguale alla somma delle d.d.p. di ciascuna lampadina. Inoltre, in un collegamento in serie, se un utilizzatore si guasta (per esempio una lampadina si brucia) si interrompe il circuito e anche gli altri utilizzatori si spengono. Questo inconveniente, invece, non si verifica per il collegamento in parallelo. Per tali motivi, nelle abitazioni si usano impianti elettrici con collegamenti in parallelo. Si ha così la possibilità di spegnere una lampada indipendentemente dalle altre, mentre ciò non sarebbe possibile con un collegamento in serie.

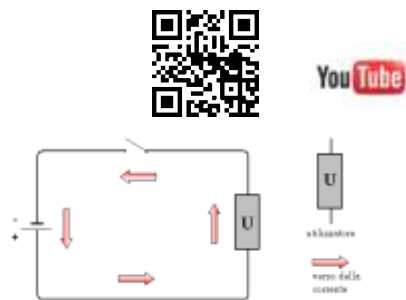


Figura 277 Circuito elettrico elementare



Laboratorio 32
Circuito elettrico

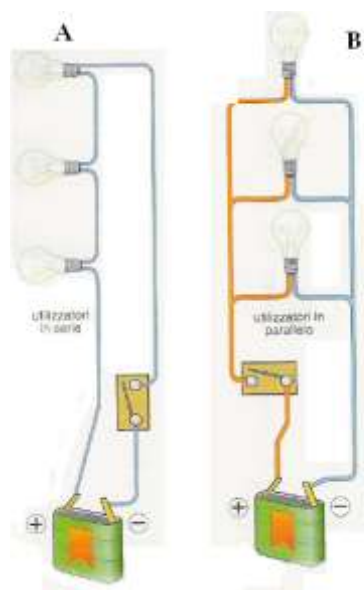


Figura 278 Utilizzatori in serie e in parallelo



12.4 Amperometro e Voltmetro

L'**amperometro**, che misura l'intensità della corrente, deve essere sempre **collegato in serie** nel circuito dove passa la corrente che si vuole misurare; vale a dire che bisogna interrompere il circuito in un punto e collegare i suoi estremi liberi con i morsetti dello strumento. (Essi devono presentare una resistenza interna molto piccola in modo da non alterare sensibilmente la corrente preesistente nel circuito)

Il **voltmetro**, che misura la tensione o d.d.p., deve essere **collegato in parallelo** (detto anche in derivazione) cioè con i suoi morsetti connessi

si ai due punti tra i quali si vuole misurare la d.d.p.. Pertanto per misurare la tensione non si deve “tagliare” il circuito in un punto come invece avviene per la misura della corrente. (Esso deve presentare una resistenza interna molto grande in modo da assorbire pochissima corrente e non alterare quindi sensibilmente la d.d.p. preesistente tra i due punti del circuito cui vengono collegati)

12.5 Il generatore di tensione

Si definisce “**generatore di corrente elettrica**” un apparecchio che trasforma in energia elettrica una forma di energia diversa (meccanica, luminosa, chimica o termica). Vediamo quali tipi di generatori esistono e come funzionano.

Tipologie di generatori

- I **generatori ad induzione**, che trasformano l'energia meccanica in energia elettrica, si basano sulla legge di Faraday, secondo la quale quando un campo magnetico si muove all'interno di una superficie delimitata da un circuito elettrico, nel circuito stesso viene creata una corrente elettrica. Sono i tipi di generatore più utilizzati per la produzione di elettricità. Rientrano in questa categoria, sicuramente la più sfruttata, le turbine idroelettriche, le pale eoliche, ecc.
- I **generatori elettrochimici** trasformano invece l'energia chimica, utilizzando i fenomeni di ossidazione e riduzione. Ne sono un esempio le pile e le celle a combustibile.
- I **generatori a differenza termica** sfruttano un effetto scoperto dal fisico **Seebeck**, per il quale, in un circuito composto da conduttori metallici, una diversa temperatura dei metalli genera elettricità.
- I **generatori fotovoltaici** generano energia elettrica direttamente a partire dalla luce solare, sfruttando l'effetto fotovoltaico. Ne sono un esempio i pannelli che vediamo sorgere sui tetti delle nostre case.
- I **generatori piezoelettrici** sfruttano la caratteristica di alcuni cristalli di produrre differenza di potenziale (e dunque elettricità) quando vengono sottoposti a compressione. Esempio tipico è l'accendigas da cucina.

Di notevole importanza, in questo ambito di “trasformazione dell'energia”, è il concetto di **rendimento**, vale a dire del rapporto tra la potenza erogata e la potenza assorbita, che fornisce un valido indice di redditività.

Funzionamento generale

Naturalmente, a seconda del tipo di trasformazione di energia, diversi saranno gli apparecchi e dunque diverso il funzionamento. Vediamo i tipi di generatore più comuni.

Un generatore a induzione consiste generalmente di un **motore a combustione interna** che utilizza benzina: la combustione della ben-

YouTube



Figura 279 Dislivello di un fluido come analogia per la corrente elettrica

zina (energia termica) viene prima trasformata (mediante il movimento dei pistoni) in energia meccanica (motore a quattro tempi); i pistoni sono collegati a un alternatore che sfruttando la legge di Faraday produce energia elettrica. Il rendimento di questo tipo di generatore varia dal 25% al 70%.

Un **pannello solare** è composto di uno strato di semiconduttore (tipicamente silicio, eventualmente “drogato” con boro e fosforo - ne parleremo successivamente nel paragrafo 12.19.1). Quando il pannello viene investito dalla luce solare, gli elettroni degli atomi di boro vengono liberati dai legami e si genera così un flusso di corrente. Il rendimento tipico va dal 15% al 40%.

Per chiarire il concetto di **forza elettromotrice** ricorriamo all'esempio di un circuito idraulico: un circuito elettrico assomiglia ad un circuito idraulico, e da esso partiremo per spiegare il funzionamento della corrente. Immaginiamo di avere due recipienti vuoti collegati tra di loro attraverso un tubo uscente dal loro fondo e munito di una valvola che inizialmente è chiusa ed impedisce la comunicazione tra i due recipienti. Versiamo poi in uno di essi dell'acqua fino a riempirlo completamente ed apriamo quindi la valvola. L'acqua scorrerà nel tubo dal recipiente pieno a quello vuoto a causa dell'energia potenziale (peso) posseduta e tale flusso continuerà finché il suo livello non sarà lo stesso nei due recipienti, cioè fino a quando ci sarà una differenza di energia potenziale tra le masse d'acqua. Il dislivello tende ad annullarsi a causa del flusso della corrente d'acqua.

Inserendo adesso una pompa, si avrà l'effetto di mantenere la differenza di livello tra i due recipienti.

Se ora, ritornando al campo elettrico, sostituiamo il recipiente ed il tubo con un conduttore e l'acqua con le cariche elettriche potremo meglio comprendere il concetto di differenza di potenziale. Il circuito elettrico funziona in modo analogo a quello idraulico.

La corrente elettrica, che consiste in un movimento di elettroni, scorre dentro il filo conduttore perché ai suoi capi **A** e **B** c'è un “**dislivello elettrico**”, o per essere più precisi, una **tensione elettrica**. La dinamo, che viene tenuta in rotazione, mantiene il dislivello elettrico ai capi del filo, cioè ha la stessa funzione della pompa nel circuito idraulico. Gli elettroni si spostano naturalmente dal polo in cui sono presenti in maggiore quantità (-), a quello in cui ve ne sono meno (+). La dinamo provvede poi a riportarli dal polo positivo a quello negativo, in modo che possano rifare il giro del circuito. Il flusso di elettroni della corrente elettrica, come abbiamo visto, si ha soltanto se tra le estremità del conduttore esiste quella che si definisce una differenza di potenziale elettrico o tensione. Quanto più grande è la differenza di potenziale agli estremi di un conduttore, tanto maggiore è la quantità di corrente che lo attraversa. E la differenza di potenziale sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la forza che spinge gli elettroni. Questa forza si chiama tensione elettrica e si misura con il voltmetro e non voltmetro come può venire spontaneo dire.

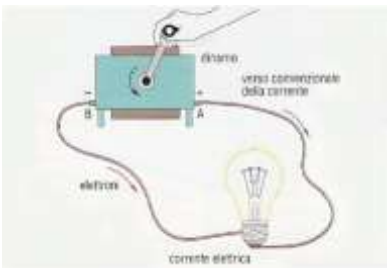


Figura 280 Dinamo

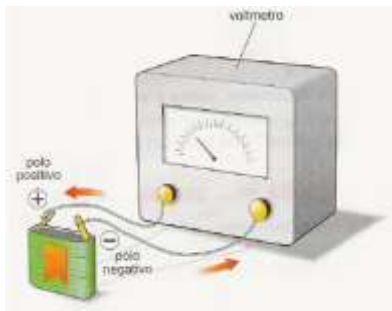


Figura 281 Misura della f.e.m. con un Voltmetro

La sua unità di misura, come già detto, è il **volt** (simbolo V), il cui nome deriva da quello del famoso fisico italiano **Alessandro Volta** (1745-1827).

Gli accumulatori

L'accumulatore è un apparecchio elettrico molto diffuso, sia per l'avviamento dei motori a scoppio, sia per muovere i carrelli industriali, sia per impianti di emergenza. Esso non è un generatore, poiché si limita ad accumulare, cioè conservare, l'energia elettrica ricevuta da un generatore, ma può erogarla ad un apparecchio utilizzatore. Un accumulatore al piombo è formato da coppie di griglie di piombo, immerse in una soluzione di acido solforico ed acqua distillata. Le griglie costituiscono gli elettrodi e sono alternate in modo che ogni griglia collegata al polo negativo sia opposta ad un'altra collegata al polo positivo.

12.6 La resistenza elettrica

Abbiamo visto che la corrente scorre per effetto di una forza detta forza elettromotrice o tensione; c'è però qualcosa che contrasta di più o di meno questa forza e tende a frenare lo scorrere degli elettroni: questa forza frenante, che dipende dalla natura del materiale attraversato, viene detta **resistenza elettrica**.

Ritornando sempre al circuito idraulico esemplificativo, l'acqua che scorre nel tubo è frenata dall'attrito con le pareti e tale ostacolo è tanto maggiore quanto minore è il diametro del tubo stesso e quanto più lungo è esso. Anche il flusso di elettroni che attraversa un conduttore incontra un simile impedimento, che è detto resistenza elettrica appunto, e la cui intensità dipende dalla sezione e dalla lunghezza del conduttore e dal materiale di cui esso è costituito. In particolare la resistenza, la cui unità di misura è l'**ohm** (simbolo Ω), è tanto maggiore quanto più lungo è il conduttore e quanto minore è la sua sezione.

Alcuni materiali, i conduttori, oppongono un piccolo ostacolo al flusso degli elettroni mentre altri, gli isolanti, ne impediscono quasi del tutto il movimento.

Il simbolo utilizzato per disegnare una resistenza elettrica inserito in un circuito è il seguente:



Figura 283 Resistore - Simbolo rappresentato nei circuiti elettrici

L'inverso della resistenza è chiamata **conduttanza**, si misura ovviamente in Ω^{-1} una nuova unità di misura nota come **Siemens** (S).

Codice colori per le resistenze

Le resistenze elettriche nella loro forma più comune sono caratterizzate da **bande colorate** che ne indicano il valore espresso in Ohm, la lo-

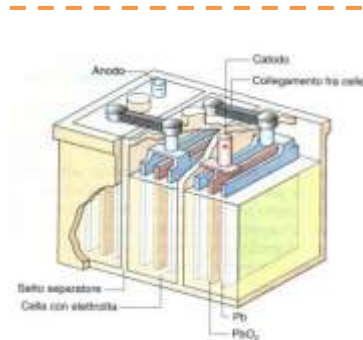


Figura 282 Accumulatori: batteria



ANNOTAZIONI

Spesso confondiamo i termini, chiamando Resistenza un **Resistore**. È un peccato "veniale" che viene solitamente perdonato, quello di confondere il dispositivo con la sua caratteristica peculiare. Analogamente capita per i **Condensatori**, confusi con la loro Capacità elettrica.



Figura 284 Resistori con varie resistenze elettriche

ro tolleranza e, qual'ora si tratti di resistenze di precisione, il coefficiente di temperatura espresso in parti per milione per grado Kelvin (ppm/K).

| colore | 1° anello | 2° anello | 3° anello | 4° anello |
|-----------|-----------|-----------|---------------------------|------------|
| ----- | 1° cifra | 2° cifra | moltiplicatore | tolleranza |
| nero | . | 0 | x1 | - |
| marrone | 1 | 1 | x10 | - |
| rosso | 2 | 2 | x100 | - |
| arancione | 3 | 3 | x1000 (1K Ω) | - |
| giallo | 4 | 4 | x10000 (10K Ω) | - |
| verde | 5 | 5 | x100000 (100K Ω) | - |
| blu | 6 | 6 | x1000000 (1M Ω) | - |
| viola | 7 | 7 | x10000000 (10M Ω) | - |
| grigio | 8 | 8 | x100000000 | - |
| bianco | 9 | 9 | - | 5% |
| oro | - | - | :10 | 10% |
| argento | - | - | :100 | 20% |

Figura 285 Codice colori per le Resistenze dei Resistori



Figura 286 Esempio di Resistore con Resistenza di circa 10 Ω

Ad esempio per la resistenza in Figura 281, tenuto conto che le bande sono, da sinistra verso destra: **marrone**, **nera**, **nera** ed infine d'**oro**, utilizzando la tabella precedente possiamo ricavare **1** (prima banda marrone), **0** (seconda banda nera), quindi 10 Ω da moltiplicare per **1** essendo nera la terza banda, quindi siamo ancora a 10 Ω con tolleranza di $\pm 10\%$ essendo d'oro la quarta ed ultima banda.

Quella in figura è quindi una resistenza che va dai 9 Ω agli 11 Ω .



12.7 Prima legge di Ohm

La **prima legge di Ohm**, deve il proprio nome a quello del fisico tedesco **Georg Simon Ohm**, esprime una relazione tra la differenza di potenziale ΔV (tensione elettrica) ai capi di un conduttore elettrico e ci per i quali la legge è soddisfatta sono detti **resistori** (o resistenze) ideali o ohmici.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Si noti che la legge di Ohm esprime unicamente la relazione di linearità fra la corrente elettrica I e la differenza di potenziale ΔV applicata.

L'equazione indicata è semplicemente una forma dell'espressione che definisce il concetto di resistenza ed è valida per tutti i dispositivi conduttori.

Spesso vengono utilizzate anche le formule inverse della formula (2), a seconda di quali siano i dati disponibili:

$$\Delta V = R \cdot I \quad (3)$$

e

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (4)$$

Verifica sperimentale

E' una legge empirica, e facilmente dimostrabile sperimentalmente; disponendo di un amperometro, di un voltmetro e di due resistenze (ad esempio due lampadine), l'una il doppio dell'altra, risulta alquanto semplice verificare che se prendiamo in considerazione un circuito elettrico dove come utilizzatore inseriamo la sola resistenza R , attraverso il voltmetro inserito in parallelo ai suoi capi e l'amperometro inserito lungo lo stesso circuito, in serie, portando ai capi della resistenza una certa differenza di potenziale ΔV , la stessa verrà attraversata da una corrente I (figura A).



Laboratorio 33 Prima Legge di Ohm

12.8 CLIL Project

Ohm's first law

The first law of Ohm, owes its name to the German physicist **Georg Simon Ohm**, expresses a relationship between the potential difference ΔV (electrical voltage) to the heads of the electrical conductor and the intensity of electric current I that crosses it. Electrical items for which the law is fulfilled are said resistors (or resistance) or ohmic ideals.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

Note that Ohm's law expresses only the linear relation between the electric current I and the potential difference ΔV applied.

The equation shown is simply a form of expression that defines the concept of resistance and is valid for all devices conductors.

Often are also used reverse the formulas of the formula (2), depending on which data are available.

$$\Delta V = R \cdot I \quad (3)$$

and

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (4)$$

Experimental verification

It 'an empirical law, and easily demonstrated experimentally by placing an ammeter, a voltmeter and two resistors (for example, two light bulbs), one twice the other, is quite easy to check that if we take into account a circuit electric where as user insert the only resistance R , through the voltmeter connected in parallel at its ends and the ammeter inserted along the same circuit, in series, bringing the ends of the resistance is a certain difference of potential ΔV , la stessa verrà attraversata da una corrente I (figura A).

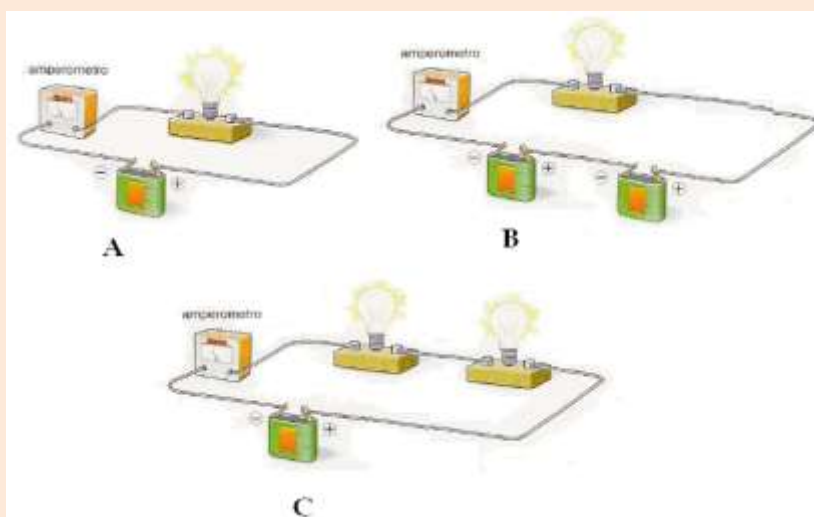


Figura 287 Esempi dicircuiti elettrici

Se lasciamo invariata la resistenza elettrica R e raddoppiamo la differenza di potenziale (mettendo ad esempio due pile identiche in serie), verificheremo che sarà raddoppiata anche la corrente che attraversa il circuito (figura B).

Anche con altre prove analoghe, in cui si può aumentare o diminuire la d.d.p. si verificherà comunque una lineare dipendenza tra la ΔV e la corrente I dove il fattore di proporzionalità è appunto la resistenza R .

Infatti se lasciassimo ora inalterato il generatore (ad esempio una pila che ha sempre la stessa d.d.p.) e sostituissimo la resistenza R con una resistenza doppia $2R$, verificheremmo che la corrente elettrica letta sull'amperometro risulterebbe dimezzata, $\frac{I}{2}$ (figura C), confermando che la costante di proporzionalità tra la d.d.p. e la corrente è proprio la resistenza e non altro.

Osservazione 1

In genere, si considera trascurabile la resistenza dei cavi conduttori e degli eventuali strumenti di misura presenti in un circuito (eccezion fatta per i voltmetri) e si assume che la resistenza elettrica che si manifesta in un circuito sia tutta concentrata negli utilizzatori in esso inseriti

Osservazione 2

Se per cause accidentali, ad esempio il consumo dei rivestimenti isolanti dei fili, l'utilizzatore non viene attraversato dalla corrente, la resistenza del circuito diventa molto piccola e pertanto la corrente assume un valore molto elevato. In questo caso gli effetti della corrente (calore, campi magnetici, reazioni chimiche) diventano eccessivamente intensi. Quando questo succede si ha un **corto circuito** che è molto pericoloso. Negli impianti elettrici domestici l'interruttore generale, chiamato "**salvavita**" ha il compito di interrompere automaticamente l'alimentazione del circuito quando l'intensità di corrente supera un certo valore.

Osservazione 3

Un utilizzatore che soddisfa la (2) si dice **lineare** o **ohmmico**. Sono tali i conduttori metallici e le soluzioni elettrolitiche; non sono lineari gli aeriformi (tubi al neon, lampade fluorescenti) e tutti i componenti realizzati con i semiconduttori come i diodi e i transistor (molto usati in elettronica). Non sono lineari anche i conduttori metallici che subiscono delle forti variazioni di temperatura come i filamenti in tungsteno delle lampadine.

Osservazione 4

La resistenza viene misurata con uno strumento chiamato ohmetro. Questo dispositivo applica una debole tensione al conduttore e misura la corrente elettrica che lo percorre: da questi valori, ricava la misura della resistenza del conduttore.

Osservazione 5

La proprietà, se vogliamo negativa, dei conduttori di opporre resistenza al passaggio della corrente, viene sfruttata per la realizzazione di componenti elettrici, chiamati con lo stesso nome della proprietà in oggetto, cioè resistenze (o resistori) che concentrano in sé un elevato valore di R .

E' più corretto dire **resistore** così come si dice condensatore e non capacità l'oggetto dotato della grandezza elettrica capacità. In un circuito i resistori vengono impiegati o per limitare il passaggio della corrente oppure per localizzare ai loro capi delle cadute di tensione.

12.9 Seconda legge di Ohm

Il valore della resistenza di un conduttore dipende dalle sue caratteristiche geometriche e dal materiale di cui è costituito; in particolare, per un conduttore di sezione costante S , (come un filo di rame) è direttamente proporzionale alla lunghezza l e inversamente proporzionale all'area della sezione. In termini matematici questa dipendenza, nota anche come seconda legge di Ohm, si scrive:

$$R = \rho_{20} \frac{l}{S} \quad (5)$$

dove ρ_{20} rappresenta la **resistività** a temperatura ambiente, un parametro caratteristico di ciascun materiale.

In sostanza, la legge afferma che, per ottenere un conduttore efficiente, è necessario sceglierlo di un materiale a bassa resistività, e inoltre di forma allungata e di sezione ampia.

12.10 Resistività e temperatura

La resistività ρ , introdotta nella seconda legge di Ohm, è il parametro utilizzato come criterio di classificazione dei materiali in rapporto alla loro capacità di farsi attraversare dalla corrente elettrica. Sulla base del suo valore si possono distinguere così le tre categorie di sostanze già introdotte e cioè

- **conduttori**, con ρ compresa tra 10^{-8} e $10^{-5} \Omega \cdot m$,
- **isolanti** con ρ compresa tra 10^{11} e $10^{17} \Omega \cdot m$ e
- **semiconduttori** con ρ compresa tra 10^{-1} e $10^4 \Omega \cdot m$.

La resistività di una data sostanza non è costante, ma varia al variare della temperatura. La legge che esprime questa dipendenza è

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (6)$$

dove ρ è la resistività alla temperatura t (misurata in gradi Celsius), ρ_{20} il valore della resistività misurato a $20^\circ C$ (come riportati in tabella col simbolo ρ), mentre $\alpha = 1/273^\circ C$ e Δt la differenza di temperatura tra t , espressa in $^\circ C$ e la temperatura di riferimento.

YouTube



Laboratorio 34 Seconda Legge di Ohm

YouTube



| Sostanza | ρ (Ω m) | Sostanza | ρ (Ω m) |
|----------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Metalli | | Semiconduttori | |
| Rame | $1.72 \cdot 10^{-8}$ | Carbonio | $3.57 \cdot 10^{-5}$ |
| Argento | $1.63 \cdot 10^{-8}$ | Germanio | 45.4 |
| Alluminio | $2.82 \cdot 10^{-8}$ | Silicio | $6.25 \cdot 10^4$ |
| Ferro | $6.54 \cdot 10^{-8}$ | | |
| Tungsteno | $5.50 \cdot 10^{-8}$ | | |
| Leghe | | Isolanti | |
| | | Vetro | $10^{10} \rightarrow 10^{14}$ |
| Manganina | $4.40 \cdot 10^{-7}$ | Mica | $10^{11} \rightarrow 10^{15}$ |
| Costantana | $4.90 \cdot 10^{-7}$ | Paraffina | $2.97 \cdot 10^{16}$ |
| Nichel-cromo | $1 \cdot 10^{-6}$ | Quarzo | $7.52 \cdot 10^{17}$ |

Figura 288 Tabella con alcune resistività di diversi materiali

Come si vede nella tabella, la resistività dei materiali copre uno spettro di circa 25 ordini di grandezza da 10^{-8} per i metalli fino ad arrivare ad un ordine di 10^{17} per gli isolanti.

La dipendenza della resistenza dalla temperatura discende dalla dipendenza della resistività: viene linearizzata con la dilatazione termica:

$$R = R(t_0) \cdot [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (7)$$

dove t è la temperatura finale, t_0 la temperatura iniziale ed α la costante termica che vale $\alpha = \frac{1}{273,15} \approx 0,00366$

12.11 I superconduttori

La superconduttività o superconduzione, è un fenomeno fisico non descrivibile con la fisica classica, scoperto per la prima volta nel 1911 da **Heike Kamerlingh Onnes**, il quale notò che alcuni particolari materiali, detti poi materiali superconduttori o semplicemente superconduttori, assumono resistenza nulla al passaggio di corrente elettrica al di sotto di una certa temperatura.

La resistività di un conduttore elettrico convenzionale decresce proporzionalmente al decrescere della temperatura. La proporzionalità lascerebbe intendere che a temperature prossime allo zero assoluto la resistività tenda a zero: questo non avviene. Anche in ottimi conduttori come l'oro, il rame o l'argento permane una sensibile resistenza anche a valori prossimi allo zero assoluto.



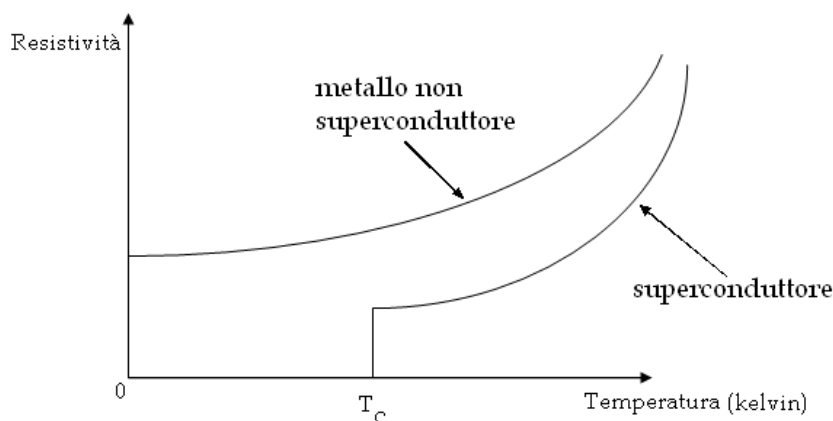


Figura 289 Grafico della resistività nei superconduttori

Nei superconduttori, invece, si manifesta una improvvisa e totale caduta della resistività a zero quando il conduttore è raffreddato a temperature inferiori alla sua temperatura di transizione allo stato di superconduzione, detta anche temperatura critica. Tale temperatura è tipica per ogni materiale superconduttore. La condizione di superconduzione permane se le condizioni che la inducono sono mantenute. L'assenza di resistività sono i fenomeni che definiscono il superconduttore.

Di seguito sono riportate le **temperature critiche** T_c di alcuni metalli:

| Materiale | Temperatura critica T_c |
|-----------|---------------------------|
| Gallio | $1,1^\circ K$ |
| Alluminio | $1,2^\circ K$ |
| Indio | $3,4^\circ K$ |
| Stagno | $3,7^\circ K$ |
| Mercurio | $4,2^\circ K$ |
| Piombo | $7,2^\circ K$ |
| Niobio | $9,3^\circ K$ |

Vi sono inoltre numerosi composti metallici superconduttori (ad esempio il niobio-stagno, $T_c = 17,9^\circ K$, e il magnesio-diboruro, $T_c = 39^\circ K$) e vari composti ceramici le cui temperature critiche possono superare i $120^\circ K$ ($-153^\circ C$). Attualmente il materiale conosciuto con la più alta temperatura critica è il **Seleniuro di Ferro** che a pressione normale (circa 1kPa) è superconduttore fino a circa $30^\circ K$ e, in linea teorica, a pressioni superiori ai 12,5GPa, tale materiale dovrebbe avere una temperatura critica di circa $48^\circ K$. Perché tale materiale possa essere utilizzato per applicazioni pratiche è necessario però spingere la sua temperatura di transizione alla superconduttività a circa $77^\circ K$ (la temperatura a cui bolle l'azoto liquido) e sembra che ciò sia possibile in quanto, facendo crescere un cristallo di Se-

leniuro di Ferro su un sottostrato di Titanato di Stronzio è stato rilevato un drastico aumento della temperatura di transizione del materiale.

12.12 Forza elettromotrice (f.e.m.)

All'interno di un generatore elettrico si verificano processi che trasportano le cariche positive verso il polo positivo e le cariche negative verso quello negativo. Questi processi si oppongono alla repulsione fra cariche elettriche dello stesso segno. Essi possono essere di natura elettrochimica, elettromagnetica, termoelettrica, fotoelettrica, piezoelettrica, ecc.

Il lavoro L necessario al trasporto delle cariche verso i rispettivi poli è direttamente proporzionale alla quantità di carica q ; la forza elettromotrice f è definita come quantità di lavoro compiuto per unità di carica, secondo la formula:

$$f = \frac{dL}{dq} \quad (8)$$

L'unità di misura nel S.I. della **forza elettromotrice** è il *volt*, la stessa che si impiega per misurare il potenziale e la tensione; l'unità di misura **egs** (centimetro-grammo-secondo) è lo **stavolt** (statV).

Nelle formule, la forza elettromotrice viene indicata talora con le lettere f , e , E , V , F_{em} oppure con **f.e.m.**. La f.e.m. rappresenta quindi la **d.d.p.** di un generatore a **circuito aperto**.

In un circuito chiuso invece, la differenza di potenziale ΔV misurata ai poli di un generatore reale risulta sempre leggermente inferiore alla forza elettromotrice f del generatore per effetto della resistenza interna r_i dello stesso:

$$\Delta V = f - I \cdot r_i \quad (9)$$

Quando vengono rappresentati in un circuito elettrico, hanno di solito le seguenti rappresentazioni:

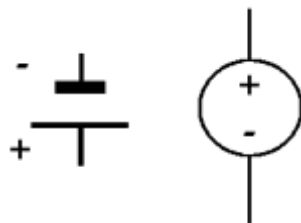


Figura 290 Simboli per i generatori nei circuiti

Essendo quindi $I r_i > 0$ risulterà sempre $\Delta V < f$.

YouTube



12.13 Energia e potenza della corrente elettrica

Nel linguaggio comune, quando si parla di energia elettrica, ci si riferisce all'energia prodotta da una corrente elettrica, da un determinato flusso di cariche elettriche, vale a dire, che in un certo intervallo di tempo attraversa una data superficie. Detta specie d'energia si manifesta in natura, in una forma che non è immediatamente controllabile, non in maniera adeguata, per lo meno, e che pertanto non risulta passibile di sfruttamento da parte dell'uomo: le meravigliose scariche elettriche dei fulmini che tutti noi siano avvezzi ammirare, specie durante i temporali estivi. L'energia elettrica che trova impiego nelle nostre case e nelle attività produttive di qualsiasi genere, invece, è il risultato del processo di trasformazione di altre forme d'energia – l'energia chimica, quella meccanica, solare, termica, etc – mediante appositi dispositivi generalmente noti come generatori di corrente. Per quanto i primi studi sull'elettricità si facciano risalire, niente meno, che a **Talete di Mileto** (624 A.C.) e a **Plinio il Vecchio** (25 D.C.) gli esperimenti risolutivi ai fini dello sviluppo delle conoscenze scientifiche in materia di elettricità risalgono alla seconda metà del XVIII secolo, quando **Alessandro Volta**, riprendendo gli studi di **Galvani** sulle rane, in netta polemica con questi, intuì un nesso di *causalità* tra il contatto tra due distinti metalli e le contrazioni muscolari osservate sull'animale morto. I tessuti umidi e salati della rana, osservò Volta, costituivano un formidabile circuito per la circolazione dell'energia elettrica prodotta dal contatto tra i metalli. Sulla base di tali osservazioni, nel 1799 Volta inventò il primo dispositivo per la circolazione della corrente elettrica, una pila di dischi di metallo alternati da dischetti di cartone imbevuti di una soluzione salina, che fu diretta antesignana della pila elettrica e, che dal suo nome, appunto, fu battezzata pila voltaica.

Fu a **Thomas Edison**, un promettente inventore ed imprenditore statunitense, che dobbiamo una delle più importanti applicazioni delle scoperte di Volta, la lampadina ad incandescenza, impiegata per alimentare piccoli impianti a corrente continua alla fine dell'800, mentre risalgono ai primi del '900 le prime applicazioni della corrente alternata mediante l'uso di appositi dispositivi detti trasformatori.

L'energia elettrica è una delle più diffuse e utilizzate forme di energia. L'energia elettrica è generata da un altro tipo di energia, ad es. termica (combustibili vari), potenziale meccanica (idrica), energia cinetica e pressione (eolica), lavoro meccanico, energia chimica, solare, fissione nucleare e (forse un giorno) fusione nucleare.

Essa si può trasformare a sua volta in altri tipi di energia. Anche per le trasformazioni che producono o consumano l'energia elettrica vale il principio di conservazione dell'energia. Si noti che l'efficienza di trasformazione di un tipo di energia in un altro è in molti casi lontana dall'unità.

12.14 Energia elettrica

Analizziamo ora l'energia necessaria per mantenere il moto delle cariche in un circuito elettrico, cioè attraverso una resistenza. Le cariche si muovono all'interno di un conduttore sotto l'azione di un campo elettrico; in effetti tale campo elettrico accelera gli elettroni liberi per un breve periodo aumentando la loro energia cinetica; ma gli elettroni non si muovono liberamente perché urtano varie volte contro gli ioni del reticolo cristallino del conduttore. In questo modo l'energia assorbita dal campo elettrico si trasforma in energia termica del conduttore. In altre parole:

*un filo conduttore percorso da
corrente si riscalda*

Detti L il lavoro elettrico (lavoro del campo elettrico, fornito dalla batteria), ΔV la tensione ai capi della resistenza R , I l'intensità di corrente, t la durata temporale considerata del flusso di corrente (intervallo di tempo) e q la carica trasportata durante il tempo t , per il trasporto di una quantità di carica:

$$q = I \cdot t \quad (10)$$

attraverso una sezione qualsiasi del conduttore c'è bisogno di un lavoro:

$$L = q \cdot \Delta V \quad (11)$$

da cui segue che:

$$L = \Delta V \cdot I \cdot t \quad (12)$$

ove utilizzando la prima legge di Ohm, sostituendo $\Delta V/R$ al posto di I , otteniamo:

$$L = \frac{\Delta V^2}{R} \cdot t$$

oppure esplicitando la ΔV , sempre dalla prima legge di Ohm, usando la formula (3):

$$L = I^2 \cdot R \cdot t \quad (13)$$

Conservazione dell'Energia per particelle cariche in moto in un campo elettrico

Se una particella di carica q è immersa in campo elettrico muovendosi da un punto A ad un punto B con velocità rispettivamente v_A e v_B e sottoposta ai potenziali elettrici V_A e V_B , si potrà esprimere il Princi-

YouTube



pio di conservazione dell'energia (vedi paragrafo) con la seguente relazione:

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + qV_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + qV_B \quad (14)$$



12.15 Potenza elettrica

La **potenza elettrica** può essere definita come la quantità di lavoro compiuto nell'unità di tempo, ovvero:

$$P = \frac{L}{t} \quad (15)$$

quindi dividendo il lavoro per il tempo si ottiene:

$$P = \Delta V \cdot I \quad (16)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (17)$$

$$P = \frac{\Delta V^2}{R} \quad (17A)$$

Bisogna fare attenzione però al fatto che le relazioni precedenti per il lavoro sono valide solo se l'intensità di corrente è costante nel tempo. Questo vuol dire che i portatori di carica si muovono con velocità (mediamente) costante (velocità di deriva). Il lavoro elettrico totale sarà quindi trasformato integralmente in calore (calore elettrico, calore Joule), visto che non c'è variazione di energia cinetica delle cariche in movimento. Si assume inoltre che il calore prodotto sia rimosso continuamente per evitare l'aumento di temperatura della resistenza ed il conseguente aumento di resistività. Le unità di misura nel SI sono quindi:

- Lavoro: in **joule** (J)
- Potenza: in **watt** (W)

E' evidente dalla formula (13) che il lavoro può essere espresso in funzione della potenza, ovvero:

$$L = P \cdot t \quad (18)$$

potendo così legare tra di loro i Joule con i Watt:

$$1kWh = 10^3 W \cdot h = 10^3 W \cdot 3600s = 3,6 \cdot 10^6 J$$

risultando il kWh una unità di misura molto utilizzata per indicare il lavoro compiuto dalla corrente elettrica e molto familiare anche nel gergo comune, riferendoci ai contatori di corrente elettrica che abbiamo nelle nostre abitazioni.

Il chilowattora è infatti il lavoro compiuto in un'ora impiegando una potenza di un chilowatt.

Segue una tabella in cui sono indicate le potenze elettriche di alcuni apparecchi di uso comune:

| Dispositivo | potenza impiegata (W) |
|-----------------------------|-----------------------|
| Torcia | da 0,5 a 3 |
| Stufetta elettrica | 2000 |
| Lampadina | da 15 a 1000 |
| Caldaia elettrica | 1200 |
| Camino elettrico | da 500 a 1000 |
| Grill elettrico | 2000 |
| Fornello elettrico | da 500 a 1500 |
| Lavatrice | da 2200 a 3200 |
| Ferro da stiro | da 600 a 1200 |
| Forno elettrico | fino a 9000 |
| Microonde | da 600 a 1000 |
| Motore per tram | 150.000 |
| Scalda acqua | fino a 1000 |
| Motore locomotiva elettrica | 5.000.000 |

Ci rendiamo così subito conto di alcuni valori di assorbimento di corrente elettrica nelle nostre abitazioni, cui viene fornita di solito una potenza istantanea di $3,0\text{kW}$. Quando infatti vengono collegati più dispositivi in grado di assorbire molta potenza elettrica, il contatore Enel è provvisto di un dispositivo di sicurezza che provvede a staccare la linea elettrica laddove vengano superati i $3,0\text{kW}$ con una tolleranza massima del 10% (fino a $3,3\text{kW}$).

12.16 Effetto Joule

Abbiamo appena visto come la potenza assorbita da un utilizzatore è data dalla formula (16):

$$P = \Delta V \cdot I$$

se il conduttore soddisfa la prima legge di Ohm, con R costante.

Ma abbiamo visto con la formula (17) che possiamo indicare la potenza assorbita dal conduttore come:

$$P = R \cdot I^2$$

Questa formula gioca un ruolo importante nell'**effetto Joule** che andremo ora a illustrare.

In diverse occasioni, in questo volume, abbiamo più volte parlato di energia. Finora abbiamo introdotto tre diverse forme di energia: l'**energia meccanica** o lavoro che può a sua volta essere presente sotto forma di energia cinetica, **energia potenziale gravitazionale** ed **energia potenziale elastica**. Abbiamo poi introdotto l'**energia termica** o calore e infine l'**energia elettrica**.

Abbiamo più volte detto che **l'energia non si crea e non si distrugge ma si può trasformare** da una forma all'altra.

YouTube



L'effetto Joule descrive la trasformazione di energia elettrica in energia termica, ossia in calore.

Se avviciniamo una mano a una lampadina accesa sentiamo del calore, perché la corrente elettrica passando attraverso il filo di tungsteno incontra una certa resistenza R al suo passaggio. La resistenza gioca nei fenomeni elettrici il ruolo dell'attrito, nel senso che ostacola il passaggio delle cariche elettriche. L'energia elettrica che viene convertita in calore per effetto Joule è data dalla seguente relazione:

$$Q = P \cdot t = \Delta V \cdot I = R \cdot I^2 \cdot t \quad (19)$$

Questa legge prende il nome di **legge di Joule**.

Rendimento di una macchina elettrica

Per via teorica è sempre possibile calcolare la potenza erogata o assorbita da un resistore, ma questa non coincide con la potenza reale. Come altre macchine, anche le macchine elettriche hanno un rendimento $\eta < 1$. Risulta quindi possibile calcolare la potenza reale, noto il rendimento, dalla relazione:

$$P_r = \eta \cdot P_{teorica} \quad (20)$$

dove P_r è la Potenza reale, mentre $P_{teorica}$ è quella teorica .

Moltissimi sono gli elettrodomestici che si basano sull'applicazione dell'effetto Joule: dalla lavatrice allo scaldabagno, dalla stufa elettrica alla piastra metallica, dal fornello all'asciugacapelli al tostapane. Tutti questi elettrodomestici assorbono energia elettrica per convertirla in calore tramite l'effetto Joule. Ricordiamo ora che il calore che forniamo a una certa sostanza di calore specifico c comporta un aumento di temperatura ΔT regolato dalla legge fondamentale della calorimetria, formula (26) paragrafo 7.18:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Uguagliando questa espressione al calore prodotto per effetto Joule, otteniamo:

$$m \cdot c \cdot \Delta T = R \cdot I^2 \cdot t$$

Nella formula bisogna fare però attenzione a non confondere la variazione di temperatura ΔT con il tempo trascorso t .

L'effetto Joule provoca dunque un aumento della temperatura T . Se questo aumento T riguarda anche il conduttore, ad esempio il filamento di una lampadina ad incandescenza, accade un fenomeno interessante.

Infatti all'aumentare di T aumentano gli urti tra gli elettroni e gli ioni positivi e dunque in generale aumenta la resistenza del conduttore, come detto nel paragrafo 12.10

Da quanto abbiamo detto sopra, possiamo anche concludere che una lampadina non soddisfa la prima legge di Ohm, ma la sua resistenza

aumenta all'aumentare dell'intensità di corrente che circola nel vuoto nel filamento di tungsteno. Una corrente maggiore infatti comporta una maggiore produzione di calore Q per effetto Joule e, di conseguenza, una maggiore temperatura T del filamento di tungsteno e una sua maggiore resistenza.

L'effetto Joule è solo uno degli effetti possibili della corrente elettrica. La corrente è in realtà in grado di produrre altri effetti, sia a livello **magnetico** che **chimico**, ma questi aspetti verranno trattati successivamente.

Interpretazione microscopica dell'effetto Joule

L'effetto è dovuto agli urti degli elettroni di conduzione contro gli atomi del conduttore che attraversano. In seguito a tali urti, gli elettroni cedono agli atomi parte della loro energia cinetica, la quale fa aumentare il moto di agitazione termica degli atomi. Di conseguenza, la temperatura del materiale aumenta e l'energia elettrica si trasforma in energia termica.

12.17 Definizioni di ramo, nodo e maglia

- Un **ramo** (o arco) è un singolo percorso circuitale. Nella figura un ramo è ad esempio quella tra i punti **a** e **b** o tra **b** e **c**. Li indichiamo con **ab** e **bc**;
- un **nodo** è un punto in cui convergono almeno due rami. Nella figura, **a**, **b**, **c** e **d** sono quindi quattro nodi.
- una **maglia** è insieme di due o più rami che formano un cammino chiuso. I rami **ab+bc+cd+da** insieme formano una maglia. La indichiamo con **abcd**.

12.18 Leggi di Kirchhoff

Primo principio di Kirchhoff o del nodo

I principi di Kirchhoff sono due relazioni connesse con la conservazione della carica e dell'energia nei circuiti elettrici a parametri concentrati. Furono formulate da **Gustav Robert Kirchhoff** nel 1845 a seguito di esperimenti empirici.

Il **primo principio di Kirchhoff** delle correnti afferma che,

definita una superficie chiusa che attraversi un circuito elettrico in regime stazionario, la somma algebrica delle correnti che attraversano la superficie (con segno diverso se entranti o uscenti) è nulla.

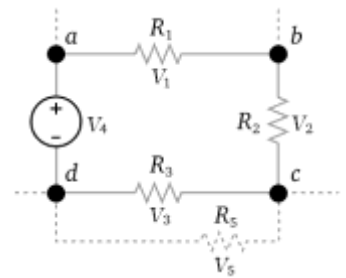


Figura 291 Ramo, Nodo, Maglia in circuiti elettrici

YouTube



In ogni istante di tempo si ha quindi:

$$\sum_{\sigma} I_k(t) = 0 \quad (21)$$

dove σ è la superficie che racchiude parte del circuito e $I_k(t)$ il valore della k -esima corrente (che attraversa σ all'istante t).

In una formulazione semplificata, e definendo una superficie che racchiuda un singolo *nodo* del circuito, si può dire che in esso:

la somma delle correnti entranti è uguale alla somma delle correnti uscenti

Indicando con I_e le correnti entranti e con I_u le correnti uscenti, in formula si scrive:

$$\sum I_e = \sum I_u \quad (22)$$

Se ad esempio, prendiamo un nodo a cui giungono quattro rami del circuito e chiamiamo le correnti I_1 , I_2 , I_3 e I_4 stabilito che dai rami 3 e 4 uscirà corrente, la formula sarà:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

che trasformata nella forma canonica diventa:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0 \quad (23)$$

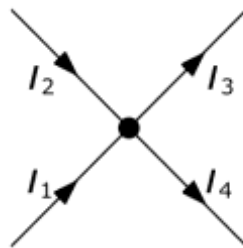


Figura 292 Prima Legge di Kirchhoff o dei nodi

Quindi la somma algebrica totale sarà nulla.

Se risolvendo il circuito otteniamo un valore negativo di corrente questo significa che il verso effettivo con cui la carica percorre il ramo è l'opposto di quello ipotizzato all'inizio.

Il primo principio semplicemente riflette il fatto che **la carica non può essere dispersa**. Se vengono indicati tutti i possibili tragitti lungo i quali il trasferimento della carica è possibile, e se si è certi che una emissione effettiva di elettroni o effetti collaterali non esistono, allora la carica netta spostata verso un nodo, deve uguagliare quella che vi si allontana. Conseguentemente, la velocità totale con cui la carica entra

in un nodo, ovvero la corrente in entrata, deve uguagliare la velocità totale della carica che lo lascia, ovvero la corrente in uscita.

Secondo principio di Kirchhoff o della maglia

Nella formulazione più semplice il principio di Kirchhoff delle tensioni afferma che,

in una maglia la somma delle f.e.m. (somma algebrica) è uguale alla somma delle cadute di tensione.

Equivalentemente,

la somma algebrica delle tensioni lungo una linea chiusa è pari a zero

con il segno appropriato in funzione del verso di percorrenza della maglia stessa.

Se le grandezze elettriche del circuito sono rappresentate nel dominio del tempo (per esempio se è in corrente continua) la somma va intesa come somma algebrica. Se il circuito è in corrente alternata e le grandezze elettriche sono rappresentate da fasori la somma può essere fatta anche sui fasori corrispondenti alle tensioni (quindi come somma vettoriale).

Indicando con V_i le tensioni, si può scrivere:

$$\sum V_i = 0 \quad (24)$$

Una maglia, come chiarito nella definizione, è un percorso chiuso di una rete elettrica che partendo da un nodo torna allo stesso senza attraversare uno stesso ramo due volte; non è necessario che tra due nodi successivi di una maglia ci sia un componente "effettivo" (anche perché si può sempre immaginare la presenza di un componente corto circuito o circuito aperto).

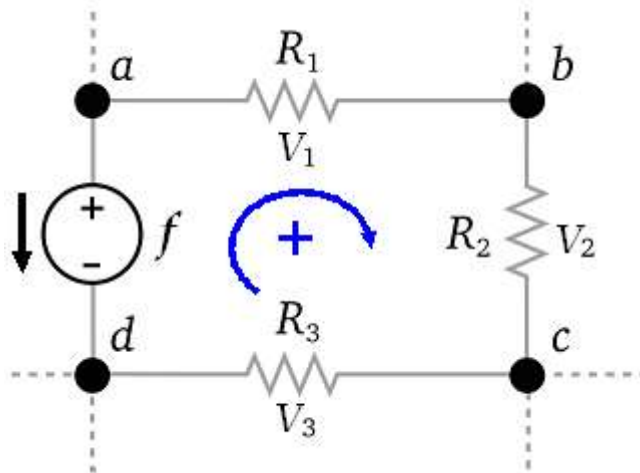


Figura 293 Seconda Legge di Kirchhoff o delle maglie

REGOLA PRATICA

Per i generatori: se la corrente che "fornirebbero" alla maglia è concorde al verso scelto nella maglia, vanno considerate positive, +

Esempio $+f_1$
Se la d.d.p. del generatore è f_1 .

n.b. è stato usato il condizionale (fornirebbero) perché se nella maglia vi è un generatore più grande, in opposizione di fase, non riuscirà ad imporre il suo verso della corrente, ma subirà quello dell'altro generatore.

Per i resistori: se la corrente che lo attraversa è concorde con il verso scelto della maglia, allora è una caduta di tensione e va considerata negativa, -

Esempio. $-R_2 I_2$
Se è attraversato da una corrente I_2 e verso della maglia concorde.

Ad esempio, applichiamo la legge alla maglia **abcd** del circuito in figura. Partiamo dal nodo **a** percorrendo la maglia in senso orario e ipotizziamo che i potenziali elettrici dei nodi da **a** a **d** siano via via decrescenti.

$$\text{Si ha: } V_1 + V_2 + V_3 - f = 0 \quad (25)$$

considerando che sul generatore la f.e.m. che abbiamo indicato con **f** risulta negativa, essendo il verso convenzionale per le tensioni che va dal polo positivo a quello negativo, quindi discorde rispetto al senso orario scelto nella maglia dell'esempio di sopra.

Questa legge corrisponde alla legge di conservazione dell'energia per un campo conservativo, in quanto afferma che il lavoro compiuto per far compiere ad una carica un percorso chiuso deve essere uguale a zero.

12.19 Resistenze di resistori in serie e in parallelo



Collegamento in serie

Si parla di collegamento in serie quando due o più resistenze sono collegati in modo da formare un percorso unico per la corrente elettrica che li attraversa; nel caso di resistenze elettriche a due terminali (detti bipoli) il collegamento in serie prevede che l'estremità di ciascuno di essi sia collegata solo con l'estremità di un altro. Il primo e l'ultimo componente hanno una estremità libera, e a queste si applica la tensione elettrica, in pratica cioè si infilano le due estremità libere del conduttore (filo) in una presa elettrica o vi si applica una batteria o qualsiasi altro generatore di corrente, che grazie alla propria tensione genera una corrente, o meglio un flusso di corrente, che permette il funzionamento di tutto l'insieme.

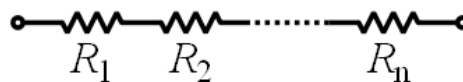


Figura 294 Resistori in serie

Conoscendo il valore della resistenza (in **ohm**) e l'intensità della corrente elettrica (in **ampère**) è possibile determinare la tensione elettrica (in volt) su una resistenza con la legge di Ohm:

$$\Delta V = R \cdot I$$

Conoscendo invece la differenza di potenziale ΔV ai capi del resistore e il valore della sua resistenza **R**, è possibile calcolare l'intensità della corrente elettrica **I** che circola utilizzando la formula inversa:

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

Considerando ora le singole cadute di tensione ΔV dovute alle singole resistenze R_i avremo che:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_n$$

dove sostituendo $\Delta V_i = R_i \cdot I$, essendo la corrente I la stessa che attraversa ciascuna resistenza posta in serie, otteniamo:

$$\Delta V = (R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + \dots + R_n \cdot I)$$

ovvero:

$$\Delta V = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot I \quad (26)$$

Ora tenuto conto che se considerassimo un circuito equivalente a quello costruito in partenza con le n resistenze, sostituito però con un'unica resistenza equivalente, avremmo:

$$\Delta V = R_{eq} \cdot I \quad (27)$$

Uguagliando ora la (26) con la (27) otteniamo la relazione:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (28)$$

che esprime il fatto che la resistenza equivalente di un circuito con resistenze poste in serie tra di loro, è dato dalla somma delle singole resistenze.

Collegamento in parallelo

Si parla di collegamento in parallelo quando le resistenze sono collegate ad una coppia di conduttori in modo che la tensione elettrica sia applicata a tutti quanti allo stesso modo. Quindi quando siamo in presenza di resistenze poste in parallelo, ciò rimane costante per ognuna è la differenza di potenziale ΔV mentre ognuna sarà attraversata da una corrente differente, l'una dall'altra, tenuto conto del Primo Principio di Kirchhoff per il nodo (paragrafo precedente).

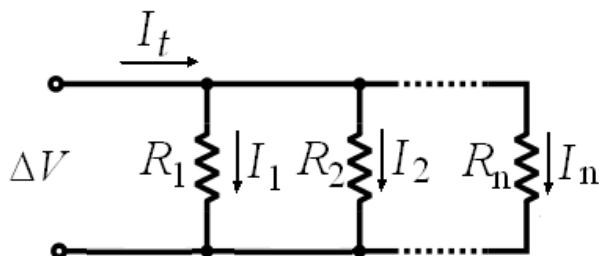
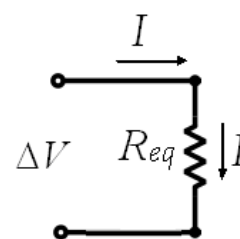


Figura 295 Resistori in parallelo



Dalla prima legge di Kirchhoff sappiamo che la somma algebrica di tutte le correnti entranti in un nodo è uguale alla somma di quelle uscenti. Estendendo il concetto ai diversi rami, risulta:

$$I_t = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (29)$$

mentre sulle resistenze le correnti che le attraversano saranno:

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1}, I_2 = \frac{\Delta V}{R_2}, \dots, I_n = \frac{\Delta V}{R_n}$$

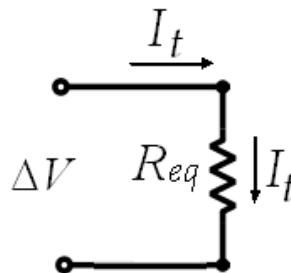
quindi dalla formula (29) sommando le singole intensità di corrente abbiamo:

$$I_t = \frac{\Delta V}{R_1} + \frac{\Delta V}{R_2} + \dots + \frac{\Delta V}{R_n}$$

ovvero:

$$I_t = \Delta V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \quad (30)$$

Ora se consideriamo il circuito equivalente:



applicando la prima legge di Ohm per il circuito equivalente, abbiamo:

$$I_t = \frac{\Delta V}{R_{eq}} \quad (31)$$

Uguagliando le ultime due relazioni otteniamo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (32)$$

che esprime il legame che intercorre tra n resistenze poste in parallelo e l'equivalente circuito avente come resistenza proprio R_{eq} .

Resistenze di shunt

Una resistenza di shunt è una qualunque resistenza che viene **inserita in parallelo** in un circuito per far sì che si possano **misurare correnti** elevate anche con un amperometro con portata inferiore, facendo in modo che gran parte della corrente attraversi proprio la resistenza di shunt piuttosto che il circuito.

La funzione della resistenza di shunt è quella di convogliare attraverso se stessa buona parte della corrente principale, in modo che la bobina mobile dello strumento rimanga interessata soltanto dalla minima corrente sopportabile. Il calcolo della resistenza di shunt si effettua in funzione della resistenza ohmica interna della bobina del microamperometro, che chiamiamo R_i , e del fattore di moltiplicazione n che si vuol ottenere. Avremo quindi:

$$R_s = \frac{R_i}{\left(\frac{I}{i} - 1\right)} \quad (33)$$

dove I è la corrente del circuito, che si vuole misurare, mentre i è quella che realmente attraverserà l'amperometro. Indicando con

$n = \frac{I}{i}$, possiamo riscrivere la relazione precedente come:

$$R_s = \frac{R_i}{(n-1)} \quad (34)$$

Un esempio. Se uno strumento è in grado di misurare l'intensità di corrente di $i=1A$ e presenta una resistenza interna di 100Ω , per raggiungere l'espansione della portata sino a $I=100A$ e tenendo conto che il fattore di moltiplicazione vale:

$$n = \frac{I}{i} = \frac{100}{1} = 100$$

sostituendo, si otterrà:

$$R_s = \frac{R_i}{(n-1)} = \frac{100\Omega}{99} = 1,01\Omega$$

Con la sigla R_s abbiamo inteso definire la resistenza di shunt, che altri indicano invece con R_p , col significato di resistenza in parallelo.

In maniera del tutto analoga si procede quando si ha la necessità di misurare tensioni **oltre il fondo scala** del voltmetro a disposizione. In

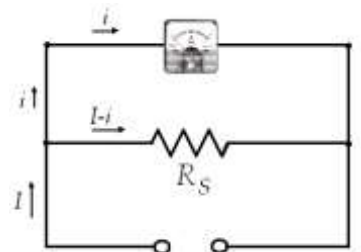
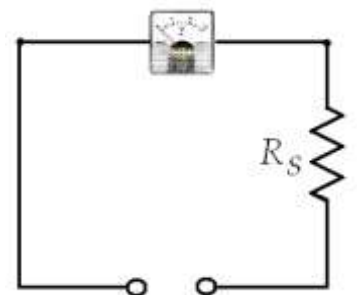


Figura 296 Resistenza di Shunt



questo caso però la resistenza di shunt viene posta **in serie al voltmetro**, in modo che la maggior parte della caduta di tensione si abbia proprio sulla resistenza di shunt.

In questo caso supponiamo di voler misurare una certa ΔV ai capi di un circuito, con il voltmetro avente una resistenza interna R_i , mentre R_s è il valore resistenza di shunt che sarà necessario inserire. Avremo quindi che :

$$\Delta V = R_i \cdot I + R_s \cdot I$$

da cui dividendo ambo i membri per $R_i \cdot I$ otteniamo:

$$\frac{\Delta V}{R_i \cdot I} = 1 + \frac{R_s}{R} \quad (35)$$

Ora, detta $\Delta V'$ la d.d.p. ai capi del voltmetro, avremo:

$$\frac{\Delta V}{\Delta V'} = 1 + \frac{R_s}{R} \quad (36)$$

da cui:

$$R_s = \left(\frac{\Delta V}{\Delta V'} - 1 \right) \cdot R_i \quad (37)$$

Esempio: Se il nostro voltmetro possiede una resistenza interna di 70Ω e volessimo ottenere un fattore di amplificazione del fondo scala pari a 20 (quindi 20 volte in più di quanto è in grado di misurare lo strumento così costruito), dovremo inserire, in serie al voltmetro, una resistenza di shunt pari a:

$$R_s = (20 - 1) \cdot 70\Omega = 1330\Omega$$

Quindi se il nostro voltmetro era in grado di misurare inizialmente una tensione massima di soli 5V, dopo l'inserimento di una resistenza di shunt pari a 1330Ω , ci saranno consentite misurazioni con una nuova portata del voltmetro pari a 100V.

Osservazione

E' facile intuire come, anche a livello di fabbricazione, questa tecnica consenta enormi benefici a livello costruttivo, potendo così costruire anche un solo tipo di amperometro e/o di voltmetro con portate diverse, ma composte tutte dallo stesso dispositivo principale, differendo solo per le resistenze di shunt opportunamente inserite.

12.20 Circuiti RC

Si definisce circuito **RC** quel particolare tipo di circuito in cui sono collegati una resistenza e un condensatore. La differenza principale rispetto a dei semplici circuiti a corrente continua in cui sono presenti o delle resistenze (collegate tra loro in vari modi) o dei condensatori, consiste nel fatto che in questo caso la corrente è variabile nel tempo, e quindi sia il processo di carica che quello di scarica, non sono istantanei. Per processo di **carica/scarica** si intendono due tipi di operazioni per cui grazie al passaggio di corrente le armature del condensatore si caricano (o scaricano).

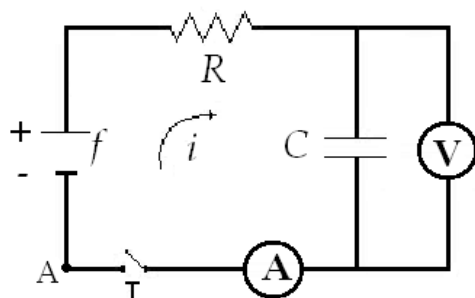


Figura 297 Circuito RC

Una resistenza R e un condensatore elettrolitico C sono collegati in serie con un generatore di forza elettromotrice f . Inoltre sono presenti altri due strumenti: un amperometro A , in serie con la resistenza, per misurare l'intensità della corrente passante nel circuito (sarà dell'ordine di pochi μF), e un voltmetro V collegato in parallelo con il condensatore per rilevare la differenza di potenziale tra le armature del condensatore stesso.

Carica di un condensatore

L'interruttore T è inizialmente aperto. Si assume che inizialmente la carica presente sulle armature del condensatore sia nulla: in questo modo ha inizio il processo di carica, che termina quando il condensatore si è caricato e la differenza di potenziale tra le sue armature ha raggiunto il valore prodotto dal generatore. La freccia indica il verso seguito dalla corrente elettrica. Alla fine del processo la carica raggiunge il valore $Q = C \cdot f$.

Se consideriamo un qualunque istante t , dopo che sulle armature si è già concentrata una carica q , partendo da quell'istante sullo stesso si concentrerà una ulteriore carica Δq in modo che l'intensità di corrente risulti:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (38)$$

Applicando la *seconda legge di Kirchhoff* alla maglia e considerando che sul condensatore vi è una caduta di tensione che vale $\frac{q}{C}$, partendo dal punto A e facendo il giro in senso antiorario, abbiamo:



$$V_A - \frac{q}{C} - R \cdot i + f = V_A$$

da cui semplificando le V_A si ricava:

$$f - \frac{q}{C} = R \cdot i \quad (39)$$

Quando il condensatore raggiungerà la carica massima Q la corrente nel circuito risulterà nulla, avendo quindi:

$$Q = C \cdot f \quad (40)$$

Al contrario, il valore massimo della corrente si ottiene al momento in cui il circuito viene chiuso (istante iniziale), quando la carica è ancora nulla. Si avrà quindi:

$$i_0 = \frac{f}{R} \quad (41)$$

Con il *calcolo integrale* applicato alla relazione (39) si ottengono le relazioni che esprimono, istante per istante, la carica q accumulata ai capi del condensatore e della corrente i che man mano fluisce, decrescendo fino ad annullarsi, nel circuito:

$$q = C \cdot f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (42)$$

e

$$i = \frac{f}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (43)$$

dove e rappresenta il **numero di Nepero**, numero irrazionale (illimitato ed aperiodico) utilizzato spesso nelle funzioni esponenziali in matematica, che vale 2,718281... .

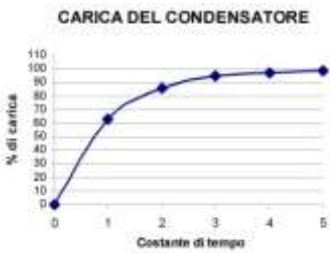
Ricordando inoltre che $\Delta V = Q/C$, siamo in grado di esprimere anche la d.d.p. misurata dal voltmetro, ai capi del condensatore, istante per istante, risultando:

$$\Delta V = f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (44)$$

Spesse volte, le formule prima presentate vengono espresse con la costante τ anziché RC , ove si è posto:

$$\tau = RC$$

che prende il nome di **costante di tempo**.



Energia immagazzinata

L'energia immagazzinata in un condensatore è pari al lavoro fatto per caricarlo. Consideriamo ora un condensatore carico di cariche $+q$ e $-q$ e che abbia capacità C . Per spostare una quantità minima di carica dq da un'armatura all'altra tra cui vi è una differenza di potenziale $\Delta V = q/C$ ($C = q/\Delta V$), dovremo compiere un lavoro pari a dW :

$$dW = \Delta V dq = \frac{q}{C} dq$$

Considerando che il condensatore sia inizialmente totalmente scarico, integrando tra 0 e Q , a condensatore totalmente carico, avremo l'energia immagazzinata nel condensatore:

$$W = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (45)$$

Ricordando che $\frac{Q}{C} = \Delta V$, potremo riscrivere l'Energia immagazzinata come

$$W = \frac{1}{2} Q \Delta V \quad (46)$$

Dalla (42) e (44) si ottiene:

$$W = \frac{1}{2} C f^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (47)$$

Che rappresenta l'energia immagazzinata in ogni istante di tempo t . Quando il tempo tende a $+\infty$, l'energia diventa

$$W = \frac{1}{2} C f^2 \quad (48)$$

Scarica di un condensatore

Se adesso distacciamo il generatore di corrente, in modo che il circuito comunque resti chiuso, in corto circuito, il condensatore inizierà il processo di scarica, fino a scaricarsi totalmente.

Inizialmente, la carica è massima, cioè $Q = C \cdot f$ mentre la d.d.p. coincide con f .

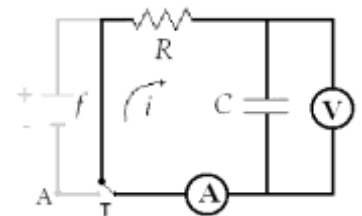
Con il trascorrere del tempo la carica Q , come detto tende a diminuire sempre più, valendo la relazione iniziale:

$$f - R \cdot i = 0$$

da cui essendo man mano $\Delta V = q/C$, otteniamo:

$$\frac{q}{C} = R \cdot i \quad (49)$$

YouTube



dove q rappresenta la carica residua ancora presente sulle armature, mentre i l'intensità di corrente misurata dall'amperometro in un determinato istante.

Anche in questo caso, utilizzando il calcolo integrale, dalla (44) possiamo ottenere le relazioni che esprimono la carica residua q , detta Q la carica iniziale, l'intensità di corrente istantanea e la d.d.p. ai capi del condensatore, man mano che il tempo trascorre risultano:

$$q = Q \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (50)$$

$$i = \frac{Q}{RC} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (51)$$

Se adesso consideriamo $t \rightarrow \infty$ (diciamo un tempo comunque grande) il termine esponenziale $e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow 0$ (dove $\tau = R \cdot C$ sta ad indicare una costante), esprimendo il fatto che sia la carica, che la corrente che la tensione tendono ad annullarsi, trascorso un certo tempo.

La figura che segue rappresenta il processo di scarica di un condensatore, dove sull'asse delle ascisse è rappresentata la costante di tempo τ .

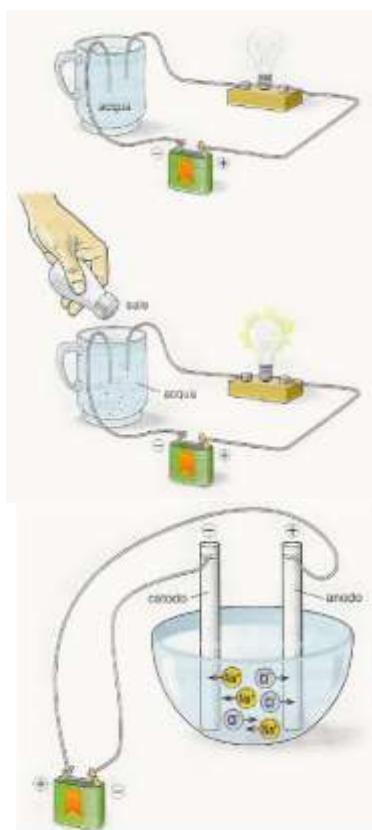


Figura 298 Elettrolisi

12.21 Elettrolisi

Osserviamo ora il passaggio della corrente elettrica attraverso i fluidi e in particolare attraverso l'acqua e le soluzioni. Se inseriamo in un circuito, completo di generatore e utilizzatore, un bicchiere con acqua distillata, vedremo che la lampadina non si accende. Facciamo lo stesso inserendo nell'acqua un po' di sale: la lampadina si accende. Perché accade ciò?

L'acqua pura è un cattivo conduttore di elettricità. Invece, quando nell'acqua sono sciolte altre sostanze (acidi o sali) si ottengono delle soluzioni che funzionano come buoni conduttori. La soluzione di acqua e sale si comporta da buon conduttore perché il soluto, il cloruro di sodio ($NaCl$), è in grado, una volta sciolto in acqua, di dissociare le sue molecole in ioni positivi o cationi (Na^+) e ioni negativi o anioni (Cl^-) secondo la reazione:



dove Na^+ è uno ione di sodio mentre Cl^- rappresenta uno ione di cloro. Se immergiamo le estremità di un circuito in un bicchiere contenente acqua distillata la corrente non passa e la lampadina non si accende. Se nel bicchiere invece c'è una soluzione di acqua e sale, la lampadina si accende. Questo accade perché il cloruro di sodio si dis-

socia in ioni, cioè in particelle cariche di elettricità positiva e negativa. Questo fenomeno è detto idrolisi (*hydor* = acqua, *lysis* = scioglimento) e le sostanze che lo determinano sono dette **elettroliti**.

A seconda che si dissocino più o meno, ossia in relazione al loro grado di dissociazione, esistono elettroliti deboli, come l'acqua che si dissocia soltanto in minima parte in cationi H^+ e anioni OH^- , e elettroliti forti, come i sali in genere, gli acidi e le basi. Ma perché gli elettroliti forti sono buoni conduttori di elettricità?

Quando inseriamo nel circuito l'acqua distillata questa si comporta da isolante; gli elettroni si spostano dal polo negativo della pila (**catodo**) verso il polo positivo della pila (**anodo**). Una volta arrivati all'elettrodo (formato per lo più da una barretta di metallo o di carbone) immerso in acqua, si arrestano, il circuito si apre e la corrente non passa.

Se all'acqua sostituiamo una soluzione di cloruro di sodio, gli elettroni arrivati all'elettrodo attirano verso di sé i cationi Na^+ , liberi di muoversi nella soluzione, i quali catturano un elettrone e diventano così neutri. Contemporaneamente, all'altro elettrodo si dirigono gli anioni Cl^- , attirati dal polo positivo della pila che richiama elettroni. Una volta arrivati, cedono un elettrone neutralizzandosi. Pertanto, l'elettrodo collegato al polo negativo della pila (**catodo**) cede elettroni ai cationi, mentre l'elettrodo collegato al polo positivo della pila (**anodo**) sottrae elettroni agli anioni. In questo modo si ha un trasporto di elettroni all'interno della soluzione che chiude il circuito e fa passare corrente elettrica.

Tale reazione chimica viene detta elettrolisi, che significa “scissione mediante elettricità” ed è per questo motivo che si parla di effetto chimico dell' elettricità. Osserva la dissociazione del cloruro di sodio nei suoi ioni: gli ioni positivi migrano al polo negativo o catodo, dove si scaricano trasformandosi in sodio metallico, quelli negativi al polo positivo o anodo, dove si scaricano trasformandosi in cloro gassoso. Ma dove viene maggiormente sfruttato l'effetto chimico della corrente elettrica, ossia l'elettrolisi?

12.22 La pila di Volta

Il primo generatore di corrente è stato realizzato da Alessandro Volta nel 1801. La sua pila funzionava in base ad un principio abbastanza semplice, detto effetto Volta. Se infatti prendiamo una lastrina di rame ed una di zinco e le mettiamo a contatto, tra i due metalli si crea una differenza di potenziale di $0,78V$. Per utilizzare tale tensione dobbiamo però mettere tra le due piastrine un feltro imbevuto di acqua ed acido solforico e collegarle con un filo metallico.

Allora nel conduttore si avrà un regolare flusso di elettroni (corrente elettrica) di $1,08V$ a causa delle reazioni chimiche innescate dall'acido solforico. L'acido, che aggredisce tutti i metalli, agisce di più sullo

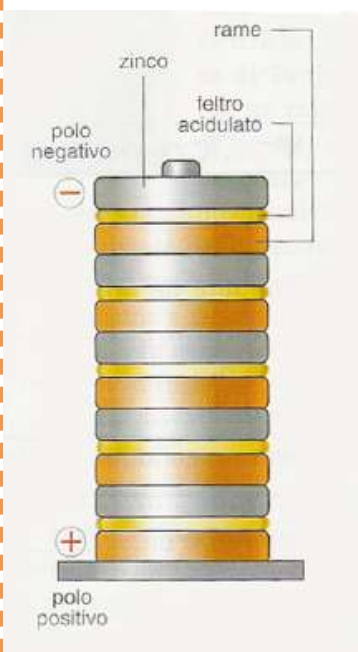


Figura 299 Pila di Volta

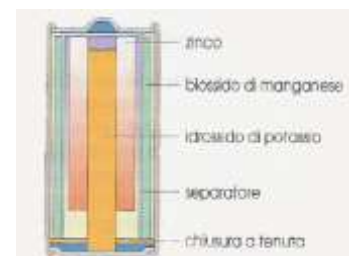


Figura 300 Pila alcalina

zinco che sul rame e si crea un flusso di elettroni dallo zinco al rame che determina così la differenza di potenziale tra i due dischetti.

L'apparecchio di Volta era formato da una serie di dischi, di rame, zinco e feltro, disposti l'uno sull'altro in modo da formare una pila (colonna). In tal modo, collegando con un filo metallico l'ultima piastra di rame con la prima di zinco si origina un flusso di elettroni che dallo zinco (polo negativo) si dirige verso il rame (polo positivo) e la tensione è pari alla somma delle singole tensioni di ogni coppia di lamine metalliche.

Le pile alcaline

Recentemente sono state introdotte pile a lunga durata (**alcaline**) con struttura ed elettrolito diverse dalle *Leclanché*. La loro caratteristica è di fornire una tensione costante per un tempo tre volte superiore a quello offerto dalle pile zinco-carbone. La differenza rispetto alle pile zinco-carbone sta nell'elettrolita, che in questo caso non è costituito da una sostanza acida, bensì da una sostanza alcalina (sostanze antagoniste degli acidi, dei quali annullano l'acidità). In questo tipo di pile l'elettrolita è costituito da idrossido di potassio.

Le pile al mercurio

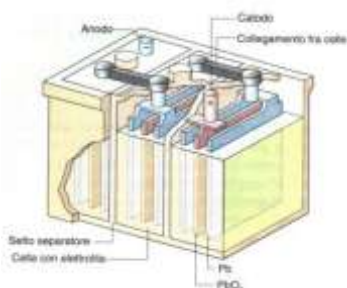
Per fornire l'energia necessaria al funzionamento di alcuni apparecchi di piccole dimensioni, come orologi da polso, calcolatrici, macchine fotografiche, si utilizzano pile che hanno come sostanze conduttrici ossido di mercurio e polvere di zinco e come elettrolita utilizzano idrossido di potassio. La loro caratteristica principale è quella di avere una durata di funzionamento ancora più elevata di quelle alcaline. Queste pile hanno una forma molto piatta, per cui sono dette a bottone, e sono contenute in un rivestimento di acciaio.



Figura 301 Pila al mercurio

Gli accumulatori al piombo

L'accumulatore è un apparecchio elettrico molto diffuso, sia per l'avviamento dei motori a scoppio, sia per muovere i carrelli industriali, sia per impianti di emergenza. Esso non è un generatore, poiché si limita ad accumulare, cioè conservare, l'energia elettrica ricevuta da un generatore, ma può erogarla ad un apparecchio utilizzatore. Un accumulatore al piombo è formato da coppie di griglie di piombo, immerse in una soluzione di acido solforico ed acqua distillata. Le griglie costituiscono gli elettrodi e sono alternate in modo che ogni griglia collegata al polo negativo sia opposta ad un'altra collegata al polo positivo. Durante la carica dell'accumulatore, l'energia elettrica provoca delle reazioni chimiche, e gli ioni positivi si depositano al catodo sotto forma di atomi di piombo: le griglie positive si ricoprono con uno strato di biossido di piombo e la superficie di quelle negative si trasforma in piombo spugnoso. Quando l'accumulatore viene collegato al circuito



esterno (scarica) restituisce l'energia accumulata durante la carica tramite lo spostamento di ioni: le reazioni avvengono in senso contrario e si ha un passaggio della corrente in senso inverso rispetto a quello di carica. Gli accumulatori per le autovetture (batteria) sono formati da una serie di 6 elementi, detti celle, ed ogni elemento fornisce la tensione di 2V .

12.23 Disputa Galvani-Volta

“Questo è il gran passo, fatto sulla fine dell'anno 1799, passo che mi ha condotto ben tosto alla costruzione del nuovo apparato scuotente; il quale ha cagionato tanto stupore a tutti i Fisici; a me grande soddisfazione.”

E' così che **Alessandro Volta**, nel 1801, ricorda la realizzazione della pila, che, di fatto, è il culmine dei suoi studi e delle sue esperienze non solo nel campo dell'elettricità, ma anche in altri rami della fisica. L'invenzione della pila è, inoltre, anche il momento conclusivo della disputa con **Luigi Galvani**, accanito sostenitore dell'elettricità animale.

Nel marzo 1792, Volta era venuto a conoscenza degli esperimenti di Galvani. Immediatamente prova a ripeterli e, all'inizio, ritiene di poter dar ragione allo scienziato bolognese. In realtà, dopo un'ulteriore indagine, giunge a credere che le contrazioni della rana non siano dovute ad una sua elettricità intrinseca, messa in circolazione grazie all'arco metallico collegato tra nervo e muscolo, ma ad un'elettricità esterna, che è provocata dal contatto dei due metalli che costituiscono l'arco. In questo caso la rana avrebbe il solo ruolo di elettroscopio, semplice ma molto sensibile. Egli porta avanti la sua tesi dopo aver variato gli oggetti degli esperimenti (cioè gli animali e i metalli) e aver, quindi, osservato che le contrazioni si verificano solo se l'animale è toccato da un arco bimetallico.

L'idea avanzata da Volta provoca una vera e propria divisione del mondo scientifico in *galvaniani* e *voltiani*. Nel 1794, però, sono adottate dai galvaniani ulteriori prove in favore dell'elettricità animale: mostrano, infatti, che le contrazioni possono avvenire anche solo ponendo a contatto i nervi crurali con i muscoli delle zampe delle rane, purché in presenza di sangue.

Nel 1797, invece, è Volta a ottenere un punto in suo favore: servendosi dell'elettroscopio condensatore, riesce a mettere in evidenza la differenza di tensione che si stabilisce tra due metalli senza bisogno di utilizzare la rana. La disputa tra Volta e Galvani, dopo la morte di costui, è tenuta viva dalla scuola di Bologna. Nel 1799, poi, sovrapponendo coppie di metalli diversi separati da un conduttore umido, egli realizza uno strumento capace di generare corrente elettrica continua e che chiamerà organo elettrico artificiale. Il nome con cui questo strumento è noto a noi oggi (pila di Volta) si richiama alla sua forma. Dall'invenzione di Volta si svilupperanno l'elettrochimica e, in seguito, l'elettromagnetismo e gli studi sulle applicazioni moderne

YouTube



Figura 302 Disputa Galvani-Volta

CURIOSITA'

Qualche secolo fa le dispute scientifiche erano qualcosa molto in voga ed a volte venivano svolte nelle piazze o nei teatri, come delle vere e proprie rappresentazioni teatrali. Vi era una sorta di giuria che poneva i quesiti ai disputandi, con tanto di pubblico ad assistere e vedere chi avesse la meglio.

In tempi più recenti, seppur in modi diversi, sono memorabili le “dispute” scientifiche tra Albert Einstein e Niels Bohr sulla Fisica quantistica, non digerita del tutto da Einstein che ad ogni occasione proponeva esperimenti mentali che tendessero a confutarne la validità.

Altri tempi...

dell'elettricità; dalle ricerche di Galvani, invece, circa trent'anni dopo, trarranno origine l'elettrofisiologia e la moderna biologia molecolare.

12.24 Corrente elettrica nei gas

In un gas non vi sono portatori di carica. Per sua natura un gas è un isolante perfetto. Si può ionizzare una frazione (molto piccola) delle molecole di un gas investendolo con radiazioni elettromagnetiche (luce visibile, raggi ultravioletti, raggi X, raggi gamma) oppure con corpuscoli veloci di dimensioni subatomiche (elettroni, protoni) emessi da sostanze radioattive o accelerati con acceleratori di particelle.

In un gas ionizzato sono presenti ioni positivi, elettroni liberi e ioni negativi. Per osservare il fenomeno della scarica elettrica in un gas, lo si racchiude in un tubo trasparente, alle cui estremità sono fissati due elettrodi metallici. A qualsiasi pressione l'intensità non è direttamente proporzionale alla d.d.p. ai capi del tubo. Ciò significa che per i gas non vale la prima legge di Ohm.

Variando la pressione la scarica assume aspetti diversi:

- **a pressione atmosferica:** se la tensione (d.d.p.) è elevata scocca una scintilla accompagnata da un rumore secco. È il risultato di un processo chiamato produzione di ioni a valanga. Ogni scintilla è accompagnata da emissione luminosa.
- **a bassa pressione** (1000Pa cioè un centesimo di atmosfera) la scintilla è silenziosa e prende il nome di scarica a bagliore.
- **a pressioni inferiori** la luminosità diminuisce per poi scomparire del tutto.

Si hanno i **raggi catodici** quando la pressione nel tubo è dell'ordine di $10^{-1} \div 10^{-2} Pa$, sulla parete di fronte al catodo compare una luminescenza verde. I raggi catodici sono costituiti da elettroni emessi dal catodo a causa del bombardamento che esso subisce da parte degli ioni positivi. Gli elettroni vengono accelerati verso l'anodo e raggiungono velocità di circa 100.000km/s. Collidendo con il vetro in prossimità dell'anodo cedono la loro energia cinetica, che viene re immessa sottoforma di energia luminosa. Nei tubi catodici gli elettroni possono essere emessi dal catodo anche per effetto termoionico.

12.25 Conduzione elettrica nel vuoto

La corrente elettrica nel vuoto si manifesta solo come moto di particelle dotate di cariche elettriche, fornite da opportune sorgenti (ad esempio elettroni emessi da un filamento per effetto termoelettronico). L'effetto termoionico, detto anche **effetto termoelettronico**, consiste nell'emissione indotta termicamente di particelle cariche (elettroni o ioni, a cui a volte ci si riferiva nella antica letteratura scientifica come a "termoioni"), da parte di un materiale, tipicamente un metallo riscaldato ad alta temperatura, per esempio a seguito del passaggio di una corrente elettrica.

L'emissione degli elettroni avviene come conseguenza dell'aumento della loro energia cinetica, rivelato come aumento della temperatura,

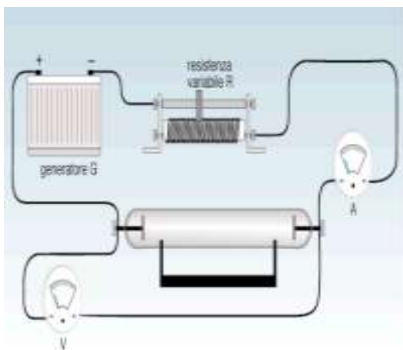


Figura 303 Corrente elettrica nei gas

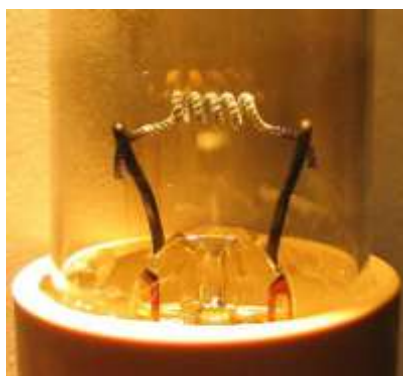


Figura 304 la lampadina a vuoto

che permette loro di vincere la forza che li trattiene vincolati agli atomi del materiale. La particella emessa tenderà a rimanere in prossimità della superficie emettitrice, superficie che si sarà caricata di una carica opposta nel segno ma uguale in modulo al totale delle cariche emesse. Tuttavia, l'emettitore tornerà nello stesso stato precedente all'emissione se collegato ad una batteria, il cui flusso di corrente neutralizzerà tale carica.

Un esempio classico di emissione termoionica è quella che si verifica nei **tubi a vuoto**, dove degli elettroni sono emessi da un catodo metallico ad alta temperatura in un tubo in cui è stato realizzato il vuoto (noto al momento della scoperta e delle prime applicazioni come Effetto Edison). Oggi, con la locuzione "effetto termoionico" si fa riferimento ad ogni processo di emissione di carica eccitata termicamente, anche quando la carica è emessa da una regione all'altra, entrambe nello stato solido. Tale processo è di cruciale importanza in una varietà di dispositivi elettronici e può essere utilizzato per la generazione di potenza e per il raffreddamento. L'intensità della corrente di cariche aumenta notevolmente al crescere della temperatura, tuttavia le emissioni da una superficie metallica in un ambiente in cui è stato realizzato il vuoto diventano significative soltanto per temperature superiori ai 1000 K. La scienza che ha studiato il fenomeno è stata indicata come la termoionica, ma tale nome è caduto gradualmente in disuso.

12.26 I semiconduttori

I semiconduttori sono materiali che hanno una resistività (o anche una conducibilità) intermedia tra i conduttori e gli isolanti. Essi sono alla base di tutti i principali dispositivi elettronici e microelettronici a stato solido quali i transistor, i diodi e i diodi ad emissione luminosa (LED). Le proprietà dei semiconduttori diventano interessanti se vengono opportunamente drogati con impurità. Le loro caratteristiche quali resistenza, mobilità, concentrazione dei portatori di carica sono importanti per determinare il campo di utilizzo. La risposta di un semiconduttore a una portante dipende dalle sue caratteristiche intrinseche e da alcune variabili esterne come la temperatura.

I semiconduttori naturali usati per la produzione di dispositivi elettronici sono stati per molti anni il **silicio** e il **germanio**. Il germanio è andato, con il passar del tempo, in disuso a causa delle migliori prestazioni del silicio. Ora si stanno diffondendo semiconduttori costituiti non da elementi naturali ma da leghe come l'*arseniuro di gallio*. Il silicio e il germanio appartengono al gruppo del carbonio e sono tetraivalenti, sono quindi in grado di formare quattro legami covalenti

In un reticolo cristallino ogni atomo di silicio è dunque legato ad altri quattro atomi. Senza perdere in efficacia precisione possiamo immaginarci un modello del reticolo bidimensionale

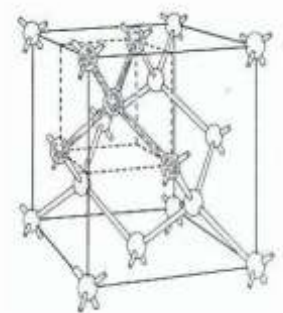


Figura 305 Struttura atomica di un semiconduttore

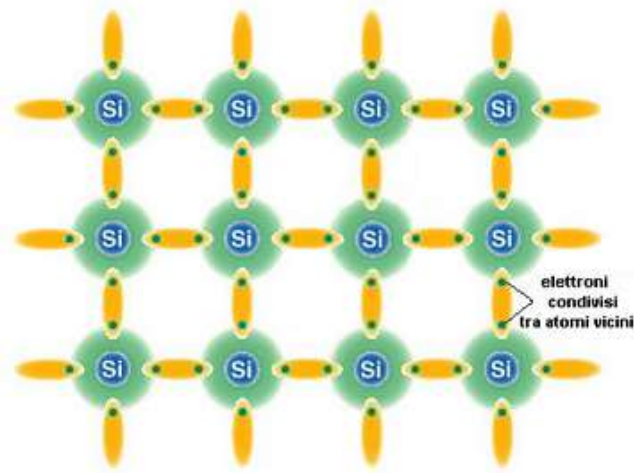
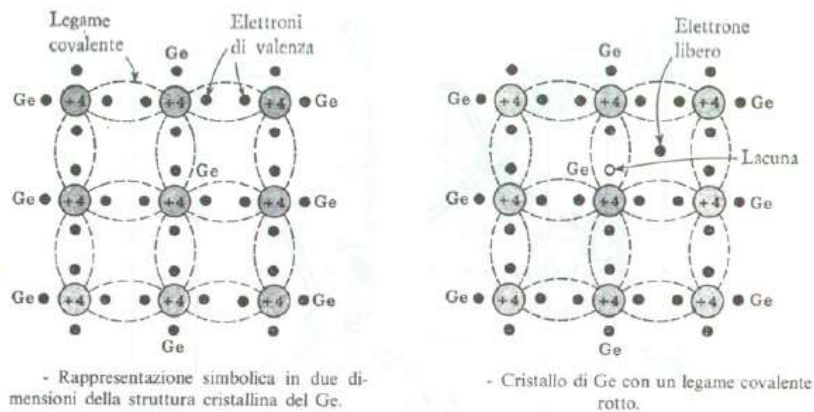


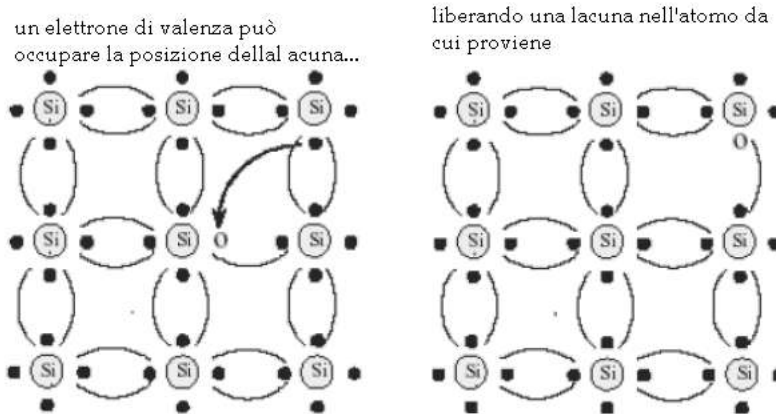
Figura 306 Reticolo cristallino di un atomo di silicio

Le lacune

La prima cosa che bisogna comprendere è che in un semiconduttore, a differenza dei conduttori, esistono due tipi di cariche libere: cariche libere negative costituite dagli elettroni e cariche libere positive dette lacune. Premettiamo fin da subito che le lacune, intese come cariche positive, non esistono ma costituiscono soltanto un modello molto efficace per rappresentare il comportamento dei semiconduttori. Immaginiamo che un elettrone di valenza, coinvolto in un legame fra due atomi di silicio, acquisisca l'energia sufficiente per effettuare il salto dalla banda di valenza alla banda di conduzione. L'elettrone andrà ad arricchire la popolazione di elettroni liberi mentre l'orbitale da cui proveniva presenterà uno spazio vuoto. Tale spazio vuoto è quello che noi chiamiamo lacuna.



Ora accade che l'energia necessaria perché un elettrone vincolato in un orbitale di legame vicino balzi nel legame semivuoto andando così ad occupare la lacuna, è molto bassa. Quindi l'effettuazione di questo salto avverrà con elevata probabilità. Se si riflette un attimo si nota come l'evento possa essere descritto dicendo che sia stata la lacuna a spostarsi in direzione opposta.



Modelli raffinati di fisica hanno dimostrato che effettivamente si può descrivere efficacemente la fisica dei semiconduttori immaginando di avere a che fare con cariche positive libere di muoversi all'interno del reticolo cristallino. Ricordando che le lacune non sono reali cariche positive, da questo momento in poi, per la sola ragione che abbiamo un modello efficace per descrivere il comportamento dei dispositivi a semiconduttore, parleremo sempre di correnti di lacune e correnti di elettroni.

Drogaggio dei semiconduttori

I semiconduttori offrono una resistività troppo elevata per poter essere utilizzati come base dei dispositivi elettronici. Pur avendo un numero di cariche libere superiore a quello degli isolanti, questo non è ancora sufficiente.

Per aumentare il numero di portatori di carica liberi e diminuire quindi la resistività si utilizza un procedimento detto drogaggio, consistente nell'inserire, all'interno del reticolo cristallino del semiconduttore, elementi chimici diversi. Esistono due forme di drogaggio: **tipo n** e **tipo p**.

Drogaggio di tipo n

Con questo tipo di drogaggio ci si pone l'obiettivo di aumentare il numero di elettroni liberi. Si realizza inserendo nel reticolo cristallino del semiconduttore materiale drogante pentavalente (cinque elettroni di valenza) come il fosforo.

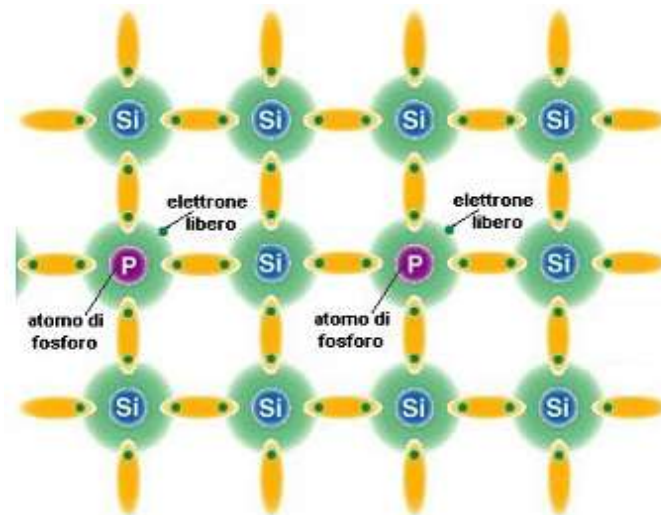


Figura 307 Drogaggio di un semiconduttore di tipo n

Il fosforo è in grado di formare cinque legami differenti, ma a causa della struttura del reticolo cristallino, esso risulta circondato da soli quattro atomi di silicio. Poiché il quinto legame non si può formare, l'elettrone superfluo, non essendo coinvolto in un orbitale di legame, abbisogna di una piccola quantità di energia per diventare libero. In pratica, per ogni atomo di fosforo che introduciamo nel reticolo del semiconduttore si introduce un elettrone libero.

Drogaggio di tipo p

Con questo tipo di drogaggio aumentiamo il numero di lacune. Si introducono nel reticolo atomi di materiale trivalente come il Boro.

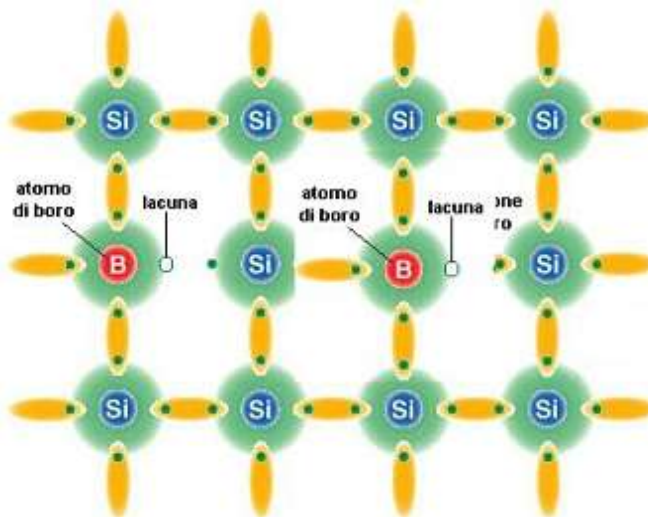


Figura 308 Drogaggio di un semiconduttore di tipo p

Poiché il boro può realizzare tre legami soltanto, pur essendo circondato da quattro atomi di silicio, si realizza automaticamente una lacuna, poiché vi sarà un orbitale incompleto fra i quattro orbitali di legame in cui sarà coinvolto l'atomo di boro.

Il diodo a giunzione

Il diverso comportamento dei semiconduttori drogati n o p permette la costruzione di dispositivi elettronici, per esempio diodi e transistori. Sfruttando le caratteristiche che si osservano mettendo a contatto un semiconduttore n e uno p, si forma una giunzione **p-n**. La giunzione costituisce il dispositivo chiamato diodo a giunzione, che è un componente non lineare.

Le sue dimensioni sono molto ridotte: minori di 2-3 mm circa. Dal punto di vista elettrico il diodo si rappresenta così:

La corrente e la tensione devono essere sempre indicate come nel disegno nella convenzione degli utilizzatori.

La realizzazione di molti componenti attivi a semiconduttore in elettronica, è dovuta alla realizzazione ed utilizzo della giunzione P-N; essa viene realizzata sia nei diodi che nei transistor tramite processi di fabbricazione automatizzati, utilizzando essenzialmente il Germanio ed il Silicio come materiale semiconduttore. Essa è un cristallo a semiconduttore, formato da due zone o regioni, come visibili in figura, la zona P e la zona N adiacenti l'una con l'altra e di materiali semiconduttori diversi, di cui la prima è formata appunto da silicio drogato con boro ed ha eccedenza di elettroni, mentre la seconda, è formata da silicio con una piccolissima quantità di fosforo ad eccedenza di lacune (le lacune sono portatrici di carica elettrica le quali contribuiscono al passaggio della corrente elettrica nei semiconduttori). Il principio di funzionamento dunque si basa sulla capacità di trasferimento di elettroni dalla zona P alla zona N, chiamato fenomeno di diffusione, ed a seconda della polarizzazione che gli si applica ai suoi capi.

Infatti se alla zona P gli si applica una tensione positiva rispetto alla zona N (in questo caso parliamo di polarizzazione diretta), si riduce l'altezza della barriera tra le due zone, e di conseguenza le lacune, che sono portatori maggioritari della nella zona P, passano per diffusione nella N; in quest'ultima zona aumenta la concentrazione dei portatori minoritari (lacune) ed aumenta la ricombinazione con gli elettroni. Lo stesso meccanismo viene adottato per gli elettroni liberi che passano dalla zona N alla zona P.

Bisogna ricordare che con la polarizzazione diretta, anche con piccoli variazioni di tensione, superiori al valore di soglia o tensione lavoro, pari a 0.7 Volt, si hanno forti variazioni di corrente, chiamate correnti dirette. In questo caso la corrente cresce rapidamente al minimo aumento della tensione applicata ai suoi capi.

Applicando invece una tensione esterna in modo tale che la zona P risulti negativa rispetto alla zona N (polarizzazione inversa), si aumenta l'altezza della barriera.

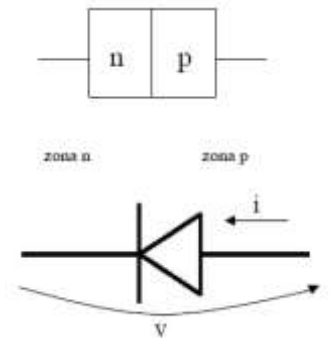


Figura 309 Diodo

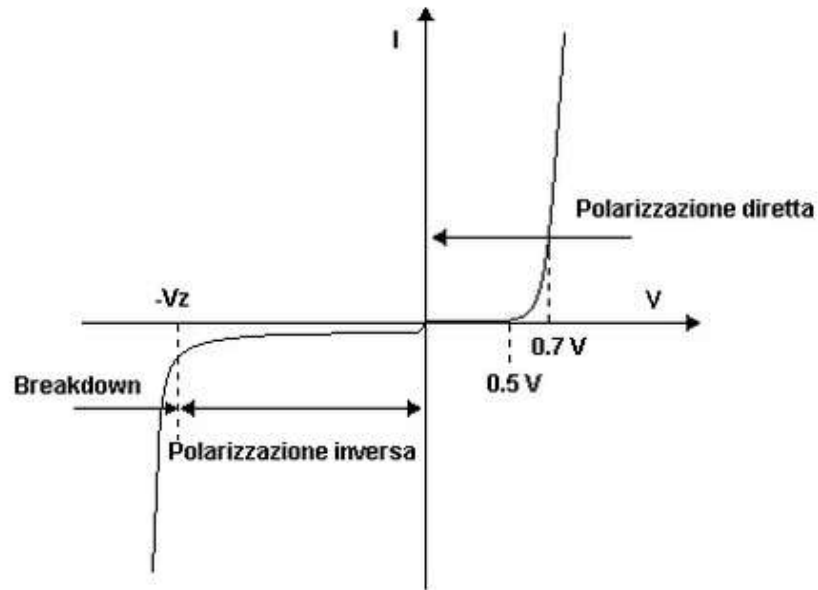


Figura 310 Grafico della polarizzazione

Di conseguenza diminuiscono notevolmente i portatori maggioritari in grado di superarla, mentre aumenta il flusso di portatori dalle zone nella quale sono minoritari, alle zone in cui divengono maggioritari. Il valore di questo flusso è molto limitato dalla scarsità di questi portatori, e di conseguenza si ha una piccolissima corrente rispetto alla precedente chiamata corrente inversa. In parole povere nel caso della polarizzazione inversa, la giunzione lascia passare solo un valore piccolissimo di corrente, il quale può ritenersi quasi nullo, fino a che la tensione non scende sotto il valore critico, chiamato tensione di rottura (dall'inglese tensione di break-down), in cui la giunzione si danneggia.

Questo è il motivo per cui il diodo conduce in un solo verso, e cioè nel caso di polarizzazione diretta.

Un esempio di applicazione è il **transistor** (abbreviazione del termine inglese *transfer-resistor*), detto anche transistore, è un dispositivo a semiconduttore largamente usato sia nell'elettronica analogica che nell'elettronica digitale.

Le principali funzioni che gli vengono affidate all'interno di un circuito elettronico sono:

- L'**amplificazione** di un segnale in entrata.
- Il funzionamento da interruttore (**switcher**).

12.27 Circuiti integrati e chip

Il materiale di partenza è una fetta circolare (wafer) di semiconduttore, detta substrato, questo materiale, in genere già debolmente drogato, viene drogato ulteriormente per impiantazione ionica o per diffusione termica per creare le zone attive dei vari dispositivi (es. zone p e n nei transistor); poi vengono depositati, cresciuti per epitassia oppure termicamente, una serie di sottili strati di materiali diversi:

Strati di semiconduttore policristallino (definito di grado elettronico EGS, **Electronic Grade Silicon**, cioè silicio con meno di un'impurità

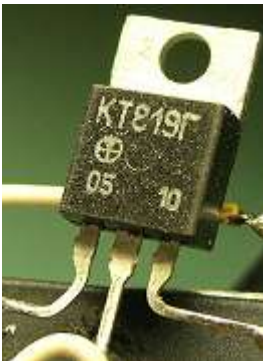
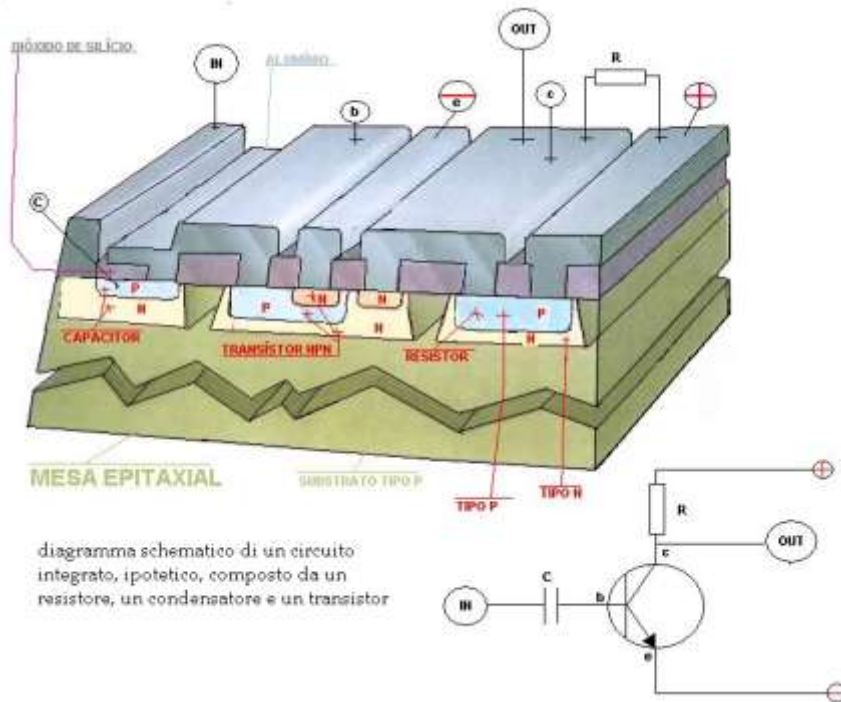


Figura 311 Transistor

ogni miliardo di atomi e quindi molto puro); Strati isolanti sottili; Strati isolanti di ossido, molto più spessi; Strati metallici (**siliciuri** o metalli come ad esempio alluminio, tungsteno o più raramente rame) per i collegamenti elettrici.



La geometria delle zone che devono ricevere il drogaggio e quella dei vari strati è impressa sul substrato con un processo di fotolitografia: ogni volta che il circuito integrato in lavorazione deve ricevere un nuovo strato o una nuova impiantazione di droganti, viene ricoperto di un sottile film fotosensibile, che viene impressionato attraverso un negativo fotografico (detto “maschera” o **layout**) ad altissima definizione.

Le zone del film illuminate divengono solubili e vengono asportate dal lavaggio, lasciando scoperto il chip sottostante, pronto per la prossima fase di lavorazione, rimozione selettiva o drogaggio delle aree prive del film fotosensibile. Attualmente la procedura è automatizzata

Una volta terminata la creazione dei chip sul substrato, questi vengono testati, il substrato viene tagliato e i chip incapsulati nei *packages* con cui verranno montati sui circuiti stampati attraverso dei collegamenti o piedini detti pin.

12.28 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Dopo aver trattato nell'unità precedente tutti i fenomeni di tipo elettrostatico, in questa abbiamo introdotto il concetto di **corrente elettrica**, chiarendo come tale fenomeno possa essere innescato e ciò che avviene a livello microscopico, chiarendo per altro che nel flusso di elettroni attraverso un conduttore non vi sia alcun passaggio di materia. Si è così indicato quale il verso convenzionale della corrente, come venga misurata attraverso uno strumento chiamato **amperometro**. Si è visto che per esserci un flusso continuo di elettroni ai capi di un conduttore vi è la necessità di creare una differenza di potenziale, **d.d.p.**, perché altrimenti non se il conduttore fosse posto ad uno stesso potenziale, ai suoi capi, non osserveremmo alcun passaggio di corrente elettrica. Lo strumento per misurare tale d.d.p. è il **voltmetro** in onore del famoso fisico italiano Alessandro Volta. Abbiamo successivamente chiarito che per mantenere una d.d.p. in un circuito fosse necessario inserire un qualche **generatore** di tensione, che può essere di varie tipologie, quali ad esempio degli accumulatori di corrente come le **pila**. Famosa la **pila di Volta** che sfrutta i fenomeni dell'**elettrolisi**. Nel passaggio di elettroni attraverso un conduttore, gli stessi incontrano una qualche resistenza, indicata proprio con il nome di **resistenza elettrica** dei **resistori**, legata soprattutto alle caratteristiche costruttive di un conduttore (lunghezza, sezione e tipo di materiale utilizzato attraverso la sua **resistività**) ma anche osservando uno stretto legame dei valori delle resistenze con i fenomeni termici. Tra questi l'**Effetto Joule** rende pienamente conto di quale sia il legame tra i due fenomeni. Abbiamo così imparato a riconoscere le resistenze nei circuiti in base ad un determinato **codice colori**, attraverso cui è possibile leggere il valore di data resistenza. In determinate condizioni di temperatura alcuni materiali riducono enormemente la propria resistenza elettrica, per questo chiamati **superconduttori**, trovando notevoli applicazioni in tutti quegli ambiti in cui è necessaria una resistenza praticamente nulla. Abbiamo così iniziato a studiare i primi circuiti elettrici con resistenze poste in serie ed in parallelo, mentre con le **leggi di Kirchhoff** risulta possibile studiarne gli effetti di correnti e d.d.p. attraverso lo studio dei **nodi** e delle **maglie**.

Abbiamo introdotto il concetto di **resistenze di shunt**, necessarie ad esempio per costruire strumenti di misura, come voltmetri ed amperometri, di volta in volta con portata sempre più elevata.

Successivamente si è iniziato a trattare di circuiti più complessi, quali quelli formati da un resistore e da un condensatore, i circuiti **RC**, potendo osservare i fenomeni di **carica e scarica del condensatore** con un flusso di corrente elettrica non più continuo ma variabile, secondo determinate leggi di tipo esponenziale.

Dopo una trattazione dettagliata dei diversi tipi di pile ed accumulatori, abbiamo osservato i fenomeni elettrici in presenza di gas e nel vuoto. In ultimo abbiamo osservato il comportamento di particolari materiali, che in base alla temperatura cui sono sottoposti mostrano un diverso comportamento, risultando in alcune condizioni dei perfetti isolanti, mentre in altre diventando buoni conduttori: i **semiconduttori**. Abbiamo così discusso di come vengano preparati tali materiali attraverso un procedimento detto **drogaggio** e le applicazioni pratiche conseguenti come con il **diodo** e il loro utilizzo nei **circuiti integrati** e **chip**.

12.29 Problemi proposti

1) Se un carico o un resistore ha una resistenza di $56\ \Omega$ determinare la corrente che circola in esso, conoscendo che ai suoi capi è applicata una tensione di $200V$.

2) Se in un filo scorre una corrente di $16A$ calcolare la quantità di carica, in Coulomb, che attraversa il conduttore in 3 minuti.

3) Se in una lampadina da $12V$ circola una corrente di $50mA$, si calcoli la resistenza offerta dalla lampadina (determinata dal filamento di tungsteno che compone la lampadina stessa) e la potenza che essa dissipa.

4) La resistenza di un filo composto di materiale conduttore dipende dalle caratteristiche del materiale ρ =resistività, dai parametri geometrici l =lunghezza, S =sezione, r =raggio come:

a) $R = \rho \cdot l \cdot S$; b) $R = \rho \cdot \frac{S}{l}$; c) $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ d) $R = \rho \cdot \frac{l}{r}$

5) Un filo elettrico di rame lungo un metro viene sostituito con un filo dello stesso materiale ma raggio doppio (la lunghezza rimane invariata). La resistenza del nuovo filo R' rispetto a quella del vecchio (R) è:

a) $R' = \frac{1}{4}R$; b) $R' = 4R$; c) $R' = 2R$ d) $R' = \frac{1}{2}R$

Suggerimento: Scrivere la resistenza del filo in funzione dei suoi parametri geometrici e valutare come il valore della resistenza dipende dal raggio

6) Un conduttore percorso da una corrente di $0.5\ A$ viene attraversato in $1\ \mu s$ da una carica di:

a) $Q = 5 \cdot 10^{-5}\ C$; b) $Q = 5 \cdot 10^{-2}\ C$; c) $Q = 5 \cdot 10^{-7}\ C$ d) $Q = 2 \cdot 10^6\ C$

7) La resistenza equivalente di tre resistenze collegate in serie vale:

a) $R_{eq} = \frac{1}{3}(R_1 + R_2 + R_3)$; b) $R_{eq} = (R_1 + R_2 + R_3)$; c)

$$R_{eq} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

d) $R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

8) La resistenza equivalente di tre resistenze collegate in parallelo vale:

a) $R_{eq} = \frac{1}{3}(R_1 + R_2 + R_3)$; b) $R_{eq} = (R_1 + R_2 + R_3)$; c)

$$R_{eq} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

d) $R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$

9) Quanto vale la potenza erogata da un generatore che eroga una corrente I , caratterizzato da una forza elettromotrice f e resistenza interna R_i ?

a) $P = R_i \cdot I^2$; b) $P = f \cdot I$; c) $P = \frac{1}{2} R_i \cdot I_{eff}^2$ d)

$$P = R \cdot C$$

Suggerimento: E' importante distinguere fra potenza erogata e dissipata.

10) La costante di tempo tipica per la carica e scarica di un condensatore di capacità C su una resistenza R è data da:

a) $\tau = \frac{1}{RC}$; b) $\tau = \frac{R}{C}$ c) $\tau = \frac{C}{R}$ d) $\tau = RC$

11) La costante di tempo tipica per la carica di un condensatore di capacità $C = 5nF$ in serie ad una resistenza di $R = 1k\Omega$ è:

a); $\tau = 5\mu s$ b) $\tau = 5ps$ c) $\tau = 0,2\mu s$ d) $\tau = 5ms$

12) La costante di tempo per la carica di un certo condensatore in un circuito è $\tau = 2ms$. Dopo quanto tempo lo si può considerare completamente carico?

a); $t = 10\mu s$ b) $t = 10ms$ c) $t = 10^{-4} s$ d) $t = 10^{-3} s$

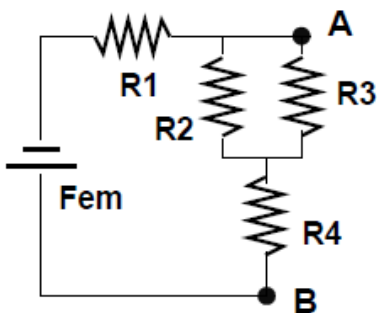
Suggerimento: Solitamente si considera un tempo di carica pari a $3 \div 5\tau$.

13) La resistenza di un filo metallico misurata a $30^\circ C$ vale 30Ω . Quanto vale la resistenza di questo filo se la temperatura vale $50^\circ C$.

Suggerimento: Utilizzare la formula (6A).

14) Si consideri il circuito in figura. In esso $R_1 = 200\Omega$, $R_2 = R_3 = 500\Omega$, $R_4 = 550\Omega$, $F_{em} = 12V$. Calcolare:

- La corrente erogata dal generatore;
- La corrente che percorre R_2 ;
- La differenza di potenziale fra i punti A e B.



Suggerimento: a) $I =$ considerando la resistenza totale della serie di R_1, R_4 e della resistenza equivalente R_{eq} del parallelo fra R_2

ed R_3 , risultando così $R_{tot} = R_1 + R_{eq} + R_4$. $I = \frac{F_{em}}{R_{tot}}$

b) $I_2 = 6mA$; c) $\Delta V = 9,6V$

15) Un motore ideale trasforma in lavoro meccanico tutta l'energia elettrica che assorbe. Se un tale motore viene attraversato per 20s da una corrente di 4A mentre la d.d.p. ai capi del motore vale 40V:

a) da quanta carica elettrica viene attraversato il motore in quei 20 s?

b) quanto lavoro fa il motore in quello stesso periodo di tempo?

c) quale potenza esplica?

[a) $Q = I \cdot \Delta T = 80C$; b) $L = \Delta V \cdot Q = \Delta V \cdot I \cdot \Delta t = 3200J$; c)

$$P_{erogata} = F_{em} \cdot I = 1,2W]$$

16) Due resistenze uguali collegate in serie ad un generatore che produce ai loro capi una $d.d.p. = 8V$, dissipano complessivamente 20W.

a) Quanto vale la corrente che percorre le due resistenze?

b) Quanto vale ciascuna delle due resistenze?

c) Quanto vale la F_{em} del generatore se la sua resistenza interna vale 2Ω ?

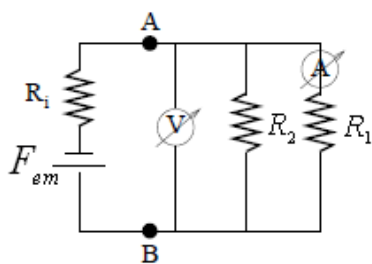
d) quanto varrebbero la corrente erogata, la d.d.p. ai capi del generatore e la potenza dissipata in ciascuna delle due resistenze se esse fossero collegate in parallelo invece che in serie?

17) La d.d.p. ai capi di una cella elettrolitica è 6V quando la cella è attraversata da una corrente di 2A. Calcolare la potenza totale dissipata nella cella.

$$[P = \Delta V \cdot I = 12W]$$

18) Due resistenze collegate in serie valgono rispettivamente 3Ω e 7Ω , sono percorse da una corrente di 0,4A. Si calcoli la d.d.p. ai capi della serie, sia direttamente che introducendo il concetto di resistenza equivalente.

19) Sapendo che le resistenze R_1 ed R_2 , collegate in parallelo, valgono rispettivamente 2Ω e 5Ω e che la d.d.p. ai capi del parallelo vale 3V, si calcoli il valore globale della corrente che scorre nel parallelo. Si faccia il calcolo sia in modo diretto che introducendo la resistenza equivalente.



20) Un circuito elettrico è costituito da un generatore di $F_{em} = 10V$ e resistenza interna 5Ω , a cui sono collegate due resistenze in parallelo R_1 ed R_2 . La d.d.p. ai capi del generatore vale $9V$ mentre la resistenza R_1 è percorsa da una corrente $I_1 = 100mA$.

- Quanto vale la corrente che percorre il generatore?
- Quanto valgono la differenza di potenziale e la corrente ai capi della resistenza R_2 ?
- Quanto valgono R_1 ed R_2 e la potenza dissipata in ciascuna di esse?

21) Quanto vale la costante di tempo per la carica di un condensatore di capacità $3\mu F$ collegato in serie ad una resistenza di 200Ω ?

[0,6ms]

22) Quanto vale la tensione ai capi di del condensatore dell'esercizio precedente dopo $1ms$ se viene caricato con un generatore a $V_0 = 10V$?

$$[V = V_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 8,1V]$$

23) Calcolare la tensione ai capi di un resistore di una stufa elettrica che dissipa 500 watt ed è attraversata da 10 coulomb per 3,5 secondi.

24) Calcolare la potenza conoscendo la tensione ai capi di un resistore e la resistenza della stessa con $V = 5V$, $R = 22\Omega$.

25) Calcolare la resistenza di un conduttore, sapendo che in essa passa una quantità di carica pari ad 8C in un tempo di 0,01s con una potenza dissipata di 521W. $Q = 8C$, $t = 10ms$ e $P = 521W$.

26) Calcolare il lavoro in joule prodotto da un resistore che dissipa 0,25W, è attraversato da una corrente di 100mA e da una carica di 0,69C.

27) Calcolare la tensione ai capi di un resistore di valore $1 K\Omega$, attraversato da 2mA di corrente.

28) Calcolare la d.d.p. (differenza di potenziale - tensione n.d.r.) che si deve applicare ai capi di un conduttore di resistenza $500 k\Omega$ affinché esso venga percorso da una corrente di intensità 4mA.

29) La resistenza totale di un circuito è 300Ω . In esso vi sono tre resistenze in serie: la seconda è tripla della prima e la terza è doppia della seconda. Determina il valore delle tre resistenze.

- 30) In un circuito vi sono quattro resistenze da $50\ \Omega$, $70\ \Omega$, $75\ \Omega$ e $105\ \Omega$ collegate in serie. Sapendo che una batteria le alimenta con una d.d.p. di 60V , determina l'intensità di corrente che le attraversa.
- 31) In un circuito vi sono due resistenze in serie di $250\ \Omega$ e $70\ \Omega$, mentre ai morsetti del generatore la d.d.p. è di 128V . Trova:
(a) l'intensità di corrente che attraversa il circuito;
(b) la d.d.p. ai capi di ciascuna resistenza.
- 32) Dopo un nodo di un circuito elettrico vi sono due rami tra loro in parallelo. Nel primo, caratterizzato da una resistenza di $3\ \Omega$, l'intensità della corrente è $0,2\text{A}$. Calcola la resistenza del secondo ramo, sapendo che in esso l'intensità della corrente è $0,8\text{A}$.
- 33) Nel nodo di un circuito la corrente entrante è di 6A , mentre i due rami uscenti dal nodo, e fra loro in parallelo, sono rispettivamente di $2\ \Omega$ e $4\ \Omega$. Determina l'intensità delle correnti che percorrono ciascuno dei due rami.
- 34) Quale valore devono avere tre resistenze di ugual valore disposte in parallelo, affinché la resistenza equivalente sia di $20\ \Omega$?

12.30 In laboratorio

- 26) Verificare sperimentalmente della prima legge di Ohm
- 27) Verifica sperimentale della seconda legge di Ohm

12.31 Approfondimento: Georg Simon Ohm



Figura 312 Georg Simon Ohm (16 marzo 1789- 6 luglio 1854)

Georg Simon Ohm nacque a Erlangen (Germania) il giorno 16 marzo 1789. Veniva da una famiglia protestante. Suo padre, Johann Wolfgang Ohm era un fabbro mentre sua madre, Maria Elizabeth Beck, era la figlia di un sarto. Sebbene i suoi genitori non erano stati educati formalmente, il padre di Ohm era un uomo piuttosto straordinario che si era educato a un alto livello ed era in grado di dare ai suoi figli un'eccellente educazione attraverso i propri insegnamenti. Con tutti i fratelli e le sorelle di Ohm che erano nati egli avrebbe voluto formare una grande famiglia, ma, come era comune a quei tempi, parecchi bambini morirono nella loro infanzia. Dei sette bambini nati a Johann e Maria Ohm solo tre sopravvissero, Georg Simon, suo fratello Martin, che proseguì per diventare un famoso matematico e sua sorella Elizabeth Barbara.

Quando erano bambini, Georg Simon e Martin furono istruiti dal padre che li portò ad un alto livello nella matematica, nella chimica, nella fisica e nella filosofia. Questo fu in totale contrasto con la loro educazione scolastica.

Georg Simon entrò nell' Erlangen Gymnasium all'età di undici anni ma qui ricevette poco nella strada per la formazione scientifica. Di fatto questa parte formale del suo insegnamento fu uno stressante apprendimento senza ispirazione da testi rovinati e mal interpretati. Questo contrastò con l'ispirata istruzione che i due ragazzi ricevettero dal padre che li portò ad un livello di matematica che indusse un professore dell'università di Erlangen, Karl Christian von Langsdorf a compararli alla famiglia Bernoulli. E' notevolmente sottolineato il meraviglioso successo di Johann Christian Ohm, un uomo completamente autodidatta, per essere stato in grado di dare ai suoi figli una così pura educazione scientifica e matematica.

Nel 1805 Ohm entrò all'Università di Erlangen, ma egli cominciò ad allontanarsi dalla vita di studente modello. Piuttosto che concentrato negli studi, egli trascorreva molto tempo danzando, pattinando e giocando a biliardo. Il padre di Ohm era adirato perché suo figlio aveva sciupato l'opportunità educativa che egli stesso non era mai stato abbastanza fortunato per sperimentare e chiese che il figlio lasciasse l'Università dopo tre semestri. Ohm fu spedito in Svizzera, dove nel settembre 1806 ottenne un posto come insegnante di matematica in una scuola a Gottstadt bei Nydau.

Karl Christian von Langsdorf lasciò l'Università di Erlangen agli inizi del 1809 per occupare un posto all'Università di Heidelberg per ricominciare i suoi studi matematici. Langsdorf consigliò a Ohm di continuare i suoi studi di matematica per conto proprio, consigliandogli di leggere Eulero, Laplace e Lacroix. Piuttosto con riluttanza Ohm seguì il suo consiglio, ma lasciò il suo posto a Gottstadt bei Nydau nel marzo 1809 per diventare un tutore privato a Neuchatel. Per due anni egli eseguì i suoi doveri come tutore mentre seguiva il consiglio di Langsdorf e continuava i suoi studi privati di matematica. Poi nell'aprile 1811 ritornò all'Università di Erlangen.

I suoi studi privati erano stati di grande utilità per ricevere un dottorato all'Erlangen il 25 ottobre 1811 e immediatamente si unì al corpo

degli insegnanti come professore di matematica. Dopo tre mesi Ohm abbandonò il suo posto all'università. Egli non poteva vedere come poter ottenere una migliore posizione all'Erlangen poiché le prospettive erano povere mentre egli viveva completamente nella povertà del posto di insegnante. Il governo bavarese gli offrì un posto come insegnante di matematica e fisica in una scuola di scarsa qualità a Bamberg ed egli vi prese posto nel gennaio 1813.

Questa non era la carriera piena di successo immaginata da Ohm e decise che avrebbe dimostrato che valeva molto di più di un insegnante in una povera scuola. Egli lavorò alla scrittura di un libro elementare sugli insegnamenti della geometria mentre rimaneva disperatamente infelice nel suo lavoro. Dopo che Ohm aveva resistito per tre anni a scuola essa chiuse nel febbraio 1812. Il governo bavarese allora lo mandò in un'affollata scuola a Bamberg per aiutarlo con l'insegnamento della matematica.

L'11 settembre 1817 Ohm ricevette un'offerta per un posto di insegnante di matematica e fisica al Jesuit Gymnasium di Colonia. Questa era una scuola assai migliore delle altre in cui Ohm aveva precedentemente insegnato e disponeva di un laboratorio di fisica ben equipaggiato. Come aveva fatto per così tanto tempo nella sua vita, Ohm continuò i suoi studi privati leggendo i testi più importanti dei matematici francesi Lagrange, Legendre, Laplace, Biot e Poisson. Egli avanzò nella lettura dei lavori di Fourier e Fresnel e iniziò i propri lavori sperimentali nel laboratorio scolastico di fisica dopo aver saputo della scoperta dell'esperimento di Oersted in elettromagnetismo nel 1820. All'inizio i suoi esperimenti erano condotti per i propri benefici educativi poiché erano studi privati che fece sui lavori dei più importanti matematici.

Il Jesuit Gymnasium di Colonia non riuscì a mantenere l'alto livello che aveva quando Ohm iniziò a lavorare lì così, dal 1825, egli decise che avrebbe cercato di nuovo di ottenere il lavoro che egli veramente voleva, vale a dire un posto all'università. Capendo che la strada per tale posto sarebbe dovuta essere attraverso pubblicazioni di ricerca, cambiò la sue attitudini verso il lavoro sperimentale che stava intraprendendo e iniziò regolarmente un lavoro verso la pubblicazione dei suoi risultati.

Di fatto egli si era convinto della veridicità di ciò che oggi noi chiamiamo "la legge di Ohm", ovvero la relazione che la corrente attraverso molti materiali è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale applicata attraverso il materiale. Il risultato non era contenuto nel primo giornale di Ohm pubblicato nel 1825, tuttavia, per questo giornale esamina la diminuzione nella forza elettromagnetica prodotta da un filo elettromagnetico poiché la lunghezza del filo aumenta. Il giornale deduce relazioni matematiche esatte puramente sulla prova sperimentale che Ohm aveva classificato.

In due importanti giornali del 1826, Ohm diede una descrizione matematica della conduzione nei circuiti modellati sullo studio di Fourier sulla conduzione del calore. Questi giornali continuano la deduzione dei risultati di Ohm dalla prova sperimentale e, particolarmente nel secondo egli era in grado di proporre le leggi che spianavano la lunga

strada per spiegare i risultati degli altri lavori sull'elettricità galvanica. Il secondo giornale è il primo passo in una vasta teoria che Ohm fu in grado di dare nel suo famoso libro pubblicato l'anno seguente.

Ciò che ora è conosciuto come la legge di Ohm compare in questo famoso libro "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet" (1827) in cui egli diede la sua completa teoria sull'elettricità. Il libro inizia con una base matematica necessaria per la comprensione del resto del lavoro. Noi dovremmo osservare qui che tale base matematica era necessaria anche ai più importanti fisici tedeschi per capire il lavoro, per l'enfasi di quel tempo continuava un approccio non matematico alla fisica. Noi dovremmo anche osservare che, a dispetto degli sforzi di Ohm in questa introduzione, egli non ebbe realmente successo nel convincere i vecchi fisici tedeschi che l'approccio matematico fosse giusto.

E' interesse che Ohm presenta la sua teoria come un'azione contigua, una teoria che oppone il concetto di azione alla distanza. Ohm credeva che la conduzione di elettricità avvenisse tra "particelle contigue" che è la durata che Ohm impiega. Il giornale è concerne con quest'idea, e in particolare nell'illustrare le differenze nell'approccio scientifico tra Ohm e quello di Fourier e Navier.

Ohm si trovava al Jesuit Gymnasium di Colonia quando iniziò le sue importanti pubblicazioni del 1825. Gli fu dato un anno libero di lavoro in cui concentrarsi sulla ricerca iniziata nell'agosto 1826 e sebbene ricevette solo la minima offerta di metà pagamento, fu in grado di trascorrere l'anno a Berlino lavorando alle sue pubblicazioni. Ohm aveva creduto che le sue pubblicazioni gli avrebbero fatto ricevere una offerta di posto universitario prima di essere ritornato a Colonia, ma quando dovette iniziare di nuovo ad insegnare nel settembre 1827 egli era ancora senza alcuna offerta.

Sebbene il lavoro di Ohm influenzò fortemente la teoria, esso fu accolto con poco entusiasmo. I sentimenti di Ohm erano dolorosi, decise di rimanere a Berlino e, nel marzo 1828, egli formalmente rinunciò al posto a Colonia. Fece un lavoro temporaneo di insegnante di matematica nelle scuole di Berlino.

Nel 1833 accettò un posto a Norimberga e sebbene questo gli diede il titolo di professore, esso non era ancora il posto universitario per il quale aveva lottato tutta la sua vita. Un suo lavoro fu alla fine riconosciuto dalla Royal Society con il premio della Medaglia Copley nel 1841. Egli diventò membro straniero della Royal Society nel 1842. Altre Accademie come quelle di Berlino e di Torino lo elessero membro corrispondente, e nel 1845 diventò membro completo dell'Accademia bavarese.

Questo tardivo riconoscimento fu il benvenuto ma rimane la questione del perché quello che oggi è un nome conosciuto per i suoi importanti contributi lottò così molto tempo per guadagnare celebrità. Questo non dovrebbe avere una semplice spiegazione, ma essere il risultato di un numero di differenti fattori contributivi. Un fattore dovrebbe essere stato l'intimità del carattere di Ohm mentre fu certamente il suo approccio matematico agli argomenti che a quel tempo erano studiati nel

suo paese in modo non matematico. C'erano anche indubbiamente discussioni personali con uomini di prestigio che non davano una buona visione a Ohm. Certamente non aveva trovato il favore di Johannes Schultz che era una autorevole figura nel ministero dell'educazione di Berlino, e di Georg Friedrich Pohl, un professore di fisica in quella città.

L'elettricità non fu il solo argomento sul quale Ohm intraprese una ricerca, e neppure l'unico in cui egli finì in controversia. Nel 1843 egli determinò il principio fondamentale dell'acustica fisiologica, concerne con il modo in cui uno sente una combinazione di toni. Tuttavia le supposizioni che egli fece nella sua derivazione matematica non erano completamente giustificate e questo risultò in una aspra discussione con il fisico August Seebeck. Egli riuscì a screditare le ipotesi di Ohm che era a conoscenza del suo errore.

Nel 1849 Ohm prese posto a Monaco come conservatore della stanza di fisica dell'Accademia bavarese e iniziò a tenere un corso di lezioni all'Università di Monaco. Solo nel 1852, due anni prima della sua morte, Ohm realizzò il desiderio di tutta una vita di essere assegnato alla cattedra di fisica nell'Università di Monaco.

Georg Ohm muore a Monaco di Baviera il giorno 6 luglio 1854, all'età di 65 anni.

13. Il magnetismo e le interazioni con l'elettricità

Prerequisiti

Struttura della materia. Concetto di Campo. Corrente elettrica. Effetto Joule. Potenza elettrica.

Sapere

Conoscere i fenomeni magnetici naturali. Concetto di dipolo magnetico. Campo magnetico. Sapere che la Terra si comporta come un magnete. Conoscere le prime esperienze di interazione tra elettricità e magnetismo. Sapere che esistono interazioni tra correnti e correnti. Campo magnetico generato da una spira percorsa da corrente. Fenomeni di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico. Conoscere le ipotesi di Ampere sul magnetismo e i campi di Weiss. Moto di una carica in un campo magnetico. Sapere la natura delle aurore boreali. Conoscere il funzionamento di un motore elettrico a corrente continua. Costruzione di un galvanometro.

Saper fare

Saper distinguere tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici presenti in natura. Comprendere le motivazioni per cui il pianeta Terra si comporta come un magnete e che subisce ciclicamente delle inversioni di polarità. Saper interpretare le differenze e le analogie con il campo elettrico. Comprendere il significato delle prime osservazioni eseguite da Oersted circa l'interazione elettro-magnetica. Comprendere le motivazioni ipotizzate da Ampere per cui è impossibile separare i poli di una calamita. Comprendere quali applicazioni abbiano portato allo studio del moto di una carica elettrica in un campo magnetico. Conoscere il funzionamento del motore elettrico come applicazione dei fenomeni di interazione elettro-magnetica.

13.1 Fenomeni magnetici

Il magnetismo è quel fenomeno fisico, per cui alcuni materiali sono in grado di attrarre il ferro nonché trasmettere tale capacità ad altri materiali.

Per estensione semantica, il magnetismo è anche la branca della fisica concernente il suddetto fenomeno. In particolare per **fenomeni stazionari**, ovvero non variabili nel tempo, si parla più specificatamente di magnetostatica (che presenta alcune analogie formali con l'elettrostatica allorché si sostituiscono alle distribuzioni di carica elettrica le densità di corrente elettrica).

L'esistenza di un magnetismo naturale era noto già agli antichi greci (V - VI secolo a.C.), ma probabilmente ancora precedentemente era stato scoperto nell'antica Cina dove, si dice, fosse in uso un rudimentale prototipo di bussola magnetica.

Pare che Archimede (287-212 a.C.) abbia cercato di magnetizzare le spade dell'esercito siracusano al fine di disarmare più facilmente i nemici.

Plinio il Vecchio (23-79 d.C.) attribuisce l'etimologia del termine "magnete" ad un pastore cretese di nome "Magnes", il quale scoprì casualmente le proprietà della magnetite appoggiandovi sopra il suo bastone con la punta in ferro.

Quello che è certo, comunque, è che gli antichi avevano scoperto la capacità di alcuni minerali (ad esempio la magnetite) di attrarre la limatura di ferro o piccoli oggetti ferrosi. Questa capacità di esercitare una forza a distanza ha dato fin dagli albori un particolare significato nei secoli al magnetismo. Tuttora nel XXI secolo si sente ancora talvolta parlare di forze magnetiche lasciando sottintendere un significato arcano e misterioso.

Il più importante studio medievale sull'argomento è certamente la "epistola de magnete" di **Pietro Peregrino di Maricourt** (del 1296),[1] che tra l'altro introduce il concetto e la terminologia dei due poli (Nord e Sud) della calamita, spiega come determinarne con precisione la posizione, ne descrive le interazioni reciproche, attrattive e repulsive, e propone l'esperimento della calamita spezzata.

Nel 1600 apparve il "**De magnete**" di William Gilbert, che rimase a lungo il testo di riferimento sul tema del magnetismo.

I primi studi quantitativi sui fenomeni magnetostatici si possono far risalire alla fine del Settecento - inizio dell'Ottocento ad opera dei francesi Biot e Savart e, successivamente, di Ampère sempre in Francia.

Nel prossimo capitolo avremo la possibilità di studiare quei fenomeni tempo-dipendenti ove i campi elettrici e magnetici si influenzano a vicenda ed è necessario ricorrere ad una descrizione unificata dei due campi ottenuta nel 1864 dallo scienziato britannico James Clerk Maxwell all'interno della teoria dell'elettromagnetismo classico ovvero l'elettrodinamica classica.

Analogamente al caso elettrostatico anche nel magnetismo si individuano due sorgenti di campo di natura opposta che vengono convenzionalmente definiti poli. Usando come magnete di riferimento la Ter-

YouTube



Figura 313 Calamita

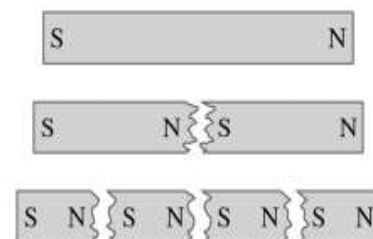


Figura 314 Divisione di un magnete in piccoli magneti

ra si parlerà allora di polo nord e sud, in particolare il polo nord geografico corrisponde grossomodo al polo sud magnetico e viceversa.

Una proprietà interessante dei magneti naturali è che essi presentano sempre sia un **polo nord** che un **polo sud**. Se si divide in due parti un magnete, tentando di “separarne” i due poli, si ottengono due magneti del tutto simili (ciascuno con una coppia di poli opposti).

Poiché il processo può concettualmente proseguire all'infinito è ipotizzabile che il magnetismo naturale abbia origine nelle proprietà atomiche della materia e comunque cercheremo di dare una risposta, così come tentò di fare lo Ampere ipotizzando una particolare struttura della materia.

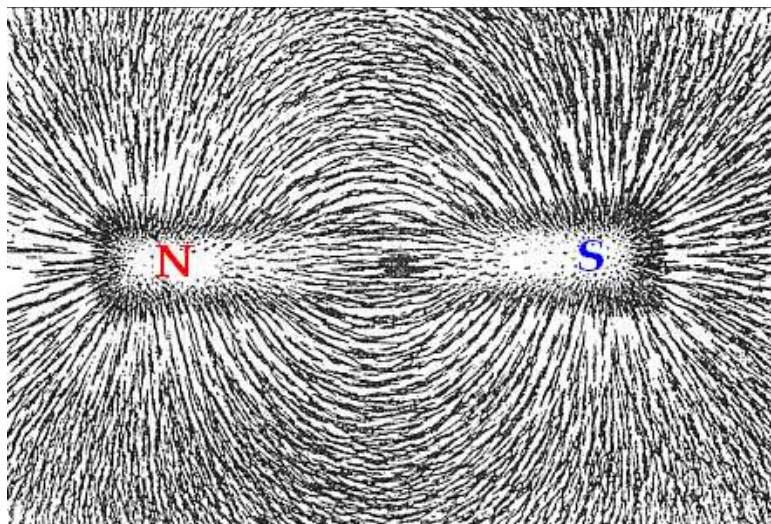


Figura 315 Linee di forza di un campo magnetico

Monopoli magnetici

I monopoli magnetici liberi, a tutt'oggi, non sono mai stati osservati sperimentalmente. Ciò conferisce una particolare proprietà alle linee di forza del campo magnetico: esse sono sempre chiuse e il flusso del campo attraverso qualsiasi superficie chiusa è nullo. Si può dimostrare che da ciò discende che il campo magnetico ha il medesimo flusso attraverso tutte le superfici che si appoggiano alla medesima curva chiusa.

Nell'ottobre 2009 tuttavia, è stato isolato in una struttura molecolare cristallina, un monopolio magnetico.

Interazione magnetica tra polarità

È facilmente verificabile che le due polarità opposte chiamate per convenzione nord-sud, si comportano in modo che polarità opposte si attraggono mentre stesse polarità si respingono.

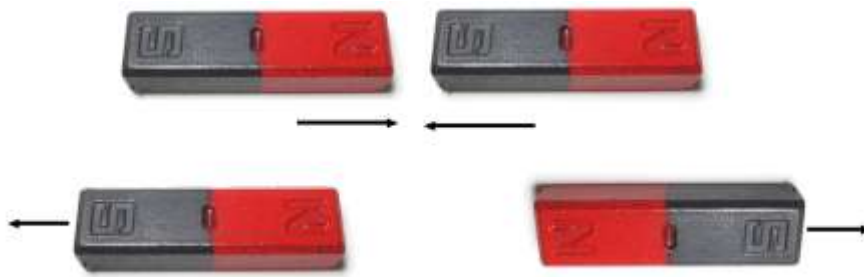


Figura 316 Interazione tra magneti

13.2 Il campo magnetico

Un magnete modifica lo spazio circostante generando un **campo magnetico** che solitamente si indica con la lettera \vec{B} che può facilmente essere visualizzato disponendo nelle vicinanze del magnete della limatura di ferro. Il campo magnetico è un campo vettoriale: la sua direzione e il suo verso sono quelle in cui si dispone un ago magnetico posto nel campo, il verso è quello indicato dal polo Nord.

Un campo magnetico può anche essere descritto tramite le linee di campo magnetico che sono tangenti punto per punto al campo magnetico e vanno dal polo Nord al polo Sud dei magneti. In base alla convenzione di Faraday le linee del campo magnetico hanno una densità che è proporzionale all'intensità del campo, in altre parole le linee sono tanto più fitte quanto più il campo è intenso. Un campo magnetico uniforme ha la stessa intensità in ogni punto: le linee del campo pertanto risultano essere parallele, equidistanti e la loro densità è costante in tutto lo spazio.

Il campo magnetico che abbiamo appena introdotto ha molte proprietà in comune con il campo elettrico: in particolare entrambi sono descritti da linee di forza e sono campi associati a una forza che può essere in entrambi i casi attrattiva (tra poli o cariche di tipo diverso) o repulsiva (tra poli o cariche dello stesso tipo). Sia l'elettrizzazione che la magnetizzazione possono avvenire per contatto ma, mentre nell'elettrizzazione c'è un passaggio di cariche elettriche, nella magnetizzazione non si ha trasferimento di poli magnetici. Inoltre, le cariche elettriche possono sempre essere isolate, mentre un magnete presenta sempre sia il polo Nord che il polo Sud.

Il **tesla** (simbolo **T**) è un'unità di misura derivata del sistema internazionale (SI). Viene utilizzata per misurare l'induzione magnetica, ossia la densità del flusso magnetico. Alla *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM) tenutasi a Parigi nel 1960, il nome "**tesla**" fu scelto in onore dell'inventore e ingegnere elettrico serbo **Nikola Tesla**, che diede molti importanti contributi nel campo dell'elettromagnetismo.

$$[1T] = \left[1 \frac{N \cdot s}{C \cdot m} \right]$$



Precedentemente veniva utilizzato un suo sottomultiplo, il **gauss**, pari a 10^{-4} T.

Analogie e differenze con il campo elettrostatico

Analogie con il campo elettrico:

- Generato da più magneti.
- Poli di segno uguale si respingono e opposto si attraggono.
- Corpo magnetico di prova (ago magnetico).
- Le linee di campo con un magnete a barra somigliano a quelle ottenuta da un dipolo elettrico.
- Tra due poli di una calamita il campo è uniforme e le linee parallele, come in due piastre elettrizzate.
- I due poli di un magnete hanno comportamento opposto.

Differenze con il campo elettrico:

- Non è possibile separare i poli e studiarli singolarmente (neanche se si taglia in due il magnete).
- Il corpo di prova per eccellenza è un ago magnetico (come quello della bussola) libero di ruotare: un polo viene respinto e uno attratto. L'equilibrio si raggiunge quando l'ago si dispone nella direzione del campo (tangente al campo);
- Non vi sono linee di forza ma di campo, perchè le linee di forza non sono tangenti al campo, ma perpendicolari;
- Le linee di forza del campo elettrico sono aperte (si può avere un campo radiale), qui sono chiuse;
- Non agisce una forza ma una coppia di forze (uguali in modulo, parallele ma discordi).
- Il campo magnetico **non è conservativo** perchè la circuitazione non è generalmente nulla, ma solo in casi particolari (ad esempio quando lo spostamento ha verso opposto al campo, o quando vi sono due correnti generatrici di uguale modulo e verso opposto, o quando non c'è corrente nel filo).

13.3 Campo magnetico terrestre

Il campo geomagnetico è un fenomeno naturale presente sul pianeta Terra. I poli magnetici non coincidono però esattamente con quelli geografici e non statici, e con asse inclinato di $11,5^\circ$ rispetto all'asse di rotazione terrestre. Le ipotesi sulle origini di questo campo sono numerose, ma oggi le teorie sono orientate verso un modello analogo a quello di una dinamo ad autoeccitazione. Anche altri corpi celesti, come il Sole o Giove, generano un loro campo magnetico planetario.

Il campo magnetico terrestre **non è costante** nel tempo né uniforme nello spazio. Le variazioni del campo possono essere misurate e presentate come valori medi giornalieri, mensili ed annuali.

Il campo magnetico terrestre è soggetto a continue variazioni direzionali e di intensità di origine interna o esterna. Le variazioni a lungo

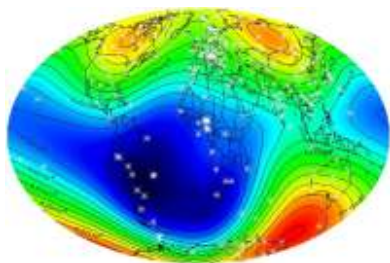


Figura 317 Campo magnetico terrestre

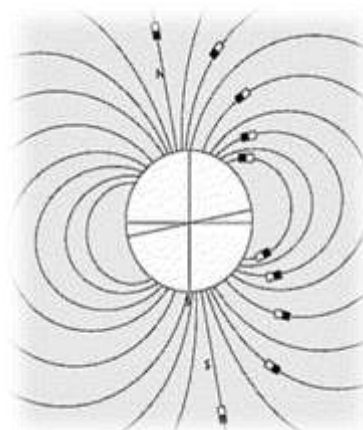
periodo (5-10 anni), dette “**variazioni secolari**”, sono dovute a cambiamenti nelle sorgenti profonde e sono riconosciute dai dati degli osservatori magnetici e dei record archeologici e geologici (*paleomagnetismo*). Le variazioni a breve periodo (da pochi minuti fino a 5 anni) sono di origine esterna. Una terza categoria è quella delle variazioni a periodo molto lungo, legate al ciclo solare di 11 anni.

Uno dei più importanti strumenti per l'orientamento sulla Terra è la **bussola**, costituita da un ago magnetico che si allinea con il campo magnetico terrestre indicando un polo nord ed un polo sud magnetici.

Si ritiene che il campo magnetico terrestre dipenda dal nucleo ferroso che forma la parte interna del pianeta; ruotando su se stessa, la Terra funzionerebbe come una sorta di gigantesca dinamo, capace di creare un intenso campo magnetico che fa risentire i suoi effetti fino ad oltre 70 km di altezza (la cosiddetta magnetosfera). Il «magnete» terrestre ha due poli, la cui posizione non coincide con quella dei poli geografici, pur essendo abbastanza vicina ad essa. Il polo nord magnetico si localizza nella regione artica dell'America Settentrionale (isola Bathurst, a circa 1500 km dal polo Nord geografico), mentre il polo Sud magnetico si trova nel continente antartico, ad analoga distanza dal polo Sud geografico. L'asse magnetico terrestre (passante per i due poli magnetici) risulta inclinato di circa 11° rispetto all'asse di rotazione (asse polare), per cui la direzione indicata dalla bussola non coincide con quella del polo nord, ma forma con essa un angolo detto declinazione magnetica.



Figura 318 Bussola



13.4 C.L.I.L. Project

Earth's magnetic field

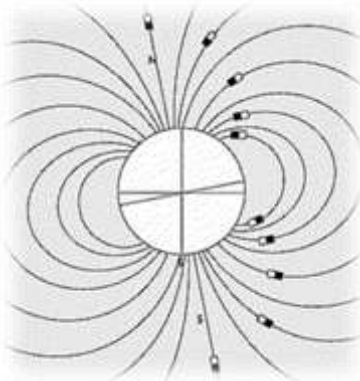
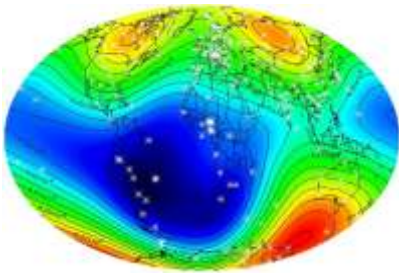
The geomagnetic field is a natural phenomenon on the planet Earth. The magnetic poles do not coincide exactly with the geographical ones, however, and not static, with its axis inclined at 11.5° to the axis of rotation of the Earth. The hypotheses on the origins of this field are numerous, but today's theories are oriented towards a model similar to that of a dynamo self-excitation. Other celestial bodies, such as the Sun or Jupiter, they generate a planetary magnetic field.

The Earth's magnetic field is **not constant** in time nor uniform in space. Changes in the field can be measured and presented as average values daily, monthly and yearly.

The Earth's magnetic field is subject to constant changes of direction and intensity of internal or external origin. The changes in the long term (5-10 years), called "secular variations", are due to changes in the deep sources and are recognized by the magnetic data of the observers and record archaeological and geological (paleomagnetism). The changes in short-term (from a few minutes up to 5 years) are of external origin. A third category is that of a very long period variations, related to the solar cycle of 11 years.

One of the most important tools for the orientation on Earth is the **compass**, consisting of a magnetic needle that aligns with the Earth's magnetic field indicating a north pole and a south pole magnetic.

It is believed that the Earth's magnetic field depends on the iron core which forms the inner part of the planet, rotating on itself, the Earth would function as a sort of gigantic dynamo, capable of creating an intense magnetic field that is affected by its effects up to over 70 km of height (the so-called magnetosphere). The "magnet" Earth has two poles, whose position does not coincide with the geographic poles, although fairly close to it. The magnetic north pole is localized in the Arctic region of North America (Bathurst Island, about 1500 km from the geographic North Pole), while the magnetic south pole is located on the Antarctic continent, a similar distance from the geographic South Pole. The earth's magnetic axis (passing through the two magnetic poles) is inclined about 11° with respect to the rotation axis (polar axis), for which the direction indicated by the compass is not fully coincides with that of the north pole, but forms with it said declination angle.



Secondo la posizione dell'osservatore, la declinazione può essere verso Est o verso Ovest rispetto al Nord geografico e il suo valore si deduce da tabelle o da carte geografiche, i cui punti aventi la stessa declinazione magnetica sono uniti da linee continue. Una bussola il cui ago può ruotare in senso verticale (invece che orizzontale) orienta, nel nostro emisfero, la sua punta che indica il nord verso il basso, secondo un angolo (detto di inclinazione) che varia con la latitudine ed è massimo (90°) sul polo nord magnetico. L'inclinazione magnetica è quindi utile per valutare la latitudine, anche se la misura ricavata va corretta (come nel caso della declinazione) con apposite tabelle. Il campo magnetico terrestre ha, come detto, un'intensità (misurata in Ampere al metro: A/m) che varia nei diversi punti del Pianeta in base alla sua costituzione geologica. Si è potuto dimostrare che il campo magnetico terrestre subisce variazioni di intensità nel corso del tempo mentre i poli si spostano continuamente sulla superficie terrestre, talora invertendo la loro posizione (l'ultima inversione avvenne circa 700.000 anni fa).

I motivi di questi eventi non sono conosciuti. Le ricerche fatte allo scopo di ricostruire la storia del magnetismo terrestre (paleomagnetismo) hanno dato risultati sorprendenti. Le lave vulcaniche di natura basaltica contengono cristalli di magnetite che si orientano col campo magnetico terrestre; quando le lave solidificano, la posizione dei cristalli rimane permanentemente fissata per cui, conoscendo l'epoca di formazione di una roccia lavica, attraverso l'esame dei suoi cristalli si può risalire alla posizione dei poli magnetici in quell'epoca. Gli studi sul paleomagnetismo informano che negli ultimi 76 milioni di anni ci sono state ben **171 inversioni di polarità** del campo magnetico terrestre (è notevole l'idea che a metà della fase di inversione il campo magnetico può essersi azzerato, col conseguente annullamento della magnetosfera). Inoltre, questi studi dimostrano che i poli sono andati errando qua e là sulla superficie terrestre, apparentemente senza un ordine preciso. Secondo alcuni Geologi, le inversioni dei poli magnetici nel tempo non si conciliano con l'ipotesi che la Terra, ruotando, funzioni come una dinamo generando un campo magnetico. Ancora oggi non esiste una spiegazione esauriente sulla esistenza della magnetosfera terrestre; va detto che anche altri pianeti, fra i quali quelli gassosi, hanno una magnetosfera.

Curiosità

l'ago magnetico di una bussola indica il polo nord terrestre, ma per poter accadere questo significa che la parte di ago attratta da polo nord terrestre è di per se un sud magnetico, senza considerare che di fatto il polo nord terrestre è un polo sud geografico. Quando diciamo che la bussola indica il nord, in realtà esercitiamo un piccolo inganno dovuto anche al fatto che sarebbe difficile spiegare come un polo sud magnetico, della bussola, indicava il polo nord terrestre, che in realtà è un polo sud magnetico.

13.5 Esperienza di Oersted

YouTube



CHE STORIA!

Quello di Oersted fu uno dei più importanti esperimenti dell'epoca, rappresentando di fatto la nascita dell'elettromagnetismo. Il suo semplice esperimento ha dato origine a tutta la teoria elettromagnetica, accendendo menti geniali come quella di Faraday e non solo.

Fino agli inizi del XIX secolo i fenomeni legati all'elettricità ed al magnetismo furono considerati indipendenti e di conseguenza studiati e analizzati separatamente. Nel 1820 una esperienza storica segnò la data di nascita dell'elettromagnetismo, una teoria unificata che dimostra come i fenomeni elettrici e magnetici siano indissolubilmente collegati. In questo anno **Hans Cristian Oersted** (1777-1851), fisico e filosofo danese, scoprì che una corrente elettrica provocava una diversa orientazione di un ago magnetico posto nelle vicinanze del filo. L'anello di congiunzione era stato trovato: la corrente elettrica interagiva con l'ago magnetico ed era quindi in grado di creare un campo magnetico nello spazio circostante, proprio come un magnete naturale. Oersted era uno studioso che si ispirava ai principi della Filosofia Naturale, basata sulla ricerca dell'unità di tutti i fenomeni naturali e descrisse i suoi risultati (qualitativi) secondo quest'ottica. (H.C. Oersted "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticum").

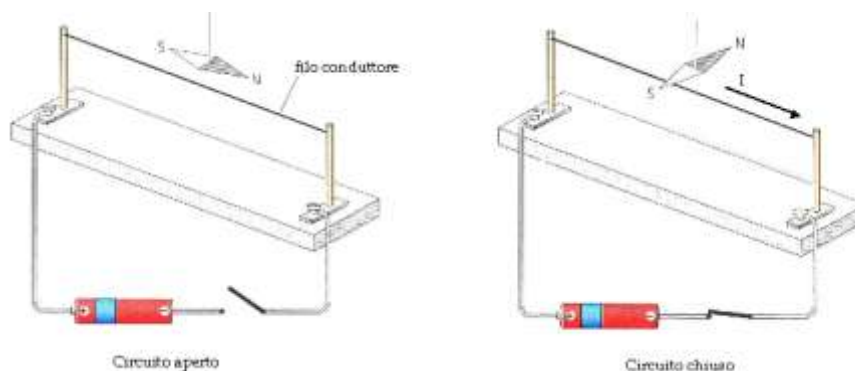


Figura 319 Esperienza di Oersted

In particolare egli cercava, in analogia con le leggi di Newton e di Coulomb, una forza di tipo **attrattivo-repulsivo** tra magneti e correnti. Inaspettatamente, Oersted osservò che sull'ago non agivano forze attrattive-repulsive rispetto al filo, ma una forza deviante.

Si deve al fisico francese André Marie Ampère (1775 - 1836) il rapido sviluppo anche teorico di questo nuovo campo di indagine. Ampère era un newtoniano convinto e non si espresse in termini di campo, ma piuttosto in termini di azione a distanza. L'interrogativo era: se non esistono sorgenti di campo, qual è l'origine del campo magnetico?

Nello stesso anno dell'esperienza di Oersted, egli indagò sulle interazioni che si esercitavano tra magneti e magneti, tra corrente e magneti ed infine tra correnti. Dobbiamo ai suoi studi le relazioni teoriche che collegano il campo magnetico alla corrente che circola in un conduttore di qualunque forma, relazioni poi riprese nella sintesi operata da Maxwell.

13.6 Esperienza di Faraday

L'esperimento di Faraday fu eseguito per la prima volta nel 1821 dal fisico e chimico britannico **Michael Faraday**.

Un anno dopo l'esperimento di Oersted, Faraday stabilì con un semplice esperimento che un campo magnetico genera una forza anche nei confronti di conduttori attraversati da corrente elettrica.

L'esperimento consiste nel porre un filo conduttore in posizione orizzontale tra i due poli di un magnete. Questo filo è sorretto da un'intelaiatura che gli permette di muoversi solo in verticale. Quando si collega questo filo ad una batteria, la corrente attraversa il filo e si nota che esso si può muovere verso il basso o verso l'alto basandosi sulla regola della mano destra (dove il pollice indica il verso della corrente, l'indice il verso del campo magnetico e il medio lo spostamento del filo).

Con questo esperimento Faraday comprese che un campo magnetico non genera solo una forza nei confronti dei magneti, ma anche nei confronti dei conduttori attraversati da corrente elettrica.

YouTube

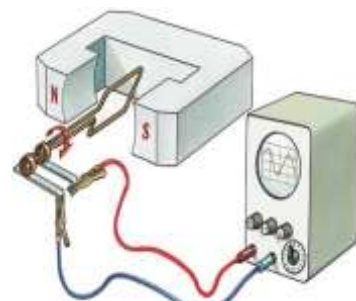


Figura 320 Esperienza di Faraday

13.7 Esperienza di Ampère tra corrente e corrente

L'esperimento di Ampère è un esperimento compiuto dal francese André-Marie Ampère nel 1820, una settimana dopo esser venuto a conoscenza dell'esperimento di Oersted. Egli capì che se un conduttore attraversato da corrente elettrica genera un campo magnetico, le forze di questo campo magnetico influenzeranno anche il conduttore stesso.

Ampère collegò due fili conduttori a due diverse batterie e li mise vicini tra di loro. La prima volta li dispose in maniera tale che le correnti avessero la stessa direzione e lo stesso verso e vide che le forze che si creavano attiravano tra loro i fili. La seconda volta invece le correnti avevano la stessa direzione ma verso opposto e notò che le forze diventavano di tipo repulsivo e allontanavano i due fili.

È possibile misurare le forze che ogni filo esercita su un tratto dell'altro con la semplice formula matematica:

$$F = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d} \quad (1)$$

dove μ_0 è la costante di permeabilità magnetica del vuoto che vale:

$$\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \frac{S}{m} \quad (2)$$

che esprime l'attitudine di una sostanza a lasciarsi magnetizzare, I_1 e I_2 le intensità di corrente che attraversano i due fili conduttori, $l = l_1 = l_2$ la lunghezza dei due fili e d la distanza cui sono stati posti.

YouTube

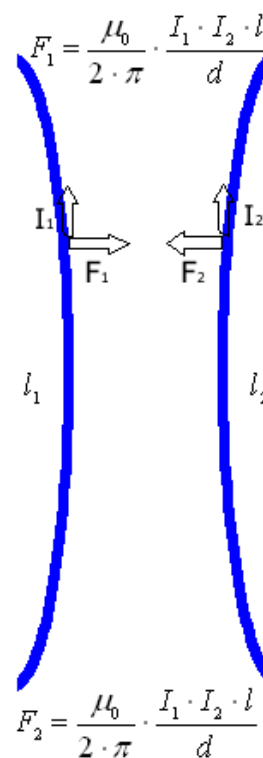


Figura 321 Esperienza di Ampère tra correnti

In poche parole è come unire l'esperimento di Oersted con l'esperimento di Faraday. Con l'esperienza di Ampère si può definire anche la relativa unità di misura dell'intensità della corrente elettrica..

Infatti l'**ampere** risulta essere come

l'intensità di corrente elettrica che, se mantenuta in due conduttori lineari paralleli, di lunghezza 1m e sezione trasversale trascurabile, posti ad 1m di distanza l'uno dall'altro nel vuoto, produce tra questi una forza pari a $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$.

13.8 Circuitazione di campo magnetico.

1. Si considera un *immaginario* percorso chiuso all'interno di un campo magnetico e si sceglie un verso di percorrenza (Il percorso non è una linea del campo, né un circuito!);
2. Si suddivide il percorso in *elementi infinitesimi* $d\mathbf{l}$;
3. Per ogni elemento si calcola il *prodotto scalare* $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ (infinitesimo) tra il vettore *locale* \mathbf{B} ed il vettore $d\mathbf{l}$;
4. Si sommano tutti gli infinitesimi: la quantità *scalare* ottenuta è la **circuitazione** $C(\mathbf{B})$ del campo \mathbf{B} lungo il percorso. Essa ha dimensioni fisiche [campo magnetico * lunghezza] e si misura in T m

La somma così descritta è una somma *integrale* e si calcola con i metodi dell'*analisi infinitesimale*. Non dobbiamo preoccuparci di questo: se il campo magnetico è stato generato da circuiti percorsi da corrente, la legge di Ampère permette di calcolare immediatamente il valore della circuitazione *semplicemente osservando la disposizione spaziale delle correnti*.

Ci interessano solo le correnti **concatenate** con il percorso, cioè *quelle che attraversano la superficie delimitata dal percorso chiuso* (è importante che il percorso sia chiuso!)

13.9 Legge di Ampere

Ampère formulò una legge analoga alla legge di Gauss che pone in relazione una distribuzione di *correnti* nello spazio ed il campo magnetico da esse prodotto. Essa vale per correnti *stazionarie* (che non variano nel tempo). Se per la legge di Gauss si deve far ricorso al concetto di *flusso elettrico*, per la legge di Ampère abbiamo bisogno della circuitazione del campo magnetico. *Flusso* e *circuitazione* sono infatti le due grandezze che descrivono efficacemente le proprietà generali di un campo di forze.

Possiamo così esprimere la legge di Ampere nel seguente modo:

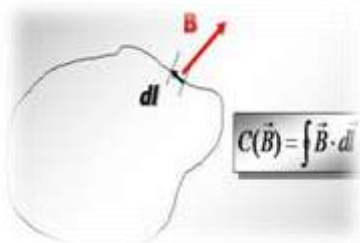


Figura 322 Circuitazione del campo magnetico

La circuitazione $C(\mathbf{B})$ del campo magnetico lungo un qualsiasi percorso chiuso è proporzionale alla somma algebrica delle correnti concatenate al percorso.

La costante μ_0 , è la **permeabilità magnetica del vuoto** e vale: $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ N/A}^2$ (ovvero $4\pi \cdot 10^{-7}$)

Il ruolo della permeabilità magnetica è analogo a quello della costante dielettrica ϵ_0 del vuoto: essa è legata alle *proprietà magnetiche* del vuoto, come la costante dielettrica è legata alle *proprietà elettriche*. I materiali *ferromagnetici* sono caratterizzati da valori della permeabilità molto alti rispetto a quella del vuoto.

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \sum I_i \quad (3)$$

13.10 Legge di Biot-Savart

Consideriamo per ipotesi un filo rettilineo posto in verticale ed infinitamente lungo: avremo che il campo magnetico sarà, in ogni punto, un vettore orizzontale sempre perpendicolare sia al filo (e cioè alla direzione della velocità delle cariche) che al vettore che orizzontalmente parte dal filo per arrivare nel punto in cui sto calcolando il campo magnetico.

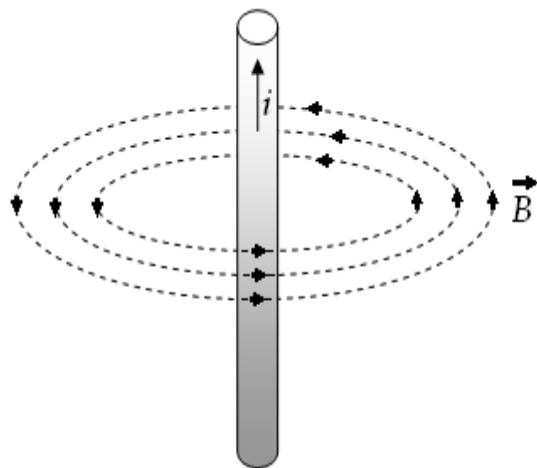


Figura 323 Legge di Biot-Savart

Questo è conseguenza del fatto che in quel punto si sommano i campi magnetici generati da ognuna delle cariche che si muovono attraverso il filo. Il **modulo** del campo magnetico sarà:

$$B = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} \quad (4)$$

YouTube



dove i è l'intensità di corrente che attraversa il filo rettilineo ed r la distanza, o meglio i raggi, a cui viene calcolato il **campo magnetico generato dal filo percorso da corrente**.

Se indichiamo la grandezza $\Omega \cdot s = H$, dove ad H si dà il nome **henry**, otteniamo per il coefficiente di permeabilità:

$$\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (5)$$

La **direzione** del campo \vec{B} è nel piano della circonferenza con centro sul filo e passante per P e risulta ad essa tangente.

Per determinare il **verso** si può usare la regola della mano destra: se si pone il pollice nella direzione della corrente, e le dita chiudendo la mano, le stesse indicheranno il verso del campo:

Per rappresentare in modo schematico le linee di campo si immagina di vedere una sezione trasversale del filo vista dall'alto:

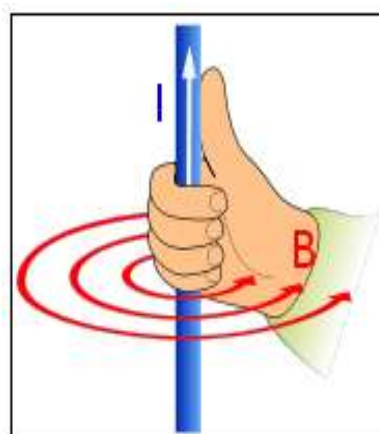
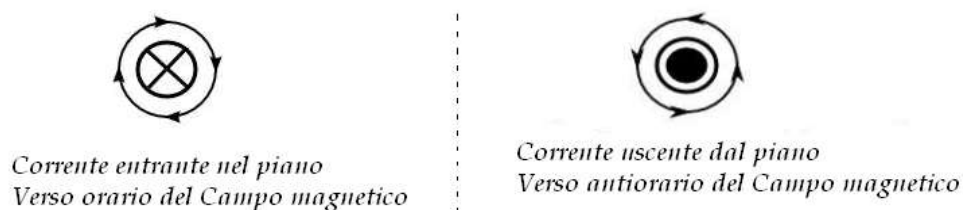


Figura 324 Regola della mano destra per il campo magnetico

13.11 Campo magnetico nel centro di una spira circolare

Una **spira** è un anello di materiale conduttore in grado di far circolare corrente su di sé.

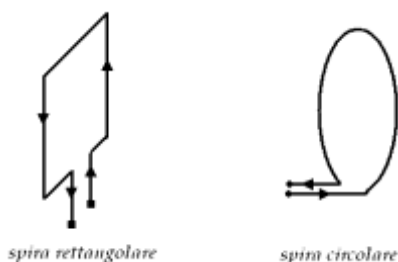
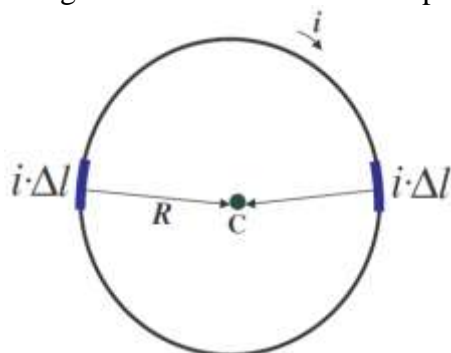


Figura 325 Spira rettangolare e spira circolare

Il calcolo del campo magnetico \vec{B} nello spazio circostante la spira è in genere molto complesso, ma diviene semplice quando decidiamo di calcolare il campo magnetico \vec{B} nel centro della spira.



Il campo magnetico \vec{B} nel punto C può essere pensato come la somma dei campi magnetici \vec{B}_i generati dai tratti di lunghezza Δl (pressoché rettilinei) di filo conduttore in cui la spira può essere suddivisa. Si dimostra che in C il **modulo** del campo magnetico è dato da:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i}{R} \quad (6)$$

La **direzione** è quella dell'asse della spira, cioè della retta perpendicolare al piano della spira, il **verso** è quello del pollice della mano destra quando le altre dita sono orientate secondo il verso della corrente.

13.12 Campo magnetico in un solenoide

Un **solenoide** o **bobina** - dal greco $\sigma\omega\lambda\eta\nu$ (*solen*): tubo, condotto, canale - è un avvolgimento solitamente di forma cilindrica formata da una serie di **spire** circolari molto vicine fra loro e realizzate con un unico filo di materiale conduttore.

YouTube

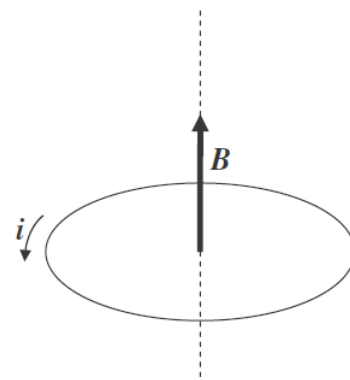


Figura 326 Campo magnetico al centro di una spira circolare

YouTube



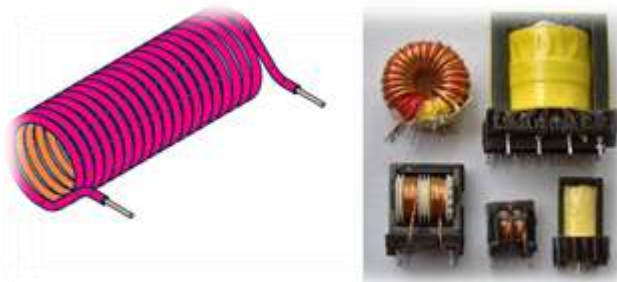


Figura 327 Bobina o solenoide

Facendo passare una corrente elettrica di intensità I nel filo, si viene a creare un campo magnetico dentro e fuori il solenoide direttamente proporzionale al numero totale delle spire, all'intensità di corrente ed inversamente proporzionale alla lunghezza del solenoide.

Nel caso di un solenoide di questo tipo, posto in un mezzo, il modulo del vettore induzione magnetica B_{int} interna al solenoide risulta essere:

$$B_{int} = \mu \cdot n \cdot I \quad (7)$$

dove n è il numero di spire per unità di lunghezza che costituiscono il solenoide, I è la corrente che lo attraversa, l la lunghezza del solenoide, μ è il coefficiente di permeabilità del mezzo e vale:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

dove μ_r è la **permeabilità magnetica** del mezzo.

Detta l la lunghezza del solenoide, ed indicando con N il valore $n \cdot l$ possiamo riscrivere la formula (7) come:

$$B_{int} = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad (8)$$

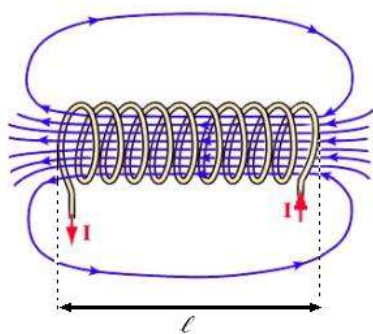


Figura 328 Campo magnetico in un solenoide

Nella tabella che segue sono indicati alcuni valori di permeabilità magnetica di alcuni materiali, di diversa natura:

| Materiale | Coefficiente di permeabilità relativo μ_r |
|--|---|
| Materiali diamagnetici (Bismuto, Rame, Argento, Acqua) | da 0,9998 a 0,9999 |
| Materiali paramagnetici (Platino, Aria, Alluminio) | da 1,000002 a 1,00036 |
| MATERIALI FERROMAGNETICI | |
| Ferro | da 1.000 a 200.000 |
| Ferro-silicio (4% Si) | da 500 a 7000 |
| Ferro-Nichel (50% nichel) | da 90 a 100 |
| Fe-Ni-Mo (79% Ni, 5% Mo) | da 100.000 a 1.000.000 |

Si potrà notare come il coefficiente di permeabilità dei materiali ferromagnetici non è mai costante, perchè dipende da eventuali precedenti magnetizzazioni, mentre per i materiali omogenei si mantiene praticamente costante e molto vicino al valore 1.

All'esterno del solenoide, a distanze sufficientemente grandi, il campo di induzione magnetica si annulla.

Se il solenoide è molto lungo rispetto al diametro delle spire, il campo magnetico che si crea all'interno è pa-

rallalelo all'asse del solenoide. La direzione del vettore induzione magnetica \vec{B} è quella dell'asse mentre il suo verso è quello di una vite che ruota in senso orario (vite destrorsa) mentre viene avvitata nel verso della corrente I .

13.13 Ciclo di isteresi magnetica

Consideriamo ora un semplice circuito elettrico in cui è inserito un solenoide avvolto intorno ad un materiale ferromagnetico ed un generatore di corrente, con la possibilità di variare la corrente immessa nel circuito (con un potenziometro).

Se nel solenoide, come detto, è inserito un materiale ferromagnetico, il campo magnetico risulta essere:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{B}_0 \quad (9)$$

dove \vec{B}_0 è il campo magnetico nel vuoto.

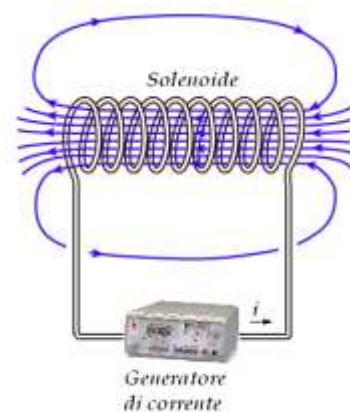
Apparentemente potrebbe sembrare semplice calcolare il campo magnetico generato all'interno del solenoide, vista la semplicità della formula appena espressa e noto il campo magnetico \vec{B}_0 . Se però ricordiamo quanto già osservato nella tabella del paragrafo precedente, i materiali ferromagnetici presentano delle oscillazioni della loro "costante" di permeabilità relativa μ_r molto ampie, al variare della magnetizzazione che già hanno subito in precedenza.

Quindi, quella che potrebbe sembrare una lineare dipendenza, nella formula (8) non lo è affatto perchè non è costante il coefficiente μ .

Osservare ora cosa accade quando facciamo passare corrente nel circuito.

Se aumentiamo man mano l'intensità della corrente i vedremo che il modulo del campo magnetico nel solenoide tende a crescere fino ad arrivare ad un valore massimo B_s oltre il quale non riesce ad andare pur continuando ad aumentare l'intensità di corrente. Possiamo così affermare che il campo magnetico è giunto ad un livello di saturazione (**punto P**).

YouTube



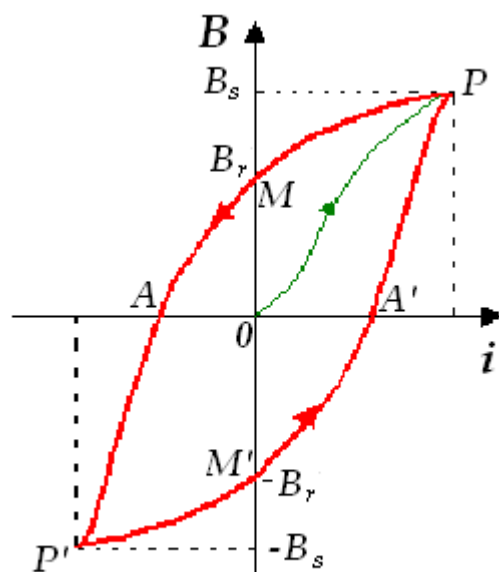


Figura 329 Curve di isteresi magnetica

A questo punto facciamo man mano scendere l'intensità di corrente, fino a farla tornare nulla (**punto M**). Noteremo però che il materiale ferromagnetico presente nel solenoide non si sarà totalmente smagnetizzato ma presenta una magnetizzazione residua B_r .

Se **scambiamo le polarità del generatore**, in modo da poter generare una corrente elettrica negativa (rispetto al verso precedentemente scelto), possiamo far sì che, fornendo ancora corrente elettrica, negativa, il materiale ferromagnetico arrivi ad un punto (**punto A**) in cui si sarà totalmente smagnetizzato. Continuando a diminuire l'intensità di corrente arriveremo ad un ulteriore punto di magnetizzazione negativa $-B_s$ (**punto P'**) in cui accade la stessa situazione del punto **P**, ovvero pur continuando a diminuire la corrente nel circuito la magnetizzazione rimane sostanzialmente invariata.

Facciamo ruotare il *potenziometro* in modo da far tornare la corrente nulla constatando anche qui che il materiale ferromagnetico sarà ora magnetizzato, con polarità invertite rispetto a prima, presentando una magnetizzazione residua $-B_r$ (**punto M'**). Possiamo a questo punto re invertire il generatore, in modo da fornire di nuovo corrente elettrica positiva, verificando che man mano che aumentiamo la corrente il materiale ferromagnetico tenderà a smagnetizzarsi, giungendo a smagnetizzarsi totalmente (**punto A'**). Se continuiamo ad aumentare la corrente nel circuito giungeremo di nuovo al punto **P**, in cui il campo magnetico risulta massimo o di saturazione.

Abbiamo appena compiuto quello che viene indicato come **ciclo di isteresi ferromagnetica**, che può essere linee ripetuto più volte percorrendo all'incirca la stessa curva chiusa:

$$P \rightarrow A \rightarrow P' \rightarrow A' \rightarrow P.$$

Si osservi anche che la **curva di prima magnetizzazione**, da $0 \rightarrow P$ viene percorsa solo la prima volta, mentre man mano che viene aumentata e poi diminuita la corrente nel circuito i valori fatti registrare dal campo magnetico non vengono più ripetuti per quel materiale ferromagnetico, pur compiendo ciclicamente traiettorie sempre molto simili tra loro.

13.14 Applicazioni: Elettrocalamita

Una semplice applicazione del fatto che un materiale ferromagnetico mostri una magnetizzazione residua quando è posto in un solenoide attraversato da corrente è proprio quello che tale magnetizzazione residua B_r lo rende a tutti gli effetti un magnete, con la differenza però che mentre un magnete permanente mostra sempre le stesse caratteristiche magnetiche, con la magnetizzazione indotta è possibile magnetizzare e smagnetizzare un materiale ferromagnetico, a seconda dell'utilizzo che si voglia fare dello stesso. Di fatto, quello descritto è alla base di funzionamento delle **elettrocalamite**, che presentano molte applicazioni pratiche in diversi ambiti. Un esempio d'uso si ha nel campo delle serrature, dove l'elettromagnete viene usato per tenere una porta chiusa (o aperta), garantendone però l'apertura (o la chiusura) in caso di mancanza di corrente elettrica dalla rete.



Figura 330 Elettrocalamite per porte di emergenza

13.15 Dipolo magnetico

Il dipolo magnetico è un magnete ottenuto considerando una spira di dimensioni microscopiche percorsa da corrente elettrica.

La grandezza che caratterizza principalmente un dipolo magnetico è il **momento magnetico**, che quantifica la tendenza del dipolo ad orientarsi in una data direzione in presenza di un campo magnetico esterno. Si tratta di un modello equivalente a due cariche magnetiche opposte rigidamente connesse, in analogia con il dipolo elettrico. Si realizza diminuendo le dimensioni di una spira percorsa da corrente elettrica, mantenendone costante il momento magnetico e prendendo il limite in cui l'area della spira è nulla. Il dipolo magnetico costituisce il caso più semplice di un $2p$ -polo, in cui $2p$ è il numero di coppie polari, che per la legge di Gauss magnetica è un numero intero. Si tratta di un'utile schematizzazione dell'influsso di un campo magnetico su spire molto piccole percorse da corrente, ed è perciò usato nell'ambito della feno-

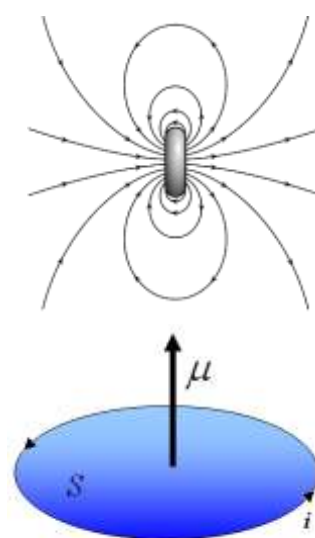


Figura 331 Momento magnetico in un dipolo

menologia del magnetismo nella materia attraverso modelli atomici classici (come quelli di *Rutherford* e *Bohr*), tramite l'introduzione di correnti atomiche dovute al moto degli elettroni e a correnti di *Larmor* causate dalla precessione dell'orbita di questi.

E' opportuno, a questo punto, definire una nuova grandezza vettoriale che permette di descrivere in modo semplice il comportamento del circuito nel campo magnetico. Si chiama **momento di dipolo magnetico** $\vec{\mu}$ o semplicemente momento magnetico un vettore perpendicolare al piano delle spire, diretto dalla parte in cui si vede la corrente circolare in verso antiorario. Se N è il numero delle spire, i l'intensità di corrente e S la superficie racchiusa, l'intensità del vettore $\vec{\mu}$ vale:

$$\mu = N \cdot i \cdot S \quad (10)$$

L'unità di misura del momento magnetico è $[A \cdot m^2]$.

Consideriamo ora una spira di forma rettangolare di lati a e b , percorsa da una corrente i e immersa in un campo magnetico \vec{B} uniforme. Immaginiamo che la spira sia disposta in modo che il momento magnetico $\vec{\mu}$ sia allineato con il campo magnetico esterno. Le linee di campo, in questo caso, attraversano perpendicolarmente la spira.

Tutti i lati della spira sono perpendicolari al campo e quindi essi sono sottoposti ad una forza magnetica massima.

Sui lati a agiscono due forze opposte di modulo:

$$F_a = i \cdot a \cdot B$$

sui lati b altre due forze opposte di modulo:

$$F_b = i \cdot b \cdot B$$

Queste due coppie agiscono lungo la stessa retta d'azione e tendono ad allargare (o a comprimere) la spira. Se la spira è rigida, non hanno alcun effetto su di essa: la spira rimane in equilibrio nel campo. Possiamo dire che la posizione di equilibrio della spira è quella in cui è massimo il flusso di campo magnetico attraverso la spira.

Cosa accade se alteriamo questa posizione?

Immaginiamo che la spira sia inclinata in modo che il momento magnetico formi un angolo α diverso da 0 con il campo magnetico. Che cosa cambia?

I lati a della spira non sono più perpendicolari al campo e le forze magnetiche diminuiscono, ma continuano ad agire lungo la stessa retta d'azione e non provocano rotazioni. Le forze che agiscono sui lati b , invece, formano una coppia a momento meccanico non nullo e tendo-

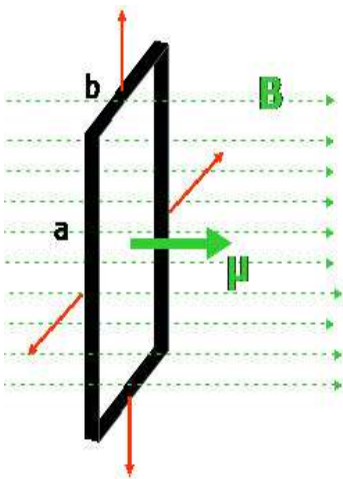
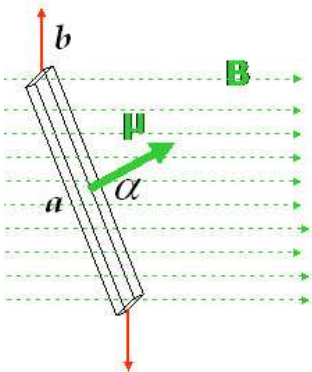


Figura 332 Spira rettangolare immersa in un campo magnetico uniforme



no a far ruotare la spira, riallineando il momento di dipolo con il campo esterno. La posizione con il momento magnetico allineato con il campo è uno stato di **equilibrio stabile**.

Questo movimento rotatorio della spira è alla base del funzionamento dei **motori elettrici**: dal punto di vista energetico, l'energia elettrica (utilizzata per far circolare la corrente) si trasforma in energia di movimento. C'è una semplice relazione che collega il momento meccanico $\vec{\tau}$ della coppia di forze al momento di dipolo $\vec{\mu}$ e il vettore \vec{B} , data dal prodotto vettoriale:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (11)$$

da cui è possibile esprimerne il **modulo** come:

$$\tau = \mu \cdot B \cdot \sin \alpha$$

con **direzione** perpendicolarmente al piano di rotazione della spira e **verso** dalla parte da cui si vede la rotazione antioraria

Dipolo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre, già trattato all'inizio del capitolo, è generato da un dipolo magnetico situato al centro della Terra ed inclinato di $11^\circ 30'$ rispetto all'asse di rotazione terrestre. I luoghi della superficie terrestre in cui fuoriesce l'asse del dipolo magnetico sono detti "**poli geomagnetici**".

Esistono due poli geomagnetici: uno nell'**emisfero australe** ($78^\circ 30' N$ $69^\circ W$) ed uno nell'**emisfero boreale** ($78^\circ 30' S$ $111^\circ E$). La scoperta scientifica dell'esistenza del campo geomagnetico è attribuita allo scienziato francese del XIII secolo **Pierre de Maricourt**.

13.16 L'origine del magnetismo e ipotesi di Ampère

Nelle precedenti sezioni abbiamo visto che una corrente i è in grado di produrre un campo magnetico B . Nelle formule per i campi magnetici compare la costante $\mu_0 = 2 \cdot 10^{-7} N/A$. Questo valore della costante μ_0 è valido solo nel vuoto. Supponiamo invece di introdurre un cilindro all'interno di un solenoide percorso da corrente. Se il campo magnetico nel vuoto ha un'intensità pari a \vec{B}_0 , quando introduciamo il cilindro, il campo magnetico diventa uguale a \vec{B} e questo valore dipende dalla sostanza di cui è costituito il cilindro che abbiamo inserito. In particolare, possiamo definire una costante, detta **costante di permeabilità magnetica** relativa

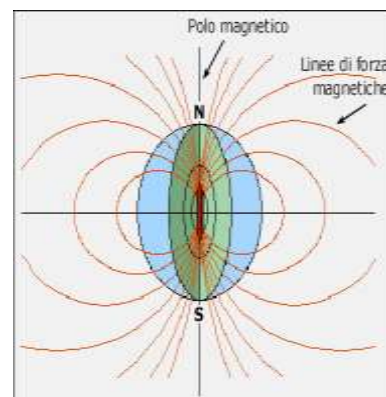


Figura 333 Poli magnetici terrestri

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (12)$$

Si possono così presentare tre casi diversi, a seconda del materiale di cui è costituito il cilindro:

- **sostanze ferromagnetiche**, $\mu_r \gg 1$. Il campo magnetico \vec{B} all'interno del solenoide può arrivare a essere migliaia di volte maggiore del campo magnetico nel vuoto \vec{B}_0 . Un esempio di materiale ferromagnetico è costituito dall'**acciaio**. L'acciaio ha la proprietà di magnetizzarsi e, quando questo avviene, nel cilindro all'interno del solenoide le linee di campo si addensano;
- **sostanze paramagnetiche**, $\mu_r > 1$. Nelle sostanze paramagnetiche, come il **ferro dolce**, l'alluminio o il platino, si osserva un leggero aumento del campo magnetico all'interno del solenoide;
- **sostanze diamagnetiche**, $\mu_r < 1$. Nelle sostanze diamagnetiche, come il **rame** o l'**argento**, il campo magnetico all'interno del solenoide diventa leggermente inferiore rispetto al caso del vuoto.



Ipotesi di Ampere sul magnetismo

Ampere, per spiegare il fenomeno del ferromagnetismo, ipotizzò l'esistenza all'interno del cilindro di tante spire circolari percorse da corrente. In condizioni normali queste spire sono orientate in maniera del tutto casuale. L'introduzione del cilindro in un campo magnetico ha la proprietà di orientare le spire tutte nello stesso verso, in modo tale da rafforzare il campo magnetico già esistente all'interno del solenoide. L'ipotesi di Ampere, che non era stata presa troppo sul serio dai suoi contemporanei, è invece oggi avvalorata dai moderni modelli di atomo che prevedono l'esistenza di elettroni in moto attorno al nucleo. Tali elettroni nella fisica moderna giocano il ruolo delle spire circolari ipotizzate da Ampere.

Cosa succede quando annulliamo gradualmente il campo magnetico esterno? L'orientamento delle spire circolari in parte permane e si creano in questo modo dei magneti permanenti artificiali.

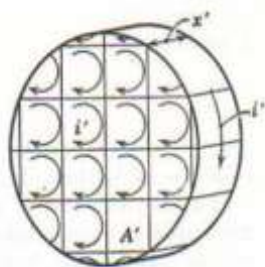


Figura 334 Ipotesi di Ampere sul magnetismo

13.17 Dominio di Weiss

Il **dominio di Weiss** è una piccola area nella struttura cristallina di un materiale ferromagnetico, i cui grani hanno un'orientazione magnetica. Viene così chiamato dal fisico francese **Pierre - Ernest Weiss** (1865–1940)

Nel momento in cui lo stesso materiale viene sottoposto ad un campo magnetico, i domini di Weiss vengono orientati secondo un'unica direzione. Una volta portato il materiale ferromagnetico nello stato di

saturazione si può affermare che esso ha raggiunto una polarizzazione magnetica totale, con la magnetizzazione di tutti i domini di Weiss allineata lungo un'unica direzione. Nello stato smagnetizzato invece la direzione della magnetizzazione all'interno dei domini di Weiss risulta diretta mediamente in modo casuale.

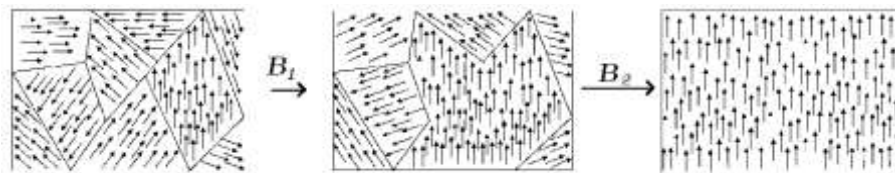


Figura 335 Domini di Weiss

Questo è il motivo per il quale, dal punto di vista macroscopico, il corpo non appare magnetizzato. Nel momento in cui verrà rimosso il campo magnetico esterno, il materiale sarà comunque in grado di esercitare uno proprio in seguito alla magnetizzazione residua, detta rimanenza.

13.18 Il moto di una carica elettrica in un campo

Consideriamo una particella di massa m e carica puntiforme $+q$ in moto con velocità \vec{v} **perpendicolare** a un campo \vec{B} uniforme.



Figura 336 Moto di una carica immersa in un campo magnetico uniforme

Sulla carica è esercitata la forza magnetica, che prende il nome di **forza di Lorentz**.

$$\vec{F}_M = q \cdot \vec{v} \cdot \vec{B} \quad (13)$$

che risulta:

1. sempre perpendicolare a $\vec{v} \Rightarrow \vec{v}$ costante in modulo ma variabile in direzione;
2. costante in modulo \Rightarrow la direzione di \vec{v} varia in modo costante \Rightarrow la tangente alla traiettoria varia in modo costante \Rightarrow la traiettoria è una circonferenza.

Da 1 e 2 segue che: il moto della carica è **circolare uniforme**.

La forza centripeta necessaria al moto è fornita dalla forza magnetica:

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{R} = q \cdot v \cdot B$$

da cui è possibile calcolare il raggio di tale traiettoria:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} \quad (14)$$

dove m è la massa della carica.

Il periodo T (tempo necessario per compiere un giro completo) è fissato da:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B} \quad (15)$$

Si noti che il periodo T non dipende dalla velocità con cui la carica entra nel campo magnetico prima di iniziare a ruotare di moto circolare uniforme.

A parità di m , q e B , particelle con velocità maggiori si muovono su circonferenze di raggio maggiore (vedi fig. a);

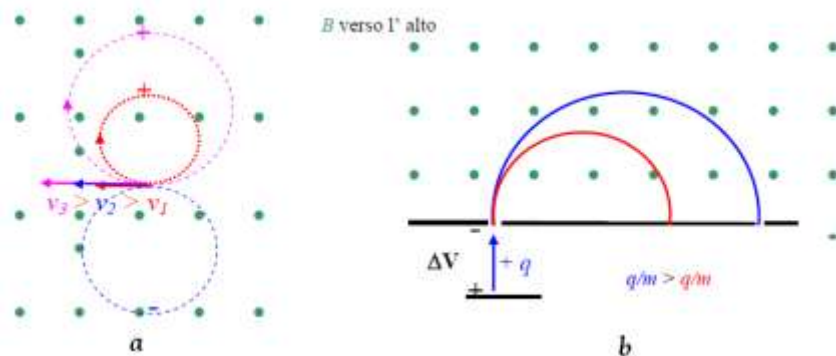
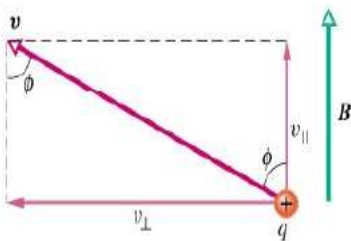


Figura 337 Moto di una carica in base alla velocità



la maggiore lunghezza della circonferenza è compensata dalla maggiore velocità e un giro completo è percorso sempre nello stesso tempo.

A parità di v , B particelle di diverso rapporto q/m si muovono su orbite diverse (vedi fig. b); questo effetto può essere usato per selezionare particelle con diverso rapporto q/m (**spettrometro di massa**).

Se la velocità \vec{v} **non è perpendicolare** a un campo \vec{B} uniforme, essa può essere scomposta in una componente parallela ed in una perpendicolare al vettore campo \vec{B} .

Nella direzione parallela a \vec{B} il moto è rettilineo uniforme, mentre nella direzione perpendicolare a \vec{B} il moto è circolare uniforme. Il

moto risultante è un'elica di raggio costante r e di passo costante $p = v_{//} \cdot T$.

Se la velocità \vec{v} **non è perpendicolare** al campo \vec{B} che **non è uniforme**, si ha ancora una spirale ma in questo caso sia il raggio r che il passo p variano con il campo.

Dove il campo è molto intenso la particella subisce “**riflessione**” (ossia la velocità longitudinale si inverte) e se ciò succede ad entrambi gli estremi delle linee di forza la particella resta intrappolata in una così detta “**bottiglia magnetica**”.

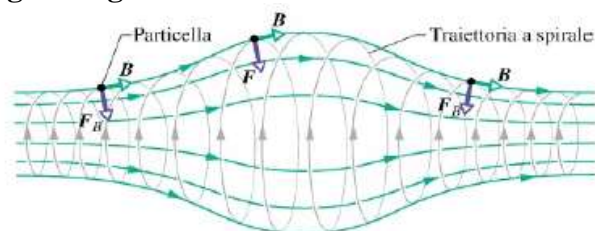


Figura 338 Bottiglia magnetica

Questo meccanismo in prossimità della Terra dà origine alle **fasce di Van Allen** e alle *aurore boreali*. Alcune particelle cosmiche (protoni ed elettroni) restano intrappolate per lungo tempo *spiraleggiando* nel campo magnetico terrestre. Va detto inoltre che le fasce di Van Allen sono altamente **radioattive** e rendono il loro attraversamento molto pericoloso, sia per gli strumenti che per gli esseri viventi a bordo di ipotetiche navicelle. Per garantire un incolore attraversamento è necessario provvedere ad una schermatura imponente sia delle apparecchiature che dell'equipaggio, onde evitare, per le prime, un improvviso deterioramento della funzionalità delle apparecchiature di bordo. Ogni viaggio, oltre il globo terrestre, deve tener conto di tali zone radioattive, onde garantire il successo delle missioni, come detto da Kelly Smith, uno scienziato della NASA, riguardo la prossima missione Orion.



Le aurore boreali

Le zone in cui le particelle restano intrappolate prendono il nome di **fasce di radiazione** o di Van Allen.

La Terra possiede due fasce di radiazione: una **interna**, relativamente compatta, situata ad un'altezza di circa 3000km e composta da protoni di alta energia ($10 \div 100\text{MeV}$) e una **esterna**, una vasta regione costituita da protoni ed elettroni di energia molto inferiore.

Le particelle cariche, collidendo con gli atomi dell'atmosfera, li portano in uno stato eccitato (più energetico). In seguito gli atomi perdono questa energia emettendo luce visibile originando le aurore boreali.



Figura 339 Aurora boreale

13.19 Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente

Consideriamo una spira piana (rettangolare di lati a e b) percorsa da una corrente i immersa in un campo \vec{B} uniforme e costante, con \vec{B}_\perp , la componente perpendicolare al lato a

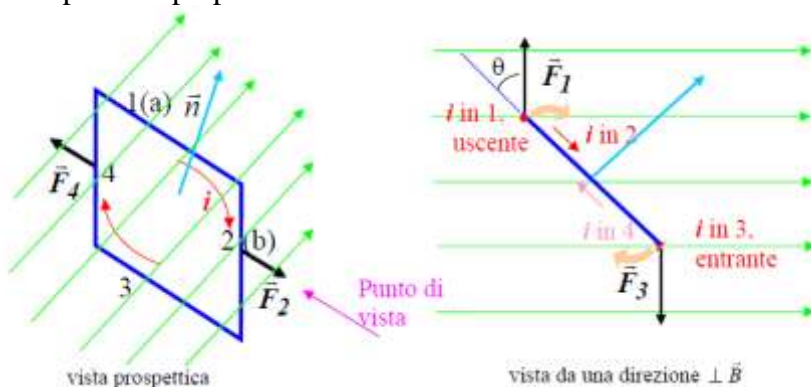


Figura 340 Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente

Ricordando che

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (16)$$

si ha che:

- Sui lati 2 e 4 abbiamo

$$\vec{F}_{2(4)} = i \cdot \vec{b} \times \vec{B}$$

con $\vec{F}_2 = -\vec{F}_4$, nello stesso piano della spira \Rightarrow nessun effetto se la spira è rigida.

- Sui lati 1 e 3 abbiamo

$$\vec{F}_{1(3)} = i \cdot \vec{a} \times \vec{B}$$

Poiché l'intensità di corrente è la stessa e i lati hanno la stessa lunghezza (osservare che $\vec{a} \perp \vec{B}$) segue che \vec{F}_1 ed \vec{F}_2 hanno stesso modulo ($F_1 = F_2 = i \cdot a \cdot B$), agiscono lungo direzione parallele e hanno verso opposto ovvero costituiscono una **coppia di forze** \Rightarrow non c'è quindi traslazione ma solo *rotazione* dovuta ad un momento τ_R . Essendo $a \cdot b = S$ è possibile calcolare il momento della spira rotante ottenendo:

$$\tau = i \cdot S \cdot B \cdot \sin \theta \quad (17)$$

Si può affermare quindi che una bobina percorsa da corrente in un campo magnetico tende a ruotare con momento

$$\vec{\tau} = \vec{\mu}_B \times \vec{B} \quad (18)$$

in modo da portare $\vec{\mu}_B$ a disporsi parallelamente alla direzione del campo (dove $\vec{\tau} = 0$)

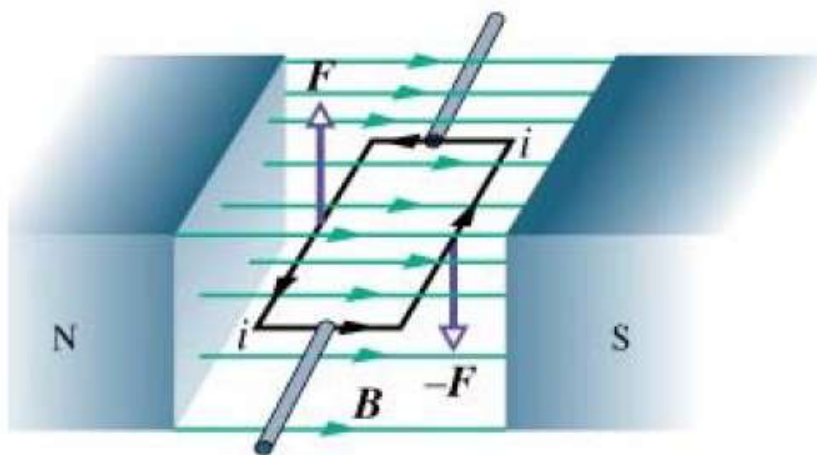


Figura 341 Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente

13.20 Il motore elettrico a corrente continua

La prima macchina elettromagnetica rotante conosciuta, è stata inventata da Michael Faraday nel 1821; consisteva in un filo conduttore tenuto fermo verticalmente alla sua estremità superiore in modo che l'estremità inferiore fosse immersa in un piatto contenente mercurio. Un magnete permanente circolare era sistemato al centro del piatto. Quando una corrente elettrica veniva fatta scorrere nel filo, questo ruotava attorno al magnete mostrando che la corrente generava un campo magnetico attorno al filo. Questo è un esperimento didattico utilizzabile in una lezione di fisica, anche se al posto del mercurio (tossico) conviene usare un altro liquido conduttore come acqua molto salata.

La classica macchina in corrente continua ha una parte che gira detta rotore o armatura, e una parte che genera un campo magnetico fisso (nell'esempio i due pezzi più esterni) detta **statore**.

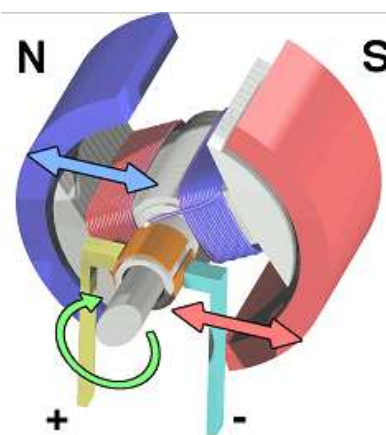


Figura 342 Motore elettrico

Un interruttore rotante detto commutatore o collettore a spazzole inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti generando un campo magnetico che entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura. Nascono forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi (indicati con N ed S nelle figure).

La velocità di rotazione dipende da:

- Tensione applicata;
- Corrente assorbita dal rotore;
- Carico applicato.

La coppia generata è proporzionale alla corrente ed il controllo più semplice agisce sulla tensione d'alimentazione, mentre nei sistemi più complessi si usa per la tensione un controllo in retroazione. La coppia è inversamente proporzionale alla frequenza meccanica; ciò è molto utile per la trazione in quanto il massimo spunto si ha con veicolo fermo, inoltre il sistema tende da solo alla autoregolazione sulla velocità. Inoltre da questo si può intuire la sua capacità di agire anche da freno, talvolta usato anche per il recupero dell'energia nei mezzi ibridi; nel caso più semplice collegando alle spazzole un resistore, l'energia meccanica trasmessa all'albero si dissipa in calore su questo resistore. Riassumendo si può affermare che il **motore a corrente continua** ha tutte le funzioni necessarie per un mezzo mobile: oltre alla funzione di motore può recuperare l'energia funzionando da dinamo quando serve l'azione frenante o agire semplicemente da freno.

Il suo limite principale è nella necessità del commutatore a spazzole:

- Le spazzole sono in grafite, mentre nei piccoli servomotori e nei tipi utilizzati nei lettori **CD/DVD** o registratori a cassette sono in lega metallica bianca. La differenza è nella frequenza della loro sostituzione, infatti nelle macchine utensili come smerigliatrici o trapani, si utilizzano spazzole in grafite, perché è molto semplice e veloce sostituirle, le spazzole in metallo, sono usate su apparecchi dove risulta scomodo o non conveniente cambiarle, come nei motori d'avviamento dei mezzi di trasporto.
- Le spazzole pongono un limite alla massima velocità di rotazione: maggiore è la velocità e più forte è la pressione che bisogna esercitare su di esse per mantenere un buon contatto, comunque i motori universali usati negli aspirapolvere e negli elettro utensili portatili (trapani, mole, etc.) possono raggiungere i $60 \div 75 \text{ Hz}$.
- Tra spazzole e collettore, nei momenti di commutazione, si hanno transitori di apertura degli avvolgimenti induttivi e quindi scintillio, attenuabile con l'anticipazione della commutazione dei vari avvolgimenti rotorici (le spazzole devono essere ruotate assialmente in anticipo rispetto alla rotazione dell'indotto), soluzione applicabile per motori che devono ruotare sempre in una sola direzione.

- Queste scintille comportano disturbi elettrici sia irradiati nell'ambiente circostante che trasmessi al generatore di tensione di macchina; questi disturbi, in determinati settori di impiego, possono causare problemi di compatibilità elettromagnetica; è possibile attenuarli tramite dei filtri.

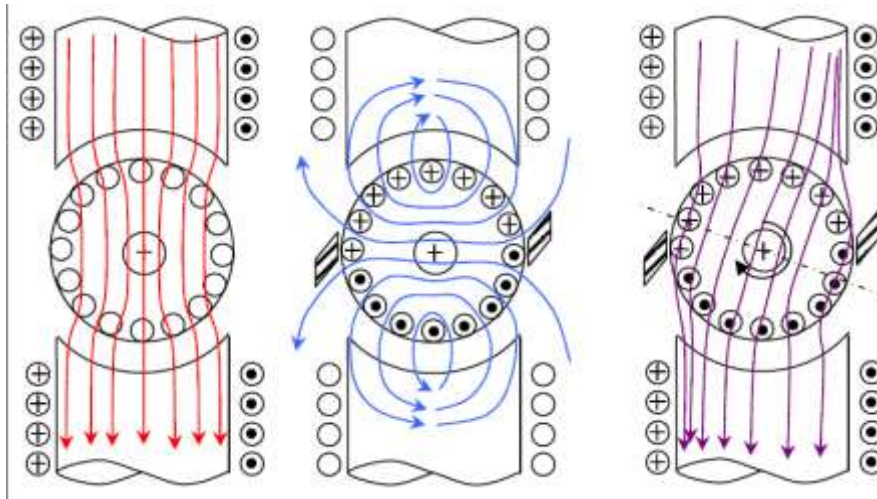


Figura 343 Schema di motore elettrico

La presenza di avvolgimenti elettrici sul rotore ha anche **due aspetti negativi**:

- Se il motore è di grossa potenza si hanno dei problemi di smaltimento del calore (gli avvolgimenti si riscaldano per effetto Joule e il campo magnetico alternato nel nucleo del rotore genera altre perdite, causate da isteresi magnetica e correnti parassite nel nucleo stesso, e quindi altro calore).
- Gli avvolgimenti appesantiscono il rotore (aumenta il momento d'inerzia): se il motore deve rispondere con rapidità e precisione (come avviene nelle automazioni industriali e nella robotica) il controllo diventa più complesso; per piccole potenze (da 1 a 200W) e servocontrolli a volte si usano particolari tipi di motori con rotore con avvolgimenti a forma di bicchiere e privo del nucleo di ferro, detti **ironless**: hanno bassa inerzia e rendimento elettrico più elevato dei loro corrispondenti con rotore avvolto su nucleo di ferro.

13.21 Il galvanometro

Il **galvanometro** è un dispositivo che traduce una corrente elettrica in un momento magnetico. È usato nell' amperometro ad alta sensibilità, nel voltmetro e come servomeccanismo di posizionamento e in strumenti di registrazione.

Il nome deriva da quello di **Luigi Galvani**, e molte delle prime applicazioni si devono a **William Thomson**.

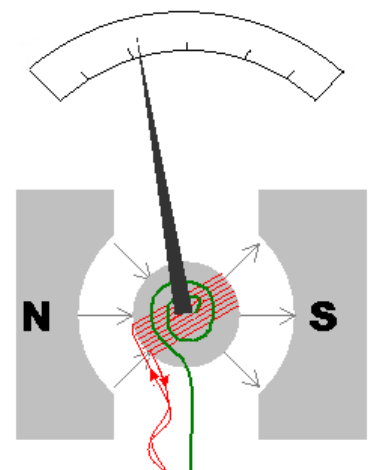


Figura 344 Galvanometro



Figura 345 Galvanometro

In molte applicazioni il galvanometro è sostituito da strumenti di misura digitali, basati sul convertitore analogico-digitale.

L'uso più comune del galvanometro è come strumento di misura o come rivelatore di corrente continua. Il dispositivo è costituito da una bobina mobile che può parzialmente ruotare all'interno di un campo magnetico, solidale con una lancetta indicatrice sovrapposta ad una scala graduata. Una molla tiene la bobina in posizione zero. Quando una corrente fluisce nelle spire, il solenoide genera un campo magnetico, che opponendosi a quello esterno produce una forza che fa ruotare la bobina e quindi l'ago indicatore. La molla contrasta la rotazione, con il risultato che l'angolo di deviazione è proporzionale all'intensità della corrente.

In alcuni strumenti la funzione della molla è svolta da un pezzo di ferro su cui agisce il campo magnetico. Nel sistema è inoltre presente un sistema di smorzamento delle oscillazioni meccaniche, in modo che l'indicatore si stabilizzi rapidamente sulla posizione finale.

La sensibilità dello strumento è indicativamente $100\mu A$ a fondo scala, con una caduta di tensione ai suoi capi di $50mV$ alla massima corrente. Applicando in parallelo allo strumento una resistenza di shunt, è possibile aumentare indefinitamente il fondo scala di misura dividendo la corrente.

Conoscendo con precisione la resistenza interna dello strumento è possibile usarlo come voltmetro, estendendone il campo di misura semplicemente mettendolo in serie ad una resistenza. La resistenza interna e quella in serie costituiscono un partitore di tensione, per cui il rapporto tra la tensione ai capi del galvanometro e la tensione ai capi del sistema equivale al rapporto tra la resistenza dello strumento e la resistenza totale.

Il galvanometro viene usato come rivelatore di corrente nel sistema di misura della tensione a potenziometro.

La scala di lettura dei galvanometri può soffrire dell'errore di parallasse nella lettura, dovuto al fatto che l'utente, osservando la lancetta da punti di vista diversi, vede questa proiettarsi su un punto diverso della scala. Per prevenire questo problema, negli strumenti più precisi viene posto uno specchio lungo il percorso dell'indice che l'utente deve guardare da una posizione perfettamente verticale, tale per cui l'immagine riflessa dell'indice è nascosta dall'indice stesso.

13.22 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questa unità abbiamo imparato a riconoscere i primi fenomeni magnetici già con la semplice osservazione di magneti permanenti come la **calamita**. Pur mostrando alcune analogie con il campo elettrico, il **campo magnetico** mostra al contempo profonde differenze, anche se strettamente correlati tra di loro. Tra le differenze più sostanziali quelle legate alla impossibilità di ottenere **due poli separati**, mentre sappiamo che per le cariche elettriche è possibile ottenere corpi carichi solo positivamente o negativamente. Tra le tante differenze spicca quella sulla natura del Campo. Il Campo magnetico infatti a differenza di quello elettrico, non è conservativo, essendo non nullo il lavoro compiuto lungo una traiettoria chiusa. In seguito abbiamo potuto osservare come anche il **planeta Terra** si comporti come un grande magnete, con polarità molto vicine a quelle indicate geograficamente, che subiscono però in cicli di milioni di anni, **inversioni di polarità**. Attraverso le esperienze di **Oersted** abbiamo potuto osservare le interazioni tra campo elettrico e campo magnetico, osservando come un ago magnetico venisse deviato se posto in vicinanza ad un filo percorso da corrente. La **legge di Ampere** ci ha permesso di stabilire il fatto che il campo magnetico è **non conservativo**. Le esperienze di **Faraday** e di **Ampere** hanno ulteriormente arricchito il numero di fenomeni studiati, potendo constatare che l'interazione potesse causare il movimento stesso del filo condut-

tore, gettando così le basi per la costruzione dei **motori elettrici**. Di lì lo studio di cosa accada in una **spira** percorsa da corrente, nel suo centro o più generalmente un **solenoido**, costituito da n spire. Ancora più interessanti sono apparsi i **fenomeni di magnetizzazione**, condotti con materiali ferromagnetici, potendoli trasformare temporaneamente in magneti. Cosa accada in tale processo è ben descritto dalle curve di **Isteresi magnetica**. Tornando ad uno studio di tipo microscopico, si sono considerate le **ipotesi di Ampere sul magnetismo**, che considerava i materiali magnetici come composto da infinitesime spire, che al passaggio di corrente, si allineano in modo da amplificare l'effetto magnetico. Terminato il flusso di elettroni, l'ipotesi è che le spire riprendano posizioni casuali, in modo che il materiali torni ad essere magneticamente neutro. Abbiamo così osservato cosa accada ad una carica elettrica che si trovi ad essere in moto giungendo in un campo magnetico costante (ad esempio indotto da una calamita) e la traiettoria circolare che essa assume in tale campo magnetico costante. Abbiamo poi osservato come i fenomeni legati a cosa accada ad una **spira percorso da corrente** sia alla base del funzionamento del **motore elettrico** a corrente continua, le cui applicazioni sono sconfinite nell'era moderna. Come ultima applicazione di tale interazione con il campo elettrico, abbiamo descritto il funzionamento del **galvanometro**.

13.23 Problemi proposti

1) Quale è l'unità di misura nel sistema internazionale del campo magnetico?

- a) **H** (Henry) b) **T** (Tesla) c) **G** (Gauss) d) **A** (Ampere)

2) Il campo magnetico terrestre alle nostre latitudini ha una intensità di circa

a) $1 \div 5G = 1 \div 5 \cdot 10^{-5}T$ b) $0,1 \div 0,5G = 1 \div 5 \cdot 10^{-5}T$

c) $1 \div 5G = 1 \div 5 \cdot 10^5T$ d) $0,1 \div 0,5G = 1 \div 5 \cdot 10^5T$

Suggerimento: *effettuare correttamente la conversione fra Gauss e Tesla*

3) Il campo magnetico ad una distanza r da un filo rettilineo percorso da corrente I ha intensità

a) $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r^2}$ b) $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$ c) $B = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2 \cdot \pi \cdot r}$ d)

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot r}{2 \cdot \pi}$$

Suggerimento: *come dipende il campo magnetico dalla distanza? E dalla corrente?*

4) Sapendo che il campo magnetico misurato ad una distanza di 5 cm da un filo percorso da corrente vale 1G (1 Gauss), quanto varrà il campo magnetico ad una distanza di 50 cm?

- a) $B=0.1\text{ G}$ b) $B=0.01\text{ G}$ c) $B=10\text{ G}$ d) $B=100\text{ G}$

Suggerimento: *come dipende il campo magnetico dalla distanza?*

5) Quanto vale il campo magnetico generato da una corrente di 10 A ad una distanza di 10 cm dal filo?

a) $B = 2 \cdot 10^5T$ b) $B = 2 \cdot 10^5G$

c) $B = 2 \cdot 10^{-5}T$ d) $B = 2 \cdot 10^{-5}G$

Suggerimento: *l'ordine di grandezza è sufficiente per individuare la risposta giusta*

6) Il campo magnetico al centro di una bobina formata da n spire di raggio r percorse da corrente I vale:

a) $B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2 \cdot r^2}$ b) $B = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2 \cdot r}$ c) $B = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{2 \cdot n \cdot r}$ d)

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot n \cdot r}{2}$$

7) Due bobine sono percorse dalla stessa corrente. La prima bobina ha 10 spire ed un raggio di 10 cm. La seconda ha 5 spire ed un raggio di 5 cm. I campi magnetici B_1 e B_2 sono

a) $B_1 = \frac{1}{2} B_2$ b) $B_1 = 4B_2$ c) $B_1 = 2B_2$ d) $B_1 = B_2$

8) Le linee di forza del campo magnetico sono sempre linee chiuse perchè

- [a] il campo magnetico è conservativo
- [b] esistono due tipi di carica elettrica
- [c] esistono due tipi di poli magnetici
- [d] non esistono poli magnetici isolati
- [e] il lavoro fatto dal campo magnetico è sempre negativo

9) In quale delle seguenti situazioni il campo magnetico non produce nessuna forza su una carica ?

I) è presente anche un campo elettrico **II)** La carica si muove con velocità perpendicolare al campo. **III)** La carica si muove con velocità parallela al campo. **IV)** La carica è ferma.

- [a] I, II [b] I, III
- [c] I, II, IV [d] II, III [e] III, IV

Suggerimento: si applichi la legge di Lorentz $F = q \cdot v \cdot B \sin \vartheta$ con ϑ l'angolo tra \vec{v} e \vec{B}

10) Una carica elettrica $q = 10^{-5} C$ entra in un campo magnetico con velocità $v = 15 m/s$, perpendicolare al vettore induzione magnetica. Se il campo magnetico vale $B = 10^{-2} T$, la forza magnetica agente sulla carica è pari a:

- [a] 1,5 N
- [b] 15 N
- [c] 1500 N
- [d] $1,5 \cdot 10^{-6} N$
- [e] $1,5 \cdot 10^{-19} N$

Suggerimento: dalla legge di Lorentz, essendo l'angolo tra \vec{v} e \vec{B} pari a $\pi/2$...

11) Se raddoppia la corrente in un conduttore, la circuitazione del campo \vec{B} prodotto dalla corrente,

calcolata su un percorso concatenato col filo,

- [a] resta invariata
- [b] dimezza
- [c] si riduce a 1/4
- [d] raddoppia
- [e] raddoppia purchè il percorso di integrazione sia circolare

Suggerimento: Si ricordi la legge di Ampere: Essa mostra che raddoppiando la corrente la circuitazione raddoppia.

12) Per osservare lo stesso valore del campo magnetico prodotto da un conduttore cilindrico, rettilineo e indefinito percorso da corrente è necessario:

- [a] raddoppiare la corrente e dimezzare la distanza dal conduttore
- [b] raddoppiare la corrente e dimezzare la sezione del conduttore
- [c] dimezzare la corrente e dimezzare la distanza dal conduttore
- [d] quadruplicare la corrente e raddoppiare la sezione del conduttore
- [e] a parità di corrente, raddoppiare la distanza dal conduttore e dimezzarne la sezione

Soluzione. Dalla legge di Ampere si deduce, in questo caso a simmetria cilindrica la legge di Biot-Savart:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

con linee di forza costituite da circonferenze concentriche al filo. Chiaramente avremo

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot d} = \frac{\mu_0 \cdot I/2}{2 \cdot \pi \cdot d/2}$$

- 13) Una corrente di intensità I percorre un lungo filo conduttore rettilineo, e il campo magnetico B da essa prodotto vale, alla distanza di 4m, $10^{-4} T$. Quanto vale B alla distanza di 2m ?

- [a] $5 \cdot 10^{-5} T$
- [b] $2 \cdot 10^{-4} T$
- [c] $25 \cdot 10^{-6} T$
- [d] $4 \cdot 10^{-4} T$
- [e] $\frac{\mu_0}{2\pi} 10^{-4} T$

R: [b]

- 14) Un filo conduttore lungo 5 m ha una massa di 50 g ed è percorso da una corrente di 100 mA. Se viene immerso, in posizione orizzontale, in un opportuno campo magnetico perpendicolare al filo, si osserva che il filo stesso non cade malgrado il proprio peso. Si determini il valore del campo magnetico.

- [a] $980T$ [b] $9,80T$ [c] $0,98mT$
- [d] $0,98T$ [e] $4\pi 10^{-7} T$

- 15) Un filo di raggio $R = 5$ mm è percorso dalla corrente di 0,5 A. Quanto vale il campo magnetico a 2,5 mm dall'asse del filo? Si supponga la corrente uniformemente distribuita sulla sezione del filo.

- [a] $1\mu T$ [b] $0,01\mu T$ [c] $0T$
- [d] $0,01T$ [e] $0,01mT$

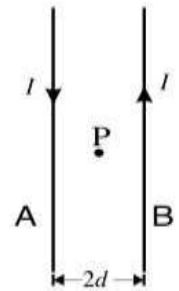
- 16) Una spira piana chiusa priva di generatori è percorsa da una corrente quando:

- [a] è immersa in un campo magnetico statico parallelo al piano della spira;
- [b] è immersa in un campo magnetico statico perpendicolare al piano della spira;
- [c] esiste un flusso magnetico variabile nel tempo concatenato con la spira;
- [d] è immersa in un campo magnetico statico e non uniforme;
- [e] è immersa in un campo elettrico non uniforme costante nel tempo;

17) Due lunghi fili paralleli A e B conducono una corrente elettrica I , come mostrato in figura.

Il campo magnetico in un punto P posto nel mezzo tra A e B vale:

1. zero
2. $\mu_0 I / (2 \pi d)$ perpendicolare al piano della figura, in verso uscente.
3. $\mu_0 I / (\pi d)$ perpendicolare al piano della figura, in verso entrante.
4. $\mu_0 I / (2 \pi d)$ nel piano della figura diretto da A a B.
5. $\mu_0 I / (\pi d)$ perpendicolare al piano della figura, in verso uscente.

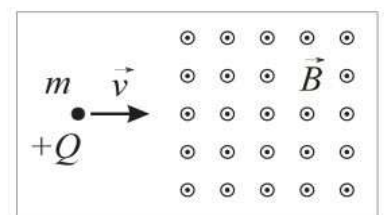


18) Un protone si muove lungo la direzione z in verso positivo dopo essere stato accelerato, a partire dalla quiete, attraverso una differenza di potenziale V . Successivamente il protone passa attraverso una regione con un campo elettrico uniforme di intensità E rivolto lungo l'asse x in verso positivo, e un campo magnetico di intensità B rivolto lungo l'asse y in verso positivo. In questa regione il protone continua a viaggiare in moto rettilineo.

Se l'esperimento fosse ripetuto usando una differenza di potenziale $2V$ per accelerare il protone, questo sarebbe inizialmente:

1. deviato nel senso del verso positivo dell'asse x ;
2. deviato nel senso del verso negativo dell'asse x ;
3. deviato nel senso del verso positivo dell'asse y ;
4. deviato nel senso del verso negativo dell'asse y ;
5. non deviato.

19) In figura è schematizzata una particella con carica $+Q$ e massa m che procede con velocità costante v , e quindi in linea retta. La particella penetra in un campo magnetico uniforme di induzione B diretto in verso uscente dal foglio e quindi comincia a percorrere una traiettoria circolare con raggio R . Si ripete l'esperimento dopo aver aumentato l'intensità del campo magnetico.



Quali delle seguenti affermazioni sul raggio R sono vere?

1 Se la stessa particella avesse la stessa velocità iniziale allora il raggio R sarebbe maggiore.

2 Perché il raggio R resti uguale bisogna che la velocità iniziale della stessa particella sia maggiore.

3 Se la stessa particella avesse una carica maggiore, il raggio R potrebbe rimanere uguale anche con la stessa velocità iniziale.

1. Solamente la 1.
2. Solamente la 2.
3. Solamente la 3.
4. Solamente la 1 e la 2.
5. Solamente la 1 e la 3.

20) Due lunghi fili rettilinei, paralleli, posti a distanza d , sono disposti sul piano di questo foglio, e sono percorsi da corrente elettrica di intensità I uguale nei due fili e rivolta nello stesso verso. Il campo magnetico generato dalla corrente che scorre nei due fili, in un punto del foglio, equidistante da essi, è:

1. Nullo.
2. Perpendicolare al piano del foglio, con verso entrante.
3. Perpendicolare al piano del foglio, con verso uscente.
4. Nel piano del foglio, parallelo ai fili e diretto nel verso della corrente.
5. Nel piano del foglio, parallelo ai fili e diretto in verso opposto alla corrente.

13.24 In laboratorio

28) Verificare la veridicità delle osservazioni di Oersted

29) Verifica delle leggi di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico e del ciclo di isteresi.

13.25 Approfondimento: André Marie Ampère

Fisico, matematico, chimico e filosofo, Ampère fece importanti studi nei campi della matematica e delle probabilità, della geometria e del calcolo delle variazioni, ed è autore di teorie fondamentali nel campo dell'elettrodinamica. Dall'elenco dei suoi interessi si può notare quale ingegno versatile si celasse dietro le apparenze dell'uomo timido e introverso che le biografie ufficiali ci hanno consegnato. In realtà, pur possedendo senz'altro un carattere complesso e contraddittorio, si trattava di un autodidatta severo con se stesso e dalla ferrea disciplina.

Nato il 22 gennaio 1775 a Polémieux-au-Mont-d'Or (Lione), da una famiglia borghese e religiosissima, da ragazzo è vittima di scherzi impietosi per la sua goffaggine, dovuta ad una grave ferita riportata tempo prima ad un braccio. Le sue inclinazioni caratteriali, poi, lo portano ad attraversare momenti di ottimismo sfrenato accanto ad altri di nera disperazione.

Il padre, coinvolto nel movimento rivoluzionario francese, viene ghigliottinato dalla Restaurazione. Questo tragico avvenimento porta solo conseguenze negative sul suo carattere già provato, come è facile immaginare. Anche il suo matrimonio, avvenuto nel 1797, gli procura solo dispiaceri.

Nonostante queste vicissitudini familiari, André dimostra in realtà di avere, come già detto, una grande capacità di concentrazione e di lavoro, dedicandosi con passione alla filosofia, alla letteratura, alla poesia, alla musica, alle scienze naturali e, soprattutto, alla matematica, materia per la quale aveva indubbiamente attitudini superiori. Basti pensare che a soli tredici anni compose, proprio come Pascal, un trattato sulle sezioni coniche...

Nel 1801 viene nominato professore di fisica a Bourg e solo 1802, con una velocità sorprendente, compone le sue considerazioni sulla teoria matematica del gioco, ingegnosa applicazione del calcolo delle probabilità. Il lavoro gli valse una cattedra al collegio di Lione e, più tardi, nel 1805, un posto di "ripetitore" di analisi matematica alla scuola politecnica. Da allora, si stabilisce definitivamente a Parigi, dove intraprende la carriera dell'insegnamento superiore.

Il suo lavoro e i suoi studi lo portano successivamente all'invenzione del primo galvanometro, del primo telegrafo elettrico e, con lo scienziato Arago, dell'elettrocalamita. Fra le sue invenzioni si deve anche obbligatoriamente citare la "Bilancia di Ampère" che serviva per studiare accuratamente le forze che si esercitano tra due conduttori percorsi da corrente e il modo da cui esse dipendono dalla distanza dei conduttori, dalla loro posizione reciproca e dall'intensità di corrente.

Fra il 1820 ed il 1827, si dedica all'elettricità ed al magnetismo: i suoi studi vertono soprattutto sulle azioni reciproche delle correnti elettriche, tanto che Ampère è considerato come il fondatore della elettrodinamica, termine, fra l'altro, coniato proprio da lui. Le teorie di Ampère, però, incontrano lo scetticismo di alcuni scienziati suoi contemporanei: solo 30 anni più tardi verranno pienamente riconosciute da studiosi come W. Thomson e Lord Kelvin.

Queste scoperte sono esposte nella celebre memoria del 1826: "Sulla teoria matematica dei fenomeni elettrodinamici dedotta unicamente dall'esperienza".

Ampère qui sostiene la riducibilità dei fenomeni magnetici a fenomeni elettrici, confutando la teoria dei "vortici" di Oersted, e cercando di considerare l'elettrodinamica come una materia avente un contenuto empirico facilmente controllabile e, nello stesso tempo, assoggettabile ad una evoluta matematizzazione. La teoria verrà poi sviluppata e perfezionata dal matematico polac-



Figura 346 André Marie Ampère (20 gennaio 1775 – , 10 giugno 1836)

co H.Grassmann e da W.E.Weber; il grande J.C. Maxwell, invece, definirà Ampère come il "Newton dell'elettricità".

Sul finire della sua esistenza, al gravoso impegno dei suoi studi, aggiunge, per necessità economiche (le difficoltà finanziarie caratterizzarono purtroppo tutta la sua esistenza), numerosi incarichi di insegnamento ed amministrativi, che logorano profondamente il suo già debole fisico.

Uno dei più geniali scienziati di quei tempi, muore il 10 giugno 1836, a sessantuno anni, a Marsiglia dove sta ricoprendo l'incarico di esaminatore all'università, per un'infezione polmonare trascurata.

In suo onore è detta ampere (**A**) l'unità di misura dell'intensità di corrente elettrica.

14. L'elettromagnetismo

Prerequisiti

Correnti elettriche continue e d.d.p. Circuito elettrico. Campo magnetico. Campo elettrico. Legge di Oersted. Struttura della materia. Concetto di Campo. Corrente elettrica. Effetto Joule. Potenza elettrica. Spira e bobina. Resistenza elettrica e Capacità di un condensatore. Concetto di Onda. Teorema di Gauss.

Sapere

Come sia possibile ottenere una corrente indotta. Flusso dell'induzione magnetica nei diversi casi di circuito fisso o in movimento. Conoscere il concetto di Induttanza e di autoinduzione. Conoscere il concetto di corrente alternata. Conoscere i dispositivi elettromagnetici come l'alternatore e la dinamo. Energia elettrica ed energia del campo magnetico. Conoscere le leggi riguardanti i circuiti RL. Concetto di impedenza e di reattanza. Conoscere la natura delle onde elettromagnetiche, tra cui la luce. Conoscere il lavoro di risistemazione di tutta la teoria elettromagnetica attraverso le Equazioni di Maxwell.

Saper fare

Saper distinguere tra una corrente prodotta da un generatore ed una indotta. Comprendere come possa variare il senso della corrente in base al tipo di moto del circuito inducente. Saper calcolare l'induttanza di un circuito con la presenza di un solenoide. Comprendere come le Equazioni di Maxwell abbia rappresentato un importantissimo lavoro di risistemazione di leggi già enunciate ma fino ad allora non collegate tra di loro. Comprendere come l'elettromagnetismo sia stato comunque alla base delle ulteriori teorie circa la meccanica quantistica e la relatività generale enunciata da Einstein.

Nel capitolo appena trattato, abbiamo osservato gli effetti che una corrente può avere nello spazio circostante creando un campo magnetico e come una carica elettrica che giunga in un campo magnetico inizi a muoversi di moto circolare uniforme. In ultimo abbiamo osservato l'effetto meccanico che un campo magnetico uniforme genera su un circuito percorso da corrente, quando lo stesso è immerso in quel campo magnetico. Di qui le applicazioni quali il motore a corrente continua.

In questo capitolo vedremo altri tipi di interazione elettro-magnetica in cui però considereremo situazioni in cui siano gli stessi circuiti o i magneti a muoversi per via di altre forze meccaniche, producendo nei circuiti posti nelle loro vicinanze effetti inattesi, ma riscontrabili con esperimenti facilmente realizzabili.

14.1 Correnti indotte

Nel 1831 l'inglese Michael Faraday scoprì, dopo alcuni anni di ricerca, un fenomeno particolarmente interessante che doveva influire in modo determinante sullo sviluppo dell'elettricità e di riflesso sul nostro modo di vivere. Alla base del fenomeno scoperto da Faraday sono due esperienze:

- *conduttore fermo e campo magnetico variabile;*
- *conduttore fermo e magnete in moto*

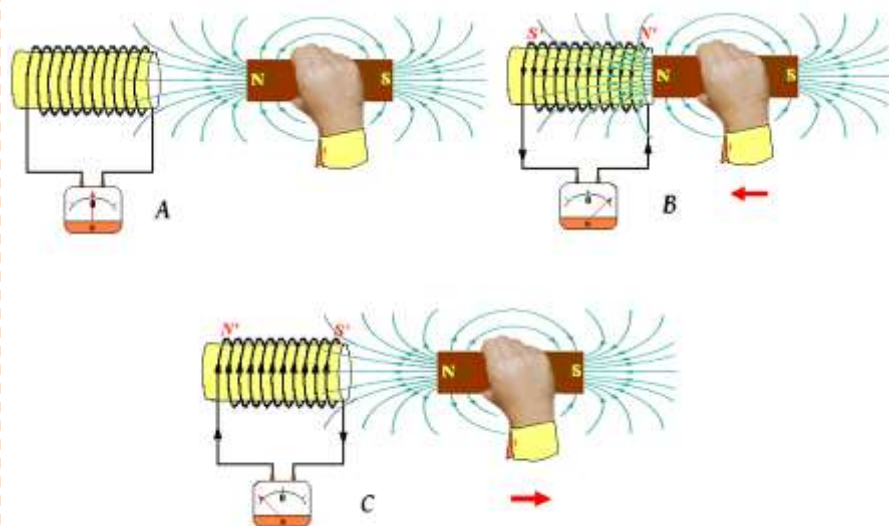


Figura 347 Correnti indotte

E' facilmente riscontrabile che se poniamo una calamita vicino ad una bobina cui è collegato un amperometro (**figura A**) lasciandolo fermo sempre nella stessa posizione, non verrà misurata nell'amperometro alcuna corrente.

Faraday si accorse però che, avvicinando ora la calamita alla bobina, si produce una corrente che attraversa la bobina (**figura B**), detta **corrente indotta**, nell'intervallo di tempo in cui il magnete è in movimento e si interrompe quando la calamita è ferma.

Se la calamita è allontanata dalla bobina il verso della corrente indotta è l'opposto (**figura C**).

Si verifica anche, agli effetti del verso della corrente indotta, che l'avvicinamento del polo Nord della calamita alla bobina equivale all'allontanamento del polo Sud e, viceversa, il verso della corrente indotta nella bobina quando si allontana il polo Nord coincide con quello della corrente che si produce quando si avvicina il polo Sud. Inoltre gli effetti sono sempre gli stessi, sia che il solenoide resti fisso rispetto ad un sistema di riferimento e il magnete si muova, sia invece che il magnete rimanga fisso e il solenoide sia in moto. Per la produzione della corrente indotta è necessario solo che ci sia un moto relativo del magnete rispetto al solenoide.

Venendo all'interpretazione delle correnti indotte, in entrambi gli esperimenti condotti da Faraday, il circuito indotto, quello cioè che subisce il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, è immerso in un campo magnetico generato, nel primo caso da una bobina alimentata da una batteria e, nel secondo, dal magnete. Questa sola circostanza però non è sufficiente; infatti non si produce alcuna corrente indotta né nel primo caso, quando la bobina è percorsa da corrente durante tutto il tempo in cui il circuito rimane chiuso, né nel secondo caso, quando magnete e solenoide sono fissi l'uno rispetto all'altro.

In entrambe le esperienze le correnti indotte si producono quando il campo magnetico sulla superficie delimitata dal circuito indotto varia nel tempo.

Nella seconda esperienza, in particolare, durante il movimento relativo del magnete e del solenoide, il campo magnetico cambia valore sui punti della superficie delimitata da ciascuna spira. Faraday attribuì la produzione di correnti indotte alla variazione delle linee di forza del campo magnetico.

Per un'analisi quantitativa dell'induzione elettromagnetica, osserviamo preliminarmente che, nei casi considerati di produzione di corrente indotta, si genera nella spira una forza elettromotrice indotta, uguale alla forza elettromotrice della batteria che dovremmo inserire nella spira per produrre, in assenza del fenomeno dell'induzione elettromagnetica, una corrente d'intensità uguale a quella della corrente indotta. Per esempio, nella seconda esperienza di Faraday la f.e.m. indotta è uguale alla f.e.m. della batteria che dovremmo inserire in serie con la spira per produrre in essa una corrente di intensità uguale a quella prodotta dal moto del magnete.

14.2 Vettore Induzione magnetica



La definizione operativa del campo magnetico B non può avvenire come nel caso di E . Per procedere, osserviamo che un campo magnetico determina un'azione su una carica elettrica in moto. Quindi se in una regione di spazio c'è \vec{B} azione sulle carica q in moto sarà dato dal prodotto vettoriale (vedi paragrafo 2.4 pag. 38)

$$F = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (1)$$

Da cui ricavando il vettore \vec{B} , esprimendo il suo **modulo** otterremo:

$$B = \frac{F}{qv} \quad (2)$$

Se i vettori \vec{B} e \vec{v} risultano ortogonali, altrimenti, se formano un angolo α , risulterà:

$$B = \frac{F}{q \cdot v \cdot \sin\alpha} \quad (3)$$

Direzione e verso, invece, sono dati dalla regola della mano destra, come indicato in figura 343.

Possiamo trovare l'espressione generale della f.e.m. indotta generata, prendendo in esame il concetto di flusso dell'induzione magnetica \vec{B} .

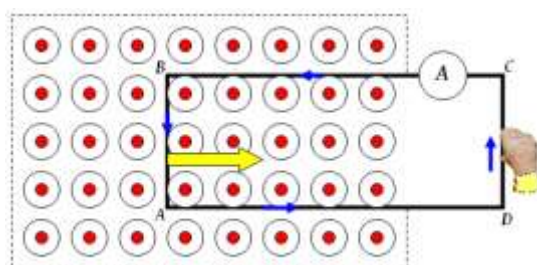
14.3 Il flusso dell'induzione magnetica

Premettiamo innanzitutto che il flusso $\Phi(B)$ attraverso qualsiasi superficie avente per contorno una spira si definisce **flusso concatenato** con la spira. Ricordando ora l'espressione del flusso (nel caso di superfici finite)

$$\Phi(B) = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (4)$$

L'unità di misura del flusso magnetico del Sistema Internazionale è il **weber** (simbolo **Wb**) ed è dato da:

$$Wb = V \cdot s = \frac{Kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A} = T \cdot m^2$$



Si può osservare che, in tutti i casi di produzione di corrente indotta, si ha una variazione del flusso $\Phi(B)$ concatenato con la spira durante l'intervallo di tempo in cui la spira è percorsa dalla corrente

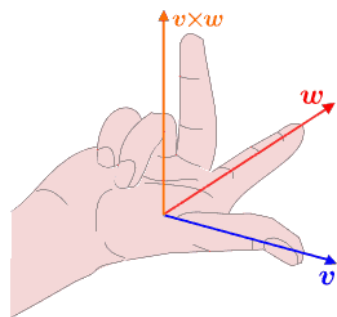


Figura 348 Regola mano destra Campo Magnetico

Figura 349 Flusso del Campo magnetico autoindotto

indotta. Infatti il flusso $\Phi(B)$ può variare per uno dei seguenti motivi:

- variazione di B ;
- variazione di α ;
- variazione di S .

Possiamo affermare che, in qualunque circuito immerso in un campo magnetico, ogni volta che il flusso $\Phi(B)$ dell'induzione magnetica concatenato con il circuito varia nel tempo, si genera una forza elettromotrice indotta e perciò una corrente indotta.

Premesso ciò, per esprimere la *f.e.m.* indotta in funzione della variazione del flusso di induzione magnetica ci riferiamo alla spira in figura.

Osservando che il flusso del vettore \vec{B} attraverso la superficie delimitata dalla spira in un istante generico in cui il tratto \mathbf{BC} di spira immerso nel campo magnetico è x , vale:

$$\Phi = B \cdot x \cdot l \quad (5)$$

essendo ora la normale alla spira parallela al campo magnetico. Dopo un intervallo di tempo Δt il flusso diventa:

$$\Phi' = B \cdot l \cdot (x - \Delta x) \quad (6)$$

dove $\Delta x = v \cdot \Delta t$ è lo spazio percorso dalla spira nel tempo Δt .

Il flusso ha perciò subito la variazione:

$$\Delta\Phi = \Phi' - \Phi = -B \cdot l \cdot \Delta x$$

Si tenga presente che la variazione di flusso è negativa in quanto, estraendo la spira dal campo magnetico, diminuisce la porzione di superficie delimitata dalla spira in cui il campo magnetico è diverso da zero. Il rapporto tra la variazione di flusso nell'intervallo Δt di tempo e risulta:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{B \cdot l \cdot \Delta x}{\Delta t} \quad (7)$$

e, poiché $\Delta x/\Delta t$ è la velocità v della spira, si ha:



Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca



$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -B \cdot l \cdot v \quad (8)$$

Segue pertanto che la *f.e.m.* in termini di flusso può essere espressa dalla seguente relazione fondamentale:

$$f = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (9)$$

Abbiamo dato ad essa un segno meno per indicare che tale forza si oppone alla variazione del flusso di B ; vale a dire che la *f.e.m.* indotta in una spira che si muove in un campo magnetico è :

- direttamente proporzionale alla variazione di flusso tagliato della spira, cioè ad essa concatenato;
- inversamente proporzionale all'intervallo di tempo durante il quale la variazione è avvenuta;
- il suo verso tende sempre a contrastare la variazione di flusso (**Legge di Lenz**).



Questa relazione prende il nome di **legge di Faraday-Neumann-Lenz** e si può sintetizzare dicendo che:

la f.e.m. indotta in un circuito da un campo magnetico è proporzionale alla velocità con cui varia il flusso del campo concatenato al circuito e tende ad opporvisi:

$$f = B \cdot l \cdot v \quad (10)$$

La corrente indotta non fornisce energia elettrica gratuita, perché per ottenerla è necessario mantenere in movimento il conduttore; si tratta quindi di energia meccanica, applicata dall'esterno, che si trasforma in energia cinetica del filo conduttore e quindi in energia elettrica.

Circuito fisso e uno in movimento

Una situazione analoga quella descritta con una bobina fissa ed un campo magnetico variabile, si verifica quando siamo in presenza di un circuito elettrico attraversato da corrente che si avvicina o si allontana da un altro circuito in cui non passa corrente, ma ove è posto un milliamperometro in grado di misurare l'eventuale passaggio di corrente nel secondo circuito.

Anche in questo caso accade che si verifica una rilevazione di corrente indotta solo quando il primo circuito è in movimento, mentre quando viene posto nelle vicinanze del secondo e lasciato fermo, nel secondo circuito l'amperometro non registra alcun passaggio di corrente indotta.



Laboratorio 35 Legge di Faraday--Neumann-Lenz

14.4 Induttanza

Una corrente elettrica i che scorre in un circuito elettrico produce un campo magnetico nello spazio circostante: se la corrente varia nel tempo il flusso magnetico $\Phi(B)$ del campo concatenato al circuito risulta variabile, determinando entro il circuito una *f.e.m.* indotta che si oppone alla variazione del flusso.

YouTube

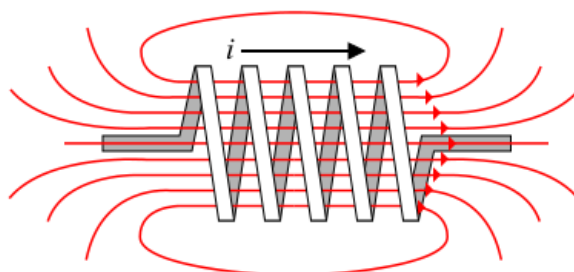


Figura 350 Induttanza

Il **coefficiente di autoinduzione** L del circuito è il rapporto tra il flusso del campo magnetico concatenato e la corrente, che nel caso semplice di una spira è dato da:

$$L = \frac{\Phi(B)}{i} \quad (11)$$

L'unità di misura dell'induttanza è detta **Henry**:

$$1H = \frac{1Wb}{1A}$$

in onore di **Joseph Henry**. In un induttore di 1 henry, quindi, una variazione di corrente di 1 ampere al secondo genera una forza elettromotrice di 1 volt.

L'induttanza è quindi la proprietà dei circuiti elettrici tale per cui la corrente che li attraversa induce una forza elettromotrice che, per la legge di Lenz, si oppone alla variazione dell'intensità della corrente stessa.

14.5 Autoinduzione

Consideriamo il circuito elettrico in figura, dove un generatore è collegato a una induttanza L e a una resistenza R .

Se inizialmente nel circuito passa una corrente i_1 allora il flusso del campo magnetico concatenato con il solenoide è dato da:

$$\Phi(B_1) = L \cdot i_1 \quad (12)$$

Supponiamo che la resistenza R inserita nel circuito sia una resistenza variabile. Se variamo R varierà la corrente $i = \Delta V/R$. Se il nuovo valore della corrente nel circuito è i_2 , il flusso finale del campo magnetico è dato da

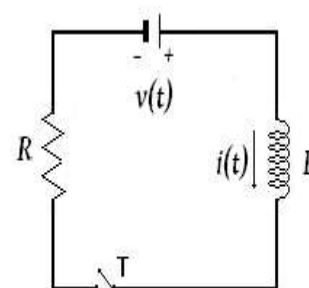


Figura 351 Circuito RL

$$\Phi(B_2) = L \cdot i_2$$

La variazione del flusso è pertanto

$$\Delta\Phi(B) = L \cdot i_2 - L \cdot i_1 = L \cdot \Delta i \quad (13)$$

Si noti che, a differenza di quanto avveniva negli esperimenti di Faraday in cui la variazione del flusso del campo magnetico era dovuta a un magnete esterno al circuito, qui è il circuito stesso a indurre una variazione del flusso del campo magnetico. Per questa ragione il fenomeno fisico in esame prende il nome di **autoinduzione**. Dalla legge di Faraday-Neumann-Lenz abbiamo che la differenza di potenziale autoindotta è

$$\Delta V_i = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (14)$$

dove ancora una volta il segno - è espressione della legge di Lenz: la corrente indotta si oppone alla causa che l'ha generata.

Quali sono le conseguenze dell'autoinduzione?

Se noi consideriamo un circuito RL , come quello della figura, avremo che, chiudendo il circuito, la corrente elettrica passa dal valore 0 al valore $i = \Delta V/R$ non in maniera istantanea ma in un certo intervallo di tempo. Analogamente quando apriamo il circuito la presenza delle correnti autoindotte fa variare la corrente da i a 0 non in maniera istantanea, ma solo dopo un certo intervallo di tempo.

Concludiamo questa sezione ricordando come in un circuito di tipo RL l'energia fornita dal generatore si divide tra l'energia elettrica della resistenza:

$$E_{el} = R \cdot i^2 \cdot \Delta t \quad (15)$$

e l'energia magnetica che rimane immagazzinata nel solenoide. La formula dell'energia immagazzinata in un solenoide di induttanza L percorso da una corrente i è data da

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (16)$$

Il suo valore, ovviamente si misura in **Joule**.

14.6 Corrente alternata

Il fenomeno delle correnti indotte è utilizzato dall'alternatore (ad esempio la dinamo della bici) per convertire energia cinetica in energia elettrica.

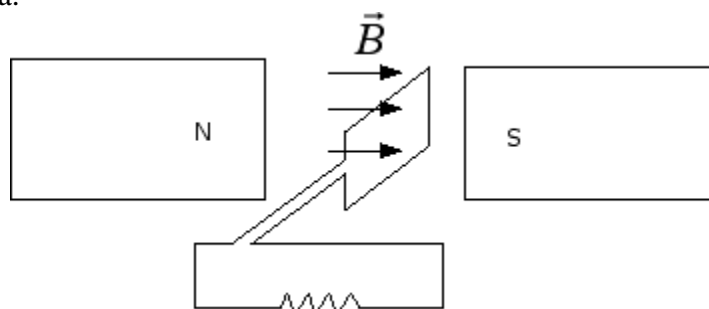


Figura 352 Corrente alternata



Una spira viene messa in rotazione all'interno di un campo magnetico uniforme. Nella rotazione varia l'angolo α tra la normale alla spira e il campo magnetico e, di conseguenza, varia il flusso del campo magnetico che produce una tensione indotta la quale fa circolare corrente nella spira e nel circuito elettrico. In base alla legge di Faraday-Neumann-Lenz la d.d.p. indotta e la corrente saranno tanto maggiori quanto più rapido è il movimento della spira.

La corrente elettrica e la tensione che si generano in questo modo sono **correnti e tensioni alternate** che variano man mano che il tempo passa in base alle relazioni:

$$i(t) = i_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (17)$$

e

$$V(t) = V_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (18)$$

dove V_0 e i_0 sono i valori massimi della tensione e della corrente e rappresentano l'ampiezza dell'onda sinusoidale. Il termine ω prende invece il nome di **pulsazione** ed è dato da:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (19)$$

dove f è la frequenza e T il periodo (ossia l'intervallo di tempo tra due massimi o due minimi consecutivi).

La corrente elettrica nelle nostre abitazioni è una corrente alternata con tensione massima $V_0 = 311V$.

La **tensione efficace** è invece una sorta di valor medio della tensione e risulta valere:

$$V_{eff} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

La frequenza della corrente varia da paese a paese: tipicamente $f = 50\text{Hz}$ nei paesi europei, mentre $f = 60\text{Hz}$ negli Stati Uniti.

Se è presente solo una resistenza R la tensione è massima quando è massima anche l'intensità di corrente e viceversa, pertanto la relazione $R = V/i$ continua a valere. Se invece cominciamo a introdurre nel circuito anche condensatori (o induttanze) la situazione cambia. Infatti, in un circuito a corrente continua sappiamo che un condensatore, una volta completato il processo di carica, si comporta come un interruttore aperto e non consente il passaggio di ulteriori cariche elettriche.

In un circuito a corrente alternata la corrente i cambia il suo verso con frequenza $f = 50\text{Hz}$ e quindi un'armatura del condensatore si ritroverà ad avere periodicamente cariche positive e cariche negative. L'inserimento del condensatore nel circuito crea uno **sfasamento** tra i valori massimi della corrente i_0 e della tensione V_0 .

Infatti la corrente è massima quando la tensione V è nulla e viceversa. In tali casi si preferisce sostituire il concetto di resistenza con l'**impedenza** Z definita come rapporto tra i valori massimi della tensione e della corrente, ossia:

$$Z = \frac{V_0}{i_0} \quad (20)$$

Se nel circuito elettrico c'è solo un condensatore di capacità C vale la seguente formula:

$$\frac{1}{Z} = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot f \quad (21)$$

La relazione che intercorre tra corrente e tensione efficace diventa

$$i_{\text{eff}} = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot f \cdot V_{\text{eff}} \quad (22)$$

Le correnti indotte sono utilizzate anche nel **trasformatore** illustrato in figura.

Se la corrente i_1 nel circuito primario è una corrente variabile, allora il campo magnetico varia nel tempo e, di conseguenza, cambia il flusso concatenato con il secondo circuito. Se il solenoide del circuito primario contiene n_1 spire e quello del secondario n_2 spire allora il rapporto tra le tensioni efficaci nei due circuiti viene ad essere uguale al rapporto tra il numero delle spire:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (23)$$

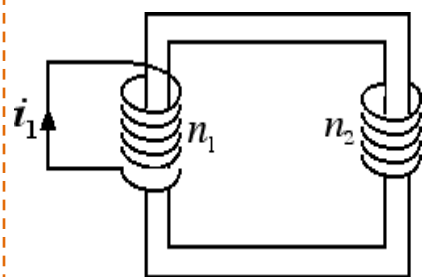


Figura 353 Trasformatore elettrico

Un trasformatore che aumenta il valore della tensione è detto elevatore, un trasformatore che abbassa il valore della tensione è detto invece riduttore.

I trasformatori sono utilizzati per innalzare la tensione dai $10 \div 25kV$ di una centrale elettrica ai $380kV$ delle linee ad alta tensione e poi per riabbassare la tensione ai $220 - 230V$ della rete domestica. Le linee ad alta tensione vengono usate per ridurre le perdite di energia elettrica per effetto Joule durante il trasporto della corrente. Infatti la perdita di potenza per effetto Joule è:

$$P = R \cdot i^2 \quad (24)$$

e dunque è tanto minore quanto minore è la corrente i .

A parità di potenza trasportata P , la corrente $i = P/\Delta V$ è tanto minore quanto maggiore è la tensione della linea. Questo è il motivo per cui si eleva la tensione della corrente fino a $380kV$ per il suo trasporto.

14.7 L'alternatore e la dinamo

L'**alternatore** è una macchina elettrica rotante basata sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica, che trasforma energia meccanica in energia elettrica sotto forma di corrente alternata assumendo la funzione di **trasduttore**, ovvero un dispositivo di qualsiasi genere destinato a trasmettere dell'energia da un punto ad un altro punto alterandone alcune delle caratteristiche che la identificano.



Figura 354 Alternatore

L'alternatore, nella sua forma più semplice è composto da un solenoide investito da un campo magnetico vincolato a ruotare attorno ad un asse perpendicolare alle linee di campo. Consideriamo infatti le seguenti approssimazioni:

- circuiti magnetici lineari;
- induzione magnetica al traferro radiale (è una parte di spazio, spesso aria, che interrompe la continuità nel materiale ferromagnetico) e sinusoidale;
- arco di avvolgimento trascurabile frequenza meccanica rotorica costante (e pari per definizione di macchina sincrona alla frequenza di induzione).

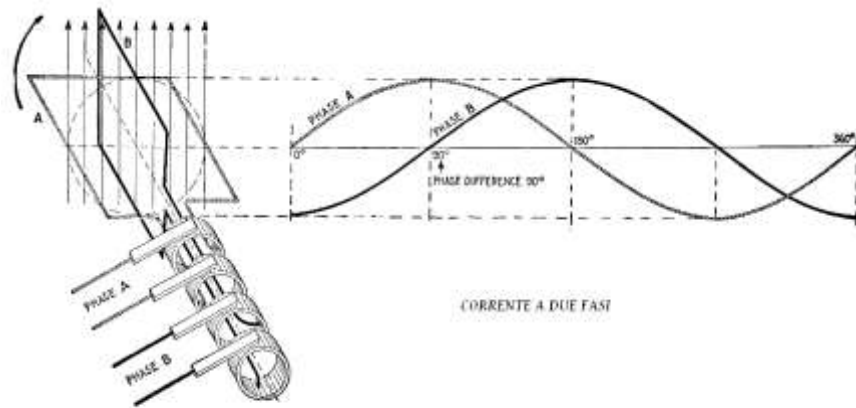


Figura 355 Correnti a due fasi

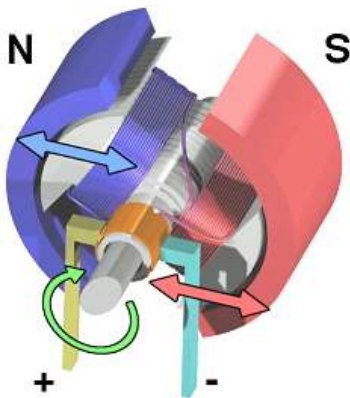


Figura 356 Dinamo

Una **dinamo** invece è una macchina rotante per la trasformazione di lavoro meccanico in energia elettrica, sotto forma di corrente continua.

Nella sua forma più semplice consiste di una spira conduttrice (rotore) immersa in un campo magnetico (generato ad esempio da una coppia di magneti permanenti, i quali formano lo statore) e messa in rotazione da un albero. Per la legge di Faraday per l'induzione un conduttore che si muove in un campo magnetico (purché non parallelamente ad esso) vede nascere una forza elettromotrice indotta (f.e.m.); chiudendo quindi la spira su un carico elettrico (ad esempio una lampadina, o un accumulatore) si può misurare una corrente scorrere nella spira stessa e nel carico (la lampadina si accende).

Se ci fermassimo qui, però, la dinamo non funzionerebbe. Fin qui la corrente è tutt'altro che continua, infatti la differenza di potenziale nella singola spira varia con legge sinusoidale con l'angolo di rotazione e quindi cambia segno ogni mezzo giro (producendo corrente alternata). È quindi necessario connettere i capi della spira ad un oggetto chiamato "**collettore**" o "commutatore", calettato sul rotore e solidale ad esso, che, attraverso un contatto strisciante con spazzole (dette carboncini), scambia i capi della spira ogni mezzo giro mantenendo la tensione in uscita sempre dello stesso segno.

Per motivi di corretto funzionamento ed efficienza energetica le realizzazioni reali sono leggermente più complesse, prevedendo diverse spire avvolte sul rotore lungo i 360° ognuna delle quali deve commutare i propri capi ogni mezzo giro. Inoltre, per potenze superiori a pochi watt, anche lo statore (quello che genera il campo magnetico) è avvolto, cioè il campo magnetico è prodotto da spire avvolte sui poli

statorici, all'interno delle quali scorre la corrente di induzione o di eccitazione.

Le dinamo sono oggi utilizzate soprattutto per le piccole potenze. La dinamo è una macchina elettrica reversibile ovvero può funzionare anche al contrario: a partire da energia elettrica produrre lavoro meccanico come motore elettrico. Se infatti si invia ai morsetti del collettore una tensione continua la corrente che scorre nelle spire interagisce con il campo magnetico dello statore generando una forza (detta forza di Lorentz) tangenziale su tutte le spire del rotore, causando la rotazione del rotore stesso e generando così una coppia motrice sull'albero di uscita. Questo è detto motore in corrente continua (CC) ed è utilizzato per potenze da pochi watt (nei modellini radiocomandati e in tutti gli utensili ed elettrodomestici a batteria) fino ad alcuni megawatt (in tutte le motrici ferroviarie escluse quelle di ultima generazione, che utilizzano motori asincroni trifase).

14.8 Energia elettrica

Il processo di produzione di energia elettrica è quella trasformazione tramite la quale si riesce a trasformare altre forme di energia in energia elettrica. Così accade ad esempio per l'energia potenziale dell'acqua e dei combustibili, l'energia cinetica del vento e l'energia luminosa della luce solare grazie all'effetto fotovoltaico.

Data la varietà delle fonti, questo processo coinvolge tecnologie complesse. L'energia è presente in natura in forma disordinata e ordinata (vedi Secondo principio della termodinamica). Un'energia in forma disordinata, ad esempio il calore, può essere convertita in una forma ordinata, come l'energia meccanica, per mezzo di un motore termico; quest'ultimo può essere a combustione esterna (cioè una macchina a vapore) o a combustione interna, di tipo volumetrico (come il motore a quattro tempi delle automobili) o di tipo continuo (come la turbina a gas). Il rendimento dei motori termici è piuttosto basso, in genere inferiore al 40%: ciò significa che meno del 40% dell'energia termica assorbita dal motore viene erogata in forma di energia meccanica utilizzabile.

L'energia in forma ordinata, di cui sono esempi classici l'energia elettrica e quella meccanica, viene detta energia “**di qualità superiore**” perché può essere convertita in altre forme con un rendimento prossimo al 100%. Un motore elettrico, ad esempio, può convertire energia elettrica in energia meccanica con un rendimento di oltre il 90%. I vantaggi dell'elettricità Per diverse ragioni l'energia viene trasportata e resa disponibile sotto forma di elettricità. L'energia elettrica, infatti, può essere trasportata dai generatori alle utenze mediante una rete di cavi facilmente installabile e senza perdite apprezzabili; può essere trasformata con alto rendimento in energia termica, meccanica e chimica; alimenta un altissimo numero di apparecchi elettrici ed elettronici e di sistemi di illuminazione; è controllabile istantaneamente nel punto di utilizzo: per accendere o spegnere un dispositivo elettrico è sufficiente lo scatto di un interruttore. Centrali elettriche La quasi tota-



Figura 357 Traliccio in alta tensione

lità dell'energia elettrica viene attualmente prodotta in impianti che sfruttano l'energia cinetica di una massa d'acqua in caduta controllata (centrali idroelettriche) oppure l'energia termica che si sviluppa durante un processo di combustione (centrali termoelettriche). In senso lato, quest'ultimo caso comprende anche le centrali nucleari, che sfruttano il calore prodotto da una reazione nucleare.

14.9 C.L.I.L. Project

Electricity

The process of production of electrical energy is that transformation through which you can transform other forms of energy into electrical energy. This happens for example for the potential energy of water and fuel, the kinetic energy of the wind and the light energy of sunlight due to the photovoltaic effect.

Given the variety of sources, this process involves complex technologies. Energy is naturally present in a disordered and ordered (see the second law of thermodynamics). Energy in the form disordered, for example the heat, can be converted in an ordered form, as the mechanical energy, by means of a thermal engine, which may be external combustion (ie a steam engine) or combustion indoors, of the volumetric type (such as the four-stroke engine of automobiles) or continuous type (such as the gas turbine). The efficiency of heat engines is rather low, typically less than 40%: this means that less than 40% of the thermal energy absorbed by the motor is supplied in the form of mechanical energy usable.

The energy in ordered form, examples of which are classical electrical energy and the mechanical energy is called "**superior**" because it can be converted into other forms with a yield close to 100%. An electric motor, for example, can convert electrical energy into mechanical energy with an efficiency of over 90%. The advantages of electricity For several reasons the energy is transported and made available in the form of electricity. The electricity, in fact, can be transported from generators to consumers via a network of cables can be easily installed and without appreciable losses; can be transformed with high efficiency in thermal energy, mechanical and chemical; feeds a very high number of electrical and electronic equipment and lighting systems; instantly can be controlled at the point of use: turn on or off an electrical device is provided by the flick of a switch. The power plants almost all of the electrical energy is currently produced in plants using the kinetic energy of a mass of water in controlled fall (hydroelectric) or the thermal energy that is developed during a combustion process (thermal power plants) . In a broad sense, the latter case also includes nuclear power plants, which use the heat produced by a nuclear reaction.



14.10 Il circuito resistenza induttanza

Un circuito **RL** è un circuito elettrico del primo ordine (è caratterizzato da un'equazione differenziale del primo ordine) basato su una resistenza e sulla presenza di un elemento dinamico, l'induttore.

Circuito RL in evoluzione libera

Quello mostrato in figura si chiama circuito **RL in evoluzione libera**, composto da una resistenza e da un induttore percorso da corrente. Evoluzione libera significa che il circuito non ha sorgenti esterne di tensione o di corrente, e questi funziona con corrente alternata

Per trattare questo circuito è conveniente usare i teoremi che riguardano le correnti vista la dualità lineare del comportamento dei circuiti tra la tensione e la corrente.

Al tempo $t_0=0$ la corrente ai capi di L è $i_L(0) \neq 0$, questa viene presa come condizione iniziale.

Applicando la *legge di Kirchhoff* delle correnti, l'equazione del circuito è:

$$i(t) + i_L(t) = 0 \tag{25}$$

da cui

$$\frac{v(t)}{L} + i_L(t) = 0 \tag{26}$$

dove $i_L(t)$ è la corrente elettrica circolante.

La relazione caratteristica dell'induttore è ben nota:

$$v(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \tag{27}$$

allora l'equazione del circuito diventa un'equazione differenziale omogenea del primo ordine e dalla teoria delle equazioni differenziali, la sua soluzione è:

$$i_L(t) = i_L(0) \cdot e^{-\frac{t \cdot R}{L}} \tag{28}$$

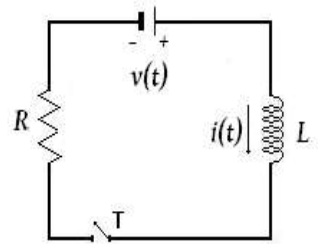


Figura 358 Circuito RL in serie

La tensione segue la legge:

$$v(t) = -R \cdot i_L(0) \cdot e^{-\frac{t \cdot R}{L}} \quad (29)$$

Al rapporto $\frac{L}{R} = \tau$ viene dato il nome di **costante di tempo** del circuito ed una quantità caratteristica costante del circuito.

Quindi la formula (26) può essere riscritta come:

$$v(t) = -R \cdot i_L(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (30)$$

Fisicamente la tensione immagazzinata nell'induttore, espressa dalla relazione al momento iniziale, nel momento in cui l'interruttore **T** viene chiuso, viene scaricata entro il circuito: ciò produce una corrente elettrica, che dissipa completamente nella resistenza **R** l'energia che era immagazzinata nell'induttore; la corrente evolve secondo la legge data dalla soluzione dell'equazione del circuito: essa tende esponenzialmente a zero per $t \rightarrow \infty$. Il tempo caratteristico di questa caduta di corrente è proprio determinato dalla costante di tempo: essa è il valore dell'istante per il quale la corrente prende il valore di:

$$i(\tau) = \frac{1}{e} \quad (31)$$

Circuito RL con generatore di corrente costante

Ipotizziamo che il generatore fornisca corrente i_0 costante nel tempo, possiamo scrivere l'equazione di Kirchhoff delle correnti:

$$i_0 = i(t) + i_L(t) = \frac{v(t)}{R} + i_L(t) \quad (32)$$

dove $v(t)$ è la tensione.

Sostituendo nella precedente relazione l'equazione caratteristica dell'induttore si ottiene un'equazione differenziale non omogenea del primo ordine e dalla teoria delle equazioni differenziali la sua soluzione è:

$$i_L(t) = (i_L(0) - i_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (33)$$

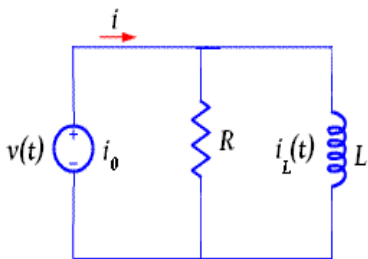


Figura 359 Circuito RL in parallelo

mentre la tensione segue la legge:

$$v(t) = -R \cdot (i_L(0) - i_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (34)$$

Fisicamente la presenza della corrente costante del generatore induce che la corrente ai capi di L , $i_L(t)$, cresca esponenzialmente partendo da $i_L(t=0) = i_L(0)$ fino a tendere al valore della corrente costante del generatore.

Dunque per $t \rightarrow \infty$ si ha che $i_L(t) \rightarrow i_0$.

Viceversa la tensione indotta nel circuito è esponenzialmente decrescente da un valore iniziale $R \cdot i_L(0)$ fino a tendere al valore costante $V_0 = R \cdot i_0$.

Quando al tendere di $t \rightarrow \infty$ la corrente $i_L(t) \rightarrow i_0 = \text{cost}$, il circuito si comporta come un corto circuito. A regime di corrente costante un qualsiasi circuito composto da un numero arbitrario di resistenze e di generatori di corrente costanti e da un induttore può essere quantitativamente studiato utilizzando questa proprietà, cioè supponendo che il circuito in corrispondenza dell'induttore sia in corto circuito.

In particolare la risposta del circuito **RL** ad una corrente costante è composta di due parti: il termine

$$(i_L(0) - i_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (35)$$

è detto **risposta transitoria** o transiente del circuito, mentre il termine i_0 è la **risposta permanente** o a regime del circuito.

Energia del campo magnetico

Considerando sempre il circuito **RL** del paragrafo precedente, volendo scrivere il bilancio energetico, considerando anche che sulla resistenza si dissipa una energia per effetto Joule pari a $R \cdot i^2$, avremo che il lavoro speso dall'induttanza contro la f.e.m. per far variare la corrente da 0 a i risulta:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (36)$$

Questo lavoro lo associamo ad un'energia immagazzinata nell'induttanza, ed in effetti lo ritroviamo integralmente se escludiamo il generatore o all'apertura del circuito.

L'induttanza percorsa da corrente i possiede dunque un'energia che associamo alla presenza di un campo magnetico generato dalla corrente che in essa circola.

Se andiamo a calcolare l'energia magnetica spettante ad un solenoide rettilineo indefinito di sezione S ed n spire, otteniamo:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot S \cdot n^2 \cdot i^2 \quad (37)$$

14.11 Impedenza e reattanza

Impedenza

Il concetto di **impedenza** generalizza la legge di Ohm estendendola ai circuiti funzionanti in regime sinusoidale (comunemente detto corrente alternata): in regime di corrente continua rappresenta infatti la resistenza elettrica:

$$\frac{V}{I} = Z = R + jX \quad (38)$$

dove X prende il nome di **reattanza** e con j si è indicata l'**unità immaginaria** (numeri complessi). Il modulo dell'impedenza corrisponde al rapporto dei valori efficaci di tensione e corrente:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (39)$$

mentre il suo argomento è:

$$\vartheta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (40)$$

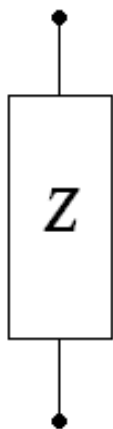


Figura 361 Simbolo dell'impedenza nei circuiti

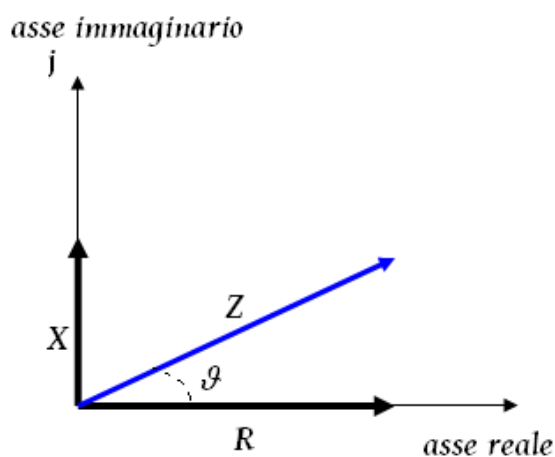


Figura 360 Grafico dell'impedenza in un circuito RL

Quando è inserita in un circuito, l'impedenza viene solitamente mostrata con il seguente simbolo:

Reattanza

La **reattanza** produce una differenza di fase tra la corrente e la tensione del circuito. La reattanza, come detto, è simbolizzata con la lettera X ed è misurata in **ohm**.

Detto $Z = R + jX$ la componente della reattanza può essere dovuta alla presenza nel circuito di una induttanza o di un condensatore. La reattanza di un condensatore e di un induttore in serie è la somma algebrica delle loro reattanze:

$$X = X_L + X_C \quad (41)$$

in cui X_L ed X_C sono rispettivamente la **reattanza induttiva** e la **reattanza capacitiva**.

E' possibile calcolare la reattanza di un condensatore, risultando:

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} \quad (42)$$

dove ω è la pulsazione $\omega = 2\pi f$ (con f indicante la frequenza), mentre la reattanza induttiva risulta essere:

$$X_L = \omega L \quad (43)$$

14.12 Onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono un fenomeno fisico attraverso il quale l'energia elettromagnetica può trasferirsi da un luogo all'altro per propagazione. Tale fenomeno di trasferimento di energia può avvenire nello spazio libero (via etere), oppure può essere confinato e facilitato utilizzando appropriate linee di trasmissione (guide d'onda, cavi coassiali, etc.). Le onde elettromagnetiche, secondo la teoria di Maxwell, sono fenomeni oscillatori, generalmente di tipo sinusoidale e sono costituite da due grandezze che variano periodicamente nel tempo: il campo elettrico ed il campo magnetico.

Il **campo elettrico** E si definisce come una proprietà o perturbazione dello spazio, prodotta dalla presenza di cariche elettriche, positive o negative. Tale perturbazione si può verificare constatando che ponendo una carica elettrica nella regione perturbata questo risulta soggetto ad una forza. L'intensità del campo elettrico si misura in Volt per metro (V/m). Qualsiasi conduttore elettrico produce un campo elettrico associato, che esiste anche quando nel conduttore non scorre alcuna corrente. Più alta è la tensione, più intenso è il campo ad una certa distanza dal conduttore; mentre per una data tensione l'intensità diminuisce al crescere della distanza. Conduttori come i metalli, i materiali edili e gli alberi hanno proprietà schermanti.

Il **campo magnetico** B può essere definito come una proprietà o perturbazione dello spazio prodotta dal movimento delle cariche elettriche ossia dalla presenza di correnti elettriche oppure da magneti permanenti (calamite). Tale perturbazione si può verificare constatando che ponendo un corpo magnetizzato nella regione perturbata, questo risulta soggetto ad una forza. L'intensità del campo magnetico si esprime in Ampère per metro (A/m), anche se solitamente si preferisce riferirsi ad una grandezza correlata, la densità di flusso magnetico o induzione magnetica B , misurata in microtesla (μT). Tra le due unità di misura vale la seguente relazione: $1T = 7,958 \cdot 10^5 A/m$.

Il campo magnetico viene generato soltanto quando viene acceso un apparecchio elettrico e quindi scorre corrente. La sua intensità dipende proporzionalmente dall'intensità della corrente elettrica. I campi magnetici sono più intensi in prossimità della sorgente e diminuiscono rapidamente all'aumentare della distanza, inoltre non sono schermati dai materiali comuni, come le pareti degli edifici.

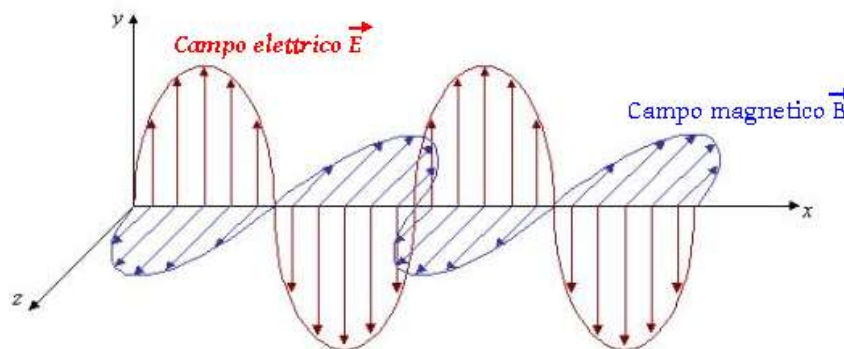


Figura 362 Direzione del campo elettrico e di quello magnetico

Un campo elettrico variabile nel tempo genera, in direzione perpendicolare a se stesso, un campo magnetico, anch'esso variabile, che a sua volta influisce sul campo elettrico stesso. Questi campi concatenati determinano nello spazio la propagazione di un campo elettromagnetico, indipendentemente dalle cariche e correnti elettriche che li hanno generati. In prossimità della sorgente irradiante, cioè in condizioni di campo vicino, il campo elettrico ed il campo magnetico assumono rapporti variabili con la distanza e possono essere considerati separatamente, mentre ad una certa distanza, cioè in condizioni di campo lontano, il rapporto tra campo elettrico e campo magnetico rimane costante: in condizioni di campo lontano i due campi sono in fase, ortogonali tra loro e trasversali rispetto alla direzione di propagazione (onda elettromagnetica piana).

Le principali caratteristiche delle onde elettromagnetiche dipendono da una loro proprietà fondamentale: la **frequenza** f , ossia il numero di oscillazioni compiute in un secondo. Tale grandezza si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz) e relativi multipli e sottomultipli. Strettamente connessa con la frequenza è la **lunghezza d'onda** l , che è la distanza percorsa dall'onda durante un tempo di oscillazione e corrisponde alla distanza tra due massimi o due minimi dell'onda (l'unità

di misura è il metro con relativi multipli e sottomultipli). Le due grandezze sono tra loro legate in maniera inversamente proporzionale attraverso la seguente relazione:

$$f = \frac{v}{l} \quad (44)$$

dove v è la velocità di propagazione dell'onda, espressa in metri al secondo (m/s). La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto è di 300.000 km/s . Frequenza e lunghezza d'onda, oltre ad essere tra loro legate, sono a loro volta connesse con l'energia E trasportata dall'onda, che si misura in Joule (J) e relativi multipli o in **electronvolt** (eV), valendo tra le due unità di misura la relazione di conversione

$$1J = 6,24 \cdot 10^{18} eV \quad (45)$$

L'energia associata alla radiazione elettromagnetica è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda stessa attraverso la relazione: $E = h \cdot f$, dove h è una costante detta **Costante di Planck** pari a:

$$6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s \quad (43)$$

L'energia elettromagnetica trasportata dall'onda nell'unità di tempo per unità di superficie si definisce densità di potenza S e si esprime in Watt su metro quadro (W/m^2).

Maggiore è la frequenza, maggiore è l'energia trasportata dall'onda. Quando un'onda elettromagnetica incontra un ostacolo penetra nella materia e deposita la propria energia producendo una serie di effetti diversi a seconda della sua frequenza. Dai meccanismi di interazione delle radiazioni con la materia dipendono gli effetti e quindi i rischi potenziali per la salute umana. L'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche, in funzione della frequenza e della lunghezza d'onda, costituisce lo **spettro elettromagnetico**.

Nello spettro elettromagnetico si possono distinguere due grandi zone. Le onde elettromagnetiche con frequenza superiore a $3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ e lunghezza d'onda inferiore a 100 nm (nano metro) hanno un'energia tale ($> 12,4 eV$) da rompere i legami chimici che tengono uniti gli atomi e le molecole e quindi da ionizzare la materia e sono dette **radiazioni ionizzanti (IR)**; viceversa, le onde con frequenza inferiore non trasportano un quantitativo di energia sufficiente a produrre la rottura dei legami chimici e produrre ionizzazione e sono perciò dette **radiazioni non ionizzanti (NIR)**: è in questa regione dello spettro elettromagnetico che si parla propriamente di campi elettromagnetici.

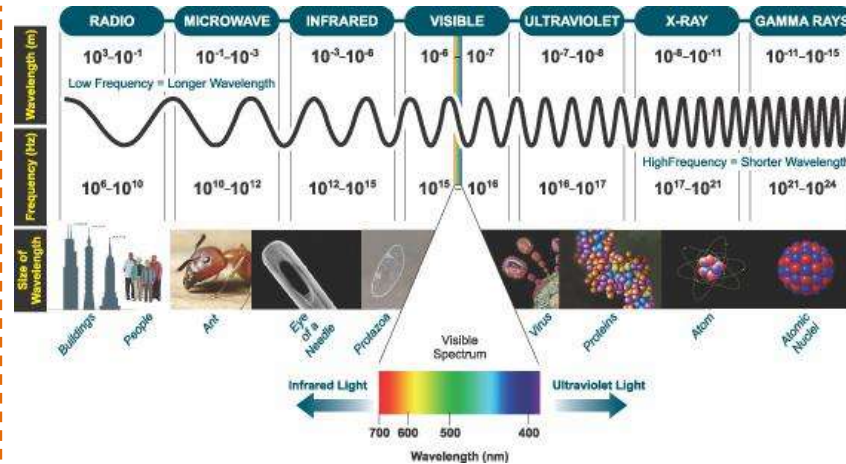


Figura 363 Lunghezza d'onda e frequenze per le onde elettromagnetiche

In particolare le radiazioni non ionizzanti di maggiore interesse ambientale sono le seguenti:

- *radiazione con frequenza* compresa tra 0 a 300GHz, che possono a loro volta venire suddivise in:
 - campi elettromagnetici a **frequenze estremamente basse** (ELF), con frequenza tra 0 e 3000Hz, anche detti semplicemente campi elettromagnetici a bassa frequenza;
 - campi elettromagnetici a radiofrequenze e microonde (RF e MO), che convenzionalmente vanno da frequenze di 100KHz a frequenze di 300GHz, anche comunemente detti campi elettromagnetici ad alta frequenza.
- *radiazione luminosa* (luce visibile)
- *radiazione ultravioletta*.

14.13 La natura della luce

Più di 300 anni fa il fisico inglese sir **Isaac Newton** (1642-1727) riuscì a scomporre la luce visibile in uno spettro di colori facendola passare attraverso un prisma ottico; poi, attraverso un secondo prisma, ricombinò in vari colori ottenendo di nuovo luce bianca. Con questo esperimento Newton dimostrò che la luce bianca è in realtà la sintesi di vari colori, dal viola al rosso:

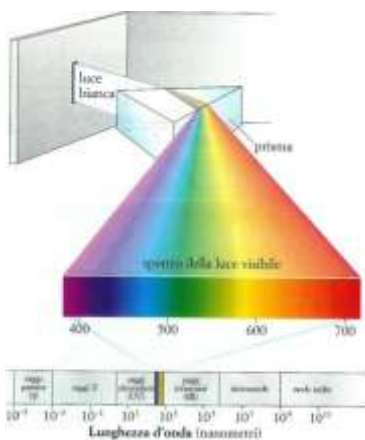


Figura 364 Luce rifratta in un prisma

La separazione dei colori è possibile perché la luce di ciascun colore, passando attraverso il prisma, viene deviata formando un particolare angolo.

Nel XIX secolo, grazie al genio di **James Clerk Maxwell** (1831-79), venne stabilito che la luce visibile corrisponde in realtà ad una sezione molto piccola di un ampio spettro continuo di radiazioni, lo spettro elettromagnetico. Tutte le radiazioni di questo spettro si comportano come se viaggiassero sotto forma di onde. La lunghezza d'onda, cioè la distanza tra la cresta di un'onda e quella successiva, varia dalle frazioni di nanometro (1 nanometro = metri) tipiche dei raggi gamma ai Kilometri (1 Km = metri) delle onde radio a bassa frequenza.

Maggiore è la lunghezza d'onda, minore è l'energia; viceversa, minore è la lunghezza d'onda, maggiore è l'energia. Nell'ambito dello spettro della luce visibile la luce rossa ha le massime lunghezze d'onda e la luce viola le minime.

I raggi più corti della luce viola hanno quasi il doppio dell'energia dei raggi più lunghi della luce rossa. Per l'occhio umano, ma non è così per tutti gli animali, lo spettro visibile varia da **380 nanometri** (luce viola) a **750 nanometri** (luce rossa).

14.14 Le equazioni di Maxwell sull'elettromagnetismo

È impossibile comprendere la rivoluzione operata da Einstein senza prima richiamare alcune importanti nozioni di elettromagnetismo. I principi fondamentali di questa vasta teoria furono stabiliti nel corso del secolo XIX dai fondamentali lavori di *Charles-Augustin de Coulomb* (1736-1806), *Hans Christian Oersted* (1777-1851), *André-Marie Ampère* (1775-1836), *Joseph Henry* (1797-1878) e soprattutto di *Michael Faraday* (1791-1867).

I loro risultati furono poi sintetizzati da Carl Fredrich Gauss (1777-1855) nei seguenti due teoremi, che stabiliscono i primi due principi fondamentali dell'elettromagnetismo:

- 1. Un corpo carico produce nello spazio circostante delle linee di forza elettriche, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è pari alla somma delle cariche poste al suo interno divisa per la costante dielettrica.**
- 2. Una corrente elettrica che circola in un conduttore produce delle linee di forza magnetiche attorno al conduttore, il cui flusso attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.**

La prima affermazione è il Teorema di Gauss del campo elettrico, e matematicamente si può scrivere:

$$\phi(E)_S = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} \quad (46)$$

mentre la seconda è detta anche Teorema di Gauss del campo magnetico:

$$\phi(B) = 0 \quad (47)$$

Il primo teorema ha per significato fisico quello che afferma dell'esistenza del monopolo elettrico, cioè la carica elettrica singola, ed essa è sorgente di campo elettrico. Il secondo teorema ci dice invece che il campo magnetico è solenoidale, ovvero che le linee di forza sono sempre chiuse, e **NON** esiste il monopolo magnetico. Abbiamo visto

infatti come spezzando un magnete in più parti troviamo sempre più magneti dotati tutti di polo Nord e polo Sud.

È a questo punto che fa irruzione nella storia della scienza il grande fisico e matematico scozzese **James Clerk Maxwell** (1831-1879). Negli anni tra il 1860 ed il 1870 egli sviluppò una teoria matematica dell'elettromagnetismo nella quale partì dai due teoremi suddetti, oggi noti come **PRIMA e SECONDA EQUAZIONE DI MAXWELL**. Egli propose un modello onnicomprensivo per visualizzare le relazioni esistenti tra le grandezze elettriche e magnetiche osservate sperimentalmente da Faraday ed altri. Egli lo descrisse matematicamente attraverso un sistema di equazioni, oggi note come equazioni di Maxwell, dalle quali si possono ottenere tutte le proprietà dei campi elettrici e magnetici. Il lavoro di Maxwell contiene alcune idee completamente nuove e ricche di conseguenze:

a) **un campo elettrico variabile nel tempo genera un campo magnetico.**

b) **non solo le correnti nei conduttori producono dei campi attorno ad essi, ma anche i campi elettrici variabili nel vuoto producono dei campi magnetici.**

Il genio di Edimburgo ragionò nel modo seguente: Sia un circuito contenente un condensatore, come quello illustrato nella figura seguente:

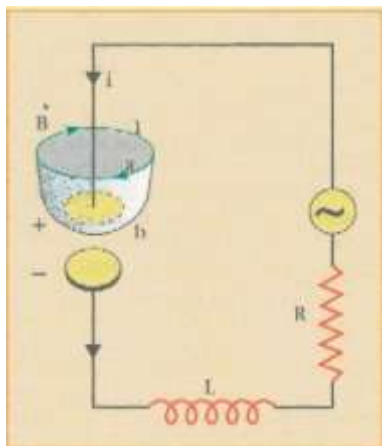


Figura 365 Corrente di spostamento di Maxwell

In regime di corrente continua, il circuito risulta ovviamente aperto, cioè non passa alcuna carica elettrica, e la circuitazione del campo elettrico calcolata lungo il percorso chiuso **1** è nulla sia prendendo in considerazione la superficie piana **a** che quella curva **b**, essendo nulla la corrente concatenata con le due superfici, cioè la corrente che le "buca" entrambe.

Diverso è il discorso se la corrente **i** è variabile nel tempo. Infatti in questo caso il circuito dotato di condensatore non è chiuso, e la circuitazione del campo **B** lungo la linea **1** è pari, per il teorema della circuitazione di Ampère, al prodotto della corrente **i** per la permeabilità magnetica del vuoto μ_0 ($B = \mu_0 \cdot i$).

Allora, tale circuitazione è pari a zero se si prende in considerazione la superficie **b** passante fra le armature del condensatore, non "bucata" da alcuna corrente di conduzione, ed è invece pari a $\mu_0 \cdot i$ se si prende in considerazione la superficie **a**.

Questo paradosso può essere risolto solo ammettendo l'esistenza, nello spazio vuoto tra le due armature, di una corrente che non è di conduzione, non essendoci cariche da spostare materialmente, ma che agli effetti del teorema della circuitazione di Ampère è equivalente ad una corrente di conduzione.

Maxwell identificò tale corrente con quella che egli chiamò **corrente di spostamento**. Siccome essa dipende dalla rapidità con cui varia la posizione delle cariche, egli concluse che essa deve essere direttamente proporzionale alla rapidità con la quale varia nel tempo il flusso del campo elettrico attraverso una superficie che ha come contorno il per-

corso l . E così il grande fisico-matematico attribuì ad essa la seguente espressione:

$$i_s = \varepsilon_0 \cdot \frac{\Delta\Phi(E)}{\Delta t} \quad (48)$$

Di conseguenza la legge di Ampère sull'induzione magnetica, fino ad ora scritta nella forma $C(B) = \mu_0 \cdot i$, deve essere così modificata:

$$C(B) = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \cdot \frac{\Delta\phi(E)}{\Delta t} \right) \quad (49)$$

perché alla corrente di conduzione i va aggiunta quella di spostamento i_s .

Questa non viene più attribuita al solo André-Marie Ampère ma, giustamente, è detta **equazione di Ampère-Maxwell**, e costituisce la **terza equazione di Maxwell**.

Certamente questa ipotesi potrà apparire come un escamotage matematico volto a salvaguardare la veridicità del teorema di Ampère; la corrente è sempre stata intesa come un moto di cariche elettriche, siano essi elettroni (nei conduttori), ioni positivi e negativi (nelle soluzioni e nei gas), elettroni e lacune (nei semiconduttori); non si capisce dunque, a prima vista, come la formula che esprime i_s possa essere definita una corrente. Ad un esame più approfondito, invece, emerge il profondo significato fisico dell'ipotesi di Maxwell: essa ci dice che il campo magnetico che circonda la corrente di spostamento può essere considerato una conseguenza della variazione nel tempo del campo elettrico.

Secondo la teoria elaborata da Maxwell, insomma, i due principi fondamentali dell'elettromagnetismo, che abbiamo già ricordato poco sopra e che erano già stati stabiliti da altri scienziati, dovevano essere integrati da un terzo:

3) un campo elettrico variabile nello spazio produce un campo magnetico.

Il vettore \vec{B} del campo magnetico indotto sta in un piano perpendicolare al vettore \vec{E} del campo elettrico variabile e l'intensità di \vec{B} dipende dalla rapidità con cui varia \vec{E} .

Consideriamo dunque una coppia di conduttori piani collegati a un generatore di corrente, come nella figura affianco.

Mentre le cariche si avvicinano o si allontanano dai piatti attraverso i conduttori collegati alla corrente, l'intensità E del campo elettrico nello spazio tra i piatti varia nel tempo. Come si è già visto, questo campo elettrico variabile produce un campo magnetico nel quale l'intensità del vettore in un dato istante varia con la distanza dai piatti.

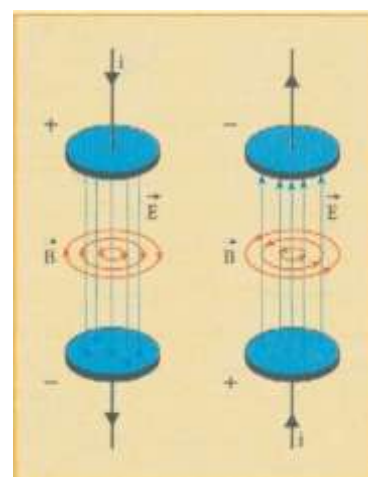


Figura 366 Campo magnetico indotto da un campo elettrico variabile

Cambiando segno alla carica sulle armature, e quindi il verso del campo elettrico da a) a b), anche le linee di forza del campo magnetico indotto cambiano verso. Questo è il significato fisico della **Terza Equazione di Maxwell**.

Un'altra proprietà dei campi elettrici e magnetici, già nota prima di Maxwell, acquista un nuovo significato alla luce del suo lavoro, poiché risulta simmetrica alla formulazione, enunciata poc'anzi, del terzo principio:

$$\Phi_S(\vec{B}) = 0 \quad (50)$$

4) un campo magnetico variabile nello spazio produce un campo elettrico.

Questo fenomeno di induzione elettromagnetica era stato scoperto sperimentalmente da Henry e da Faraday, ed infatti la legge matematica che la esprime è nota come **equazione di Faraday-Henry**:

$$C(E) = - \frac{\Delta\phi(B)}{\Delta t} \quad (51)$$

Essa significa che la circuitazione del campo elettrico indotto dal campo magnetico variabile nel tempo è pari alla variazione nel tempo del flusso di tale campo magnetico induttore. Il segno meno indica che la corrente indotta ha segno opposto alla variazione di flusso che la produce, ed è nota come **legge di Lenz**. Essa rappresenta un caso particolare di una legge universale assai più generale, nota come **principio di Le Chatéllier** ed esprimibile in questi termini:

quando un sistema fisico viene perturbato, esso evolve nella direzione che tende a minimizzare la perturbazione avvenuta.

Infatti, quando il flusso di B varia nel tempo, viene indotta una corrente elettrica che a sua volta genera un campo magnetico, il cui flusso (per via di quel segno meno) varia in direzione opposta a quella del campo B esterno. In tal modo, se quest'ultimo sta diminuendo la corrente indotta cerca di sostenerlo, mentre se sta aumentarlo cerca di tamponarne la crescita. L'equazione di Faraday-Henry e la legge di Lenz, prese assieme, costituiscono la **QUARTA EQUAZIONE DI MAXWELL**.

A partire dalle quattro equazioni di Maxwell è quindi possibile ricavare in ogni punto il valore del campo elettrico e del campo magnetico, a patto di conoscere:

- la distribuzione delle cariche nello spazio;
- la distribuzione delle correnti nei mezzi materiali o nel vuoto.

L'insieme completo di relazioni tra i campi elettrici e magnetici proposto da Maxwell non fu subito direttamente verificabile. Egli, però, aveva previsto anche un fenomeno del tutto nuovo, che avrebbe dovuto

insorgere per effetto delle reciproche interazioni tra campi elettrici e magnetici variabili. Per capire di cosa si tratta, supponiamo che in una certa regione di spazio ad un certo istante si determini una variazione del campo elettrico, originato, per esempio, da un moto accelerato di cariche elettriche. Nei punti immediatamente vicini si produce allora, per la terza equazione di Maxwell, un campo magnetico anch'esso variabile nel tempo. La variazione del campo magnetico, per la quarta equazione di Maxwell, origina nei punti immediatamente vicini un campo elettrico anch'esso variabile, e così via. Nasce in tal modo una perturbazione elettromagnetica che si propaga nello spazio.

Il fatto che una variazione del campo magnetico in un punto produce un campo elettrico variabile era noto già prima di Maxwell, in quanto era previsto dalla legge di Faraday-Henry; si pensava però che, allorché un campo magnetico bruscamente diminuiva da un valore massimo a zero, altrettanto doveva fare il campo elettrico e il tutto cessava dopo un piccolo intervallo di tempo dall'istante in cui si era annullato il campo magnetico. La novità prevista da Maxwell consiste nel fatto che il campo elettrico ed il campo magnetico generati dalla variazione nel tempo di uno dei due sono in grado di auto-sostenersi, cioè di propagarsi anche se la variazione iniziale che li ha prodotti è venuta meno!

Se ne conclude che, da una brusca variazione di un campo elettrico o magnetico nel tempo, ha origine la propagazione di un impulso elettromagnetico, cioè di un'ONDA, chiamata per l'appunto **onda elettromagnetica**.

Il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto dato dalla relazione

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \quad (52)$$

che coincide con buona approssimazione con quello della **velocità della luce** (300.000 km/s).

Questo fu un risultato clamoroso che mise in evidenza lo straordinario **potere unificante** delle equazioni di Maxwell. Egli, avendo notato che le onde elettromagnetiche e la luce, oltre ad essere caratterizzate entrambe da vibrazioni trasversali, si propagano con la stessa velocità, avanzò l'ipotesi della natura elettromagnetica della luce, e così l'ottica divenne un capitolo dell'elettromagnetismo.

14.15 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

Dopo le prime considerazioni circa l'interazione tra elettricità e magnetismo osservate da Oersted, o prodotte da fili posti in vicinanza percorsi da corrente, abbiamo potuto osservare come sia possibile una interazione tra campo magnetico e campo elettrico, inducendo ad esempio un campo con il solo moto di un magnete nelle vicinanze di detto circuito, osservando così il fenomeno delle **correnti indotte**. Si è così introdotto il concetto di **flusso dell'induzione magnetica**. la presenza di un solenoide in un circuito elettrico, rende necessaria l'introduzione di una ulteriore grandezza, l'**induttanza**, che rende conto del magnetismo prodotto da ciascuna spira di tale solenoide. Interessanti sono stati anche i fenomeni in cui non eravamo in presenza di circuiti esterni che inducessero una qualche corrente, ma è lo stesso circuito, tramite il solenoide, che **autoinduce** una corrente nello stesso. Dopo l'ampia trattazioni fin qui riportata delle correnti continue, tutte prodotte da generatori che

permettono un flusso costante di elettroni, tramite i fenomeni di induzione o di autoinduzione elettromagnetica, abbiamo introdotto il concetto di **corrente alternata**, dove il senso della corrente varia con una legge di tipo sinusoidale che è quella prodotta da macchine come l'**alternatore** o la **dinamo**.

Abbiamo così studiato i fenomeni di andamento di tali correnti in un circuito RL, potendo inoltre quantificare l'energia del campo magnetico e le due grandezze **impedenza** e **reattanza**. In seguito abbiamo ripreso il concetto di onda elettromagnetica, rendendo conto del fatto che la loro velocità di trasmissione è pari a quella della luce, sancendo definitivamente la natura elettromagnetica dell'onda luminosa. A fine unità abbiamo presentato uno dei più grandi lavori scientifici del XX secolo, in cui il fisico Maxwell ha dato definitivo ordine alle leggi sull'elettromagnetismo, enunciando le famose **quattro equazioni di Maxwell**.

14.16 Problemi proposti

1) Si abbia un solenoide rettilineo lungo $l = 100\text{cm}$ di sezione circolare formato da $N=1500$ spire di diametro $d=8\text{cm}$ disposte in un unico strato e strettamente affiancate tra di loro. Il solenoide sia avvolto in aria e sia percorso dalla corrente continua $I=5\text{A}$:

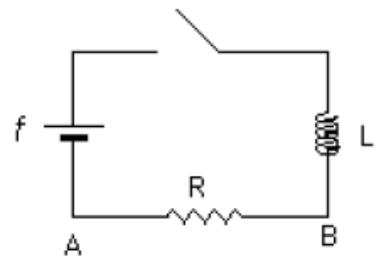
1) determinare il campo magnetico, l'induzione ed il flusso all'interno del solenoide.

2) calcolare l'induttanza del solenoide.

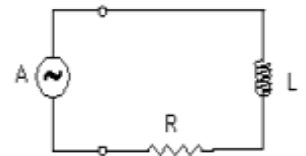
3) determinare l'energia immagazzinata nel campo magnetico interno al solenoide.

4) supponendo che l'intensità della corrente si annulli nel tempo di un centesimo di secondo, calcolare il valore medio della forza elettromotrice autoindotta E_{ai} che si sviluppa in tale intervallo di tempo nel solenoide.

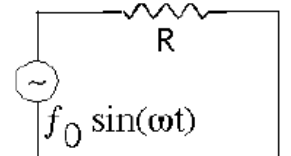
2) Si consideri il circuito RL disegnato in figura. Si assuma che al tempo $t = 0$ l'interruttore venga chiuso. Si chiede dopo quanto tempo la differenza di potenziale fra A e B è di 5V . **Dati:** $f=15\text{V}$, $R=15\Omega$, $L=45\text{mH}$



3) Il circuito in figura ($R = 10\Omega$, $L = 1\text{mH}$) è alimentato con un alternatore costituito da una spira quadrata di lato $l = 10\text{cm}$ che viene fatta ruotare in un campo magnetico di 0.5T . Si chiede quanto deve essere la velocità angolare ω con cui ruota la spira per avere una differenza di potenziale di 10V ai capi della resistenza.



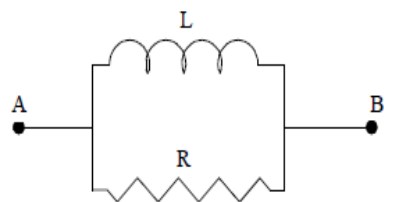
4) Sia dato il circuito in figura, in cui l'alimentatore è costituito da un alternatore nel quale una bobina quadrata di 100 spire e di lato $l = 10\text{cm}$ ruota in un campo magnetico $B=0.5\text{T}$. Se la resistenza vale $R=100\Omega$, quanto deve valere la velocità angolare della bobina per avere una potenza dissipata di 100W su R ?



5) In una bobina circola una corrente i stazionaria. Ad un certo istante il valore della corrente viene bruscamente aumentato. Questa variazione causa una corrente indotta che si sovrappone ad i . Quale sarà il verso della corrente indotta?

- il verso della corrente indotta è concorde con i
- il verso della corrente indotta è opposto a quello di i

6) Calcolare l'impedenza complessiva tra i punti A e B della figura nei casi in cui la frequenza f valga 50Hz e 100Hz ; i dati sono i seguenti: $R=30\Omega$, $L=45\text{mH}$.



7) Con quale velocità deve variare il campo elettrico E_t fra le armature di un condensatore per ottenere un campo magnetico di induzione B di intensità 10^{-6}T alla distanza $d=20\text{cm}$ dall'asse, consi-

derando che anche le armature a forma di disco hanno le stesse dimensioni.

- 8) Calcola l'intensità del vettore induzione magnetica B indotto a 10cm dall'asse delle piastre del condensatore dell'esempio precedente.
- 9) All'interno delle piastre di un condensatore piano, in un tempo Δt , vi è la variazione del campo elettrico dal valore $E_i = 0$ al valore finale $E_f = 10^7$. Calcola l'intervallo di tempo Δt al fine di generare un campo magnetico di $B = 10^4 T$ alla distanza $R_1 = 20\text{cm}$ dal centro delle piastre nel caso in cui queste piastre abbiano un raggio $R_2 = 40\text{cm}$.
- 10) Dei principali fenomeni dell'elettromagnetismo può essere data una descrizione *a diversi livelli*; in quale dei seguenti elenchi essi sono messi in ordine, dal più intuitivo al più astratto?
 - (a) Forza, equazioni di Maxwell, campo.
 - (b) Equazioni di Maxwell, campo, forza.
 - (c) Forza, campo, equazioni di Maxwell.
 - (d) Equazioni di Maxwell, forza, campo.

14.17 Approfondimento: Michael Faraday

Fisico e chimico, nato da una povera famiglia che non poteva neanche permettersi di pagare l'istruzione di base per i figli, Michael Faraday è un personaggio unico nella storia della scienza, un germoglio cresciuto in un terreno arido che ha trovato da solo, dentro se stesso, le risorse per emergere. Del tutto autodidatta ha saputo raggiungere, nonostante il suo handicap iniziale, vette altissime nel campo della ricerca chimica e fisica, grazie alla sua insaziabile curiosità scientifica e alla rara abilità pratica di cui era dotato. Non è esagerato dire che probabilmente Faraday è il maggior fisico sperimentale mai vissuto.

Nasce a Newington, nella regione del Surrey, in Inghilterra, il 22 settembre 1791; l'infanzia è stata davvero tra le più povere e sfortunate, ma la sua enorme forza di volontà lo ha sempre salvato dal cadere nell'indifferenza intellettuale o, peggio, nella cupa disperazione. Assunto giovanissimo come apprendista rilegatore, non trova di meglio che passare le sue (poche) ore libere nel leggere alcuni dei volumi che gli passavano per le mani.

Un articolo sull'elettricità pubblicato sull'Enciclopedia Britannica lo colpisce in modo particolare, tanto da convincerlo a dedicare la sua vita alla scienza. Si rivolge a Sir Humphrey **Davy**, direttore della Royal Institution di Londra, per un posto di lavoro, il quale lo prende effettivamente con sé in qualità di assistente di laboratorio.

L'abilità pratica di Michael Faraday si sviluppa così rapidamente che ben presto sembra "dare dei punti" al suo pur ottimo mentore: un aspetto che non mancò di creare fra i due, purtroppo, degli spiacevoli dissapori (Davy non accettava di essere superato da un così accademicamente sprovvisto allievo).

La fama di Faraday come eccellente chimico si sparge in gran fretta, procurandogli numerosi incarichi da parte dell'industria chimica, all'epoca sviluppata solo in fase embrionale. In particolare un gran parlare si fece della sua scoperta di come isolare il benzene, un metodo che gli aprì le porte di numerosi laboratori industriali. Più tardi si occupò di ioni in soluzione, scoprendo così le leggi che governano l'elettrolisi. È il risultato scientifico che lo farà entrare nella storia. Da qui discendono gli altri suoi celebri contributi alla scienza, come la legge dell'induzione e lo sviluppo di un prototipo di generatore elettrico, creato sperimentalmente inserendo un magnete in una bobina.

Dal punto di vista fisico Faraday fu dunque il primo a sviluppare l'idea dei campi elettrici e magnetici. Il fatto curioso è che non avendo sufficienti nozioni di matematica per trattare teoricamente i problemi di campo, nel suo monumentale lavoro, "Ricerche sperimentali sull'elettricità", non si azzardò ad inserire neppure un'equazione. Tuttavia queste osservazioni sono così giuste e di tale e fondamentale importanza che successivamente un grande fisico dell'Ottocento come James Clerk Maxwell, le usò come base per le sue famose equazioni che descrivono per l'appunto il campo elettromagnetico.

Per questo motivo Albert Einstein una volta disse che Faraday ebbe nei confronti di Maxwell la stessa relazione nello sviluppo dell'elettromagnetismo che Galileo ebbe con Newton nello sviluppo della meccanica.



Figura 367 Michael Faraday (22 settembre 1791 – 25 agosto 1867)

Fisica per la scuola superiore

Carattere disinteressato e puro, dallo stile di vita estremamente sobrio, Faraday respinse in vita tutti quegli onori e quelle possibilità di ricchezza che la sua posizione facevano meritatamente sperare. In parte ciò è dovuto alla sua costante devozione nei confronti della ricerca scientifica, in parte ad alcune radicate convinzioni religiose.

Così successe che se rifiutò la presidenza della Royal Society di Londra (e anche la sola idea di farne parte come semplice membro), di converso aderì all'oscura setta dei sandemanisti.

Michael Faraday morì il 25 agosto 1867, nella più completa semplicità di mezzi, e fedele fino all'ultimo al suo rigoroso stile di vita.

15. La fisica moderna

Prerequisiti

Concetto di onda. Lunghezza d'onda. Onde elettromagnetiche. Struttura atomica della materia. Concetto di Forza. Equazioni di Maxwell. Teoria della relatività galileiana.

Sapere

Conoscere le motivazioni che portarono ad una crisi della fisica classica. Le radiazioni del corpo nero. Effetto fotoelettrico. Conoscere i concetti fondanti della Meccanica quantistica e le diverse interpretazioni fisiche. Conoscere il Principio di Indeterminazione di Heisenberg. Forze nucleari. E struttura atomica. Radioattività. Forze della natura. Le particelle elementari. Il Bosone di Higgs. Teoria della relatività di Einstein. I buchi neri.

Saper fare

Comprendere le motivazioni per cui la relatività galileiana venne messa in discussione. Comprendere quali processi logici portarono a nuove interpretazioni di fenomeni fisici non prima spiegabili con la meccanica classica o con l'elettromagnetismo. Comprendere il senso della Relatività generale enunciata da Einstein e le molteplici applicazioni. Saper interpretare il fenomeno fotoelettrico e le sue applicazioni pratiche.

15.1 La crisi della fisica classica

Verso la fine del XIX secolo sembrava che l'edificio concettuale della Fisica fosse ormai completato. La meccanica newtoniana da un lato e la teoria maxwelliana dell'elettromagnetismo, dall'altro, parevano fornire la chiave di interpretazione e di previsione di tutti i fenomeni, dal moto dei pianeti al comportamento di cariche elettriche.

Esempi eclatanti della capacità di previsione e della potenza dei modelli interpretativi newtoniani e maxwelliani (quelli che oggi chiamiamo della fisica classica) furono la scoperta del pianeta Nettuno, fatta nel 1846 dall'astronomo Galle dell'osservatorio di Berlino, su calcoli di Urbain Leverrier (Plutone fu scoperto nel 1930 su calcoli di Percival Lowell) e la scoperta delle onde elettromagnetiche previste teoricamente da Maxwell (nel 1873) da parte di Hertz (1886).

La seconda metà del secolo XIX è caratterizzata da importanti fenomeni in campo economico, sociale e filosofico, strettamente intrecciati con il trionfo della fisica classica. In campo economico e sociale c'è l'inizio impetuoso della seconda rivoluzione industriale, fondata sull'uso dell'energia elettrica (macchine elettriche nelle industrie ed elettrodomestici, illuminazione pubblica, trasporti ferroviari); in quegli anni si avvia inoltre l'utilizzazione delle onde elettromagnetiche per le trasmissioni (nel 1897 Guglielmo Marconi inventa il radiotelegrafo). In campo filosofico c'è l'affermarsi del positivismo, corrente di pensiero che propone di applicare i procedimenti della scienza ad ogni ramo del sapere ed ai campi della morale, della società e della religione.

Solo alcuni fenomeni, apparentemente marginali, erano al di fuori del quadro interpretativo della fisica classica, ma il convincimento di quasi tutti gli scienziati dell'epoca era che prima o poi anche questi trovassero una interpretazione all'interno della fisica classica.

I fatti dimostrarono che le cose non stavano così; lo studio sperimentale e teorico dei problemi irrisolti portò al superamento della fisica classica, che da teoria generale in grado di interpretare tutta la realtà fu ridotta al rango di ottimo modello in grado di spiegare e prevedere fenomeni in un limitato ambito di validità.

In effetti, i fenomeni su cui si è sviluppata la fisica classica sono quelli che più direttamente rientrano nell'esperienza comune ed usuale di tutti gli uomini, come la caduta dei gravi ed il moto dei proiettili, il moto dei pianeti, il lento movimento di cariche elettriche nei circuiti. In sostanza la fisica classica è nata e si è sviluppata su fenomeni che riguardano corpi lenti e grandi; in questo ambito essa è un metodo scientifico di prima classe. Non è affatto detto, però, che la fisica classica sia in grado di interpretare altrettanto bene la realtà al di fuori di questo ambito, su fenomeni che coinvolgono velocità paragonabili a quella della luce o dimensioni piccole come quelle degli atomi o delle particelle elementari.

E' interessante notare che questa considerazione, della cui validità abbiamo oggi prove evidenti, era per gli scienziati dell'epoca poco credibile, tenendo conto che la fisica newtoniana era nata con l'affermazione che stesse leggi regolano i corpi celesti e quelli terrestri, in contrasto con la pre-esistente concezione aristotelica.

LA FISICA MODERNA

Disse una volta Niels Bohr

“Chiunque non rimanga sconvolto dalla teoria quantica, non l'ha capita”

Ed è assolutamente vero!

La Fisica Moderna è quanto di **MENO intuitivo** possa esserci tra le Scienze e comprenderla è compito davvero arduo. Tutto nasce nel 1900 con una scoperta, di **Max Planck**, su come si trasmetta l'Energia: in pacchetti discreti e non in forma continua come si era sempre pensato.

La Rivoluzione Scientifica degli ultimi tempi, iniziò da lì.

Uno dei filoni di ricerca che maggiormente contribuì al superamento della fisica classica fu quello relativo alla propagazione ed all'emissione della luce. L'indipendenza della velocità della luce dal sistema di riferimento scelto, dimostrata sperimentalmente da **Michelson e Morley** nel 1881, metteva in crisi il principio galileiano di composizione delle velocità. Inoltre il principio di relatività galileiana sembrava essere in contrasto con le equazioni di Maxwell che modificano la loro forma nel passaggio da un sistema di riferimento inerziale ad un altro. Tutto questo portò **Albert Einstein** a riaffermare il criterio di relatività, mettendo però in crisi la concezione classica dello spazio e del tempo con la teoria della relatività ristretta (1905).

D'altro canto, gli studi sull'emissione della luce da parte di un corpo incandescente (**corpo nero**), avevano portato **Max Planck** nel 1900 a ipotizzare che gli atomi eccitati emettessero energia non in modo continuo ma per **quantità discrete**, gettando così le basi della fisica quantistica che, come vedremo, costituisce un valido modello interpretativo dei fenomeni su scala atomica e subatomica.

L'ipotesi quantistica di Planck permise inoltre nel 1905 ad Einstein di interpretare un altro fenomeno classicamente inspiegabile: l'**effetto fotoelettrico**.

Un altro potente impulso all'affermazione della fisica quantistica nella scala microscopica venne dalle teorie sulla struttura dell'atomo. Nel 1897, infatti, la scoperta dell'elettrone (**J.J. Thomson**) dimostrò con chiarezza che l'atomo non poteva essere considerato il costituente elementare della materia, ma era a sua volta formato da particelle più semplici. La costruzione di un valido modello atomico e nucleare confermò l'inadeguatezza, su questa scala, della fisica classica e la necessità di interpretare le cose dal punto di vista quantistico.

La crisi della fisica classica fu la premessa di un tumultuoso sviluppo scientifico. I nuovi modelli interpretativi permisero di prevedere nuovi fenomeni ed aprirono la strada al superamento del dualismo tra onda e particella. Nella fisica classica esistono i fenomeni corpuscolari ed i fenomeni ondulatori con una netta separazione tra essi, nel senso che un singolo fenomeno può essere visto o in una chiave oppure nell'altra, senza possibilità di commistione tra esse. Nel mondo microscopico, viceversa, la separazione tra i due punti di vista cade: la radiazione può presentare caratteri corpuscolari e le particelle mostrare aspetti ondulatori. Il comportamento delle onde di materia deve essere descritto da una nuova teoria, la meccanica quantistica (o meccanica ondulatoria) fondata nel 1925 indipendentemente da Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg.

In meno di 30 anni, a partire dal 1900, il panorama della fisica cambiò radicalmente: al posto di un unico modello interpretativo, la fisica classica, si avevano due teorie più generali, la fisica quantistica e la fisica relativistica, una valida per piccole dimensioni, l'altra per velocità elevate. Ciascuna di queste teorie comprende la **fisica classica come caso limite**, cioè come approssimazione del modello per dimensioni grandi o per velocità piccole.



Laboratorio 36 Spettro
corpo nero

La saldatura tra fisica quantistica e fisica relativistica avviene nel campo delle piccole dimensioni e delle alte velocità; in questo ambito la teoria interpretativa (fisica quantum-relativistica) costituisce una delle attuali frontiere della scienza.

15.2 La radiazione di corpo nero

La luce è un'onda elettromagnetica emessa da corpi incandescenti. Gli atomi di un corpo caldo si comportano come piccoli oscillatori elettromagnetici capaci di emettere e di assorbire frequenze principalmente del visibile e dell'infrarosso. Si dice che un corpo caldo irraggia.

L'irraggiamento o **radianza** rappresenta la potenza emessa per unità di superficie.

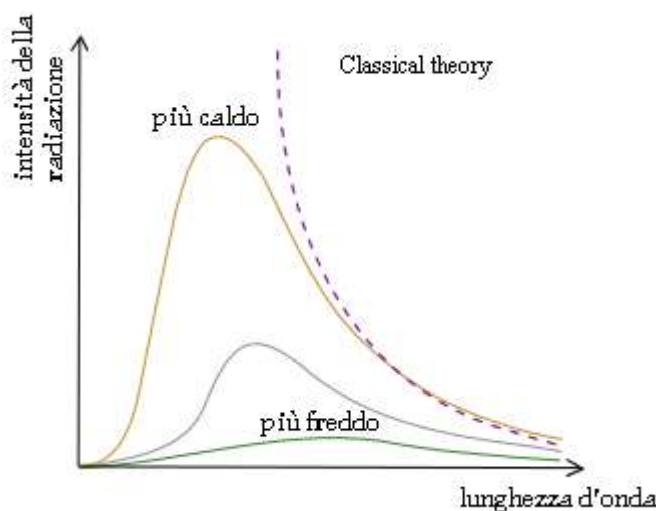
$$\text{radianza} = \frac{\text{energia}}{\text{tempo} \cdot \text{superficie}}$$

La radianza si misura in W/m^2 .

Un corpo nero è capace di emettere (e assorbire) radiazione di tutte le frequenze.

Un buon modello di corpo nero, dato nel 1860 da Gustav Kirchhoff (1824-1887), è **un blocco di materiale con una cavità interna e un piccolo foro che viene riscaldato fino ad una data temperatura (uniforme)**.

La radiazione (radiazione di cavità o di corpo nero) emessa dal forellino dipende solo dalla temperatura T e non dal materiale o dalla forma della cavità.



La curva di emissione ad una determinata temperatura è una curva quasi a campana che dà la radianza spettrale in funzione della lunghezza d'onda λ . La curva è fatta in modo che una piccola area ΔR tra λ e $\lambda + \Delta\lambda$ misura l'irraggiamento relativo a quell'intervallo di lunghezze d'onde. L'area totale sotto la curva è la radianza totale e rappresenta tutta la potenza emessa per unità di superficie.

$$R = \int_0^{+\infty} R(\lambda; T) d\lambda \quad (1)$$

dove il simbolo \int indica la funzione integrale (permette il calcolo dell'area sottostante la curva che sta integrando). Per tutti i materiali vale la **legge di Stefan - Boltzmann**:

$$R = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

$$\text{con } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

Per una data temperatura, per esempio $2000K$, la radianza di corpo nero è la stessa per tutti i materiali:

$$R(2000K) = 9105 W/m^2 \quad (3)$$

Per una data temperatura è costante anche la forma della curva, per temperature più basse la curva si appiattisce spostando il picco verso le lunghezze d'onda maggiori. La curva è analoga a quella della distribuzione di velocità in un gas.

Alla fine del XIX secolo si tentò di spiegare la radiazione di corpo nero con la fisica classica. Il fisico tedesco **Wilhelm Wien** (1864-1928), premio Nobel per la Fisica nel 1911, descrisse la legge di proporzionalità inversa che lega la lunghezza d'onda del picco alla temperatura. Questo significa che la radiazione di picco emessa cambia colore con l'aumentare della temperatura, da rossa a gialla, azzurra, bianca. La **relazione di Wien** è

$$\lambda_{picco} \cdot T = \beta \quad (4)$$

con $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} mK$ **costante di Wien**.

La legge di Wien è utilizzata anche per valutare la temperatura superficiale delle stelle (temperatura del colore).

Wien, applicando al corpo nero le leggi della termodinamica, propose una teoria che si accordava con l'andamento sperimentale alle piccole lunghezze d'onda, ma non alle grandi. I fisici Rayleigh e Jeans elaborarono invece una seconda teoria che si accordava con le onde lunghe, ma divergeva per piccole lunghezze d'onda (catastrofe ultravioletta). Queste due leggi furono quanto di meglio poté essere fatto con la fisica classica.

Il 19/10/1900 il fisico tedesco **Max Planck** (1858-1947) propose una formula empirica che funzionava per tutte le lunghezze d'onda e, il 14/12/1900 formulò la sua teoria.

Teoria di Planck

Gli atomi della cavità si comportano come oscillatori elettromagnetici. Gli oscillatori scambiano (cedono e acquistano) energia con la radiazione attraverso **pacchetti discreti**. Ogni pacchetto energetico ha energia:

$$E = n \cdot h \cdot f \quad (5)$$

con n intero positivo, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} Js$ (**costante di Planck** o quanto d'azione), f la frequenza dell'oscillatore.

Se un atomo passa da uno stato energetico ad un altro emette o assorbe energia **per pacchetti**, altrimenti non emette e non assorbe energia. Planck, il padre della teoria dei quanti, non era molto convinto della sua teoria e la considerò un semplice artificio. Nel 1918 ebbe il premio Nobel per la fisica per la scoperta dei quanti.

15.3 L'effetto fotoelettrico

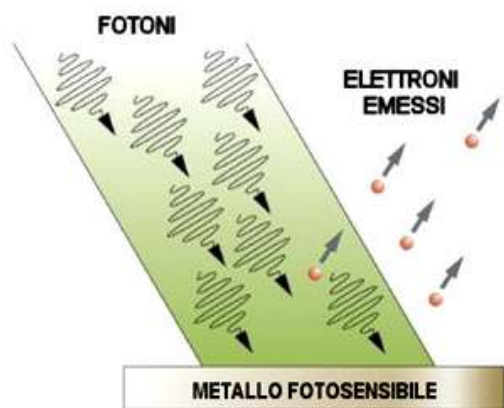


Figura 368 Effetto fotoelettrico

Illuminando alcuni metalli con luce (o più in generale con una radiazione elettromagnetica) di opportuna frequenza, si osserva sperimentalmente che essi emettono elettroni; questo fenomeno si chiama **effetto fotoelettrico**.

Nel 1905 Einstein permise alla teoria quantistica di fare un ulteriore passo avanti. Planck aveva proposto che gli scambi di energia tra la radiazione elettromagnetica e la materia avvenissero in modo quantizzato, ma Einstein propose che la radiazione stessa fosse composta da quanti, dando alla discontinuità dell'energia assume un carattere universale e più strettamente fisico, non solo matematico! Questo passaggio fu possibile grazie allo

studio dell'effetto fotoelettrico, scoperto casualmente nel 1887 dal fisico tedesco **Heinrich Rudolf Hertz**, quando vide che illuminando una piastra di zinco con delle radiazioni ultraviolette, il metallo si caricava elettricamente.

La spiegazione di questo fenomeno sta nel fatto che l'energia della radiazione elettromagnetica in arrivo determina l'espulsione degli elettroni e quindi la generazione della corrente elettrica (ma solo se l'energia incidente supera la forza che tiene legati gli elettroni all'atomo).

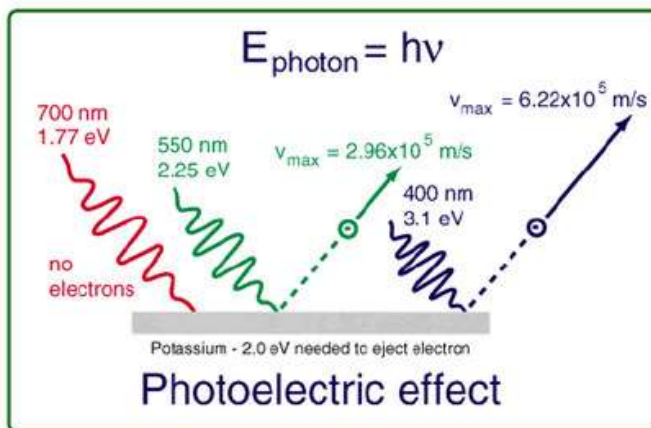
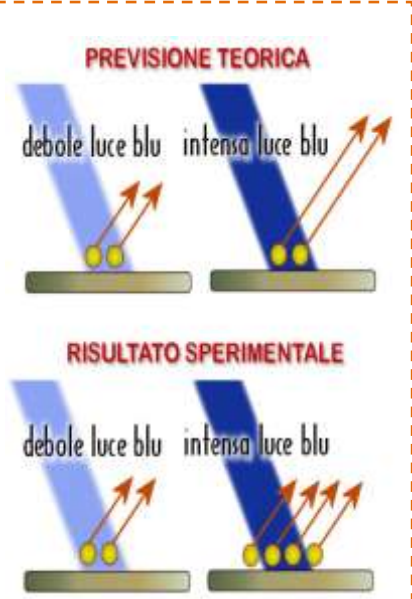
Poiché all'epoca la luce era considerata un'onda la forza di espulsione degli elettroni sarebbe dovuta dipendere solo dall'intensità della luce e non dalla sua frequenza, quindi non c'era ragione di pensare che luci rosse, verdi o blu avrebbe dovuto avere effetti diversi. Al contrario una debole luce rossa o una debole luce verde avrebbero dovuto espellere gli elettroni con meno forza di una intensa luce rossa o di una intensa luce verde.

Ma questo non accadeva! Al variare dell'intensità cambiava soltanto il numero degli elettroni espulsi, ma la velocità di espulsione degli elettroni rimaneva esattamente la stessa!

C'era un'ulteriore complicazione: in alcuni metalli la luce rossa non riusciva ad espellere alcun elettrone, mentre quella blu o ultravioletta potevano farlo con facilità... da cosa dipendeva tutto ciò?

Einstein ipotizza, sull'onda dell'intuizione di Planck, che la luce in questo caso andasse considerata come una particella. Ogni "pacchetto di luce", in questa ipotesi, possiede un'energia che è proporzionale alla sua frequenza secondo la formula di Planck... per cui i quanti di luce rossa hanno una bassa energia (sono a bassa frequenza), mentre i quanti di luce ultravioletta hanno un'alta energia (sono ad alta frequenza).

Quando l'energia di un quanto arriva a colpire un atomo essa viene ceduta all'elettrone. Se un fotone è a bassa frequenza (ad es. di luce rossa) l'energia posseduta non è sufficiente a causare l'emissione di un elettrone, mentre oltre una determinata soglia di frequenza l'energia del fotone può strappare l'elettrone all'atomo. A seconda della soglia fotoelettrica di un metallo, una debole luce ultravioletta - caratterizzata da un'alta frequenza - potrebbe tranquillamente generare una corrente elettrica, mentre una fortissima luce rossa potrebbe non esserne capace.



In sostanza la maggiore intensità della luce rappresenta solo un maggior numero di fotoni, senza con questo disporre di una maggiore intensità dell'energia (che dipende invece dalla frequenza), quindi la capacità di strappare gli elettroni rimane la stessa e non viene influenzata la loro velocità di espulsione, ma ciò che cambia è semplicemente che più elettroni verranno emessi (aumentando il flusso di corrente elettrica).

Il considerare la luce come un'onda avrebbe reso la sua energia dipendente esclusivamente dall'intensità della luce, per cui una luce rossa ed una ultravioletta - a parità di intensità - avrebbero dovuto espellere lo stesso numero di elettroni e l'energia cinetica di espulsione sarebbe dovuta essere equivalente. Una luce troppo debole non avrebbe dovuto generare alcun elettrone, indipendentemente dalla sua frequenza. Il quanto di luce venne definito "fotone" dal chimico statunitense Gil-

bert Newton Lewis nel 1926, mentre Einstein per questa interpretazione ricevette il Nobel per la Fisica nel 1921.

A proposito di quanto sopra esposto riportiamo un interessante commento tratto dal sito: www.fisicamente.net

“... si è scardinato l'impianto della fisica classica. Se solo si pensa, ad esempio, ad una energia proporzionale alla frequenza ci si rende conto dell'enorme distanza che ci separa da quell'elettrodinamica che prevede una proporzionalità con l'ampiezza (qualcuno ha giustamente osservato che rimarremmo quanto meno stupiti nel vedere un uragano non provocare nessun effetto su un bosco di palme, mentre una leggera brezza sradicarle e scagliarle a chilometri di distanza).”

15.4 CLIL Project

The photoelectric effect

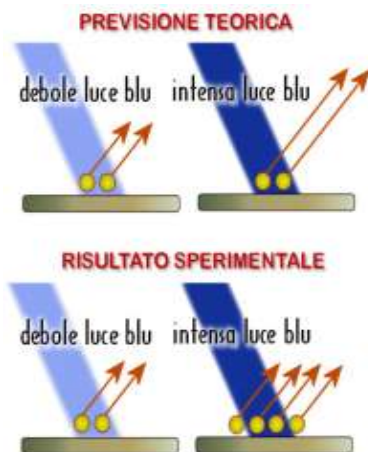
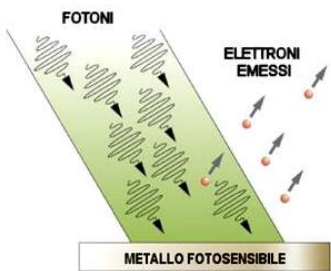
Illuminating some metals with light (or more generally, with an electromagnetic radiation) of an appropriate frequency, is observed experimentally that they emit electrons; this phenomenon is called photoelectric effect.

In 1905, Einstein allowed the quantum theory to take a further step forward. Planck had proposed that the exchange of energy between electromagnetic radiation and matter should occur in a quantized, but Einstein proposed that the radiation itself was composed of many, giving the energy discontinuity assumes a universal and more strictly physical, not only mathematical ! This step was made possible thanks to the study of the photoelectric effect, discovered accidentally in 1887 by German physicist **Heinrich Rudolf Hertz**, when he saw that illuminating a zinc plate with ultraviolet radiation, the metal was loaded electrically.

The explanation of this phenomenon lies in the fact that the energy of the electromagnetic radiation in arrival determines the expulsion of the electrons and thus the generation of electric current (but only if the incident energy exceeds the force that keeps the electrons bound to the atom)

Because at the time the light was a wave considered the ejection force of the electrons would have to depend only on the intensity of the light and not on its frequency, so there was no reason to think that the red light, green or blue should have different effects. Conversely, a weak red light or a faint green light would have to expel the electrons with less force of an intense red light or a bright green light.

But this did not happen! By varying the intensity changed only the number of electrons ejected, but the ejection velocity of the electrons remained exactly the same! There was a further complication: some metals in the red light was unable to eject a single electron, while the blue or ultraviolet light could do it with ease ... everything depended on what?



Einstein hypothesized, in the wake of the intuition of Planck, that the light in this case should be regarded as a particle. Each "bundle of light", in this case, has an energy that is proportional to its frequency in accordance with the Planck formula ... for which the quanta of red light have a low energy (are low frequency), while many of ultraviolet light have a high energy (are high frequency).

15.5 **Nascita della Meccanica Quantistica - L'Effetto Compton**

Nel 1923 **Arthur Holly Compton** fece un esperimento inviando un fascio monocromatico di raggi X su un blocco di grafite e misurò la direzione e l'intensità dei raggi X uscenti.

L'esperimento evidenziò che la radiazione uscente veniva deviata in tutte le direzioni e che la frequenza dell'energia in uscita era molto più piccola di quella del fascio in entrata. La logica spiegazione di tali riscontri era che i singoli fotoni urtassero contro gli elettroni della materia e, colpendoli, fossero deviati e perdessero essi stessi energia; in pratica si comportavano come palle da biliardo che ne colpivano altre.

La teoria ondulatoria avrebbe previsto che la radiazione elettromagnetica, interagendo con gli atomi di grafite, avrebbe dovuto mantenere la stessa frequenza della radiazione incidente e inoltre che la deviazione dei raggi X derivata dal passaggio nella grafite sarebbe dovuto essere molto minore.

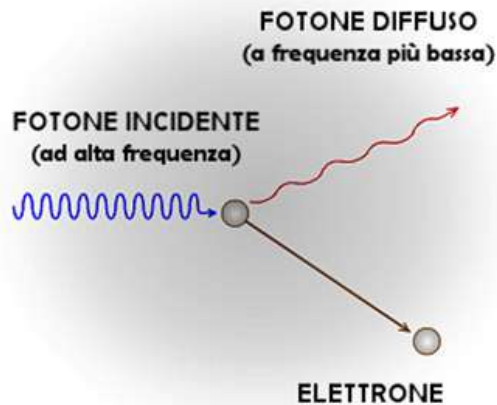


Figura 369 Effetto Compton

La scoperta dell'effetto Compton convinse in maniera pressoché definitiva la comunità scientifica che la radiazione elettromagnetica possedeva anche una **natura corpuscolare**.

Compton ottenne il Nobel per la Fisica nel 1927 grazie a questa scoperta.

Considerare l'energia come composta da quantità discrete (corpuscoli) e non da onde era l'unico modo per interpretare correttamente i dati

sperimentali derivanti dallo studio dell'effetto fotoelettrico e dell'effetto Compton. Veniva così resa evidente la natura corpuscolare della luce e si apriva la strada ai paradossi della Meccanica Quantistica, quale ad esempio la doppia natura ondulatoria e corpuscolare dei quanti, che vedremo in seguito.

15.6 La meccanica quantistica

La meccanica quantistica fornisce molte informazioni sulla realtà e permette di spiegare dei fenomeni altrimenti inspiegabili con la fisica classica. Non è un lusso di cui si può fare a meno ma una teoria fisica indispensabile per comprendere ciò che ci circonda. Ma qual è il quadro di riferimento generale a cui la meccanica quantistica riconduce? Quale tipo di realtà viene in effetti descritta? Su questo non c'è alcun accordo e qui nascono le molteplici interpretazioni che andremo di seguito a conoscere.



Einstein:
"Non posso credere che Dio giochi a dadi con l'universo!"



Bohr:
"Albert, smettila di dire a Dio cosa deve fare!"

Interpretazione di Copenaghen

La cosiddetta "Interpretazione di Copenaghen" è stata sviluppata soprattutto da Niels Bohr e da Werner Heisenberg (con Pauli, Dirac, Born ed altri), negli anni 1924-27. Rappresenta l'interpretazione standard della meccanica quantistica ed è a questa visione che Einstein si oppose fortemente.

Secondo questa interpretazione la funzione d'onda descrive un'insieme di possibilità tutte copresenti e solo il processo della misura la fa collassare in un unico e solo stato osservabile. Il gatto di Schrödinger, perciò, non è né vivo né morto finché non si apre la scatola! Secondo questa interpretazione la realtà è probabilistica e non è determinata a priori (viene negato il "realismo" e il "determinismo"), il ruolo dell'osservatore è quindi cruciale.

Interpretazione di De Broglie-Bohm

Questa interpretazione ("Guide Wave Interpretation") fu proposta originariamente da Louis de Broglie e poi migliorata e sostenuta da David Bohm. Fa parte del gruppo detto "a variabili nascoste". Secondo questa teoria ad ogni tipo di particella è associata un'onda ("onda pilota") che guida il moto della particella. L'onda pilota è ben reale e permea tutto l'universo, costituendone l'ordine implicato (non manifesto),



Figura 370 Interpretazione di De Broglie-Bohm

che Bohm considera avere una struttura ologrammica, in quanto lo schema globale è riprodotto in ogni sua singola parte. Quello che noi possiamo osservare è solo l'ordine esplicito, che risulta dall'elaborazione che il nostro cervello effettua delle onde di interferenza. Poiché Bohm riteneva che l'universo fosse un sistema dinamico (mentre il termine ologramma rimanda di solito ad un'immagine statica), utilizzò il termine "Ologomovimento" per descrivere la natura del cosmo.

Nello spiegare il processo di **entanglement** (correlazione), Bohm afferma che le due particelle che noi vediamo come distinte ma interconnesse sono una cosa sola ad un livello di realtà più profondo. Se due telecamere differenti riprendessero lo stesso pesce in un acquario, infatti, noi potremmo avere la percezione di vedere due pesci stranamente interconnessi tra loro. Ogni cambiamento nei movimenti dei due pesci, infatti, sarebbe sincrono. Ciò che nei due televisori (ordine esplicito) sembra diviso, noi sappiamo trattarsi di un'unica entità nell'acquario (ordine implicito). Allo stesso modo le due particelle **entangled** costituirebbero un'unità su un piano di realtà più fondamentale di quello che i nostri sensi percepiscono.

Interpretazione statistica

L'interpretazione statistica è un'estensione dell'interpretazione probabilistica di **Max Born** della funzione d'onda. La funzione d'onda non viene considerata un'entità reale e viene negato che possa essere applicata ad un sistema individuale (come un fotone o una particella); essa descrive semplicemente il comportamento statistico di un insieme di sistemi, allo stesso modo in cui le leggi probabilistiche descrivono il comportamento delle molecole di un gas nel suo insieme. I misteri dei quanti non sarebbero affatto diversi dai "misteri" relativi ai numeri che potrebbero uscire da un lancio di dadi. Il dualismo onda/particella non esiste proprio in questa interpretazione!

Einstein fu un convinto sostenitore dell'interpretazione statistica e disse:

“Il tentativo di concepire la descrizione quantistica teorica come la descrizione completa dei sistemi individuali porta a interpretazioni teoriche innaturali, che diventano immediatamente non necessarie se si accetta che l'interpretazione si riferisca ad insiemi di sistemi e non a sistemi individuali”.

Non esiste, a tutt'oggi, una interpretazione della meccanica quantistica univoca e condivisa da tutti; esistono solo molte interpretazioni sulla realtà che sottende determinati fenomeni.

15.7 Il Paradosso del Gatto di Schrödinger

Erwin Schrödinger nel 1935 propone alla comunità scientifica un esperimento mentale (ideale), con lo scopo di evidenziare le palesi incongruenze della teoria quantistica con l'ordinaria percezione della realtà.

CURIOSITA'

Come sia possibile che due sistemi inizialmente posti in contatto e poi separati, subiscano una interazione istantanea anche a distanze notevoli, è un mistero tutto da scoprire. L'**Entanglement** credo rappresenti la conferma dell'esistenza di mondi paralleli che interagiscono tra di loro. Per ora ne osserviamo solo gli effetti. Un giorno saremo in grado di spiegarli e di prevederli.



Figura 371 interpretazione probabilistica della funzione d'onda



Figura 372 Gatto di Schrödinger

In una scatola perfettamente isolata dall'esterno, collochiamo un contatore Geiger con una piccolissima quantità di sostanza radioattiva, un martelletto, una fiala di cianuro e un gatto. Quando il contatore Geiger rileva un decadimento radioattivo, il martelletto viene azionato e la fiala si spezza, uccidendo così il gatto. La sostanza radioattiva è in quantità così minima che nell'arco di un'ora c'è il 50% di probabilità che un atomo sia decaduto, ed abbia quindi liberato della radioattività, e un 50% di probabilità che non sia accaduto nulla... dopo aver quindi aspettato un'ora che cosa troveremo all'apertura della scatola?

La funzione d'onda ci dice che il gatto è in uno stato di superposizione, cioè è sia vivo, sia morto e solo quando apriamo la scatola abbiamo il collasso della funzione d'onda e potremo trovare il gatto o vivo o morto. Il paradosso sta proprio nel fatto che, fino a quando l'osservazione non è avvenuta, due stati evidentemente opposti e inconciliabili sono entrambi presenti!

L'esperimento è stato congegnato per traslare i paradossi quantistici presenti nella realtà subatomica nella realtà macroscopica e dimostrare la loro insostenibilità o quantomeno la loro incompletezza.

Secondo la teoria della *decoerenza quantistica* il gatto non sarebbe mai in stato di superposizione, indipendentemente dall'osservazione o meno, perché la sostanza radioattiva interagirebbe fin da subito con il contatore Geiger e sarebbe obbligata a scegliere uno stato (decadimento o non decadimento) e quindi il gatto sarebbe sempre o solo vivo o solo morto! Nell'interpretazione di Copenhagen sostenuta da Bohr, invece, solo al momento della misura (cioè dell'osservazione) potremo avere la scelta di uno stato piuttosto che di un altro.

Osservazione

Questo paradosso ci fa riflettere su come voler trasferire la realtà subatomica nel mondo macroscopico dà origine a degli evidenti paradossi, quali la presenza simultanea di uno stato di vita e di morte che è impossibile da riscontrarsi nell'esperienza quotidiana. Esiste un passaggio tra lo stato descritto dalla fisica quantistica e quello descritto dalla fisica classica che sembra essere generato dall'interazione di ciò che è in superposizione con un osservatore o con l'ambiente stesso.

15.8 La lunghezza d'onda di una particella

Tutte le particelle con una certa quantità di moto hanno una lunghezza d'onda, chiamata **lunghezza d'onda di de Broglie**, che si sviluppa in base alla relatività ristretta:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (6)$$

dove h è la costante di Planck, p è la quantità di moto della particella, m è la massa della particella, v è la velocità della particella, e c è la velocità della luce.

De Broglie affermò che questa relazione è valida per tutte le particelle comprese quelle non relativistiche (**postulato di de Broglie**)

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad (7)$$

con $v \ll c$ (velocità molto inferiore rispetto alla velocità della luce)

Benché l'espressione matematica sia molto semplice, le implicazioni fisiche sono molto profonde. La materia ha proprietà ondulatorie poiché la lunghezza d'onda implica che a ogni particella che si muove è associata un'onda.

Se l'equazione precedente è corretta ci si può aspettare che fenomeni di interferenza e diffrazione debbano essere osservati in modo analogo a quanto avviene per i fotoni. Questo è quanto effettivamente avviene.

¹Figura 373 5• Congresso di Solvay del 1927



Nella fotografia della conferenza, scattata ai 29 partecipanti, 17 dei protagonisti erano stati o sarebbero stati in futuro premiati con il premio Nobel. **Marie Curie**, l'unica ad aver vinto il premio Nobel in due discipline distinte (Fisica e Chimica), è anche l'unica donna presente nella fotografia.

Dietro: **Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, JE Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Fowler, Léon Brillouin.**

Fila di Mezzo: **Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr.**

Prima Fila: **Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, CTR Wilson, Owen Richardson.**

Fotografia: Benjamin Couprie, Institut International de Physique de Solvay

UNA FOTO STORICA

Le menti più brillanti del XX Secolo tutte lì, immortalate in un'unica fotografia.

Se oggi abbiamo le conoscenze scientifiche e tecnologiche che ci circondano, è soprattutto grazie a loro, ai loro sforzi di capire la Natura e di saperla interpretare.

¹ si segnala un libro che racconta dell'incredibile cena che si tenne a fine Congresso in quel lontano 29 Ottobre del 1927 a Bruxelles. Tra mito e realtà un brillante racconto dei fatti di quella sera.

“**L'incredibile cena dei fisici quantistici**” di Gabriella Greison – Salani Editori 2016

15.9 Il principio di indeterminazione di Heisenberg

Nel 1927 **Werner Heisenberg** formula un principio, detto “di indeterminazione”, che dà un ulteriore, forte, scossone alle certezze della vecchia fisica newtoniana. Secondo questo principio vi sono in fisica delle grandezze tra loro correlate (dette “**coniugate**”) che non potranno mai essere conosciute con esattezza allo stesso tempo: la determinazione precisa di una delle due, infatti, rende più incerta la misura dell'altra.

Sono grandezze coniugate la posizione di una particella e la sua velocità (più esattamente la quantità di moto = massa x velocità) . Possiamo quindi arrivare a conoscere l'esatta posizione di una particella in un dato istante, ma in tal caso non potremo conoscere la sua velocità con precisione e viceversa. In pratica si afferma l'esistenza di una indeterminazione ineliminabile nella misura simultanea di queste due grandezze.

Per comprendere in che modo misurando alcune grandezze, altre possano sfumarci tra le mani, portate l'attenzione alla doppia natura ondulatoria e corpuscolare dei quanti... immaginate di voler determinare con precisione la lunghezza d'onda di un quanto, avrete bisogno del suo pacchetto d'onda che si propaghi nello spazio, così come se volete determinarne con precisione la frequenza avrete bisogno che essa duri nel tempo. A questo punto, però, di un quanto esteso nello spazio e nel tempo non possiamo dire con precisione la posizione che occupa ad un determinato istante nella sua forma corpuscolare.

Il valore minimo di questa indeterminazione è correlato alla costante di Planck. Inizialmente si è pensato che questa incertezza derivasse dall'interferenza generata dalla misurazione, ma poi si è visto che non dipende affatto dalle tecniche di misura, bensì è una proprietà intrinseca della materia!

La formula che descrive l'indeterminazione di posizione/quantità di moto afferma che il prodotto della massima accuratezza con cui possiamo determinare queste due grandezze è una costante.

Risulta:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad (8)$$

dove Δx è l'errore sulla posizione, Δp è l'errore sulla quantità di moto, h (“acca tagliata”) deriva dalla costante di Planck:

$$h = \frac{h}{2\pi} \quad (9)$$

Lo stesso principio può essere applicato anche ad altre grandezze coniugate, ad esempio energia e tempo (nel misurare l'energia emessa da un elettrone nel passaggio da un livello energetico ad un altro, la precisione della misura dell'energia comporterà un aumento dell'incertezza sulla durata della transizione).

Risulta:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (10)$$

da cui deriva:

$$\Delta E \geq \frac{\hbar}{2 \cdot \Delta t} \quad (11)$$

da cui osserviamo che diminuendo il valore del tempo si accresce quello dell'energia, cioè se si effettuano misurazioni per un periodo di tempo tendente a zero, i valori di energia tendono all'infinito: *questo è un fatto strano che permette la violazione del principio di conservazione dell'energia per istanti brevissimi.*

In pratica il principio di indeterminazione prevede che delle particelle possano venire all'esistenza pur in assenza dell'energia necessaria alla loro creazione. Di fatto queste particelle sono prodotte a partire da indeterminazioni nell'energia, "prendono a prestito" dal vuoto l'energia necessaria alla loro creazione e, trascorso un piccolissimo lasso di tempo, "pagano il loro debito" scomparendo nuovamente. Dal momento che queste particelle non hanno un'esistenza permanente, sono dette particelle virtuali. Sebbene non possano essere osservate lasciano comunque una traccia della loro generazione nei livelli di energia degli atomi, tracce che sono state effettivamente misurate (**Willis Lamb**, 1947) e che hanno confermato la teoria.

15.10 Il Principio di Complementarietà di Bohr

Il principio di complementarità fu formulato da Bohr nel 1927; afferma che ogni esperienza capace di evidenziare un quanto dal punto di vista corpuscolare esclude la possibilità di osservare il suo aspetto ondulatorio e viceversa; i due aspetti sono complementari e allo stesso tempo si escludono a vicenda, per cui l'osservazione dell'uno preclude quella dell'altro.

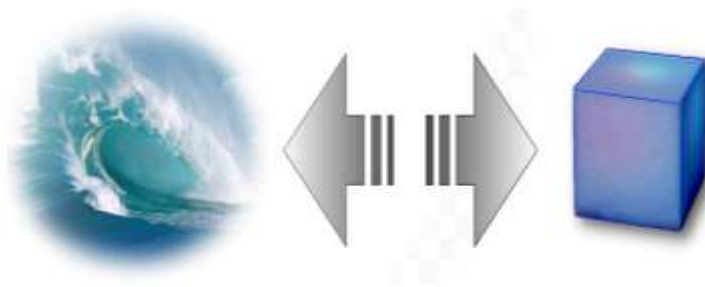


Figura 374 Complementarietà di Bohr

l'aspetto corpuscolare e quello ondulatorio si escludono a vicenda

Secondo questo principio non potremo mai osservare, contemporaneamente durante lo stesso esperimento, sia la natura corpuscolare che quella ondulatoria di un elettrone o di un fotone.

Il principio di indeterminazione di *Heisenberg* dice che esistono delle grandezze (posizione e quantità di moto - energia e tempo) il cui valore è impossibile da conoscere contemporaneamente, con la massima accuratezza. Più si definisce una e più si rende indeterminata l'altra. Questo principio stabilisce un limite alla conoscibilità della Natura, limite che nella fisica classica non esisteva!

Inoltre la conseguenza estrema dell'indeterminazione della coppia energia/ tempo dimostra che il vuoto non è poi così vuoto, ma in realtà è ricco di fluttuazioni energetiche di brevissima durata che permettono la generazione dal nulla di materia. E' il cosiddetto **Campo di Punto Zero**.

15.11 L'Effetto Tunnel

Una delle proprietà più straordinarie dei quanti è rappresentata dal cosiddetto "Effetto Tunnel".

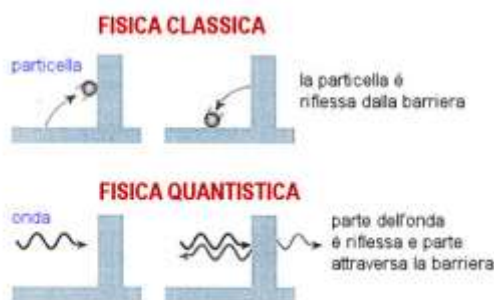


Figura 375 Effetto tunnel

Consiste nella capacità che possiedono le particelle quantistiche di attraversare una barriera di potenziale più alta dell'energia che avrebbero a disposizione!

Nella meccanica classica è intuitivo che una particella non possa superare

un ostacolo se non ha l'energia necessaria per farlo.

Ad es. se una palla non ha la forza di risalire il crinale di una collina fino alla sua cima, non potrà mai rotolare in discesa lungo il crinale opposto. Se un proiettile non ha la forza di bucare una parete, non potrà mai essere trovato al di là di quella parete.

Nel mondo quantistico una particella possiede una funzione d'onda che prevede una probabilità, piccola ma concreta, di attraversare spontaneamente una barriera più alta dell'energia posseduta dalla particella stessa. In sostanza un elettrone collocato in una scatola chiusa, può

trovarsi, ad un certo punto, fuori dalla scatola stessa, in modo del tutto spontaneo.

L'effetto tunnel è una conseguenza diretta del principio di indeterminazione di Heisenberg: se una particella è confinata in uno spazio molto stretto e quindi l'incertezza sulla sua posizione (Δp) è molto piccola, l'incertezza della sua quantità di moto (Δx), in pratica la sua velocità, è molto grande ed è possibile che riesca a superare la barriera. Allo stesso risultato arriviamo anche se si prende in considerazione l'indeterminazione energia/tempo: in un intervallo di tempo molto breve (Δt), la fluttuazione energetica della particella (ΔE) può raggiungere livelli tali da permetterle di fuoriuscire.

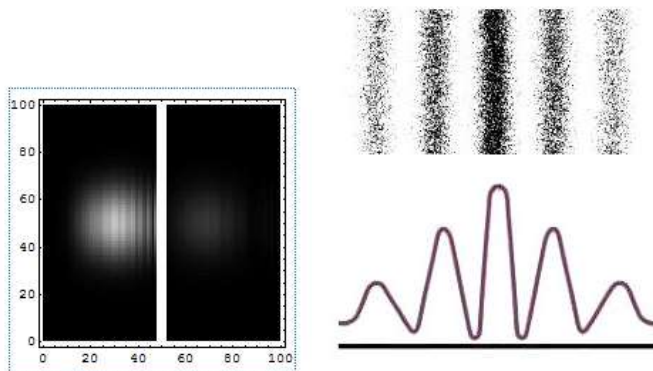


Figura 376 le onde rappresentano la densità di probabilità di trovare l'elettrone

Questo effetto, impossibile per la fisica classica, non solo è stato ampiamente dimostrato in laboratorio, ma permette il funzionamento dei diodi tunnel, del microscopio a effetto tunnel (STM) e delle memorie flash per computer ed è addirittura responsabile dell'irradiazione del sole e delle stelle.

Le reazioni all'origine dell'emanazione dell'energia stellare sono dette di fusione nucleare ed avvengono quando due nuclei (ad es. di idrogeno o di elio) sono sufficientemente vicini da far prevalere l'interazione nucleare forte sulla forza di repulsione elettromagnetica (essendo carichi positivamente, i nuclei tendono a respingersi tra loro). A quel punto sono in grado di fondersi per creare un elemento più pesante e, al tempo stesso, liberare un elevatissimo quantitativo di energia.

Le temperature presenti all'interno delle stelle non sarebbero in grado di avviare un tale processo, ma grazie all'effetto tunnel questa barriera di potenziale viene superata e la reazione a catena è innescata.

L'effetto tunnel rende ragione anche della radioattività di tipo alfa: le forze nucleari di un atomo non permettono ai neutroni e ai protoni di allontanarsi da esso, ciò nonostante negli elementi chimici pesanti ed instabili (quali il Radio e l'Uranio) grazie all'effetto tunnel una particella alfa (2 protoni + 2 neutroni, in pratica un nucleo di elio) può lasciarsi alle spalle le barriere di potenziale dell'attrazione nucleare. E' in questo modo che l'uranio diventa radioattivo e si trasforma in piombo. Questa spiegazione è stata formulata nel 1928 dal fisico ucraino **George Gamow**.

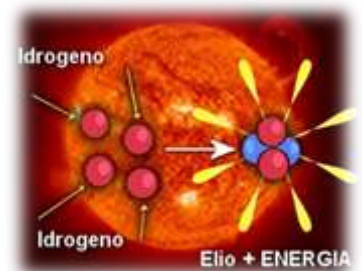


Figura 377 Reazioni per l'Energia stellare

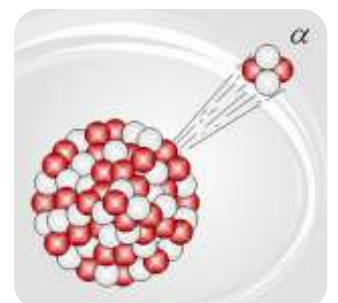


Figura 378 Emissione di un nucleo di Elio-4 da un atomo radioattivo

15.12 Forze nucleari

Le forze nucleari capaci di tenere insieme il nucleo dell'atomo furono studiate da molti fisici degli anni '40. L'Istituto di Fisica italiano di **via Panisperna** a Roma era tra i più attivi, era diretto da Enrico Fermi. Negli esperimenti si cercava di comprendere le cause e le forze in grado di mantenere l'equilibrio stabile nei nuclei. La proprietà di un atomo dipende infatti dal numero di elettroni (e quindi di protoni) che possiede.

Il gruppo di Enrico Fermi studiò in laboratorio la capacità degli **isotopi**, ovvero degli atomi in grado di diventare stabili nel tempo acquistando o cedendo neutroni. Queste reazioni sono dette “**nucleari**”.

Le forze nucleari devono essere intensissime, per poter tenere insieme, a distanza molto piccola, molti protoni con la stessa carica. Al di fuori del nucleo atomico stesso, queste forze sono invece inefficaci.

Quindi per mettere insieme il nucleo, avvicinando un protone ad un altro protone, dovremmo spendere molta energia. Energia che sarà poi immagazzinata nel nucleo fino quando qualcosa non lo rompa, ovvero resterà imprigionata nella struttura che abbiamo creato.

Ogni nucleo avrà immagazzinata dentro di sé una quantità di energia, poiché le strutture dei nuclei sono diverse questa energia sarà allo stesso modo diversa da nucleo a nucleo. Ciò vale sia per i nuclei “**naturali**” sia per quelli creati in laboratorio, ovvero “**artificiali**”.

Nel momento in cui spezziamo un nucleo, rompendolo otteniamo due nuclei più leggeri ma anche rilascio di energia. I due nuovi nuclei più leggeri immagazzinano in totale meno energia di quella contenuta nel nucleo originario da cui derivano. Ovvero si ha un “**guadagno di energia**”. Questo è il principio della “**fissione nucleare**”, ovvero della frammentazione dei nuclei.

Non sempre comunque il guadagno netto di energia è presente. In alcuni casi per spezzare il nucleo dovremmo impiegare un'energia dall'esterno tale da creare nei due nuovi nuclei una forza energetica maggiore del nucleo da cui derivano.

Se invece di spezzare un nucleo volessimo fondere tra loro due nuclei leggeri per formare un nucleo pesante potremmo al pari creare energia. Dalla fusione potremmo ottenere un unico nucleo con un'energia immagazzinata maggiore o minore di quella originariamente immagazzinata nei due nuclei più leggeri. Nel caso in cui l'energia contenuta nel nucleo è maggiore, avremmo un guadagno netto di energia. E' il principio della “**fusione nucleare**”.

Non è comunque possibile ripetere un processo frammentazione --> fusione sugli stessi nuclei, se così fosse avremmo una produzione di energia perenne ed infinita.

Generalmente è possibile produrre energia in due modi:

- Spezzando un nucleo pesante in nuclei medi. (**Fissione Nucleare**);
- Fondendo più nuclei leggeri in un nucleo medio. (**Fusione Nucleare**).

Le proprietà dei nuclei per dare luogo alla fissione nucleare o alla fusione nucleare sono quindi diverse. Ovvero è diverso il carburante.

Nel caso (1) saranno utilizzati i nuclei pesanti dell'uranio o del plutonio, nel caso (2) i nuclei leggeri dell'idrogeno e dell'elio.

Si può affermare che i nuclei di peso intermedio immagazzinano meno energia sia rispetto a quelli pesanti, sia rispetto a quelli leggeri.

Il guadagno di energia che viene liberato dalla fissione o dalla fusione si può presentare in due modi:

- sotto forma di calore;
- sotto forma di particelle veloci che si allontanano tra loro, portando con se parte dell'energia liberata.

15.13 Struttura atomica

Percorrere l'evoluzione dei modelli atomici è un ottimo modo di rendersi conto del significato di modello, cioè di una costruzione mentale in grado di interpretare i fenomeni fisici e, se possibile, di prevederne di nuovi. Inoltre questo settore di ricerca fu in mutuo e continuo scambio con lo sviluppo della teoria quantistica. La necessità di prevedere l'esistenza degli atomi si era presentata all'inizio del secolo XIX in chimica, ed era subito stata accettata in quell'ambito scientifico. I fisici, al contrario, furono molto restii ad ammettere la loro esistenza, opponendo una obiezione di tipo "galileiano": poiché gli atomi non sono direttamente osservabili, essi non possono essere entità fisiche, dato che in fisica una grandezza, per esistere, deve essere misurabile.

Alla fine del secolo XIX, comunque, gli sviluppi della termodinamica e nuove scoperte, come l'esistenza degli elettroni (esperimento di J. J. Thomson, 1897) convinsero della necessità di costruire validi modelli atomici. Qualunque modello atomico doveva rispettare alcune evidenze sperimentali:

le sue dimensioni dovevano essere dell'ordine di $10^{-10}m$ doveva essere complessivamente neutro, come avviene per tutta la materia ordinaria doveva contenere cariche negative (scoperta dell'elettrone) e quindi un ugual numero di cariche positive.



Laboratorio 37 Diffusione di Rutherford

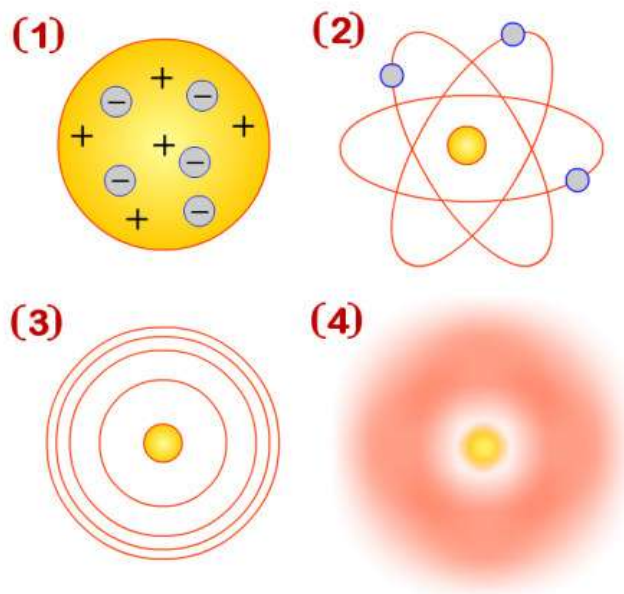


Figura 379 Struttura atomica

E' chiaro che possono esistere molti modelli che soddisfano queste condizioni; nella scienza vale un principio molto generale, quello dell'economicità: il modello migliore è quello più semplice, quello cioè che rispetta tutti i parametri con il minor numero di ipotesi aggiuntive. Un modello è però una struttura dinamica in continua evoluzione: occorre testarlo con esperimenti mirati. Se il modello è coerente con i dati sperimentali ottenuti esso si rafforza, altrimenti occorre abbandonarlo e sostituirlo con uno nuovo che spieghi tutti i risultati sperimentali del vecchio, più quelli che lo hanno messo in crisi. Il primo modello atomico fu proposto da J. J. Thomson nel 1903 (modello a panettone); esso prevedeva che l'atomo fosse una sfera costituita da materia carica positivamente, con gli elettroni conficcati come l'uvetta in una torta, in modo da assicurare la neutralità del sistema. Modello di Rutherford

Il modello di Thomson entrò in crisi tra il 1909 ed il 1911 in seguito ad una serie di esperimenti condotti nell'Università di Manchester dal neozelandese Ernest Rutherford con la collaborazione dei giovani fisici tedeschi Geiger e Marsden. L'idea base dell'esperimento di Rutherford è semplice: per ottenere informazioni sull'atomo lo si bombarda con proiettili delle sue dimensioni e si analizza la deflessione subita dai proiettili dopo l'urto. Ragionando per analogia è come se volessimo ottenere informazioni su un oggetto sconosciuto posto all'interno di una scatola chiusa sparando contro di essa con una mitragliatrice; se ad esempio tutti i proiettili attraversano la scatola quasi indisturbati si può pensare che il contenuto sia poco resistente e tenero, se invece qualche proiettile viene fortemente deviato o addirittura rimbalza indietro si può ipotizzare che all'interno vi siano oggetti molto tenaci e duri.

Nell'esperimento di Rutherford i proiettili erano costituiti da particelle α (nuclei d'elio) emesse da una sorgente radioattiva (polonio), mentre il bersaglio era una sottilissima lamina d'oro, con uno spessore pari ad

uno strato di qualche migliaio di atomi appena. Le attese degli sperimentatori, sulla base del modello di Thomson, erano che i proiettili dovessero attraversare lo strato di atomi come se fosse stata carta o burro, tenendo conto che le particelle α costituivano proiettili massicci che arrivavano sulla lamina d'oro ad alta velocità.

Secondo il modello di Thomson, l'atomo era una sferetta di raggio r di circa $10^{-10} m$ con una carica positiva q distribuita in modo uniforme. Questa sferetta avrebbe dovuto creare un campo radiale nello spa-

zio di valore massimo $E = \frac{k \cdot q}{r^2}$, troppo debole per deviare sensibil-

mente le particelle α .

I risultati sperimentali furono sorprendenti: si osservò infatti che, se la maggior parte delle particelle α attraversava la lamina d'oro senza subire una apprezzabile deviazione, come previsto, un certo numero di proiettili, però, veniva deflesso fortemente e qualcuno, con una frequenza di 1 particella su 6 milioni, veniva addirittura riflesso all'indietro. Rutherford disse: "era come se vi fosse capitato di sparare un proiettile da 15 pollici su un pezzo di carta velina e questo fosse tornato indietro a colpirvi".

Era come se la carica positiva nell'atomo fosse in grado di esercitare sulle particelle α forze repulsive molto più intense di quelle previste dal modello a panettone. Sulla base delle frequenze statistiche delle particelle rimbalzate indietro venne valutata la sezione d'urto e quindi il raggio della sezione occupata dalla carica positiva. Il raggio risultò molto più piccolo dell'atomo: $r = 1,5 \cdot 10^{-14} m$.

Se la carica positiva occupa una zona molto minore delle dimensioni atomiche, allora il campo elettrico E massimo è decine di milioni di volte più intenso di quello previsto dal modello di Thomson. Questo spiega l'enorme forza repulsiva che fa rimbalzare indietro le particelle α che si trovano quasi in rotta di collisione con un nucleo d'oro.

Sulla base dei risultati sperimentali, Rutherford nel 1911 propose il suo modello atomico, detto anche atomo planetario per la sua struttura analoga a quella del sistema solare. Nel modello di Rutherford, la carica positiva è concentrata in un volume piccolissimo al centro dell'atomo, il nucleo, il cui raggio varia da 10^{-15} a $10^{-14} m$ passando dall'idrogeno agli elementi pesanti, mentre gli elettroni, in numero tale da bilanciare la carica positiva del nucleo, ruotano su orbite di raggio compreso tra 10^{-10} e $3 \cdot 10^{-10} m$.

Questo modello, semplice ed elegante, spiegava bene i risultati sperimentali, ma, in base alla fisica classica, aveva il difetto di essere instabile. Infatti le cariche elettriche non possono comportarsi stabilmente come satelliti intorno al nucleo perché la teoria classica di Maxwell prevede che una carica che oscilla emetta onde elettromagnetiche della stessa frequenza di rotazione. Gli elettroni avrebbero dovuto emettere continuamente radiazione elettromagnetica e quindi perdere energia a ritmo costante, avvicinandosi sempre di più al nucleo, fino a cadervi e questo doveva avvenire in un tempo molto breve, in contrasto con l'evidente stabilità della materia.

Si era ad un punto di crisi: o il modello di Rutherford non andava bene e allora non si potevano spiegare in nessun modo i risultati sperimentali sulla deflessione della particelle α , o la fisica classica non era adeguata alla descrizione dell'atomo. La soluzione del dilemma avvenne due anni dopo, nel 1913, per merito del fisico danese Niels Bohr che adattò al modello di Rutherford i principi della neonata fisica quantistica.

Prima di parlare del modello atomico di Bohr è però necessario illustrare alcuni importanti fatti sperimentali che ebbero interpretazione teorica proprio grazie a questo nuovo modello. Uno di questi era lo spettro di luce emesso dai gas incandescenti.

Modello quantistico dell'atomo

Nel 1925 il tedesco **Werner Heisenberg** e l'austriaco **Erwin Schrödinger** presentarono un modello puramente quantistico dell'elettrone nel quale esso non è più visto come una particella, ma come un'onda materiale. Anche se le conclusioni del modello semiclassico di Bohr sono identiche a quelle previste dall'equazione di Schrödinger, il cambiamento del punto di vista operato dal modello quantistico è enorme.

La meccanica ondulatoria non interpreta l'elettrone nell'atomo come una particella in orbita e abbandona ogni analogia legata a moti rotatori come il numero quantico orbitale l legato alla forma dell'orbita o lo **spin** legato al verso di rotazione dell'elettrone attorno al proprio asse. L'elettrone non è più localizzato in un punto preciso dello spazio, ma diventa un oggetto sfumato come una nube di probabilità che ha valori massimi in determinate zone intorno al nucleo. I raggi delle orbite di Bohr rappresentano pertanto zone di massima probabilità: è più probabile che l'elettrone si trovi ad una distanza dal nucleo pari al raggio di Bohr che non a qualsiasi altra distanza.

Non è possibile in linea di principio verificare sperimentalmente i dettagli del moto dell'elettrone a causa del principio di indeterminazione.

Il comportamento dell'elettrone è descritto dalla funzione d'onda ψ (si legge psi) dell'equazione di Schrödinger nella quale ogni possibile stato è caratterizzato da quattro parametri corrispondenti ai quattro numeri quantici n , l , m , s del modello di Bohr-Sommerfeld.

I quattro numeri quantici rappresentano i valori che soddisfano matematicamente l'equazione di Schrödinger: non è possibile alcuna analogia con i modelli della realtà a cui siamo abituati, poiché in questa non è rappresentabile il mondo microscopico. Nella meccanica ondulatoria l'elettrone è un quartetto di valori n , l , m , s che soddisfano l'equazione di Schrödinger.

I modelli della fisica moderna non sono più meccanici, ma matematici: ad essi non corrispondono più immagini intuitive legate alle esperienze ed al linguaggio quotidiano.

Elettroni intrappolati

La meccanica ondulatoria interpreta l'elettrone nell'atomo come una nube di probabilità che ha valori massimi in determinate zone intorno al nucleo. Un elettrone confinato a muoversi in una zona piccola di spazio come è quella intorno ad un nucleo è descritto da un'onda stazionaria. Le onde stazionarie, a differenza delle onde progressive, sono caratterizzate dal fatto di avere punti fissi (nodi) e punti di massima ampiezza (antinodi).

Se ragioniamo per analogia, anche un'onda costretta a propagarsi su una corda di lunghezza finita genera per sovrapposizione un'onda stazionaria. Per una corda fissa agli estremi si possono stabilire solo alcuni modi discreti di vibrazione dovuti al fatto che devono sempre esserci due nodi agli estremi della corda. Le lunghezze d'onda permesse sono discrete:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n} \quad (12)$$

dove L è la lunghezza della corda e n un numero intero.

La localizzazione di un'onda su una corda comporta dei limiti sulla lunghezza d'onda. La localizzazione di un'onda materiale significa che una particella è costretta a muoversi in una zona limitata di spazio.

La meccanica ondulatoria porta a conseguenze inaspettate sul comportamento di una particella confinata in una scatola di dimensioni L (come l'elettrone in un atomo) perché la lunghezza d'onda (di De Broglie) di una particella è legata all'energia e alla quantità di moto. La particella non può stare ferma perché a questa situazione corrisponderebbe una lunghezza d'onda infinita. Più la zona limitata è piccola, più veloce deve essere la particella.

L'emissione di raggi β (cioè di elettroni) da parte di nuclei di sostanze radioattive aveva portato in un primo momento a credere che il nucleo fosse fatto di protoni ed elettroni, ma questa condizione esclude che l'elettrone possa essere costretto in una zona di spazio piccola come un nucleo atomico. Non è possibile che un elettrone sia confinato nel nucleo perché altrimenti la sua velocità supererebbe quella della luce.

Invece protoni e neutroni possono essere confinati nel nucleo perché hanno una massa maggiore.

15.14 La radioattività

La scoperta della radioattività avviene accidentalmente nel 1896 da parte di Henry Becquerel che, mentre studiava la fosforescenza dei sali di uranio, scoprì che essi avevano il potere di impressionare una lastra fotografica tenuta al buio. Nello stesso periodo questi risultati sperimentali furono confermati dai coniugi Pierre e Marie Curie con cui Becquerel condivise il premio Nobel nel 1903.

I coniugi **Curie** lavorano con la **pechblenda**, un minerale che contiene l'80% di uranio. Dal decadimento dell'uranio giungono alla scoper-

ta del polonio (chiamato così per ricordare la patria di Marie Curie) e del radio, elemento con particolare attività radiante.

“Vorrei che il radio avesse un bel colore” [...] Il radio ha qualcosa d'altro d'assai più bello che “un bel colore”: esso è spontaneamente luminoso.

Eva Curie, Vita della signora Curie

15.15 Le forze fondamentali in natura

In natura sono state individuate quattro **forze fondamentali**, o interazioni fondamentali, che sono alla base degli scambi di energia tra le particelle e che sono responsabili della struttura dell'Universo: l'interazione gravitazionale, l'interazione elettromagnetica, l'interazione nucleare forte e l'interazione nucleare debole. Per energie dell'ordine dei 100GeV , la forza elettromagnetica e la forza nucleare debole si presentano come un'unica interazione, nota come interazione **elettrodebole**.

Secondo il Modello Standard, le interazioni sono descritte attraverso lo scambio di una o più particelle mediatrici di forza, che sono chiamate bosoni di **gauge**, mediatori oppure quanti del campo d'interazione, e sono dei bosoni (ovvero hanno **spin intero**) vettori (ovvero hanno $\text{spin}=1$, eccetto il gravitone che dovrebbe avere $\text{spin}=2$). Queste particelle, trasportatrici dell'energia dell'interazione, vengono emesse e riassorbite dalle particelle interagenti.

| Interazione | Mediatore | Magnitudine relativa | Andamento asintotico | Raggio d'azione |
|------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Interazione forte | gluone | 10^{38} | r^0 | $1,4 \cdot 10^{-15} m$ |
| Interazione elettromagnetica | fotone | 10^{36} | $\frac{1}{r^2}$ | ∞ |
| Interazione debole | Bosoni W e Z | 10^{25} | $\frac{e^{-Mr}}{r}$ | $10^{-18} m$ |
| Interazione gravitazionale | gravitone | 10^0 | $\frac{1}{r^2}$ | ∞ |

In particolare, la particella mediatrice della forza gravitazionale, il gravitone, è stata finora ipotizzata ma non ancora rilevata da nessun esperimento.

Unificazione delle forze

Nel 1875, Maxwell per la prima volta riconosce che due forze della natura apparentemente diverse, la forza magnetica e la forza elettrica, sono in realtà manifestazioni della stessa interazione fondamentale. Il capolavoro di Maxwell è la formulazione delle 4 equazioni (oggi note appunto come equazioni di Maxwell) che descrivono in maniera unita-

ria e completa tutti i fenomeni elettromagnetici (ad esempio: l'attrazione fra due calamite e la propagazione della luce nel cosmo).

Allo stesso modo nel XX secolo si è scoperto che anche l'interazione elettromagnetica e la forza nucleare debole erano due manifestazioni di un'unica interazione, che prese il nome di interazione **elettro-debole**.

Allo stato attuale delle ricerche, esiste una teoria, nota come Modello Standard, che descrive in modo unitario l'interazione nucleare forte e l'interazione elettro-debole. Il Modello Standard ha ottenuto numerose verifiche sperimentali, anche grazie, tra l'altro, al lavoro del fisico italiano **Carlo Rubbia** (recentemente -fine agosto 2013- nominato Senatore a Vita dal Capo dello Stato Giorgio Napolitano).

Il grande obiettivo della fisica teorica contemporanea è ora quello di integrare l'interazione gravitazionale con le altre, ossia la Relatività Generale con il Modello Standard.

La nuova generazione di macchine acceleratrici dovrebbe consentire di validare il Modello Standard anche per le interazioni forti.

Secondo le moderne teorie di unificazione (ad esempio, la teoria delle stringhe), ad alti livelli energetici (e quindi ad alte temperature) le quattro forze fondamentali si fondono in una sola. Queste condizioni di energia elevata sono proprio previste per i primi istanti dell'Universo: quando questo aveva una età minore di 10^{-43} secondi, le quattro interazioni non erano distinte tra di loro. Con il diminuire della densità, la forza di gravità si separò dalle altre tre. Dopo 10^{-35} secondi tutte le quattro forze erano separate.

Descrizione dell'interazione

Il raggio d'azione e l'intensità sono i due tratti più caratteristici di ciascuna interazione.

Semplificando, il raggio d'azione di un'interazione può essere pensato come la distanza massima alla quale essa è influente. Ad esempio l'interazione gravitazionale ha un raggio d'azione infinito; per questo motivo il Sole esercita la sua forza anche su corpi lontanissimi come Plutone, e qualunque atomo dell'universo esercita una forza, seppur minima, su ogni altro atomo dell'universo. Anche l'interazione elettromagnetica ha raggio d'azione infinito, mentre interazione forte ed interazione debole hanno raggi d'azione finiti (e particolarmente piccoli, se raffrontati con le scale umane).

L'intensità fornisce una misura dei rapporti di forza tra le interazioni di diversa natura.

15.16 Le particelle elementari: leptoni e quark

Il modello STANDARD

Il Modello standard è una teoria fisica che riassume tutte le attuali conoscenze nel campo delle particelle elementari e delle forze che ne regolano le interazioni fondamentali. Tutte le interazioni osservate in natura possono spiegarsi mediante lo studio del comportamento di un

certo numero di particelle elementari. Poiché la materia è composta dalle stesse particelle elementari, la base dello studio delle interazioni consiste nell'analisi delle leggi che regolano l'azione mutua tra le particelle elementari; tale analisi si semplifica considerando che tutte le forze conosciute si possono ridurre a quattro tipi fondamentali i quali dovrebbero spiegare tutte le forze che si esercitano tra le diverse parti dell'Universo.

Sino al sec. XIX si conoscevano solo due di queste interazioni, quella elettromagnetica e quella gravitazionale. Alla velocità di propagazione di queste interazioni, supposta infinita dalla fisica newtoniana, fu assegnato dalla teoria della relatività di Einstein un valore uguale a quello della velocità della luce nel vuoto.

Per quanto riguardava il modo di propagazione, già nel sec. XIX la teoria classica dei campi assumeva che le forze si propagassero attraverso campi specifici, la cui struttura poteva spiegare tutti i fenomeni naturali. Nel sec. XX la meccanica quantistica e il principio di dualità onda-corpuscolo permettevano di spiegare tali campi in termini di interazioni di particelle (i **bosoni**) il cui scambio tra i corpi produce la propagazione dell'interazione.

Storicamente il secondo tipo di interazione studiata fu l'interazione elettromagnetica. Il suo nome deriva dal fatto che elettricità e magnetismo sono due diversi aspetti dello stesso fenomeno, peraltro più complesso della gravitazione, non solo per l'esistenza di due tipi di cariche elettriche, ma anche per la dipendenza di queste interazioni dalla velocità delle particelle cariche che ne sono responsabili.

Successivamente la scoperta del **neutrone** implicò la considerazione delle interazioni forti aventi caratteristiche assai diverse da quelle delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche. Le interazioni forti infatti sono indipendenti dalla carica elettrica e sono le forze responsabili dell'esistenza stessa dei nuclei, che in assenza di tali forze tenderebbero a frantumarsi a causa della repulsione *coulombiana* tra i protoni contenuti nel limitato volume nucleare. Il decadimento del neutrone e l'ipotesi del neutrino indussero, infine, Fermi a introdurre un quarto tipo di interazione: le interazioni deboli, di intensità inferiore a quelle forti, ma sensibilmente superiore a quella delle interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche.

Tali interazioni governano il decadimento di molte particelle che interagiscono fortemente e sono responsabili del decadimento di certi nuclei radioattivi. L'agente responsabile delle interazioni deboli è rimasto sconosciuto fino agli inizi degli anni Ottanta; fino a che nel 1983 il fisico italiano C. Rubbia con un gruppo di ricercatori del **CERN di Ginevra** scoprì le particelle attraverso le quali interagiscono le interazioni deboli, individuandole nei bosoni **W** e **Z₀**.

E' proprio cercando di mettere in ordine le nuove scoperte, che i fisici nucleari iniziarono a costruire il Modello standard, con l'intento di riuscire a spiegare tutte le interazioni con un unico modello. Sotto questo profilo però il Modello standard presenta dei limiti che ostacolano il raggiungimento dello scopo ultimo della fisica moderna. In primo luogo, pur avendo riunificato la forza elettromagnetica e quella nucleare debole (forza **elettrodebole**), il Modello standard :

- non include la forza di gravità, che è l'interazione di più debole intensità;
- non spiega lo spettro delle masse delle particelle;
- in esso compaiono diversi parametri arbitrari;
- non riunisce in un'unica teoria l'interazione nucleare forte e la forza elettrodebole, che la teoria della grande unificazione spiega con l'ipotesi che queste due forze a temperature elevate si equivalgono;
- per costruire il modello è necessario introdurre i bosoni di Higgs che gli odierni acceleratori di particelle non sono ancora in grado di produrre.

Fermioni e Bosoni

Innanzitutto, bisogna spiegare una legge, chiamata il **principio di esclusione di Pauli**, secondo cui

non possono esistere nello stesso posto nello stesso tempo due particelle nello stesso stato

(identico spin, identica carica di colore, identico momento angolare, etc.).

I fisici adoperano questa legge per dividere le particelle in due grandi classi:

- le particelle soggette all'esclusione di Pauli -- i **fermioni**--,
- e
- le particelle non soggette all'esclusione di Pauli -- i **bosoni**.

| Fermioni | | Bosoni | |
|------------------|-----------------------|--|---|
| Leptoni Quark | Spin $\frac{1}{2}$ | 1 | Bosoni mediatori $\gamma W^+ W^- Z g$ |
| Barioni (qqq) | | $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ | 0, 1, 2, ... |
| | | | Mesoni (q \bar{q}) |

Figura 380 Fermioni e bosoni

Un **fermione** è qualunque particella il cui momento angolare intrinseco (spin) ha un valore multiplo dispari di $1/2$ ($1/2, 3/2, \dots$), misurato in unità \hbar (h-tagliato). Come conseguenza del loro momento angolare, tutti i fermioni obbediscono al principio di esclusione di Pauli.

Le particelle materiali fondamentali (**quark** e **leptoni**), come anche la maggior parte delle particelle composte (come protoni e neutroni) sono fermioni. Perciò, secondo il principio di esclusione di Pauli, queste particelle non possono coesistere nello stesso luogo. E questa, per la materia in condizioni ordinarie, è una proprietà importantissima!

I bosoni sono le particelle il cui spin ha misura intera (0, 1, 2...) misurato in unità \hbar .

Sono **bosoni**:

- Le particelle mediatrici di tutte le interazioni fondamentali;
- Le particelle composte da un numero pari di fermioni, come ad esempio i **mesoni**.

Il nucleo di un atomo può essere un bosone oppure un fermione: dipende dal numero dei suoi protoni e neutroni (se è pari sarà un bosone, se è dispari un fermione). Questa proprietà spiega lo strano comportamento dell'elio, che, a bassissime temperature, è un superfluido, per cui, tra le altre cose, non ha viscosità: i suoi nuclei sono bosoni e possono passare uno attraverso l'altro.

Leptoni

Un **leptone** (dal greco *lepton*, luce) è una particella subatomica che non è composta da quark. I leptoni sono gli elettroni, i muoni, le particelle tau, e i loro rispettivi neutrini.

Tutti i leptoni conosciuti hanno carica negativa o neutra. Ci sono sei tipi di leptoni: tre con carica negativa e tre con carica neutra.

Elettrone

delle tre particelle che costituiscono gli atomi, è di gran lunga il più leggero ed il più piccolo, ed il suo raggio è così piccolo che non si è ancora riusciti a misurarlo; per questo diciamo che è puntiforme. Sappiamo anche che è privo di struttura interna, a differenza del neutrone e del protone, cioè è una particella elementare in quanto non composta da altre più piccole, come per gli adroni.

Nell'uso comune, l'elettrone viene abbreviato con il simbolo e^- . La sua carica elettrica è negativa.

Si identifica come carica elementare e la carica dell'elettrone, e la carica di tutte le altre particelle viene riferita a questa. Esiste una fondamentale legge della fisica: la carica elettrica di una particella è sempre un multiplo intero, segno a parte, della carica elementare.

L'elettrone, essendo un leptone, risente delle interazioni deboli ed elettromagnetiche, ma non delle interazioni forti.

Neutrino

è una particella elementare. Ha spin $1/2$ e quindi è un fermione. La sua massa è molto piccola, anche se recenti esperimenti hanno mostrato che è diversa da zero (da 100.000 a 1 milione di volte inferiore a quella dell'elettrone). Poiché i neutrini non hanno carica elettrica ne carica di colore, interagiscono solo attraverso la forza nucleare debole e non sentono l'interazione nucleare forte e la forza elettromagnetica (in quanto possiedono una massa, sono sensibili anche alla gravità, ma avendo una massa piccolissima ed essendo la gravità la forza più debole, questa interazione è trascurabile).

Poiché il neutrino interagisce debolmente, quando si muove attraverso la materia le sue possibilità di interazione sono molto piccole. Occorrerebbe un anno luce di piombo per bloccare la metà dei neutrini che lo attraversano. I rilevatori di neutrini tipicamente contengono centi-

naia di tonnellate di materiale, costruito in modo tale che pochi atomi al giorno interagiscano con i neutrini entranti. Nelle supernova collassanti, la densità del nucleo diventa abbastanza alta (10^{14} g/cm³) da permettere la rilevazione dei neutrini prodotti.

Esistono tre tipi differenti di neutrino: il neutrino elettronico ν_e , il neutrino **muonico** ν_μ e il neutrino **tau** ν_τ , corrispondenti ai rispettivi leptoni del modello standard (**eletttrone**, **muone** e **tauone**).

L'esistenza del neutrino venne postulata da Wolfgang Pauli per spiegare lo spettro continuo del decadimento beta.

Flussi massicci di neutrini possono oscillare tra i tre sapori, in un fenomeno conosciuto come oscillazione dei neutrini (che fornisce una soluzione al problema dei neutrini solari e a quello dei neutrini atmosferici).

Alcuni anni fa si pensava che i neutrini potessero essere ritenuti responsabili per la materia oscura, ma con l'attuale conoscenza della loro massa possono contribuire solo per una frazione insignificante.

Muoni

in base al modello standard delle particelle fisiche, muone (conosciuto anche come mesone **mu**) è il nome collettivo di due particelle fondamentali semistabili, una con carica positiva e una con carica negativa. I muoni hanno una massa 207 volte superiore a quella dell'eletttrone (105.6 MeV) e uno spin di 1/2. Sia gli elettroni che i muoni appartengono alla famiglia dei fermioni detta leptoni. Per questo motivo, un muone con carica negativa può essere pensato come un eletttrone estremamente pesante. I muoni vengono indicati con μ_- e μ_+ a seconda della carica.

Sulla Terra, i muoni sono creati dal decadimento di pioni carichi. I pioni vengono creati nell'atmosfera esterna dalla radiazione cosmica e hanno un tempo di decadimento molto breve, pochi nanosecondi. Anche i muoni hanno vita breve, il loro tempo di decadimento è di 2,2 microsecondi. Comunque, i muoni hanno alta energia, quindi gli effetti di dilazione del tempo della relatività speciale li rendono facilmente rilevabili sulla superficie terrestre.

Tauone

la particella Tau (o **tauone**) è una particella elementare con carica negativa e una massa di 1.777MeV . È associata con un antiparticella e un neutrino. È una particella della materia di terza generazione, e decade rapidamente in una particella stabile. A causa della conservazione del numero tauonico, detta anche conservazione del numero leptonico (l'oscillazione dei neutrini viola questa legge), un neutrino tau viene creato quando un tauone decade in un leptone più leggero (muone o eletttrone). Fatta eccezione per la sua massa più grande e per la sua instabilità il tauone è molto simile all'eletttrone.

I Quark

Nella fisica delle particelle i quark sono una delle due famiglie di particelle subatomiche, che si ritiene siano fondamentali e indivisibili (l'altra è quella dei leptoni). Gli oggetti composti da quark sono conosciuti come **adroni**; esempi ben noti sono i protoni e i neutroni. Si ritiene che i quark non esistano da soli ma solo in gruppi di due o tre (e, più recentemente, cinque); tutte le ricerche di quark singoli, fin dal 1977 hanno avuto esito negativo. I quark si differenziano dai leptoni, l'altra famiglia di particelle elementari, per la carica elettrica. I leptoni (come l'elettrone o i muoni) hanno carica intera ($+1$, 0 o -1) mentre i quark hanno carica $+2/3$ o $-1/3$ (gli antiquark hanno invece carica $-2/3$ o $+1/3$).

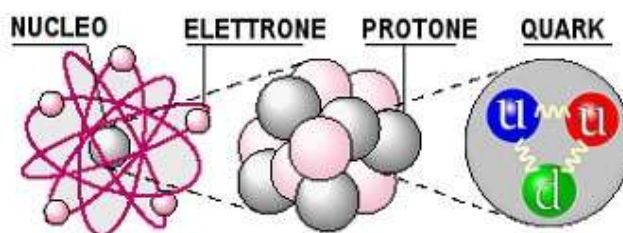


Figura 381 nel nucleo atomico

Tutti i quark hanno spin $1/2h$. Sei differenti tipi di quark sono conosciuti; è in corso la ricerca per i quark di quarta generazione. A causa della estrema intensità della forza nucleare forte, i quark non si trovano mai liberi. Sono sempre legati in barioni e mesoni. Quando si cerca di separare i quark, come avviene negli acceleratori di particelle, la forza nucleare forte aumenta con l'aumentare della distanza tra i quark. A un certo punto diventa più favorevole, dal punto di vista energetico, creare altri due quark per cancellare la forza crescente, e due nuovi quark (un quark e un antiquark) spuntano dal nulla. Questo processo viene detto **adronizzazione** o **fragmentazione**, ed è uno dei processi meno compresi della fisica delle particelle. Come risultato della fragmentazione, quando i quark vengono prodotti negli acceleratori, invece di vedere l'individuale quark nei rilevatori, gli scienziati vedono “getti” di molte particelle color-neutre (mesoni e barioni) impacchettate assieme.

La teoria dietro i quark venne avanzata per la prima volta dai fisici Murray Gell-Mann e George Zweig, che trovarono di poter spiegare le proprietà di molte particelle considerandole composte da questi quark elementari. Il nome quark deriva da “*three quarks for Muster Mark*”, una frase senza senso contenuta nel romanzo *Finnegans Wake* di James Joyce.

15.17 L'unificazione delle forze: Teoria del tutto

In fisica la **Teoria del Tutto** (in inglese **TOE = Theory of Everything**) è considerata il “Sacro Graal” della fisica teorica e corrisponde ad una teoria che unifichi le quattro forze fondamentali (gravitazionale, elettromagnetica, nucleare debole, nucleare forte) e che comprenda le centinaia di particelle presenti del Modello Standard, l'attuale schema di riferimento principale in fisica. La Teoria del Tutto dovrebbe spiegare interamente e collegare assieme tutti i fenomeni fisici conosciuti, quindi dovrebbe essere in grado di conciliare la Fisica Quantistica con la Teoria della Relatività, che sembrano un po' come l'olio e l'acqua, cioè difficilmente compatibili tra loro.

Il primo passo verso la Teoria del Tutto dovrebbe essere l'unificazione delle tre forze non-gravitazionali (elettromagnetica, nucleare debole e forte) in una unica forza; tale unificazione è nota come GUT (Grand Unification Theory = Teoria della Grande Unificazione). L'unificazione della gravità con le altre tre forze darebbe la TOE, la Teoria del Tutto.

Einstein spese tutte le sue energie per arrivare ad una tale teoria, ma morì senza riuscire nell'impresa. Molte teorie sono state candidate per essere la teoria finale, ma nessuna ha ancora avuto delle reali conferme sperimentali; la candidata attualmente più quotata sembra essere la M-Teoria di Edward Witten, che unifica le cinque teorie delle Superstringhe (tipo I, IIA, IIB, eterotica-E, eterotica-O) e la teoria della Supergravità ad 11 dimensioni riuscendo nel difficile compito di conciliare la gravità con le altre forze fondamentali.

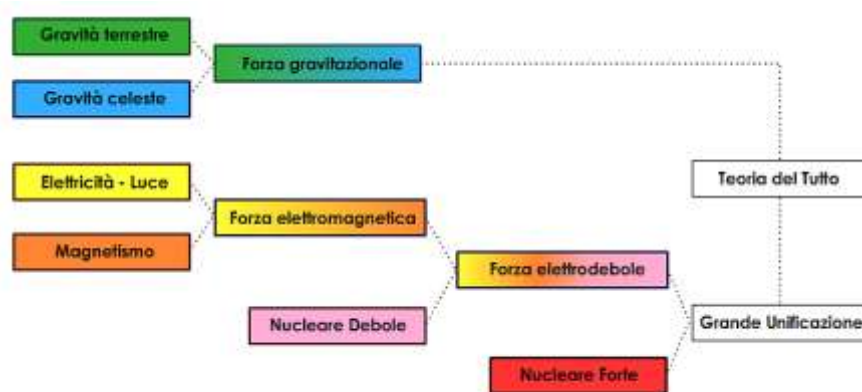


Figura 382 Teoria del tutto

E' molto interessante notare che l'unificazione delle forze fondamentali non trova spazio in un Universo con 3 dimensioni spaziali e risulta necessario introdurre nuove dimensioni dello spazio definite “extra”, fino a ieri viste dai fisici come ipotesi di fantascienza ed oggi accettate come più che probabili!



Figura 383 Acceleratore di particelle del Cern di Ginevra

15.18 Il Bosone di Higgs

CURIOSITA'

E' stato il primo caso nella storia che uno scienziato prendesse il premio Nobel grazie al lavoro di centinaia di altri fisici, di ingenti investimenti in danaro di tanti Stati europei e non solo, per riprodurre degli esperimenti che confermassero una teoria enunciata 50 anni prima.

Altra casualità, non di poco conto, è che Higgs fosse ancora vivo cinquantanni dopo aver enunciato tali ipotesi, per poter così ricevere e ritirare il tanto prestigioso premio.

Risulta opportuno fare una distinzione fra meccanismo di Higgs e **bosone di Higgs**.

Introdotti nel 1964, il meccanismo di Higgs fu teorizzato dal fisico britannico Peter Higgs e indipendentemente da François Englert, Robert Brout (questi due studiosi lavorando su un'idea di Philip Anderson), G. S. Guralnik, C. R. Hagen e T. W. B. Kibble (tutti questi fisici, rimasti relativamente in ombra rispetto a Peter Higgs, sono stati premiati nel 2010 per il loro contributo), ma solo la pubblicazione di Higgs citava esplicitamente, in una nota finale, la possibile esistenza di un nuovo bosone. Egli aggiunse tale nota dopo che una prima stesura era stata rifiutata dalla rivista *Physics Letters*, prima di reinviare il lavoro a *Physical Review Letters*.

Il bosone e il meccanismo di Higgs sono stati successivamente incorporati nel Modello standard, in una descrizione della forza debole come teoria di gauge, indipendentemente da Steven Weinberg e Abdus Salam nel 1967.

Il bosone di Higgs è dotato di massa propria, il cui valore non è previsto dal Modello standard. Misure indirette dalle determinazioni dei parametri elettro-deboli danno indicazioni che i valori più probabili siano comunque relativamente bassi, in un intervallo accessibile al Large Hadron Collider presso il **CERN**. Molti modelli supersimmetrici predicono inoltre che il valore più basso possibile della massa del bosone di Higgs sia intorno a 120 GeV o meno, mentre la teoria dà un limite massimo di circa 200 GeV ($\approx 3,5 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$).

Ricerche dirette effettuate al **LEP (Large Electron-Positron Collider)**. E' stato uno dei più grandi acceleratori di particelle mai costruito) hanno permesso di escludere valori inferiori a $114,5 \text{ GeV}$.

Al **2002** gli acceleratori di particelle hanno raggiunto energie fino a 115 GeV . Benché un piccolo numero di eventi che sono stati registrati potrebbero essere interpretati come dovuti ai bosoni di Higgs, le prove a disposizione sono ancora inconcludenti. A partire dal 2001 la ricerca del bosone di Higgs si è spostata negli Stati Uniti, studiando le collisioni registrate all'acceleratore Tevatron presso il Fermilab. I dati lì raccolti hanno consentito di escludere l'esistenza di un bosone di Higgs con massa compresa tra 160 e 170 GeV . Simulazione Geant4 di un evento in un acceleratore di particelle che dovrebbe generare un bosone di Higgs

Come detto, ci si aspetta che **LHC**, che dopo una lunga pausa ha iniziato a raccogliere dati dall'autunno 2009, sia in grado di confermare l'esistenza di tale bosone.

Il **13 dicembre 2011**, in un seminario presso il *Cern*, era stata illustrata una serie di dati degli esperimenti ATLAS e CMS, coordinati dai fisici italiani Fabiola Gianotti e Guido Tonelli, che individuavano il bosone di Higgs in un intervallo di energia fra i 124 e 126 GeV con una probabilità prossima al 99%.

Benché tale valore fosse sicuramente notevole, la comunità scientifica richiede che sia raggiunto un livello di confidenza, ossia una possibilità di errore dovuto al caso (nella fattispecie a fluttuazioni quantistiche),

non superiore a 6 parti su 10 milioni, corrispondente a una probabilità del 99,99994%, pari a 5 deviazioni standard, prima di poter annunciare ufficialmente una scoperta.

Il **5 aprile 2012**, nell'anello che corre con i suoi **27 km** sotto la frontiera tra Svizzera e Francia, è stata raggiunta l'energia massima mai toccata di 8.000 miliardi di elettronvolt ($8TeV$).

Gli ulteriori dati acquisiti hanno permesso, il **4 luglio 2012**, l'annuncio da parte del CERN della scoperta di una particella compatibile con il bosone di Higgs, la cui massa risulta intorno ai 126 GeV per l'esperimento ATLAS[16] e ai $125,3 GeV$ per l'esperimento CMS; l'accuratezza delle misure ha raggiunto la precisione richiesta di 5 deviazioni standard.

Il Large Hadron Collider è rimasto inattivo tra il 2013 e il 2015 a causa di delicati lavori di manutenzione, prima di riprendere la fase conclusiva degli esperimenti raggiungendo la massima energia di $14 TeV$. Molti fisici teorici si aspettano che una nuova fisica emerga oltre il Modello standard alla scala del TeV , a causa di alcune proprietà insoddisfacenti del modello stesso. In particolare i ricercatori (tra cui molti italiani, secondi finanziatori e seconda comunità scientifica del Cern) sperano di verificare l'esistenza delle particelle più sfuggenti della materia e comprendere la natura della materia e dell'energia "oscure", che costituiscono rispettivamente il 23% e il 72% dell'universo (l'energia e la materia visibili ne costituiscono solo il 5%).

Il bosone di Higgs è noto al grande pubblico e ai media con la denominazione di "Particella di Dio", derivante dal titolo del libro di fisica divulgativa di Leon Lederman "The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?", pubblicato nel 1993. Tale titolo derivò da un cambiamento da parte dell'editore del soprannome di "Goddamn particle" (particella maledetta), originalmente scelto dall'autore in riferimento alla difficoltà della sua individuazione.

La successiva errata traduzione di "**God particle**" in "*particella di Dio*", in luogo di "particella Dio", ha aggiunto un'ulteriore storpiatura. *Higgs non condivide questo soprannome*, in quanto lo trova potenzialmente offensivo nei confronti delle persone di fede religiosa.

15.19 *Gli acceleratori di particelle*

In fisica delle particelle un acceleratore di particelle è una macchina il cui scopo è quello di produrre fasci di ioni o particelle subatomiche (elettroni, positroni, protoni, antiprotoni etc.) con "elevata" energia cinetica. Tali macchine vengono usate principalmente per:

- scopi industriali (60%) (impiantazione di ioni, sterilizzazione);
- medici (35%) (produzione di isotopi radioattivi, terapia adronica, etc.), studio della struttura dei materiali (ad esempio sfruttando la radiazione di sincrotrone);
- per scopi di ricerca (5%) in fisica delle particelle (un fascio di particelle di elevata energia permette di sondare oggetti di dimensioni molto piccole).

I metodi per accelerare particelle sono basati sull'uso di campi elettrici e magnetici, di cui i primi forniscono energia alle particelle accelerandole e i secondi servono a curvarne la traiettoria sfruttando la forza di Lorentz (ad esempio negli acceleratori circolari: ciclotrone e sincrotrone) o a correggere dispersioni spaziali e di impulso dei fasci accelerati.

Il principio fisico della generazione di nuove particelle è quello semplice degli urti ad elevata energia: facendo collidere tra di loro particelle ad alta energia cinetica, ovvero prossime alla velocità della luce c , il prodotto (sintesi) è, per l'uguaglianza tra massa ed energia, una nuova particella a massa/energia superiore che eventualmente decade in altre particelle figlie. Dall'analisi di tali decadimenti è possibile risalire alle caratteristiche della particella madre.

In generale sono possibili due modi per rilevare nuove particelle subatomiche:

- rivelatori passivi che sfruttano le collisioni naturali ad alta energia tra i raggi cosmici ad alta energia e l'atmosfera terrestre rilevandone i prodotti ovvero i decadimenti: questa è l'ottica in cui si muove l'Astrofisica particellare. Queste collisioni sono però poco frequenti rispetto a quelle producibili in laboratorio tramite acceleratori di particelle.
- uso di acceleratori di particelle cariche per produrre fasci di particelle ad altissima energia in quantità degne di nota, fatti poi collidere tra loro rilevandone i prodotti in appositi rivelatori (collisioni artificiali).

15.20 Teoria della relatività di Einstein

Lo studio delle particelle elementari e la meccanica quantistica avevano chiarito moltissime cose della natura infinitesimale della realtà, ciò che restava fuori era la gravità (praticamente ininfluenza a quel livello) e le meccaniche dell'infinitamente esteso, che invece si sono potute comprendere grazie al genio di Albert Einstein e alla sua Teoria della Relatività.

La Teoria della Relatività di Einstein ha due formulazioni, una detta “**ristretta**” o “**speciale**” (in quanto limitata a delle condizioni ben precise, cioè ai sistemi che non presentano accelerazioni) ed una “generale”. La formulazione di questa teoria, con le successive conferme sperimentali, ha cambiato per sempre la nostra concezione dello spazio, del tempo, della materia e dell'energia - in sostanza l'intera visione della realtà - sfortunatamente è per lo più misconosciuta al livello ordinario della società.

Di cosa si occupa la Teoria della Relatività? A dispetto del nome, si occupa di dimostrare che le leggi fisiche sono universali e che si presentano nella stessa forma a tutti gli osservatori. Einstein avrebbe voluto chiamarla “**Teoria dell'Invarianza**” (*Invarianten theorie*) ma il termine di “relatività”, proposto da Max Planck, prese il sopravvento. Cionondimeno, per poter dimostrare l'invarianza delle leggi fisiche in

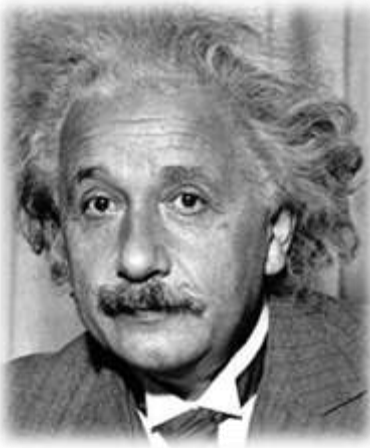


Figura 384 Albert Einstein

sistemi in movimento relativo tra loro è indispensabile prendere in considerazione delle trasformazioni matematiche che li possano correlare, questo in fisica è detto appunto “relatività”.

Il concetto di relatività, infatti, nasce per risolvere il problema di come fanno due persone a conciliare le rispettive osservazioni quando una delle due si muove e l'altra no.

La prima formulazione si deve a Galileo Galilei (1564-1642) nel “Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo” ed afferma che le leggi della fisica sono identiche in tutti i sistemi inerziali.

Nota 1

I sistemi inerziali sono tutti i sistemi per cui è valido il principio di inerzia (o primo principio della dinamica), il quale afferma che ogni corpo non soggetto a forze preserva nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme. In altre parole se su un corpo non agisce alcuna forza, esso non può subire alcuna accelerazione.

In un sistema inerziale le leggi della meccanica classica non differiscono rispetto ad un sistema statico: se un treno potesse viaggiare con moto uniforme, rettilineo e senza scossoni, un viaggiatore chiuso in una cabina, senza vista sull'esterno, non sarebbe in grado di dire se il treno è fermo o in movimento, infatti: nessun esperimento eseguito all'interno di un dato sistema di riferimento può evidenziare il moto rettilineo ed uniforme dello stesso sistema.

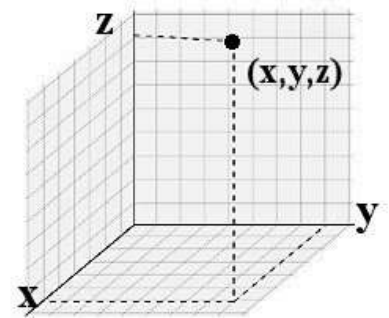
Galileo definì le equazioni che permettono di passare dalla descrizione di un evento da un sistema inerziale ad un altro, sono dette “trasformazioni di Galileo” e una delle conseguenze più importanti di queste trasformazioni è la composizione della velocità: una palla lanciata da fermi ha una velocità v_1 , se lancio la stessa palla, con la stessa velocità, da una macchina in rapido movimento (definiamo la velocità della macchina v_2 , la mia palla avrà come velocità finale $v_1 + v_2$, dal che se ne deduce che se colpisce una persona a terra potrà fargli molto più male!

Un'importante conseguenza del principio di relatività è che il concetto di “**corpo in quiete**” è assolutamente relativo al sistema di riferimento, non è un concetto assoluto. Non esiste, sul piano fisico, una “**quiete assoluta**”.

Vediamo adesso in che modo Einstein fece evolvere il principio di relatività galileiano.

Il fisico e matematico scozzese James Clerk Maxwell (1831-1879) riuscì a spiegare tutti i fenomeni elettrici e magnetici, nel 1873, tramite quattro eleganti equazioni, deducendo - per via teorica - che non esiste un campo elettrico separato dal campo magnetico, ma che entrambi sono manifestazioni di un'unica realtà fisica, la forza elettromagnetica.

Ecco però comparire un problema: pur essendo verificata sperimentalmente la validità delle equazioni di Maxwell (Hertz, 1895), si vide che nel passare da un sistema di riferimento ad un altro non era più rispettato il principio di invarianza galileiano (cioè la relatività), senza entrare in dettagli tecnici era come se osservatori diversi sperimentassero leggi dell'elettromagnetismo diverse ... e ciò era imbarazzante!



Poteva esistere un'asimmetria tra l'elettrodinamica e la meccanica? Un'asimmetria per cui il principio di relatività non era applicabile ai fenomeni elettromagnetici?

I fisici di fine '800 tentarono di risolvere il paradosso in questo modo: poiché il principio di relatività afferma che non esiste un sistema di riferimento inerziale privilegiato, si assunse allora che per i fenomeni elettromagnetici dovesse invece esistere un sistema privilegiato: l'etere (un mezzo elastico permeante tutto l'universo in grado di trasportare le onde luminose). Di fatto dell'etere non vi era traccia e gli esperimenti effettuati da Albert Michelson e Edward Morley nel 1887 per dimostrarne l'esistenza ebbero esito negativo.

Einstein fu in grado di risolvere il problema assumendo che la velocità della luce fosse una costante universale e, quindi, che se la luce aveva sempre la stessa velocità, per mantenere il principio di relatività era necessario che fossero lo spazio e il tempo a variare: in un razzo che viaggiasse a velocità vicine a quelle della luce gli astronauti al suo interno sperimenterebbero le stesse leggi fisiche e gli stessi fenomeni di quando sono fermi, solo che dall'esterno si percepirebbe una contrazione spaziale dell'astronave ed un rallentamento del tempo (come nel famoso "paradosso dei gemelli").

Nota 2

L'assunto della velocità della luce come costante deriva direttamente dalle equazioni di Maxwell (dove la velocità della luce nel vuoto è

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

e sia ϵ_0 che μ_0 sono appunto costanti universali (la prima è la “**costante dielettrica**”, la seconda è la “**permeabilità magnetica del vuoto**”).

Questa relazione rende ragione del fallimento dell'esperimento di Michelson e Morley il cui scopo era proprio quello di misurare diverse velocità della luce nelle varie direzioni spaziali - confermando così la presenza dell'etere - ma tali differenze non vennero trovate.

La Teoria della Relatività Ristretta di Einstein (1905) si basa quindi sui seguenti due postulati fondamentali:

1. Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Non esiste un sistema inerziale privilegiato (Principio di relatività).

2. La velocità della luce nel vuoto ha lo stesso valore c in tutti i sistemi inerziali (Principio della costanza della velocità della luce).

Nella relatività di **Galileo** il tempo è una costante e dunque le velocità sono relative (si possono, infatti, sommare o sottrarre), Einstein si rese invece conto che se la velocità della luce è una costante allora è il tempo che deve essere relativo! Questa è una vera e propria rivoluzione concettuale!

Valgono così le relazioni, dette **trasformazioni di Lorentz**:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{e} \quad t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

dove m_0 e t_0 sono rispettivamente massa da fermo e il tempo misurato dall'orologio nel sistema di riferimento fermo.

Quando invece $v \ll c$ di fatto le formule (13) si riducono in:

$$t \approx t_0 \quad \text{e} \quad m \approx m_0 \quad (14)$$

essendo il rapporto $v^2/c^2 \approx 0$.

Le relazioni (14) confermano la validità delle leggi enunciate da Galileo, a patto di avere velocità molto inferiori a quelle della luce ($v \ll c$).

Quando invece $v \approx c$ il rapporto $v^2/c^2 \approx 1$ da cui: $1 - v^2/c^2 \approx 0$.

In tale situazione **sia la massa che il tempo tendono all'infinito**; Daremo maggiore compiezza con l'introduzione delle Trasformazioni di Lorentz.

Un'altra innovazione è che spazio e tempo sono visti nella Relatività Ristretta come un'unica entità, di modo che passando da un sistema di riferimento inerziale ad un altro, lo spazio ed il tempo cambiano di conseguenza secondo delle equazioni matematiche dette trasformate di Lorentz. Mentre prima per definire un punto P in una regione dello spazio si usavano le coordinate $P(x,y,z)$ adesso necessitiamo delle coordinate $P(t,x,y,z)$ per identificare lo stesso punto in una regione dello spazio-tempo.

Un'altra fondamentale conseguenza della Relatività Ristretta riguarda il concetto di massa e di energia. Secondo la meccanica classica un corpo possiede una energia quando è in movimento, altrimenti la sua energia è nulla. Tramite la notissima formula:

$$E = m \cdot c^2 \quad (15)$$

Einstein afferma che un corpo **possiede energia** anche quando è in quiete, un'energia equivalente alla sua massa moltiplicata al quadrato della velocità della luce. In pratica

la massa e l'energia sono solo due aspetti diversi di una medesima realtà



Figura 385 varianza del tempo

per cui l'una può trasformarsi nell'altra (ne abbiamo tristemente avuto prova con la bomba atomica utilizzata in Giappone a conclusione del secondo conflitto mondiale nel XX secolo).

Dalla relatività speciale a quella generale

La relatività speciale einsteiniana estende quella galileiana a tutte le leggi della fisica, con il limite però di far riferimento ai soli sistemi inerziali. Per eliminare questa limitazione, nel 1915, Einstein generalizzò la sua teoria per includere i sistemi accelerati (non inerziali) facendo delle ingegnose comparazioni tra l'accelerazione e la gravità. Einstein si rese conto che in un sistema di riferimento uniformemente accelerato (vedi nella figura sotto il razzo in movimento, l'immagine sulla destra) non si hanno percezioni differenti rispetto allo stesso sistema sottoposto ad un campo gravitazionale (immagine del razzo sulla sinistra), si crea infatti un campo gravitazionale apparente. Questo significava che gravità ed accelerazione erano in qualche modo analoghe (si parla di “principio di equivalenza” secondo cui massa inerziale = massa gravitazionale); questa intuizione diventa, per Einstein, la chiave per mettere in relazione sistemi accelerati e non.



Figura 386 a razzo fermo ed in accelerazione, l'astronauta percepisce la medesima forza su di lui.

“Nel 1908, mentre cercavo di generalizzare la Teoria della Relatività speciale, mi venne in mente il pensiero più felice della mia vita nella seguente forma. Pensate a una persona che cade dal tetto di casa sua - pensateci con tutta calma. Costui sta prendendo delle chiavi, degli oggetti dalla sua tasca, e sta cercando di gettarli via, di lasciarli cadere. Cosa accade? Essi si mettono a fluttuare attorno a lui, senza cadere distanti, benché cadano anch'essi. Così, mentre uno sta cadendo sperimentalmente, non potete trovare campi gravitazionali”.

Albert Einstein

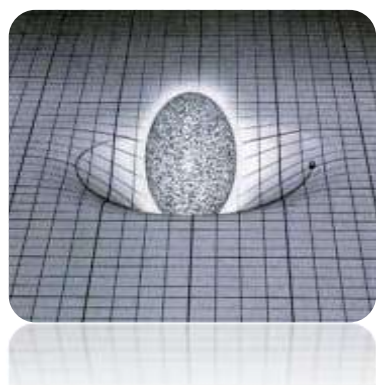


Figura 387 Curvatura dello spazio-tempo

Einstein ipotizza che un campo gravitazionale sia l'equivalente ad un sistema di riferimento accelerato (non inerziale, dunque), in tale campo lo spazio-tempo risulta incurvato dalle masse che lo generano, imprimendo così un'accelerazione agli oggetti che sono nelle vicinanze.

I sistemi di riferimento non inerziali vengono conglobati nella Teoria della Relatività come una generalizzazione di quelli inerziali in presenza di campo gravitazionale.

Lo spazio-tempo non è più concepito come piatto ma risulta essere modellato dalla presenza di oggetti massivi (ad es. la Luna gira attorno alla Terra perché attratta dalla curvatura che la Terra stessa genera nello spazio-tempo).

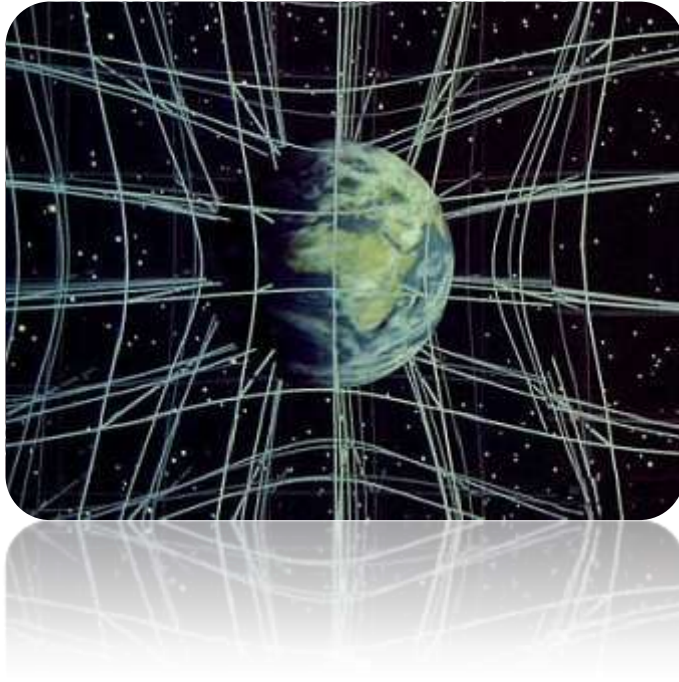


Figura 388 per comodità di rappresentazione la curvatura spazio-temporale viene spesso rappresentata da una griglia bidimensionale, in realtà tutte le 4 dimensioni sono curvate (t, x, y, z)

In questo modo il principio di relatività diventa il seguente:

“ Tutti i sistemi di coordinate sono equivalenti per principio, per formulare le leggi generali della natura! ”

Grazie ad Einstein è stato possibile formulare le equazioni del campo gravitazionale e porre le fondamenta della moderna cosmologia.

La prima conferma sperimentale della Relatività Generale avvenne nel 1919 quando Arthur Eddington, durante un'eclissi solare, fotografò delle stelle vicine al bordo del Sole la cui localizzazione era stata deviata dalla massa del Sole stesso. A posteriori sembra però che Eddington fece degli errori nelle misurazioni, una conferma probante riguardò una particolarità dell'orbita di Mercurio che la teoria della gravitazione di Newton non poteva spiegare. Ad oggi sono state prodotte ulteriori prove, tali da farci concludere che la Relatività Generale sia una teoria corretta.

15.21 Trasformazioni di Lorentz

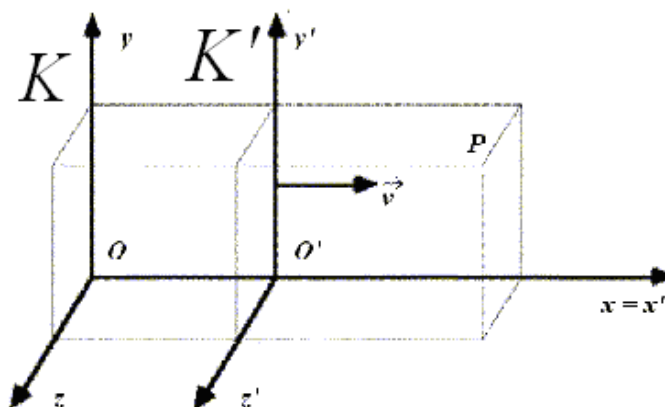
Le scoperte di Einstein crearono un fermento mai visto da secoli. La rivoluzione da lui operata era pari a quella copernicana: ora l'universo andava visto in un modo affatto nuovo.

Certo, quando si viaggia in automobile ad una velocità di “soli” 144 Km/h , sette milioni e mezzo di volte più piccola di quella della luce, la percezione del tempo o le misure lineari delle persone a bordo non cambiano in modo apprezzabile, ma se si costruisce un sincrotrone per lo studio delle particelle subatomiche si deve tenerne ben conto!

Per descrivere le differenze nel moto dovute alla dilatazione dei tempi e alla contrazione delle lunghezze si deve ricorrere ad un nuovo sistema di coordinate. Il vecchio sistema galileiano, basato su lunghezze e tempi assoluti, era assai semplice ma, come questa unità cercherà di mostrare, assolutamente inadatto a descrivere i fenomeni studiati dalla meccanica relativistica.

Consideriamo un sistema di assi cartesiani ortogonali, ed un altro che si sposta rispetto ad esso con velocità costante v in modo che gli assi x e x' coincidano scivolando l'uno sull'altro, e gli altri (y e y' , z e z') restino paralleli fra di loro, e consideriamo i due diversi sistemi di coordinate:

$$K(x, y, z, t) \quad \text{e} \quad K'(x', y', z', t')$$



risferiti rispettivamente alle origini O e O' . Se K' si muove rispetto a K con velocità v , per la contrazione delle lunghezze sarà:

$$O'P' = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (16)$$

Infatti, considerando in K un punto P dell'asse $x = x'$, punto che corrisponde a P' nel sistema K' , le sue coordinate rispetto ai due sistemi risulteranno:

$$P(x,0,0,t) \quad \text{e} \quad P'(x',0,0,t')$$

$O'P' = x'$ se K' é fermo, perché se é in moto con velocità v esso si contrae nella direzione del moto riducendosi ad una lunghezza data dalla (16).

Ma essendo $O'P' = OP - OO' = x - vt$, si deduce che

$$x - vt = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

da cui:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (17)$$

Ordinata e quota rimangono uguali, visto il modo in cui K' si muove rispetto a K . Si consideri invece la coordinata temporale. Il segmento OP rispetto al sistema K' é uguale alla somma di:

$$OO' = vt \quad \text{con} \quad O'P = O'P' = x'$$

Il segmento OP , però, se K' fosse fermo, misurerebbe x ; in effetti si muove con velocità v , e dunque, nella direzione del moto, risulta più corto:

$$OP(K') = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

quindi:

$$v \cdot t' + x' = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

e, utilizzando la (17):

$$v \cdot t' + \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (18)$$

moltiplicando ambi i membri per $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, otteniamo:

$$v \cdot t' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + x - vt = x - x \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

da cui si ricava, senza alcuna difficoltà:

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (19)$$

Si hanno così le nuove trasformazioni chiamate **Trasformazioni di Lorentz**, in onore di **H.A. Lorentz**, lo scienziato olandese:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \quad (20)$$

Se v è molto vicino a zero, cioè se $v \ll c$, si ritorna alle trasformazioni classiche di Galileo, perché $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1$ e $\frac{v \cdot x}{c^2} \approx 0$.

Le formule inverse si ottengono senza calcoli, solo tenendo conto che, se K' si considera fisso, sarà K a muoversi con una velocità $-v$; allora ad x si deve sostituire x' e t' a t . Si ha così:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x' + v \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= \frac{t' + \frac{v \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \quad (21)$$

15.22 I buchi neri

Nella relatività generale si definisce **buco nero** una regione di spazio da cui nulla, nemmeno la luce, può sfuggire. Classicamente questo avviene attorno ad un corpo celeste estremamente denso. Questo corpo è dotato di un'attrazione gravitazionale talmente elevata da non permettere l'allontanamento di alcunché dalla propria superficie. Questa condizione si ottiene quando la velocità di fuga dalla sua superficie è superiore alla velocità della luce. Un corpo celeste con questa proprietà risulterebbe invisibile e la sua presenza potrebbe essere rilevata solo indirettamente, tramite gli effetti del suo intenso campo gravitazionale. Fino ad oggi sono state raccolte numerose osservazioni astrofisiche che possono essere interpretate (anche se non univocamente) come indicazioni dell'effettiva esistenza di buchi neri nell'universo. Il termine "buco nero" è dovuto al fisico John Archibald Wheeler (in precedenza si parlava di dark star o black star).

Verso il termine del proprio ciclo vitale, dopo aver consumato tramite fusione nucleare il 90% dell'idrogeno trasformandolo in elio, nel nucleo della stella si arrestano le reazioni nucleari. La forza gravitazionale, che prima era in equilibrio con la pressione generata dalle reazioni di fusione nucleare, prevale e comprime la massa della stella verso il suo centro.

Quando la densità diventa sufficientemente elevata può innescarsi la fusione nucleare dell'elio, in seguito alla quale c'è la produzione di litio, azoto e altri elementi (fino all'ossigeno e al silicio). Durante questa fase la stella si espande e si contrae violentemente più volte espellendo parte della propria massa. Le stelle più piccole si fermano ad un certo punto della catena e si spengono, raffreddandosi e contraendosi lentamente, attraversano lo stadio di nana bianca e nel corso di molti



Figura 389 Buco nero

milioni di anni diventano una sorta di gigantesco pianeta. In questo stadio la forza gravitazionale è bilanciata da un fenomeno quantistico, detto pressione di degenerazione, legato al principio di esclusione di Pauli. Per le nane bianche la pressione di degenerazione è presente tra gli elettroni.

Se invece il nucleo della stella supera una massa critica, detta limite di Chandrasekhar e pari a 1,4 volte la massa solare, le reazioni possono arrivare fino alla sintesi del ferro. La reazione che sintetizza il ferro per la formazione di elementi più pesanti è endotermica, richiede energia invece che emetterne, quindi il nucleo della stella diventa una massa inerte di ferro e non presentando più reazioni nucleari non c'è più nulla in grado di opporsi al collasso gravitazionale. A questo punto la stella subisce una contrazione fortissima che fa entrare in gioco la pressione di degenerazione tra i componenti dei nuclei atomici. La pressione di degenerazione arresta bruscamente il processo di contrazione, ma in questo caso può provocare una gigantesca esplosione, detta esplosione di supernova di tipo II.

Durante l'esplosione quel che resta della stella espelle gran parte della propria massa, che va a disperdersi nell'universo circostante. Quello che rimane è un nucleo estremamente denso e massiccio. Se la sua massa è abbastanza piccola da permettere alla pressione di degenerazione di contrastare la forza di gravità si arriva ad una situazione di equilibrio e si forma una stella di neutroni. Probabile aspetto di un buco nero, se posto davanti ad uno sfondo ricco di stelle. Da notare la luce distorta dalla gravità e l'orizzonte degli eventi. Il buco è pensato con una massa pari a dieci volte quella del Sole, e visto da 600km di distanza. In questa posizione sarebbe necessaria un'accelerazione pari a $4 \cdot 10^8 g$ per mantenere il distacco costantemente.

Se la massa supera le tre masse solari (limite di Volkoff-Oppenheimer) non c'è più niente che possa contrastare la forza gravitazionale. Inoltre, secondo la Relatività generale, la pressione interna non viene più esercitata verso l'esterno (in modo da contrastare il campo gravitazionale), ma diventa essa stessa una sorgente del campo gravitazionale rendendo così inevitabile il collasso infinito.

A questo punto la densità della stella morente, ormai diventata un buco nero, raggiunge velocemente valori tali da creare un campo gravitazionale talmente intenso da non permettere a nulla di sfuggire alla sua attrazione, neppure alla luce. Si ha una curvatura infinita dello spaziotempo che può far nascere dei cunicoli all'interno di buchi neri in rotazione. Alcuni scienziati hanno così ipotizzato che, almeno in linea teorica, sia possibile viaggiare nel passato, visto che i cunicoli collegano due regioni diverse dello spaziotempo.

A causa delle loro caratteristiche i buchi neri non possono essere “visti” direttamente ma la loro presenza può essere ipotizzata a causa degli effetti di attrazione gravitazionale che esercitano nei confronti della materia vicina e della radiazione luminosa in transito nei paraggi o “in caduta” sul buco.

Esistono anche altri scenari che possono portare alla formazione di un buco nero. In particolare una stella di neutroni in un sistema binario può rubare massa alla sua vicina fino a superare la massa di Chandra-

sekhar e collassare. Alcuni indizi suggeriscono che questo meccanismo di formazione sia più frequente di quello “diretto”.

Un altro scenario permette la formazione di buchi neri con massa inferiore alla massa di Chandrasekhar. Anche una quantità arbitrariamente piccola di materia, se compressa da una gigantesca forza esterna, potrebbe in teoria collassare e generare un orizzonte degli eventi molto piccolo. Le condizioni necessarie potrebbero essersi verificate nel primo periodo di vita dell'universo, quando la sua densità media era ancora molto alta a causa di variazioni di densità o di onde di pressione. Questa ipotesi è ancora completamente speculativa e non ci sono indizi che buchi neri di questo tipo esistano o siano esistiti in passato.

Ipotesi alternativa

Alcuni scienziati hanno messo in dubbio l'esistenza dei buchi neri come sono attualmente definiti e hanno ipotizzato che i corpi celesti identificati attualmente come buchi neri ma solo osservati indirettamente siano in realtà "stelle nere" prive di orizzonte degli eventi. «Noi abbiamo dimostrato che certi effetti quantistici possono impedire ai buchi neri di formarsi, producendo invece un oggetto chiamato “stella nera”, che non arriverebbe a densità infinita e non sarebbe avvolto dall'orizzonte degli eventi». Tali scienziati hanno visto come la definizione attuale di buco nero provochi alcuni paradossi: uno di questi è quello della perdita di informazioni. Questo paradosso consiste nel fatto che un buco nero, che contiene al suo interno un'enorme quantità di informazioni, evapora emettendo la radiazione di Hawking, che tuttavia non porta con sé nessuna informazione. Di conseguenza, durante l'evaporazione del buco nero, le informazioni contenute in esso svaniscono nel nulla. Questa perdita di informazioni contraddice una proprietà fondamentale della meccanica quantistica, l'unitarietà, secondo cui nessuna informazione può essere distrutta.

Secondo la teoria delle stelle nere alcuni effetti quantistici (RSET) controbilancerebbero l'attrazione gravitazionale, impedendo così alla stella collassante di diventare un buco nero. Esse diventerebbero invece stelle nere che hanno alcune proprietà osservabili in comune con i buchi neri, ma anche molte differenze. Esse sarebbero infatti corpi materiali estremamente densi, fatti di materia densa e privi di orizzonte degli eventi. Sarebbero estremamente fioche a causa di un intenso spostamento verso il rosso della luce da loro emessa. Potrebbero emettere una radiazione analoga a quella di Hawking ma in questo caso non ci sarebbe perdita di informazioni (in quanto le radiazioni emesse dalle stelle nere, a differenza di quella di Hawking, trasporterebbero informazioni) e dunque il principio di unitarietà non verrebbe violato.

15.23 Riassumendo e glossario dei termini incontrati

In questa ultima unità abbiamo affrontato numerosi aspetti e fenomeni che non erano spiegabili con la fisica classica. Con le Equazioni di Maxwell il mondo scientifico riteneva di aver raggiunto la quadratura di ogni fenomeno fisico, ma fu un entusiasmo durato davvero poco, non riuscendo a spiegare alcuni fenomeni appena osservati come l'**effetto fotoelettrico** e la **radiazione del corpo nero**. Eravamo in pieno agli inizi di quella che tutt'oggi viene indicata come **fisica moderna**. Un tentativo di spiegare taluni fenomeni venne dal fisico **Max Planck**, il quale introdusse il concetto di **quanti** di energia, ovvero di pacchetti di energia che si trasmettevano non con continuità, ma secondo ben precisi pacchetti discreti. Era nata la **meccanica quantistica**. Diverse interpretazioni vennero ipotizzate su certi comportamenti quantistici, quali quello di Copenaghen, di De Broglie-Bohm e l'interpretazione statistica, ove quest'ultima trovò un fervido sostenitore in Albert Einstein. Sempre in questo periodo vengono enunciate nuove ipotesi circa la strutturazione dell'atomo, anche in questo caso indotto da una non coerenza dell'allora **teoria atomica** con quanto accadeva in alcuni fenomeni osservati. Si cercò quindi di ipotizzare quali fossero le più piccole particelle della materia, arrivando così alla scoperta dei **quark** e di altre particelle elementari come

il **bosone**, famoso quello di **Higgs**, tutt'oggi oggetto di studio, attraverso sofisticatissimi **acceleratori di particelle** al **CERN** di Ginevra. Ma la vera rivoluzione nel mondo scientifico del XX secolo si ebbe con la enunciazione, da parte di Einstein, della cosiddetta Teoria della **Relatività generale**, che in qualche modo completa ed amplia la ben nota teoria della relatività enunciata quattrocento anni prima da Galileo. Cadono miseramente alcuni dogmi fino ad allora accettati come l'invarianza di alcune grandezze come la massa ed il tempo, prendendo corpo il significato di "relatività" inteso ora nel senso che ciascuna di queste grandezze è dipendente dal sistema di riferimento in cui è posto l'osservatore e qualora le velocità di tale sistema siano uguali o anche prossime a quella della luce, tempo e spazio iniziano a contrarsi. Fu anche grazie ad un fisico olandese, **Lorentz**, che attraverso le sue **trasformazioni**, riuscì a rappresentare ciò che accade per un sistema di riferimento in movimento rispetto ad un altro, nell'ipotesi più generale ipotizzata da Einstein.

In ultimo abbiamo espresso alcune osservazioni, di tipo astronomico, circa la presenza di **buchi neri**, circa i quali non appare ancora aver prevalso una sola teoria rispetto alle altre, tutte però destanti molto interesse scientifico.

15.24 Problemi proposti

- 1) Una candela emette una potenza di circa 1W ad una lunghezza d'onda media di 5500\AA
 - a) Quanti fotoni vengono emessi al secondo?
 - b) A quale distanza massima la candela risulta visibile, se l'intensità di soglia è pari a 10^{-7} W/m^2 ?

- 2) Una fiamma in cui si immettano dei sali di litio, presenta una caratteristica colorazione rossa dovuta ad una riga monocromatica di frequenza pari a $\nu = 4,469 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Si osserva, tramite opportune misure, che tale luce, quando si propaga in acqua, ha una lunghezza d'onda $\lambda = 0,504 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Quanto vale la velocità della luce rossa del litio in acqua?

- 3) Un fascio di radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda pari a $0,7 \mu\text{m}$ incide su una superficie. La velocità degli elettroni estratti è pari a $4 \cdot 10^5 \text{ m/s}$.
 - a) Quanto vale l'energia associata ai fotoni?
 - b) Quanto vale l'energia cinetica degli elettroni estratti ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$)?
 - c) Quanto vale l'energia di legame ϕ (misurato in eV) degli elettroni per quella sostanza?

- 4) Nello spettro di assorbimento di una certa sostanza si osserva (fra le altre) una riga corrispondente all'assorbimento di radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda pari a $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.
 - a) Quale è l'interpretazione delle righe osservate nello spettro di assorbimento di una sostanza?
 - b) Quanta energia possiede un fotone assorbito nella transizione in questione?
 - c) Quanto vale l'energia dello stato eccitato, se l'energia dello stato fondamentale vale $12eV$?

- 5) In un esperimento viene misurata la lunghezza d'onda di un fotone con un'accuratezza di 1 parte per milione, $\Delta l/l = 10^{-6}$. Qual è approssimativamente l'incertezza minima Δx in una misura simultanea di posizione nel caso in cui il fotone abbia lunghezza d'onda:
 - a) $l = 600 \text{ nm}$, b) $l = 0,5 \text{ nm}$.

- 6) Il raggio tipico di un atomo è $0,1 \text{ nm}$. Per localizzare il nucleo o uno degli elettroni entro una distanza di $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$ tramite l'uso di radiazione elettromagnetica, la lunghezza d'onda di quest'ultima deve essere almeno di quest'ordine di grandezza. Si calcolino
 - a) l'energia e

- b) il momento di un fotone di questa lunghezza d'onda. Se si localizza l'elettrone con la precisione richiesta,
- c) quant'è la corrispondente incertezza nella sua quantità di moto?
- 7) Un nucleone, protone o neutrone, è confinato nel nucleo, che ha un raggio dell'ordine di circa $4Fm$ ($1Fm = 10^{-15}m$). Dare una stima dell'energia e velocità del nucleone nel nucleo. Ci si aspetta di trovare sperimentalmente un valore maggiore o minore di quello calcolato?
- 8) L'energia di legame di un elettrone nel reticolo cristallino è dell'ordine di $0,12meV$. Si stimi
- a) le dimensioni del pacchetto d'onda;
- b) quanti siti reticolari siano inclusi entro il pacchetto d'onda, se il passo reticolare è $0,12nm$?
- 9) Si supponga di studiare l'orbita dell'elettrone nell'atomo di idrogeno. Secondo la teoria di Bohr, il raggio dell'orbita vale $a = n^2 \cdot a_0$ con n un numero naturale e $a_0 = 0,05nm$. Per determinare l'orbita con precisione sufficiente, bisogna localizzare l'elettrone con una precisione $\Delta x = 0,5a_0$
- a) Quanta energia cinetica si trasferisce con grande probabilità all'elettrone nella misura?
- b) L'atomo resta indisturbato dall'osservazione?
- 10) Una particella di massa m è immersa nel seguente potenziale a forma di V :
- $$V(x) = b \cdot x \quad \text{per } x > 0 \quad \text{e} \quad V(x) = -b \cdot x \quad \text{per } x < 0.$$
- 11) Utilizzando il principio di indeterminazione di Heisenberg, si dimostri che il più basso autovalore, quello dello stato fondamentale, è dell'ordine:
- $$[(h/2p)^2 b^2 / m]^{1/3}$$
- 12) Usando il principio di indeterminazione di Heisenberg si determini (come ordini di grandezza) a) lo stato energetico più basso di un atomo di idrogeno "appoggiato" su un piano orizzontale nel campo gravitazionale terrestre (si sfrutti il risultato del problema precedente); b) la quota tipica dell'atomo al di sopra della superficie di riferimento; c) la temperatura corrispondente all'energia di punto zero così trovata.
- 13) Elettroni sono emessi da un filamento caldo che funge da catodo con un'energia tipica di circa $0,1eV$. Vengono poi accelerati sotto una d.d.p. di $10^4 V$ in direzione x . Trascurando il moto lungo le altre direzioni ed assumendo che l'incertezza sulla quantità di moto alla fine dell'accelerazione sia dovuta interamente agli $0,1eV$ iniziali, si calcolino:
- a) il valore medio del vettore d'onda k_0 e la corrispondente lunghezza d'onda di De Broglie l_0 ;

b) lo sparpagliamento Dk e l'approssimativa lunghezza L del pacchetto d'onda che descrive gli elettroni alla fine della fase di accelerazione;
 c) l'intervallo di tempo in cui lo sparpagliamento quantistico s del pacchetto d'onda lo ha allargato fino alle dimensioni di 1 mm, dal momento in cui gli elettroni escono dalla regione di accelerazione e si propagano come particelle libere, e la distanza percorsa fino a quel momento.

14) Un fascio di elettroni di velocità $V = 8 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ passa attraverso una fenditura di larghezza $D=10\text{mm}$. Si calcoli

- a) l'allargamento del fascio nello spazio dei momenti,
 b) la larghezza L dell'immagine della fenditura su uno schermo posto a $d=2 \text{ m}$.

15) Una lampada a flash (molto potente) è posta nel punto **A** a 60 Km da un osservatore **O**. La lampada viene accesa e l'osservatore **O** vede il flash alle ore 13h 00m 00s. Calcolare l'istante effettivo in cui la lampada è stata accesa (per la costante c assumere sempre il valore $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, anche nei problemi che seguono).

16) Due eventi (del tipo lampi di luce) si verificano nei punti **A** e **B**, posti ad eguali distanze da un osservatore **O**. Supponiamo che **O**, per valutare la simultaneità o meno dei due eventi, adotti il seguente criterio: "Per me i due eventi sono simultanei se i segnali luminosi emessi da ciascun evento mi raggiungono in quello che io giudico lo stesso istante". Mostrare (con l'ausilio di disegni elementari) che, in base a questa definizione, se l'osservatore **O** rileva che i due eventi sono simultanei, un altro osservatore **O'** (che utilizzi lo stesso criterio di simultaneità), in moto relativo rispetto ad **O** con velocità v , rileverà in generale che i due eventi non sono simultanei (il moto di **O'** rispetto ad **O** è tale che esso transita all'altezza di **O**, con moto verso destra, nell'istante in cui i due eventi si producono in **A** e **B**).

17) Calcolare $\left[\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right]$ per:

- (a) $v = 10^{-2} c$ e (b) $v = 0,9998 \cdot c$

18) L'osservatore **O** rileva che il lampo di un flash si è verificato (rispetto al suo sistema di coordinate) nella posizione: $\mathbf{x} = 100 \text{ Km}$, $\mathbf{y} = 10 \text{ Km}$, $\mathbf{z} = 1 \text{ Km}$, all'istante $t = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$. Calcolare quali sono le coordinate x' , y' , z' e t' dello stesso evento che vengono determinate da un secondo osservatore **O'**, in moto relativo rispetto ad **O**, con una velocità $v = -0,8 \cdot c$, nella direzione dell'asse comune $x-x'$ (come al solito, si supponga che all'istante $t = t' = 0$ le origini dei due sistemi coincidevano).

- 19) Un treno lungo **500m** (secondo le misure di un osservatore a bordo) viaggia a una velocità di **100 Km/h**. Due lampi colpiscono le estremità del treno simultaneamente (secondo un osservatore a terra). Qual è la separazione temporale tra i due eventi come risulterebbe misurata da un osservatore sul treno, posto esattamente a metà lunghezza del treno ?
- 20) Si hanno gli eventi **A** e **B**. L'osservatore **O'**, in moto rispetto all'osservatore **O** alla velocità v , rileva tra i due eventi l'intervallo temporale $t'_B - t'_A$. Applicando le trasformazioni di Lorentz, calcolare quale sarà l'espressione della differenza temporale ricavata dall'osservatore **O**.
- 21) Risolvere il problema inverso rispetto all'esercizio precedente. Cioè ricavare quale sarà l'espressione della differenza temporale tra i due eventi, misurata dall'osservatore **O'** (sempre in moto rispetto ad **O** alla velocità v), essendo $t_B - t_A$ l'intervallo temporale misurato da **O**.
- 22) Dunque, nella fisica relativistica, due eventi che siano simultanei per un osservatore, non lo sono per un altro in moto rispetto al primo. Allora, dati due eventi simultanei per un osservatore **O'** (in moto), ricavare l'espressione (di $t_B - t_A$) che dà l'intervallo temporale tra i due eventi, per un osservatore **O**, fermo rispetto ad **O'**.
- 23) Calcolare a quale velocità dovrebbe viaggiare un'astronave per consentire a un suo passeggero che ha a disposizione **60 anni da vivere**, di raggiungere una galassia distante **160.000 anni luce**.
- 24) Si supponga che un mesone, che venga generato all'altezza dal suolo di **6000 m**, abbia tempo di vita medio (tempo proprio) $\Delta t_0 = 2 \cdot 10^{-6} s$, e che si precipiti verso il suolo alla velocità $v = 0,998 \cdot c$. Determinare se esso riesce a raggiungere il suolo prima di decadere, sia secondo la meccanica classica che quella relativistica.
- 25) L'osservatore **O'** parte da una piattaforma spaziale e viaggia alla velocità $v = 0,8 \cdot c$ verso Alfa Centauri, che dista dalla piattaforma **4 anni luce**. Quando raggiunge la stella, inverte subito la rotta e ritorna alla piattaforma, sempre alla stessa velocità. Quando **O'** ritorna alla piattaforma, confronta la sua età con quella del fratello gemello **O**, che è sempre rimasto sulla piattaforma.

15.25 Approfondimento: Albert Einstein

Albert Einstein, nasce il 14 marzo del 1879 a Ulm, in Germania, da genitori ebrei non praticanti. Un anno dopo la sua nascita la famiglia si trasferisce a Monaco di Baviera, dove suo padre Hermann apre, col fratello Jacob, una piccola officina elettrotecnica. L'infanzia di Einstein si svolge nella Germania di Bismarck, un paese in via di massiccia industrializzazione, ma anche retto con forme di dispotismo che si fanno sentire a vari livelli e in vari ambienti della struttura sociale.

Il piccolo Albert era per istinto un solitario ed impara a parlare molto tardi. L'incontro con la scuola è da subito difficile: Albert, infatti, trovava le sue consolazioni a casa, dove la madre lo avvia allo studio del violino, e lo zio Jacob a quello dell'algebra. Da bambino, legge libri di divulgazione scientifica con quella che definì "un'attenzione senza respiro". Non a caso, in seguito con amarezza dei primi corsi scolastici. Odiava i sistemi severi che rendevano la scuola, a quei tempi, simile ad una caserma.

Nel 1894 la famiglia si trasferisce in Italia per cercarvi miglior fortuna con una fabbrica a Pavia, vicino a Milano. Albert rimase solo a Monaco affinché terminasse l'anno scolastico al ginnasio, poi raggiunse la famiglia.

Gli affari della fabbrica cominciarono ad andare male e Hermann esortò il figlio a iscriversi al famoso Istituto Federale di Tecnologia, noto come Politecnico di Zurigo. Non avendo però conseguito un diploma di scuola secondaria superiore, nel 1895 dovette affrontare un esame di ammissione e fu bocciato per insufficienze nelle materie letterarie. Ma ci fu di più il direttore del Politecnico, impressionato dalle non comuni capacità mostrate nelle materie scientifiche, esortò il ragazzo a non rinunciare alle speranze e a ottenere un diploma abilitante per l'iscrizione al Politecnico nella scuola cantonale svizzera progressiva di Aargau. Qui Einstein trovò un'atmosfera ben diversa da quella del ginnasio di Monaco. Nel 1896 può finalmente iscriversi al Politecnico. Lì prende una prima decisione non farà l'ingegnere ma l'insegnante.

In una sua dichiarazione dell'epoca dirà, infatti, "Se avrò fortuna nel passare l'esame, andrò a Zurigo. Lì starò per quattro anni per studiare matematica e fisica. Immagino di diventare un insegnante in quei rami delle scienze naturali, scegliendo la parte teorica di esse. Queste sono le ragioni che mi hanno portato a fare questo piano. Soprattutto, è la mia disposizione all'astrazione e al pensiero matematico, e la mia mancanza di immaginazione e di abilità pratica".

Nel corso dei suoi studi a Zurigo matura la sua scelta: si dedicherà alla fisica piuttosto che alla matematica.

Si laurea nel 1900. Prende dunque la cittadinanza svizzera per assumere un impiego all'Ufficio Brevetti di Berna. Il modesto lavoro gli consente però di dedicare gran parte del suo tempo allo studio della fisica.

Nel 1905 pubblica tre studi teorici. Il primo e più importante studio contiene la prima esposizione completa della teoria della relatività ristretta. Il secondo studio, sull'interpretazione dell'effetto fotoelettrico, conteneva un'ipotesi rivoluzionaria sulla natura della luce; egli affer-

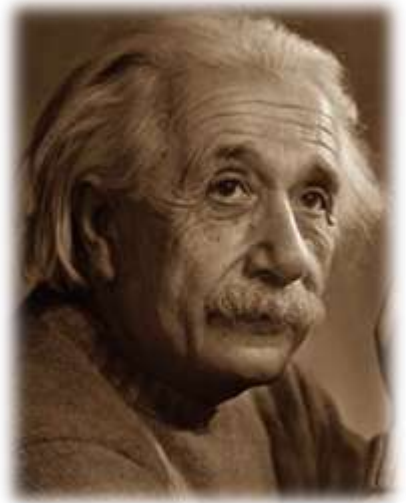


Figura 390 Albert Einstein (14 marzo 1879 - 18 aprile 1955)

mò che in determinate circostanze la radiazione elettromagnetica ha natura corpuscolare, ipotizzando che l'energia trasportata da ogni particella che costituiva il raggio luminoso, denominata fotone, fosse proporzionale alla frequenza della radiazione. Quest'affermazione, in base alla quale l'energia contenuta in un fascio luminoso viene trasferita in unità individuali o quanti, dieci anni dopo fu confermata sperimentalmente da Robert Andrews Millikan. Il terzo e più importante studio è del 1905, e reca il titolo "Elettrodinamica dei corpi in movimento": conteneva la prima esposizione completa della teoria della relatività ristretta, frutto di un lungo e attento studio della meccanica classica di Isaac Newton, delle modalità dell'interazione fra radiazione e materia, e delle caratteristiche dei fenomeni fisici osservati in sistemi in moto relativo l'uno rispetto all'altro. È proprio quest'ultimo studio che gli valse in seguito il premio Nobel per la Fisica nel 1921.

Nel 1916 pubblica la memoria: "I fondamenti della teoria della Relatività generale", frutto di oltre dieci anni di studio. Questo lavoro è considerato dal fisico stesso il suo maggior contributo scientifico e si inserisce nella sua ricerca rivolta alla geometrizzazione della fisica.

Intanto, nel mondo i conflitti fra le nazioni avevano preso fuoco, tanto da scatenare la prima guerra mondiale. Durante questo periodo fu tra i pochi accademici tedeschi a criticare pubblicamente il coinvolgimento della Germania nella guerra. Tale presa di posizione lo rese vittima di gravi attacchi da parte di gruppi di destra; persino le sue teorie scientifiche vennero messe in ridicolo, in particolare appunto la teoria della relatività.

Con l'avvento al potere di Hitler, Einstein fu costretto a emigrare negli Stati Uniti, dove gli venne offerta una cattedra presso l'Institute for Advanced Study di Princeton, nel New Jersey. Di fronte alla minaccia rappresentata dal regime nazista egli rinunciò alle posizioni pacifiste e nel 1939 scrisse assieme a molti altri fisici una famosa lettera indirizzata al presidente Roosevelt, nella quale veniva sottolineata la possibilità di realizzare una bomba atomica. La lettera segnò l'inizio dei piani per la costruzione dell'arma nucleare.

Einstein ovviamente disprezzava profondamente la violenza e, conclusi quei terribili anni, s'impegnò attivamente contro la guerra e le persecuzioni razziste, compilando una dichiarazione pacifista contro le armi nucleari.

Più volte, poi, ribadì la necessità che gli intellettuali di ogni paese dovessero essere disposti a tutti i sacrifici necessari per preservare la libertà politica e per impiegare le conoscenze scientifiche a scopi pacifici.

Morì, a Princeton, il 18 aprile 1955, circondato dai più grandi onori.

16 *Matematica e Fisica*

In questo ultimo capitolo presentiamo alcuni argomenti che di fatto sono stati già trattati in altri capitoli, ma questa volta sottolineando lo stretto legame che abbiamo tra concetti matematici, come la Derivata di Funzione, che ritroviamo in concetti come quello di Velocità, nel moto Aromatico o nel concetto di cariche elettriche, di corrente elettrica, di flusso di un vettore. Altro concetto importante, insieme a quello della derivata, è rappresentato dall'Integrale di Funzione che ritroviamo tutte le volte in cui ci chieda, ad esempio, di calcolare un valore totale di una funzione variabile, fissati determinati parametri iniziali e finali o l'area sottostante una curva.

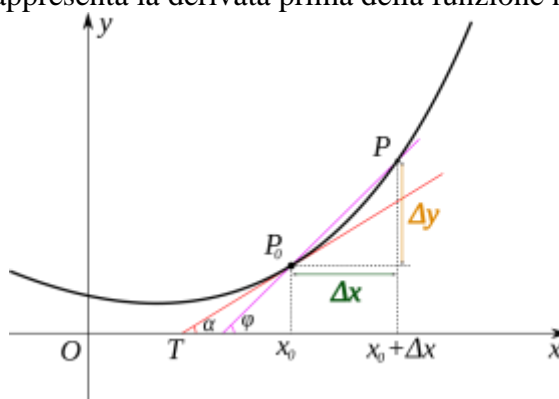
16.1 Concetto di Derivata di Funzione

Significato geometrico della derivata

Sia data una funzione $f(x)$ definita e continua nel proprio dominio. Se fissiamo un punto x_0 sarà individuato sulla curva il punto $P_0(x_0; f(x_0))$ e preso un secondo punto sull'asse x , $x_0 + \Delta x$, con Δx incremento, piccolo a piacere, sarà individuato sulla curva il punto $P(x_0 + \Delta x; f(x_0 + \Delta x))$. Se facciamo ora tendere l'incremento a zero, ovvero $\Delta x \rightarrow 0$, otteniamo il limite così definito:

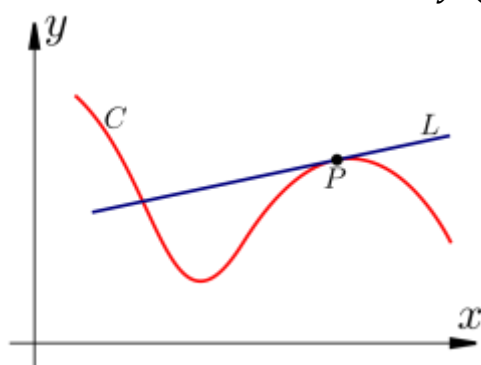
$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$$

Tale limite rappresenta la derivata prima della funzione nel punto x_0 .



In altre parole, la derivata prima di una funzione continua (e derivabile) rappresenta il coefficiente angolare m della retta tangente alla curva in quel punto, risultando:

$$m = y'(x_0)$$



Significato fisico della derivata: esempi

Velocità istantanea

In Fisica questo concetto viene ripreso in diversi contesti. Ad esempio se un corpo si muove con velocità variabile, Prendiamo, ad esempio, una $s(t)$ che rappresenti la posizione del corpo in un determinato istan-

te di tempo t , ad esempio $s(t) = 3t^2 + 2t + 1$, la derivata prima di questa funzione, rispetto al tempo, coincide con la velocità istantanea in un determinato istante. Avremo quindi:

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt}$$

Che nell'esempio specifico fa risultare una velocità istantanea $v(t) = 6t + 2$

Se invece ci fosse stato chiesto di calcolare la velocità media tra un istante iniziale ed un certo istante t_1 , per calcolare tale valore avremmo dovuto ricavare lo spazio percorso dopo quel tempo t_1 , risultando:

$$s(t_1) = 3t_1^2 + 2t_1 + 1$$

Da cui la velocità media sarebbe risultata pari a:

$$v_{media} = \frac{s(t_1) - s(0)}{t_1}$$

Moto armonico semplice

Abbiamo già studiato il moto armonico nel paragrafo 4.22 e 4.28 dove ricordiamo la legge oraria del moto è espressa solitamente come:

$$y(t) = y_0 \cos(\omega t)$$

che indica lo spostamento lungo l'asse delle y del corpo, sia esso una molla o un corpo in rotazione, ω rappresenta la pulsazione e vale $2\pi/T$ o $2\pi f$ con T ed f rispettivamente periodo e frequenza.

Se volessimo conoscere la velocità istantanea in ogni istante di tempo, ci basterebbe fare la derivata prima della funzione $y(t)$ rispetto al tempo, ottenendo:

$$v(t) = -y_0 \omega \sin(\omega t)$$

Che rappresenta appunto la velocità istante per istante.

Derivando ulteriormente (derivata seconda) otteniamo l'accelerazione istantanea legata al moto armonico, ovvero:

$$a(t) = -y_0 \omega^2 \cos(\omega t) = -y(t) \omega^2$$

Intensità di corrente elettrica

Altra situazione in cui compare la derivata prima è con la corrente elettrica, definita come

$$i(t) = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Se in un problema dovessimo avere la carica variabile nel tempo, espressa ad esempio da una relazione del tipo:

$$q(t) = 3te^{-\frac{t}{2}}$$

Per conoscere la corrente istantanea ci basterà eseguire la derivata prima, ottenendo:

$$i(t) = 3e^{-\frac{t}{2}} - \frac{3}{2}te^{-\frac{t}{2}}$$

Forza elettromotrice indotta

Se in un problema viene indicato che un campo magnetico agisce su una spira con campo variabile, è noto dal paragrafo 14.3 che la f.e.m. $f(t)$ risulta

$$f(t) = -\frac{\Delta\phi(\vec{B})}{\Delta t}$$

Se viene quindi chiesta la f.e.m. istantanea basterà eseguire la derivata prima del flusso del vettore campo magnetico che attraversa la sezione S della spira, risultando per altro:

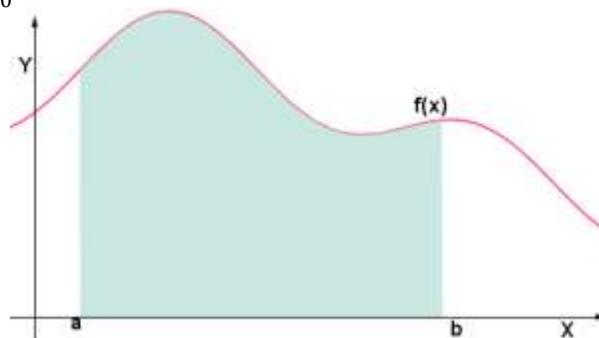
$$\phi(\vec{B}) = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

dove α è l'angolo che il Campo magnetico \vec{B} forma con la normale alla superficie S .

16.2 Integrale di Funzione

Carica totale che attraversa un conduttore

Immaginiamo ora che ci venga fornita la relazione, in funzione del tempo, della carica che fluisca lungo un conduttore e ci venga chiesto di calcolare la carica totale fluita in un certo tempo, immaginiamo indicato con t_0



Se la carica ha un'espressione del tipo $q(t) = 3te^{-\frac{t}{2}}$, per calcolare la carica totale dovremo calcolare l'integrale tra 0 e t_0 della funzione suddetta. Avremo quindi:

$$Q_{totale} = \int_0^{t_0} 3te^{-\frac{t}{2}} dt$$

che è un integrale che si risolve con il metodo per parti in modo abbastanza semplice.

Potenza come derivata del Lavoro

Nel paragrafo 6.6 abbiamo già introdotto il concetto di lavoro di una forza, mentre nel paragrafo 6.9 il concetto di Potenza, definito con la formula (26) del cap. 6, ovvero:

$$P(t) = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

Quando si passa al limite, per $\Delta t \rightarrow 0$, se il Lavoro è non costante nel tempo, otteniamo la potenza istantanea

$$P(t) = \frac{dL}{dt}$$

Ma la potenza può essere vista anche in funzione dell'Energia cinetica, essendo il Lavoro pari alla variazione di Energia cinetica, ovvero:

$$L = \Delta K = \frac{1}{2} m [v_2^2(t) - v_1^2(t)]$$

Se a sua volta la velocità fosse non costante, ma in funzione del tempo, basterebbe calcolare la derivata di ΔK , risultando:

$$P(t) = m [v_2(t) - v_1(t)]$$

Potenziale elettrico e potenziale gravitazionale

Entrambi questi potenziali possono essere visti rispettivamente come la derivata prima dell'Energia potenziale elettrica e quella Gravitazionale, risultando:

$$V(q) = \frac{dU(P)}{dq}$$

Essendo $U(P) = k \frac{q_1(t) \cdot q_2(t)}{r}$ l'Energia potenziale elettrica con cariche variabili nel tempo nel punto P , si avrà:

$$V(q) = k \frac{dU(P)}{dq}$$

Per il campo gravitazionale, detta m la massa del corpo ed $U(m) = m \cdot g \cdot h$ l'Energia potenziale gravitazionale, avremo similmente:

$$V(m) = k \frac{dU(m)}{dm}$$

Campo elettrico generato da una carica puntiforme in quiete

Questo risulta uguale a meno la derivata del potenziale elettrico rispetto al raggio, ovvero:

$$E(r) = -\frac{d}{dr} \left(k \frac{q}{r} \right)$$

essendo $V = k \frac{q}{r}$ il potenziale in un determinato punto P .

Campo gravitazionale generato da una massa in quiete

Questo risulta uguale a meno la derivata del potenziale gravitazionale rispetto al raggio, ovvero:

$$g(r) = -\frac{d}{dr} \left(G \frac{m}{r} \right)$$

essendo $V = G \frac{m}{r}$ il potenziale gravitazionale ad un certa distanza r dalla massa m .

Laboratorio virtuale di fisica

Università del Colorado Boulder: <https://phet.colorado.edu>

Applet Java di Lorenzo Bernacchioni www.openfisica.com

| Simulazione | Descrizione |
|--|--|
| Spinta di Archimede | Un corpo immerso in un fluido ... |
| Moto di un pendolo | Analizza il moto del pendolo |
| Moto di un proiettile | Moto di un proiettile in 2D in assenza di attrito |
| Moto in un fluido | Studia le forze che agiscono su una sferetta che cade in un fluido viscoso |
| Moto di un satellite | Metti in orbita un satellite! |
| Cambiamenti di stato dell'acqua | Viene seguita l'evoluzione di 100 g di acqua dallo stato solido (ghiaccio) al vapore |
| openFisica 1 | Laboratorio. I vettori. Equilibrio meccanico (introduzione alla forza). Equilibrio nei fluidi. Ottica geometrica. |
| openFisica 2) | Cinematica. Dinamica del punto materiale. Fenomeni termici (work in progress). |
| openFisica 3 | Relatività galileiana. Leggi di conservazione. Meccanica del corpo rigido (work in progress). Gravitazione. Fenomeni ondulatori. |
| openFisica 4 | Termodinamica. Campi elettrici. Corrente continua (work in progress). Magnetismo |
| openFisica 5 | Campi non stazionari. Relatività. I quanti. Fisica nucleare (work in progress) |
| | |
| Laboratorio Virtuale di Fisica Università di Messina http://ww2.unime.it/weblab/index.php | Laboratorio di meccanica Laboratorio di termodinamica Laboratorio di elettromagnetismo Laboratorio di ottica Laboratorio per fenomeni ondosi (ONDE) Laboratorio per le radiazioni |

Fisica per la scuola superiore

| | |
|--|---|
|  <p>http://catalogo.museogalileo.it</p> | tantissime animazioni su fenomeni fisici. Indice dei |
| <p>http://www.libroattivo.com/sei/fisica/</p> | Lezioni multimediali - SEI |
| | |

<http://www.fmboschetto.it/>

Interessante materiale didattico disponibile in questo sito del prof. Boschetto

Test ingresso FISICA

(24 domande in 36 minuti)

1) Quale tra i seguenti oggetti non è uno strumento di misura?

- La calamita
- L'orologio
- La bilancia
- Il termometro

2) Per quale motivo un astronauta in una stazione orbitale è senza peso?

- Perché il peso viene bilanciato esattamente da una forza diretta in senso opposto
- Perché il suo peso è diminuito a causa dei continui sforzi fisici a cui è sottoposto
- Perché l'attrazione gravitazionale da parte della Luna risente dell'attrazione da parte della Luna

3) Rispetto al livello del mare, andando in alta montagna, la pressione:

- È superiore Non cambia
- È inferiore
- Non ha senso parlare di pressione

4) Un remo immerso nell'acqua appare piegato:

- Perché è stato piegato
- Perché la parte immersa è più leggera
- Perché è un effetto ottico
- Perché gli oggetti nei liquidi si deformano

5) Un telefono cellulare funziona impiegando:

- Le vibrazioni metalliche
- Gli impulsi luminosi
- Le onde elettromagnetiche
- Le onde acustiche

6) Il cronometro digitale contiene:

- Un circuito elettrico
- Un piccolo motore
- Un termometro
- Un orologio

7) Pensa a una mela: quale di queste proprietà non è una grandezza Fisica

- Massa
- Sapore
- Volume
- Temperatura

8) Siano dati due solidi di pari volume (1 cm^3) fatti rispettivamente di ferro e d'alluminio. I due solidi hanno lo stesso peso?

- Sì
- No

9) I corpi allo stato liquido

- posseggono una forma propria
- non posseggono una forma propria
- sono volatili

10) Versando dell'acqua nell'olio

- l'acqua si stratifica sotto l'olio
- l'olio si stratifica sotto l'acqua
- olio e acqua si mescolano
- l'olio di pone tra due strati di acqua

11) I gas

- sono comprimibili
- sono incompressibili
- se allo stato liquido si
- se allo stato aeriforme no

12) L'acqua del rubinetto ha densità

- maggiore dell'acqua salata
- minore dell'acqua salata
- uguale all'acqua salata

13) Nei fluidi sono compresi corpi

- solidi e liquidi
- solidi e gassosi
- solidi e plasma
- gassosi e liquidi
- plasma e solidi

Questionario ANONIMO

Data: ____/____/____

Classe: ____ sez. ____

CHIARIMENTO per lo STUDENTE

Un test d'ingresso di Fisica non ha alcun valore valutativo né serve all'insegnante per farsi un'idea della bravura o meno del singolo discente.

*Si suggerisce infatti di rendere comunque **anonimo** il questionario, in modo che ognuno risponda con maggiore tranquillità.*

Ha come unico scopo quello di capire quale sia il livello di partenza generale della classe, la capacità di ragionamento degli stessi e da queste preziose informazioni calibrare la propria programmazione didattica in modo efficace ed incisiva.

Provare a "sbirciare" sul foglio del compagno vicino è un inutile spreco di tempo, che rischia però di inquinare quelle informazioni, desumendo un livello di partenza della classe diverso da quello reale.

14) Il ghiaccio galleggia in una bibita perché

- ha un peso specifico maggiore di quello della bibita
- ha un peso specifico minore di quello della bibita
- ha lo stesso peso specifico di quello della bibita

15) Quanti kg d'aria sono contenuti in una stanza di

5 m x 4 m x 3 m (1 m³ circa 1,29 kg)?

- 76,40
- 76,44
- 77,40
- 77,44
- 78,44

16) Considerando tre cubi di pari volume, uno di ferro, uno di legno e uno di alluminio quale troverai più pesante

- legno
- ferro
- alluminio

17) Calcola a quanti litri corrispondono 60 kg di benzina (750kg = 1m³)

- 80
- 8000
- 8
- 800
- 0,8

18) Siano dati due solidi di pari volume (1 dm³) fatti rispettivamente di rame e di ghisa. I due solidi hanno lo stesso peso?

- Sì
- No

19) Facendo ruotare un triangolo rettangolo di un giro completo attorno ad un cateto, si ottiene?

- un cono di altezza pari alla lunghezza del cateto intorno al quale è avvenuta la rotazione
- un prisma con base triangolare

- una piramide con base triangolare

20) Come si calcola l'area di un triangolo qualunque?

- Moltiplicando tra loro la misura dei due cateti e dividendo per 2 il prodotto ottenuto
- Sommando la misura della base maggiore e la misura della base minore e dividendo per due la somma ottenuta
- Moltiplicando la diagonale maggiore e la diagonale minore e dividendo per 2 il prodotto ottenuto
- Moltiplicando la misura della base per la misura dell'altezza ad essa relativa e dividendo per 2 il prodotto ottenuto

21) Due angoli opposti al vertice sono sicuramente ...

- congruenti
- acuti
- supplementari
- ottusi

22) Quanti cm corrispondono a 9,11 dm?

- 0,911 cm
- 0,0911 cm
- 91,1 cm
- 911 cm

23) È dato il triangolo ABC, con angoli di 35°, 65° e 90°. Questo triangolo è ...

- Acutangolo
- Rettangolo
- Isoscele
- nessuna delle precedenti

24) La temperatura sul monte Bianco ha raggiunto la scorsa notte i 29 gradi sotto zero; questa mattina la temperatura è aumentata di 8 gradi, raggiungendo ...

- +8°C
- 37°C
- +19°C
- 21°C

Tabella di costanti fisiche

| Grandezza | Simbolo usuale | Valore | unità |
|-------------------------------------|----------------|--|--|
| Costante gravitazionale | G | $6,67 \cdot 10^{11} \frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$ | $\frac{N \cdot m^2}{Kg^2}$ |
| Velocità della luce nel vuoto | c | $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Costante dielettrica del vuoto | ϵ_0 | $8,854\ 187\ 817... \times 10^{-12} \text{ N/m}$ | $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| Permeabilità del vuoto | μ_0 | $4\pi \times 10^{-7}$ | $\text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ |
| Costante di gravitazione universale | G | $6,672\ 59(85) \times 10^{-11}$ | $\text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ |
| Massa della Terra | M_T | $5,98 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$ | Kg |
| Raggio medio della Terra | R_T | $6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$ | m |
| Distanza media Terra-Sole | d_{T-s} | $1,49 \cdot 10^{11} \text{ m}$ | m |
| Distanza media Terra-Luna | d_{T-L} | $3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$ | m |
| Pressione atmosferica | p_A | $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ | Pa |
| Costante di Planck | h | $6,626\ 068\ 76(52) \times 10^{-34}$ | $\text{J} \cdot \text{s}$ |
| Carica dell'elettrone | e | $1,602\ 176\ 462(63) \times 10^{-19}$ | C |
| Massa a riposo dell'elettrone | m_e | $9,109\ 381\ 88(72) \times 10^{-31}$ | kg |
| Massa a riposo del protone | m_p | $1,672\ 621\ 58(13) \times 10^{-27}$ | kg |
| Massa a riposo del neutrone | m_n | $1,674\ 927\ 16(13) \times 10^{-27}$ | kg |
| Unità di massa atomica | 1 amu | $1,660\ 538\ 73(13) \times 10^{-27}$ | kg |
| Numero di Avogadro | L oppure N_A | $6,022\ 141\ 99(47) \times 10^{23}$ | mol^{-1} |
| Costante di Boltzmann | k | $1,380\ 6503(24) \times 10^{-23}$ | $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Costante di Faraday | F | $9,648\ 534\ 15(39) \times 10^4$ | $\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| Costante dei gas | R | 8,314 472(15) | $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| Raggio di Bohr | a_0 | $5,291\ 772\ 083(19) \times 10^{-11}$ | m |
| Costante di Rydberg | R_∞ | $1,097\ 373\ 156\ 8549(83) \times$ | m^{-1} |

Fisica per la scuola superiore

| | | 10^7 | |
|---|----------------|--|-------------------------------|
| Grandezza | Simbolo usuale | Valore | unità |
| Magnetone di Bohr | μ_B | $9,274\ 008\ 99(37) \times 10^{-24}$ | $J \cdot T^{-1}$ |
| Volume molare per gas ideale a 1 bar, 0°C | | 22,710 981(40) | $L \cdot mol^{-1}$ |
| Momento magnetico dell'elettrone | μ_e | $-9,284\ 763\ 62(37) \times 10^{-24}$ | $J \cdot T^{-1}$ |
| Momento magnetico del protone | μ_p | $1,410\ 607\ 61(47) \times 10^{-26}$ | $J \cdot T^{-1}$ |
| Magnetone nucleare | μ_N | $5,050\ 786\ 6(17) \times 10^{-27}$ | $J \cdot T^{-1}$ |
| Rapporto giromagnetico del protone | γ_p | $2,675\ 221\ 28(81) \times 10^8$ | $s^{-1} \cdot T^{-1}$ |
| Costante di Stefan-Boltzmann | σ | $5,670\ 400(40) \times 10^{-8}$ | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ |
| Prima costante di radiazione | c_1 | $3,741\ 774\ 9(22) \times 10^{-16}$ | $W \cdot m^2$ |
| Seconda costante di radiazione | c_2 | $1,438\ 769\ (12) \times 10^{-2}$ | $m \cdot K$ |
| Accelerazione di gravità (livello del mare) | g | 9,80665 | $m \cdot s^{-2}$ |
| Forza | F | 1N = 1 kg m/s ² 1 kgf = 9.80665 kg m/s ² \approx 9.81 kg m/s ² | N |
| Calore | c | 1 kcal = 4186.8 J | J |
| Potenza | P | 1 CV = 735.5 W 1 HP = 745.7 W | W |
| EVENTUALI COSTANTI AGGIUNTIVE | | | |
| Grandezza | Simbolo usuale | Valore | unità |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Simulazione seconda prova scritta Liceo Scientifico Febbraio 2019

Problema 1 quesito 3.....Par.12.2
Problema 1 quesito 4Par. 12.2
Problema 2 quesito 1Par. 11.8
Problema 2 quesito 2Par. 11.13
Quesito 6Par. 4.13
Quesito 7Par. 6.4
Quesito 8Par. 14.3

Simulazione seconda prova scritta Liceo Scientifico Aprile 2019

Problema 1
Problema 2
Quesito ...
Quesito ...
Quesito ...



Indice analitico

- aberrazioni ottiche**; 292
-
- acca tagliata (c. di Planck); 486
 acceleratori di particelle; 505
 accelerazione centripeta; 108
 accelerazione di gravità; 103; 105
 accelerazione e sicurezza; 104; 105
 accelerazione gravità su un pianeta; 134
 accelerazione media; 101
 accelerazione scalare istantanea; 101
 accelerazione tangenziale; 108
 accumulatori; 357
 adiabatica; 233
 adroni; 502
 adronizzazione; 502
 alessandro volta; 357; 383; 385
 alternatore; 451
 altezza di un suono; 260
 amperè; 353
 Ampère, André-Marie; 413; 439
 amperometro; 354
 analisi dimensionale; 21
 anodo; 383
 anomalia dell'acqua; 191; 193
 Archimede da Siracusa; 76, 89
 aree; 5
 armature; 326
 ascensore; 144
 atlas; 504
 attrito viscoso del mezzo; 115
 aurore boreali; 427
 autoinduzione; 447
 autovelox; 99
 azione a distanza; 141
- baricentro**; 65
-
- barometri; 79
 battimenti; 262; 265
 Bernoulli; 81; 233
 bicicletta; 131
 Biot-Savart; 415
 Bohr, Niles; 487
 Born, Max; 483
 bosone di Higgs; 504
 bosoni; 498
 brinamento; 202
 buchi neri; 515
- calcolo dell'energia interna**;
 240
-
- calore; 182
 calore latente; 203
 calore molare; 194
 calore specifico; 194
 calore specifico molare; 222
 caloria; 182
 calorimetro; 199
 campi conservativi; 141
 campo; 310
 campo conservativo; 314
 campo elettrico generato da più cariche puntiformi; 313
 campo elettrico generato da un filo carico; 323
 campo elettrico generato da una carica puntiforme; 311
 campo elettrico generato da una distribuzione di cariche su una sfera conduttrice; 325
 campo elettrico generato da una distribuzione di cariche su una sfera isolante; 325
 campo gravitazionale; 140
 campo magnetico; 407; 460
 campo magnetico generato dal filo percorso da corrente; 416
 campo magnetico in un solenoide; 417
 campo magnetico nel centro di una spira circolare; 417
 campo magnetico su una spira percorsa da corrente; 428
 campo magnetico terrestre; 408
 capacità elettrica; 327
 capacità equivalente; 334
 capacità termica; 196
 capillarità; 73
 caratteristiche di un'onda; 256
 carica di un condensatore; 379
 carica elettrica; 305
 carrucola; 67
 catodo; 383
 cause del moto; 124

- Cavendish, Henry; 55
 Cern di Ginevra; 498; 504
 cicli termodinamici; 235
 ciclo di Carnot; 237
 ciclo di isteresi; 419
 ciclo frigorifero; 239
 ciclo Otto; 236
 cifre significative; 13
 cinematica e dinamica; 92
 circuitazione; 414
 circuitazione di campo magnetico; 414
 circuiti integrati; 392
 circuiti RC; 379
 circuito elettrico; 351; 354
 circuito RL; 447,455; 456
 classificazione delle lenti; 289
 CMS; 504
 codice colori per le resistenze; 357
 coefficiente di attrito; 40
 coefficiente di autoinduzione L ; 447
 colori; 285
 componenti x e y del vettore; 39
 comportamento delle onde; 257
 composizione di vettori; 35
 vettori; 35
 Compton, Arthur Holly; 481
 condensatore piano; 326
 condensatori; 326
 condensatori cilindrici; 328
 condensatori in parallelo; 332
 condensatori in serie; 333
 condensazione; 202
 conduttanza; 357
 conduttori; 307; 350
 conduzione; 205
 conduzione elettrica nel vuoto; 386
 congresso di Solvay; 485
 convezione; 205
 corpi trasparenti; 281
 corpo immerso in un liquido; 77
 corpo immerso nell'atmosfera; 78
 corpo nero; 476
 corpo rigido; 50, 64
 corrente alternata; 449
 corrente elettrica; 350; 353
 corrente elettrica nei gas; 386
 correnti concatenate; 414
 correnti indotte; 442
 coseno goniometrico; 44
 costante di Boltzmann; 232
 costante di permeabilità magnetica del vuoto; 415
 costante di Planck; 478
 costante di tempo nel circuito RC; 380
 costante di Wien; 477
 costante dielettrica nel vuoto; 309
 cotangente goniometrica; 46
 Coulomb Charles Augustin de; 308; 347
 criteri di arrotondamento; 13
 Curie, Marie; 495
d.d.p.; 365
 de Broglie, Louis; 482
 densità di massa; 6
 densità relativa; 77
 densità superficiale di carica; 322
 derivata di una funzione; 98,
 derivata di funzione applicata alla fisica; 526
 diapason; 262
 dielettrici; 310
 difetti della vista; 294; 295
 differenza di potenziale; 320
 diffrazione della luce; 278,286
 dilatazione dei gas; 192; 193
 dilatazione lineare dei solidi; 187
 dilatazione superficiale dei solidi; 188
 dilatazione termica; 187
 dilatazione termica nei liquidi; 191
 dilatazione volumica dei solidi; 189
 dinamo; 451
 dinamometro; 34
 diodo a giunzione; 391
 dipolo elettrico; 309
 dipolo magnetico; 421

dipolo magnetico terrestre; 423
disordine; 244
dispersione della luce; 285
disputa Galvani-Volta; 385
dominio di Weiss; 424
drogaggio dei semiconduttori;
389

ebollizione; 202

eco; 261
effetto Compton; 481
effetto Doppler; 266
effetto fotoelettrico; 278,478
effetto Joule; 369
effetto tunnel; 488
Einstein, Albert; 506; 523
elettrizzazione; 305
elettrizzazione per contatto;
306
elettrizzazione per induzione;
306
elettrizzazione per strofinio;
305
elettrocalamita; 421
elettrolisi; 382
elettromagnetismo; 441
elettrone; 500
elettronvolt; 461
elettroscopio; 307
elettrostatica; 304
energia; 170
energia accumulata nei
condensatori; 331
energia cinetica; 170
energia del campo magnetico;
457
energia elettrica; 367; 453
energia interna di un gas
perfetto; 233
energia meccanica; 173
energia potenziale elastica; 172
energia potenziale elettrica;
319
energia potenziale
gravitazionale; 171
entanglement; 483
entropia; 244
enunciato di clausius; 243
enunciato di kelvin; 243

equazione di Ampère-
Maxwell; 465
equazione di Bernoulli; 81
equazione di Faraday-Henry;
466
equazione di stato; 218
equazione di stato dei gas
perfetti; 228; 230
equazioni di Maxwell; 463,466
equilibrio del corpo rigido; 63
equilibrio di un corpo; 60
equilibrio termodinamico; 224
equivalenza tra lavoro e calore;
200
equivalenza tra massa inerziale
e gravitazionale; 129
errore assoluto; 11
errore relativo; 11
errori di misura; 7; 8
esa; 303
esperienza di Ampère; 413
esperienza di Faraday; 413

f.e.m.; 365

facebook; 122
farad; 328
Faraday; 317; 413; 471
Faraday-Neumann-Lenz,
legge; 446
fasce di Van Allen; 427
fenomeni magnetici; 405
fermioni; 499
fisica moderna; 473
fissione nucleare; 490
fluidi; 69
fluido ideale; 80
flusso concatenato; 444
flusso dell'induzione
magnetica; 444
flusso di un vettore; 314
fonografo; 264; 265
fonti rinnovabili; 180
formazione delle immagini;
291
formule goniometriche; 49
forza; 33
forza apparente; 143
forza attrito volvente; 116
forza centrifuga; 143
forza conservativa; 171

forza di attrito volvente; 116
 forza di Lorentz; 425
 forza elastica; 39
 forza elettromotrice; 365
 forza peso e massa; 43
 forze a distanza; 33
 forze apparenti; 142
 forze d'attrito; 40; 41
 forze di contatto; 33
 forze fondamentali in natura;
 496
 forze non conservative; 174
 forze nucleari; 54,490
 fotone; 479
 freecooling; 207
 Fresnel, Augustin-Jean; 282
 fulcro; 66
 fusione; 202
 fusione nucleare; 490

gabbia di Faraday; 317

Galilei, Galileo; 2; 30
 Galvani, Luigi; 385, 386; 431
 galvanometro; 431
 gas; 219
 gas ideale o gas perfetto; 228;
 230
 gatto di Schrödinger; 483
 Gauss, Johann Friedrich Carl;
 316, 408
 generatore di tensione; 355
 germanio; 387
 gittata; 113
 God particle; 505
 goniometria e di trigonometria;
 44
 grandezze di stato dei gas; 220
 grandezze fisiche; 3
 gravitazione universale; 131;
 133

Heisenberg, Werner; 486; 494

hertz; 107
 Hertz, Heinrich Rudolf; 478
 Higgs, Peter; 504
 hubble; 302
 Huygens, Christiaan; 277; 282

illusioni ottiche; 296

impedenza; 450

impedenza; 458
 impulso della forza; 157
 indice di rifrazione; 284
 induttanza; 447
 induzione magnetica; 444
 integrale di funzione applicato
 alla fisica; 528
 intensità del suono; 261
 interazione magnetica; 406
 interferenza; 287
 interferenza; 258; 262; 264
 interferenza costruttiva; 262
 interferenza distruttiva; 262
 interpretazione di Copenaghen;
 482
 interpretazione microscopica
 dell'effetto Joule; 371
 ipotesi di Ampère; 423
 irraggiamento; 206
 isobara; 226
 isocora; 227
 isolanti; 307; 350
 isoterma; 225
 isteresi ferromagnetica; 420

Joule, James Prescott; 368

Kelvin, William Thomson; 253

Keplero, Giovanni; 136, 149
 Kirchhoff, Gustav Robert
 Georg; 371

lacune; 388

large electron-positron; 504
 large hadron collider; 505
 lavoro; 165; 167
 lavoro di una forza non
 costante; 168
 le forze; 33
 le forze fondamentali; 54
 le scienze; 248
 legge di Ampere; 414
 legge di Avogadro; 225
 legge di Biot-Savart; 415
 legge di Boyle e Mariotte; 224
 legge di Charles; 226
 legge di Coulomb; 308
 legge di Coulomb
 generalizzata; 310

- legge di Faraday-Neumann-
lenz; 446
legge di Hooke; 39
legge di Joule; 370
legge di Lenz; 466
legge di Poisson; 234
legge di Snell-Cartesio; 284
legge di Stefan -Boltzmann;
477
legge di Stevin; 71
legge di Stokes; 115
legge fondamentale della
calorimetria; 196
legge oraria del moto; 99
leggi di Keplero; 135
leggi di Kirchhoff; 371
leggi di proporzionalità; 15
lente convergente; 290
lente divergente; 290
lenti; 289
lenti sferiche; 289
lep; 504
leptoni; 500
leve; 66
leve di primo genere; 67
leve di secondo genere; 67
LHC; 504
limite; 98
linee di forza del campo
elettrico; 313
LorentzHendrik; 514
lunghezza; 4
lunghezza d'onda; 257,260,460
lunghezza d'onda di de
Broglie; 484
- macchina termodinamica;**
235
-
- macchine e loro rendimento;
175
macchine semplici; 65
maglia; 371
magnetismo; 405
manometri; 79
massa; 4
massa gravitazionale; 129
massa inerziale; 128
massa inerziale e massa
gravitazionale; 128
materia; 183
- Maxwell, James Clerck; 462
meccanica quantistica; 482
metodo scientifico; 2
Michelson e Morley; 475
miglio; 9
misura diretta ed indiretta; 12
misure; 7; 8
modello quantistico dell'atomo;
494
modello standard; 497
mole; 221
momento di dipolo elettrico;
329
momento di dipolo magnetico;
422
momento di una coppia di
forze; 62
momento di una forza; 61
monopoli magnetici; 406
moto armonico; 108
moto armonico semplice; 113
moto circolare uniforme; 106
moto di un corpo lanciato in
obliquo; 112
moto di un corpo lanciato
orizzontalmente; 111
moto di un corpo lanciato
verticalmente; 112
moto di un satellite; 137
moto di una carica elettrica in
un campo magnetico; 425
moto di una carica in un campo
elettrico uniforme; 335
moto generato da una molla;
113
moto relativo; 95
moto rettilineo uniforme; 99
moto rettilineo uniformemente
accelerato; 102
motore a scoppio; 236
motore elettrico; 429
muoni; 501
- Nasa; 303**
-
- natura corpuscolare della luce;
481
natura della luce; 277; 462
neutrino; 498
neutrino muonico; 501
neutrone; 498

nodo; 371
 notazione scientifica; 13
 numero di avogadro; 221
 numero di nepero; 380

occhio; 293

Oersted, Hans Christian; 412
 Ohm, George; 357,400
 onda; 255
 onda elettromagnetica; 467
 onde armoniche; 258
 onde elettromagnetiche; 459
 onde longitudinali; 256
 onde stazionarie; 257
 onde trasversali; 256
 orbita geostazionaria; 138
 oscillazione di una molla; 110

Panisperna, via; 490

paradosso idrostatico; 73; 75
 Pascal, Blaise; 78
 passaggi di stato; 202
 pendolo semplice; 109
 periodo; 257
 peso specifico; 70
 peso volumico; 72
 piano di Clapeyron; 221
 piano inclinato; 60
 pila di Volta; 383
 Planck, Max; 477
 polarizzazione di un dielettrico; 329
 portata; 11
 postulato di de Broglie; 485
 potenza; 66; 169
 potenza elettrica; 368
 potenze, algebra; 14
 potenziale elettrico; 319
 potere calorifico; 201
 potere delle punte; 318
 precisione di uno strumento; 11
 pressione; 68
 pressione atmosferica; 72, 78
 pressione dei gas; 220
 pressione idrostatica; 72
 pressione in un gas perfetto; 232
 prima legge di Gay-Lussac o di Charles; 226
 prima legge di Ohm; 358

primo principio della dinamica; 125
 primo principio della termodinamica; 242
 principi della dinamica; 124
 principio dei vasi comunicanti; 73; 75
 principio di Archimede; 76
 principio di complementarità di Bohr; 487
 principio di conservazione con forze non conservative; 174
 principio di conservazione dell'energia meccanica; 173
 principio di conservazione della quantità di moto; 160
 principio di esclusione di Pauli; 499
 principio di Fermat; 282
 principio di Huygens-Fresnel; 282
 principio di indeterminazione di Heisenberg; 486
 principio di le Chatéllier; 466
 principio di Pascal; 70
 principio di relatività; 508
 principio zero della termodinamica; 241
 prodotto di un vettore per uno scalare; 37
 prodotto scalare; 38
 prodotto vettoriale; 38
 propagazione della luce; 278
 punto materiale; 49; 64

quantità di moto; 157

quantità di moto e impulso; 157
 quark; 499, 502

radianza; 476

radiazione di corpo nero; 476
 radioattività; 495
 ramo; 371
 rapporto incrementale; 100
 rappresentazione dei dati; 15
 reattanza; 459
 reazioni vincolari; 33
 relatività di Einstein; 506
 relatività speciale; 510

- relazione di laboratorio; 17
relazione fondamentale della goniometria; 45
rendimento; 175
rendimento di una macchina termica; 237
resistenza; 66
resistenza elettrica; 357
resistenze di shunt; 377
resistenze in serie e in parallelo; 374
resistività; 362
resistore; 358
resistori in parallelo; 375
resistori in serie; 374
riflessione della luce; 281
rifrazione della luce; 283
rimbombo; 261
ripetibilità; 3
risolvere i problemi di fisica; 20
risonanza; 262
Rubbia, Carlo; 497
-
- scala Celsius**; 185
-
- scala Fahrenheit; 185,215
scala Kelvin; 186
scarica di un condensatore; 381
Schrödinger, Erwin; 483; 494
scomposizione di una forza; 50
seconda legge di Gay-Lussac; 227
seconda legge di Ohm; 362
secondo principio della dinamica; 127
secondo principio della termodinamica; 242
semiconduttori; 387
seno goniometrico; 44
sensibilità di uno strumento; 10
sfasamento; 450
silicio; 387
sistema adiabatico; 217
sistema aperto; 217
sistema cartesiano; 93
sistema chiuso; 217
sistema di riferimento inerziale; 124
sistema fisico; 217
sistema isolato; 159; 217
- sistemi di riferimento; 93, 124
sistemi di riferimento non inerziali; 142
sistemi termodinamici; 217
Snell, Willebrordus; 284
solenoide; 417
sommatoria; 64
sostanze ferromagnetiche; 424
spazio di frenata; 104; 105
spettrometro di massa; 426
spettro elettromagnetico; 461
spin; 494
spire; 417
statore; 429
Stevino, Simone; 71
strumenti ottici; 293; 295
struttura atomica; 491
sublimazione; 202
suoni semplici; 259
suono; 259
superconduttori; 363
- tangente**; 46
-
- tauone; 501
telescopio spaziale; 302
temperatura; 182
temperatura assoluta; 247
temperatura critica; 218
temperatura di equilibrio; 197
temperature critiche; 364
tempo; 4
tensione efficace; 449
teorema dell'energia cinetica; 170
teorema dell'impulso; 158
teorema di Carnot; 239
teorema di Gauss; 316
teoria cinetica dei gas; 231
teoria del tutto; 503
teoria di Planck; 478
termometro; 184
terremoti; 273
terzo principio della dinamica; 130
Tesla, Nikola; 407
Thomson, Joseph John; 431
timbro; 261
torchio idraulico; 70
Torricelli, Evangelista; 78
traiettoria; 94

transistor; 392
trasformatore; 450
trasformazioni adiabatiche; 233
trasformazioni di Lorentz; 509,
512
trasmissione del calore; 204
trigonometria; 47

unità astronomica; 10

urti; 160
urto elastico; 165

valor medio; 11

vantaggio meccanico; 66
vaporizzazione; 202
vasi comunicanti; 73
vasi comunicanti con liquidi
diversi; 73
velocità; 95
velocità angolare; 107
velocità areolare; 136
velocità della luce; 280
velocità istantanea; 98

velocità limite corpo in caduta
libera; 115
velocità media; 97
velocità tangenziale; 107
verricello; 68
verso convenzionale della
corrente elettrica; 352
vettore spostamento; 101
vettori; 34
vincoli; 33
viscosità di un fluido; 79
Volta, Alessandro; 355,
381,383
voltmetro; 354
volumi; 5

Watt, James; 368

Wien, Wilhelm; 477

yard; 9

zero assoluto; 186

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1 Figure geometriche solide | 5 |
| Figura 2 bilancia..... | 6 |
| Figura 3 Lettura del calibro | 7 |
| Figura 4 Sensibilità di uno strumento..... | 10 |
| Figura 5 Rappresentazione grafica dei dati | 15 |
| Figura 6 Rappresentazione grafica della proporzionalità lineare ... | 15 |
| Figura 7 Rappresentazione grafica della proporzionalità diretta..... | 16 |
| Figura 8 Proporzionalità quadratica..... | 16 |
| Figura 9 Proporzionalità inversa | 16 |
| Figura 10 Galileo Galilei (15 febbraio 1564 -8 gennaio 1642) | 30 |
| Figura 11 esempi di forze muscolari | 33 |
| Figura 12 Dinamometro | 33 |
| Figura 13 Rappresentazione | 34 |
| Figura 14 Esempio di forza obliqua | 34 |
| Figura 15 Calcolatrice scientifica | 36 |
| Figura 16 Prodotto scalare tra due vettori..... | 38 |
| Figura 17 Prodotto vettoriale | 38 |
| Figura 18 Regola della mano destra per il prodotto vettoriale..... | 38 |
| Figura 19 Esempio di allungamento di una molla..... | 39 |
| Figura 20 Forze d'attrito | 40 |
| Figura 21 Direzione della forza gravitazionale di tipo radiale e diretta sempre verso il centro della Terra | 44 |
| Figura 22 Funzioni goniometriche | 44 |
| Figura 23 Teorema di Pitagora con le aree | 45 |
| Figura 24 Tangente e cotangente goniometriche | 46 |
| Figura 25 alcuni valori noti delle funzioni goniometriche principali | 47 |
| Figura 26 Dalla Goniometria alla Trigonometria..... | 47 |
| Figura 27 triangolo rettangolo con raggio qualunque..... | 48 |
| Figura 28 Importanti formule goniometriche e trigonometriche | 49 |
| Figura 29 Rappresentazione del punto materiale..... | 49 |
| Figura 30 Corpo rigido..... | 49 |
| Figura 31 Scomposizione di una forza lungo gli assi cartesiani | 50 |
| Figura 32 rappresentazione dell'atomo con la nube elettronica | 54 |
| Figura 33 Fulmine che colpisce un traliccio di alta tensione..... | 56 |
| Figura 34 Struttura dell'atomo | 57 |
| Figura 35 Equilibrio delle forze su un piano orizzontale..... | 60 |
| Figura 36 Forza peso scomposta su un piano inclinato | 60 |
| Figura 37 Piano inclinato con attrito | 61 |
| Figura 38 Momento di una forza | 62 |
| Figura 39 Momento di una coppia di forze | 62 |
| Figura 40 Esempio di momento di una forza - Bilancia..... | 63 |
| Figura 41 Traslazione corpo rigido..... | 63 |
| Figura 42 Rotazione corpo rigido..... | 63 |
| Figura 43 Coppia di forze che non producono momento | 64 |
| Figura 44 Baricentro di un corpo | 65 |
| Figura 45 Tavola delle macchine semplici | 66 |
| Figura 46 Leva di primo genere | 66 |
| Figura 47 Leve di secondo genere | 67 |
| Figura 48 Leve di terzo genere | 67 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 49 Carrucola - diversi tipi</i> | 67 |
| <i>Figura 50 Verricello</i> | 68 |
| <i>Figura 51 Blais Pascal 19 giugno 1623 – Parigi, 19 agosto 1662</i> | 69 |
| <i>Figura 52 Principio di Pascal</i> | 70 |
| <i>Figura 53 Torchio idraulico</i> | 70 |
| <i>Figura 54 Esempio Torchio idraulico in un'autofficina</i> | 71 |
| <i>Figura 55 Legge di Stevin</i> | 71 |
| <i>Figura 56 Paradosso idrostatico</i> | 73 |
| <i>Figura 57 Principio dei</i> | 73 |
| <i>Figura 58 Effetto della Capillarità</i> | 73 |
| <i>Figura 59 Vasi comunicanti con liquidi non miscibili</i> | 74 |
| <i>Figura 60 Principio di Archimede</i> | 76 |
| <i>Figura 61 Corpo immerso in un liquido</i> | 77 |
| <i>Figura 62 Galleggiamento di un corpo in un fluido</i> | 77 |
| <i>Figura 63 mongolfiera come esempio del Principio di Archimede</i> ... | 78 |
| <i>Figura 64 Esperienza di Torricelli</i> | 78 |
| <i>Figura 65 Manometro</i> | 79 |
| <i>Figura 66 Barometro</i> | 79 |
| <i>Figura 67 Viscosità di un fluido</i> | 80 |
| <i>Figura 68 Teorema di Bernoulli per i fluidi</i> | 80 |
| <i>Figura 69 Archimede da Siracusa (287 a.C. - 212 a.C)</i> | 89 |
| <i>Figura 70 Sistema di riferimento mono dimensionale</i> | 93 |
| <i>Figura 71 Sistema di riferimento monodimensionale curvilineo</i> | 93 |
| <i>Figura 72 Sistema di riferimento bidimensionale NON cartesiano</i> ... | 93 |
| <i>Figura 76 Traiettorie simili</i> | 94 |
| <i>Figura 73 Sistema di riferimento Cartesiano</i> | 94 |
| <i>Figura 74 Sistema di riferimento cartesiano tridimensionale</i> | 94 |
| <i>Figura 75 Esempio di traiettoria: una strada</i> | 94 |
| <i>Figura 77 Moti relativi galileiani</i> | 96 |
| <i>Figura 78 Somma di vettori spostamento</i> | 97 |
| <i>Figura 79 Vettore velocità</i> | 97 |
| <i>Figura 80 Concetto di limite di funzione</i> | 98 |
| <i>Figura 81 Sistema Tutor autostradale</i> | 99 |
| <i>Figura 82 Rappresentazione della Legge oraria del moto</i> | 99 |
| <i>Figura 83 Legge oraria del moto come nella relazione (14)</i> | 100 |
| <i>Figura 84 Esempi di vettori spostamento</i> | 101 |
| <i>Figura 85 Rappresentazioni grafiche di una accelerazione</i> | 101 |
| <i>Figura 86 Moto rettilineo uniformemente accelerato</i> | 102 |
| <i>Figura 87 Paracadutisti in caduta libera</i> | 103 |
| <i>Figura 88 Spazi di frenata in base alla velocità</i> | 104 |
| <i>Figura 90 Moto circolare uniforme - spostamenti</i> | 106 |
| <i>Figura 89 Moto circolare uniforme</i> | 106 |
| <i>Figura 91 Moto circolare uniforme - velocità tangenziale</i> | 106 |
| <i>Figura 92 Velocità angolare nel moto circolare uniforme</i> | 107 |
| <i>Figura 93 Accelerazione centripeta nel moto circolare uniforme</i> ... | 108 |
| <i>Figura 94 Moto armonico semplice</i> | 109 |
| <i>Figura 95 il Pendolo semplice</i> | 109 |
| <i>Figura 96 Oscillazione di un molla</i> | 110 |
| <i>Figura 97 Moto di un corpo lanciato orizzontalmente</i> | 111 |
| <i>Figura 98 Moto di un corpo lanciato verticalmente</i> | 112 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 99 Moto di un corpo lanciato obliquamente</i> | 112 |
| <i>Figura 100 Legge di Hooke per una molla appesa ad un sostegno.</i> | 113 |
| <i>Figura 101 Moto dell'elettrone tra due armature</i> | 119 |
| <i>Figura 102 Congresso Solvay a Bruxelles del 1927</i> | 122 |
| <i>Figura 103 Albert Einstein (14 marzo 1879 - 18 aprile 1955)</i> | 122 |
| <i>Figura 104 Mulino ad acqua</i> | 124 |
| <i>Figura 105 Trasmissione della quantità di moto</i> | 124 |
| <i>Figura 106 Moti relativi</i> | 124 |
| <i>Figura 107 Seconda Legge di Newton</i> | 127 |
| <i>Figura 108 Massa inerziale e massa gravitazionale</i> | 129 |
| <i>Figura 109 Moto di discesa da una barca</i> | 131 |
| <i>Figura 110 Bicicletta</i> | 131 |
| <i>Figura 111 Gravitazione tra corpi</i> | 132 |
| <i>Figura 112 Moto dei pianeti intorno al Sole</i> | 135 |
| <i>Figura 113 Afelio e Perielio</i> | 136 |
| <i>Figura 114 Satellite in orbita intorno alla Terra</i> | 137 |
| <i>Figura 115 Satelliti geostazionari</i> | 138 |
| <i>Figura 116 Campo gravitazionale</i> | 141 |
| <i>Figura 117 Campo gravitazionale conservativo</i> | 141 |
| <i>Figura 118 Forze centrifuga e centripeta cui sono soggetti i pianeti</i> | 142 |
| <i>Figura 119 Forze apparenti in un ascensore</i> | 144 |
| <i>Figura 120 Giovanni Keplero (27 dic 1571 - 15 nov 1630)</i> | 149 |
| <i>Figura 121 Sistema fisico</i> | 159 |
| <i>Figura 122 Urto tra biglie- caso bidimensionale</i> | 165 |
| <i>Figura 124 Lavoro di una forza</i> | 165 |
| <i>Figura 123 Urto tra biglie - caso bidimensionale. Rappresentazione dei vettori</i> | 165 |
| <i>Figura 1252 Lavoro di una forza non costante</i> | 168 |
| <i>Figura 126 Energia di una turbina ad acqua</i> | 170 |
| <i>Figura 127 Pannelli fotovoltaici</i> | 180 |
| <i>Figura 128 Turbina eolica</i> | 180 |
| <i>Figura 129 corpi caldi, corpi freddi</i> | 182 |
| <i>Figura 130 Scambio di calore tra corpi</i> | 182 |
| <i>Figura 131 Termometri in due scale termiche</i> | 184 |
| <i>Figura 132 Dilatazione lineare dei corpi</i> | 188 |
| <i>Figura 133 Dilatazione superficiale dei corpi</i> | 188 |
| <i>Figura 134 Sfera di Gravesande</i> | 189 |
| <i>Figura 135 Anomalia dell'acqua</i> | 191 |
| <i>Figura 136 Temperatura di equilibrio di corpi in contatto termico</i> | 197 |
| <i>Figura 137 Calorimetro</i> | 199 |
| <i>Figura 138 Macchina di Joule</i> | 200 |
| <i>Figura 139 Alcuni valori nutrizionali ed energetici</i> | 201 |
| <i>Figura 140 Passaggi di stato</i> | 202 |
| <i>Figura 141 Schema passaggi di stato</i> | 202 |
| <i>Figura 142 Passaggi di stato rapportati al calore</i> | 203 |
| <i>Figura 143 Moti convettivi del calore</i> | 205 |
| <i>Figura 144 Irraggiamento dei corpi e dei liquidi</i> | 206 |
| <i>Figura 145 vapore ceduto da un caffè bollente</i> | 207 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 146 Gabriel Fahrenheit (24 maggio 1686 - 16 settembre 1736)</i> | 215 |
| <i>Figura 147 Band di cantanti cinesi chiamati “ Fahrenheit”</i> | 215 |
| <i>Figura 148 Sistema fisico termodinamico</i> | 217 |
| <i>Figura 149 Stato della materia in base a pressione e temperatura</i> . | 218 |
| <i>Figura 150 Moto caotico delle molecole di gas</i> | 219 |
| <i>Figura 151 Compressione di un gas</i> | 220 |
| <i>Figura 152 Esempio di moto di un gas in un ambiente isolato</i> | 220 |
| <i>Figura 153 Diagrammi PV in diversi stati</i> | 221 |
| <i>Figura 154 Diversi stati della materia e schema molecole</i> | 221 |
| <i>Figura 155 Legge di Charles</i> | 226 |
| <i>Figura 156 Legge di Gay-Lussac per le isocore</i> | 227 |
| <i>Figura 157 Piano di Clapeyron per i gas perfetti</i> | 228 |
| <i>Figura 158 Teoria cinetica dei gas</i> | 231 |
| <i>Figura 159 Urto di molecole in un gas perfetto</i> | 232 |
| <i>Figura 160 Confronto grafico tra isoterma ed adiabatica</i> | 233 |
| <i>Figura 161 Trasformazioni adiabatiche</i> | 234 |
| <i>Figura 162 Ciclo termodinamico</i> | 235 |
| <i>Figura 163 Macchina termodinamica</i> | 235 |
| <i>Figura 164 Motore a 4 tempi</i> | 236 |
| <i>Figura 165 Fasi del motore a 4 tempi</i> | 237 |
| <i>Figura 166 Ciclo di Carnot</i> | 237 |
| <i>Figura 167 Esempio di ciclo di Carnot</i> | 238 |
| <i>Figura 168 Ciclo frigorifero</i> | 240 |
| <i>Figura 169 Schema ciclo</i> | 240 |
| <i>Figura 170 Secondo Principio della Termodinamica</i> | 242 |
| <i>Figura 171 Equivalenza enunciati secondo principio della termodinamica</i> | 243 |
| <i>Figura 172 Entropia e disordine</i> | 245 |
| <i>Figura 173 Entropia</i> | 245 |
| <i>Figura 174 Strutture atomiche</i> | 246 |
| <i>Figura 175 William Thomson Kelvin (26 giugno 1824 – 17 dicembre 1907)</i> | 253 |
| <i>Figura 176 Tipi di onda: trasversali e longitudinali</i> | 256 |
| <i>Figura 177 Onde su corde vincolate</i> | 256 |
| <i>Figura 178 Onda luminosa riflessa</i> | 257 |
| <i>Figura 179 Rifrazione di un onda</i> | 257 |
| <i>Figura 180 Diffrazione di un onda</i> | 258 |
| <i>Figura 181 Interferenza: Onde in fase e in contro fase</i> | 258 |
| <i>Figura 182 Onda sonora percepita dall'uomo</i> | 259 |
| <i>Figura 183 Ampiezza d'onda</i> | 260 |
| <i>Figura 184 Effetto sonar</i> | 261 |
| <i>Figura 185 Diapason</i> | 262 |
| <i>Figura 186 Interferenza tra onde</i> | 262 |
| <i>Figura 187 Interferenza costruttiva e distruttiva</i> | 263 |
| <i>Figura 188 Interferenza con sorgenti in fase</i> | 263 |
| <i>Figura 189 Interferenza con sorgenti in opposizione di fase</i> | 263 |
| <i>Figura 190 Fonografo di Edison</i> | 264 |
| <i>Figura 191 Sorgente in movimento</i> | 266 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 192 Sorgente che si muove verso un osservatore, verso sinistra</i> | 267 |
| <i>Figura 193 la sorgente in movimento rispetto all'osservatore</i> | 268 |
| <i>Figura 194 Osservatore posto ad un certo angolo rispetto alla direzione della sorgente</i> | 268 |
| <i>Figura 195 Terremoto</i> | 273 |
| <i>Figura 196 Globo terrestre</i> | 273 |
| <i>Figura 197 Mappa di eventi sismici dal '600 al 1908</i> | 274 |
| <i>Figura 198 Luce solare</i> | 277 |
| <i>Figura 199 Christiaan Huygens (14 aprile 1629 - 8 luglio 1695</i> | 277 |
| <i>Figura 200 Albert Einstein</i> | 278 |
| <i>Figura 201 Luce attraverso una fenditura</i> | 279 |
| <i>Figura 202 Luce oltre un ostacolo opaco – Sorgente puntiforme</i> | 279 |
| <i>Figura 203 Luce oltre un ostacolo opaco - Sorgente estesa</i> | 279 |
| <i>Figura 204 Luce oltre un ostacolo opaco - Sorgente estesa più grande dell'ostacolo</i> | 280 |
| <i>Figura 205 Riflessione della luce contro uno specchio</i> | 281 |
| <i>Figura 206 Riflessione di un raggio incidente</i> | 282 |
| <i>Figura 207 Principio di Huygens-Fresnel</i> | 282 |
| <i>Figura 208 Rifrazione di un raggio incidente attraverso un mezzo</i> | 283 |
| <i>Figura 209 Indice di rifrazione</i> | 284 |
| <i>Figura 210 Scomposizione della luce su un prisma ottico</i> | 285 |
| <i>Figura 211 Arcobaleno</i> | 285 |
| <i>Figura 212 Diffrazione della luce</i> | 286 |
| <i>Figura 213 Interferenza con doppia fenditura</i> | 287 |
| <i>Figura 215 Interferenza costruttiva e distruttiva</i> | 288 |
| <i>Figura 214 Sorgente che emette un'onda che attraversa prima una fenditura e poi una doppia fenditura</i> | 288 |
| <i>Figura 216 Tipi di lenti</i> | 289 |
| <i>Figura 217 Formazione dell'immagine</i> | 291 |
| <i>Figura 218 Fotografia</i> | 291 |
| <i>Figura 219 Occhio umano</i> | 293 |
| <i>Figura 220 Illusioni ottiche:</i> | 296 |
| <i>Figura 221 Telescopio spaziale</i> | 302 |
| <i>Figura 222 Sfere cariche che si respingono o si attraggono</i> | 305 |
| <i>Figura 223 Attrazione o respingimento di cariche</i> | 305 |
| <i>Figura 224 Elettrizzazione per contatto</i> | 306 |
| <i>Figura 225 Elettrizzazione per induzione</i> | 306 |
| <i>Figura 226 Struttura atomica e legame tra elettroni e protoni</i> | 307 |
| <i>Figura 227 Elettroscopio a foglie d'oro</i> | 307 |
| <i>Figura 228 Direzione dei vettori forza tra cariche elettriche</i> | 309 |
| <i>Figura 229 Dipolo elettrico</i> | 310 |
| <i>Figura 230 Concetto di Campo</i> | 310 |
| <i>Figura 231 Linee di forza del Campo gravitazionale</i> | 311 |
| <i>Figura 232 Linee di forza generate da cariche positive e negative</i> | 312 |
| <i>Figura 236 Linee di campo nel dipolo elettrico</i> | 313 |
| <i>Figura 233 (a) cariche positive</i> | 313 |
| <i>Figura 234 (b) cariche entrambi negative</i> | 313 |
| <i>Figura 235 (c) una carica positiva ed una negativa</i> | 313 |
| <i>Figura 238 Flusso di un vettore</i> | 314 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 237 Traiettorie nei campi conservativi.....</i> | 314 |
| <i>Figura 239 Flusso lungo una superficie sferica.....</i> | 315 |
| <i>Figura 240 Teorema di Gauss.....</i> | 316 |
| <i>Figura 241 Gabbia di Faraday.....</i> | 317 |
| <i>Figura 242 Potere delle punte.....</i> | 318 |
| <i>Figura 243 Schermatura in un edificio.....</i> | 318 |
| <i>Figura 244 Fulmine.....</i> | 318 |
| <i>Figura 245 Distribuzione superficiale di carica.....</i> | 322 |
| <i>Figura 246 Campo generato da una distribuzione lineare di cariche.....</i> | 323 |
| <i>Figura 247 Campo generato da una distribuzione sferica di cariche su una sfera isolante.....</i> | 325 |
| <i>Figura 248 Campo generato da una distribuzione sferica di cariche su una sfera conduttrice.....</i> | 325 |
| <i>Figura 249 Condensatore elettrico.....</i> | 326 |
| <i>Figura 250 simbolo del condensatore utilizzato nei circuiti.....</i> | 326 |
| <i>Figura 251 Campo tra le armature di un condensatore ed effetto di bordo.....</i> | 326 |
| <i>Figura 252 Campo elettrico dentro e fuori le armature.....</i> | 327 |
| <i>Figura 253 Condensatore con e senza materiale dielettrico.....</i> | 328 |
| <i>Figura 254 Condensatore cilindrico.....</i> | 329 |
| <i>Figura 255 Condensatore sferico.....</i> | 329 |
| <i>Figura 256 Molecole polarizzate tra le armature di un condensatore.....</i> | 329 |
| <i>Figura 257 Momento di dipolo elettrico.....</i> | 329 |
| <i>Figura 258 Polarizzazione per orientamento.....</i> | 330 |
| <i>Figura 259 Polarizzazione per deformazione.....</i> | 330 |
| <i>Figura 260 Grafico dell'energia accumulata da un condensatore ..</i> | 331 |
| <i>Figura 261 Condensatori in parallelo.....</i> | 332 |
| <i>Figura 262 Capacità equivalente in un circuito.....</i> | 333 |
| <i>Figura 263 Condensatori in serie.....</i> | 333 |
| <i>Figura 264 Moto di un elettrone in un campo elettrico uniforme....</i> | 335 |
| <i>Figura 265 Carica che entra in un campo elettrico, non proveniente da un'armatura.....</i> | 335 |
| <i>Figura 266 Charles Augustin de Coulomb (14 giugno 1736 –23 agosto 1806).....</i> | 347 |
| <i>Figura 267 Nube elettronica nell'atomo.....</i> | 350 |
| <i>Figura 268 Percorso degli elettroni lungo un conduttore.....</i> | 351 |
| <i>Figura 269 Passaggio di elettroni tra sfere cariche.....</i> | 352 |
| <i>Figura 270 Flusso degli elettroni in un circuito e senso convenzionale della corrente.....</i> | 352 |
| <i>Figura 271 Intensità di corrente misurata da un Amperometro.....</i> | 353 |
| <i>Figura 272 Circuito elettrico elementare.....</i> | 354 |
| <i>Figura 273 Utilizzatori in serie e in parallelo.....</i> | 354 |
| <i>Figura 274 Dislivello di un fluido come analogia per la corrente elettrica.....</i> | 355 |
| <i>Figura 275 Dinamo.....</i> | 356 |
| <i>Figura 276 Misura della f.e.m. con un Voltmetro.....</i> | 356 |
| <i>Figura 278 Resistore - Simbolo rappresentato nei circuiti elettrici</i> | 357 |
| <i>Figura 277 Accumulatori: batteria.....</i> | 357 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 279 Resistori con varie resistenze elettriche</i> | 357 |
| <i>Figura 280 Codice colori per le Resistenze dei Resistori</i> | 358 |
| <i>Figura 281 Esempio di Resistore con Resistenza di circa 10Ω</i> | 358 |
| <i>Figura 282 Esempi dicircuiti elettrici</i> | 360 |
| <i>Figura 283 Tabella con alcune resistività di diversi materiali</i> | 363 |
| <i>Figura 284 Grafico della resistività nei superconduttori</i> | 364 |
| <i>Figura 285 Simboli per i generatori nei circuiti</i> | 365 |
| <i>Figura 286 Ramo, Nodo, Maglia in circuiti elettrici</i> | 371 |
| <i>Figura 287 Prima Legge di Kirchhoff o dei nodi</i> | 372 |
| <i>Figura 288 Seconda Legge di Kirchhoff o delle maglie</i> | 373 |
| <i>Figura 289 Resistori in serie</i> | 374 |
| <i>Figura 290 Resistori in parallelo</i> | 375 |
| <i>Figura 291 Resistenza di Shunt</i> | 377 |
| <i>Figura 292 Circuito RC</i> | 379 |
| <i>Figura 293 Elettrolisi</i> | 382 |
| <i>Figura 294 Pila di Volta</i> | 383 |
| <i>Figura 295 Pila alcalina</i> | 383 |
| <i>Figura 296 Pila al mercurio</i> | 384 |
| <i>Figura 297 Disputa Galvani-Volta</i> | 385 |
| <i>Figura 298 Corrente elettrica nei gas</i> | 386 |
| <i>Figura 299 la lampadina a vuoto</i> | 386 |
| <i>Figura 300 Struttura atomica di un semiconduttore</i> | 387 |
| <i>Figura 301 Reticolo cristallino di un atomo di silicio</i> | 388 |
| <i>Figura 302 Drogaggio di un semiconduttore di tipo n</i> | 390 |
| <i>Figura 303 Drogaggio di un semiconduttore di tipo p</i> | 390 |
| <i>Figura 304 Diodo</i> | 391 |
| <i>Figura 305 Grafico della polarizzazione</i> | 392 |
| <i>Figura 306 Transistor</i> | 392 |
| <i>Figura 307 Georg Simon Ohm (16 marzo 1789- 6 luglio 1854)</i> | 400 |
| <i>Figura 308 Calamita</i> | 405 |
| <i>Figura 309 Divisione di un magnete in piccoli magneti</i> | 405 |
| <i>Figura 310 Linee di forza di un campo magnetico</i> | 406 |
| <i>Figura 311 Interazione tra magneti</i> | 407 |
| <i>Figura 312 Campo magnetico terrestre</i> | 408 |
| <i>Figura 313 Bussola</i> | 409 |
| <i>Figura 314 Esperienza di Oersted</i> | 412 |
| <i>Figura 315 Esperienza di Faraday</i> | 413 |
| <i>Figura 316 Esperienza di Ampere tra correnti</i> | 413 |
| <i>Figura 317 Circuitazione del campo magnetico</i> | 414 |
| <i>Figura 318 Legge di Biot-Savart</i> | 415 |
| <i>Figura 319 Regola della mano destra per il campo magnetico</i> | 416 |
| <i>Figura 320 Spira rettangolare e spira circolare</i> | 417 |
| <i>Figura 321 Campo magnetico al centro di una spira circolare</i> | 417 |
| <i>Figura 322 Bobina o solenoide</i> | 418 |
| <i>Figura 323 Campo magnetico in un solenoide</i> | 418 |
| <i>Figura 324 Curve di isteresi magnetica</i> | 420 |
| <i>Figura 325 Elettrocalamite per porte di emergenza</i> | 421 |
| <i>Figura 326 Momento magnetico in un dipolo</i> | 421 |
| <i>Figura 327 Spira rettangolare immersa in un campo magnetico uniforme</i> | 422 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 328 Poli magnetici terrestri</i> | 423 |
| <i>Figura 329 Ipotesi di Ampere sul magnetismo</i> | 424 |
| <i>Figura 330 Domini di Weiss</i> | 425 |
| <i>Figura 331 Moto di una carica immersa in un campo magnetico uniforme</i> | 425 |
| <i>Figura 332 Moto di una carica in base alla velocità</i> | 426 |
| <i>Figura 333 Bottiglia magnetica</i> | 427 |
| <i>Figura 334 Aurora boreale</i> | 428 |
| <i>Figura 335 Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente</i> | 428 |
| <i>Figura 336 Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente</i> | 429 |
| <i>Figura 337 Motore elettrico</i> | 429 |
| <i>Figura 338 Schema di motore elettrico</i> | 431 |
| <i>Figura 339 Galvanometro</i> | 431 |
| <i>Figura 340 Galvanometro</i> | 432 |
| <i>Figura 341 Andrè Marie Ampère (20 gennaio 1775 – , 10 giugno 1836)</i> | 439 |
| <i>Figura 342 Correnti indotte</i> | 442 |
| <i>Figura 343 Regola mano destra Campo Magnetico</i> | 444 |
| <i>Figura 344 Flusso del Campo magnetico autoindotto</i> | 444 |
| <i>Figura 345 Induttanza</i> | 447 |
| <i>Figura 346 Circuito RL</i> | 447 |
| <i>Figura 347 Corrente alternata</i> | 449 |
| <i>Figura 348 Trasformatore</i> | 450 |
| <i>Figura 349 Alternatore</i> | 451 |
| <i>Figura 350 Correnti a due fasi</i> | 452 |
| <i>Figura 351 Dinamo</i> | 452 |
| <i>Figura 352 Traliccio in alta tensione</i> | 453 |
| <i>Figura 353 Circuito RL in serie</i> | 455 |
| <i>Figura 354 Circuito RL in parallelo</i> | 456 |
| <i>Figura 355 Grafico dell'impedenza in un circuito RL</i> | 458 |
| <i>Figura 356 Simbolo dell'impedenza nei circuiti</i> | 458 |
| <i>Figura 357 Direzione del campo elettrico e di quello magnetico</i> ... | 460 |
| <i>Figura 358 Lunghezza d'onda e frequenze per le onde elettromagnetiche</i> | 462 |
| <i>Figura 359 Luce rfratta in un prisma</i> | 462 |
| <i>Figura 360 Corrente di spostamento di Maxwell</i> | 464 |
| <i>Figura 361 Campo magnetico indotto da un campo elettrico variabile</i> | 465 |
| <i>Figura 362 Michael Faraday (22/09/1791 – , 25/08/1867)</i> | 471 |
| <i>Figura 363 Effetto fotoelettrico</i> | 478 |
| <i>Figura 364 Effetto Compton</i> | 481 |
| <i>Figura 365 Interpretazione di De Broglie-Bohm</i> | 482 |
| <i>Figura 366 interpretazione probabilistica della funzione d'onda</i> | 483 |
| <i>Figura 367 Gatto di Schrödinger</i> | 483 |
| <i>Figura 368 5° Congresso di Solvay del 1927</i> | 485 |
| <i>Figura 369 Complementarietà di Bohr</i> | 488 |
| <i>Figura 370 Effetto tunnel</i> | 488 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 371 le onde rappresentano la densità di probabilità di trovare l'elettrone</i> | 489 |
| <i>Figura 372 Reazioni per l'Energia stellare</i> | 489 |
| <i>Figura 373 Emissione di un nucleo di Elio-4 da un atomo radioattivo</i> | 489 |
| <i>Figura 374 Struttura atomica</i> | 492 |
| <i>Figura 375 Fermioni e bosoni</i> | 499 |
| <i>Figura 376 nel nucleo atomico</i> | 502 |
| <i>Figura 377 Teoria del tutto</i> | 503 |
| <i>Figura 378 Acceleratore di particelle del Cern di Ginevra</i> | 503 |
| <i>Figura 379 Albert Einstein</i> | 506 |
| <i>Figura 380 varianza del tempo</i> | 509 |
| <i>Figura 381 a razzo fermo ed in accelerazione, l'astronauta</i> | 510 |
| <i>Figura 382 Curvatura dello spazio-tempo</i> | 510 |
| <i>Figura 383 per comodità di rappresentazione la curvatura spazio-temporale</i> | 511 |
| <i>Figura 384 Buco nero</i> | 515 |
| <i>Figura 385 Albert Einstein (14 marzo 1879 - 18 aprile 1955)</i> | 523 |

Laboratori Proposti

| | |
|---|-----|
| Laboratorio 1 Somma di vettori | 37 |
| Laboratorio 2 Attrito | 40 |
| Laboratorio 3 Gravità e orbite..... | 43 |
| Laboratorio 4 Funzioni goniometriche..... | 44 |
| Laboratorio 5 Le Leve | 66 |
| Laboratorio 6 Galleggiamento dei corpi | 77 |
| Laboratorio 7 il Pendolo semplice | 110 |
| Laboratorio 8 Moto del proiettile..... | 112 |
| Laboratorio 9 Masse e Molle | 113 |
| Laboratorio 10 Legge di Hooke | 114 |
| Laboratorio 11 Forze e Moto | 128 |
| Laboratorio 12 Urti tra corpi | 161 |
| Laboratorio 13 Trasformazione di lavoro in calore | 200 |
| Laboratorio 14 Stati della Materia | 202 |
| Laboratorio 15 Generare Onde..... | 255 |
| Laboratorio 16 Onde generate con una corda | 257 |
| Laboratorio 17 Interferenza tra onde..... | 263 |
| Laboratorio 18 Rifrazione della luce..... | 283 |
| Laboratorio 19 Ottica geometrica | 289 |
| Laboratorio 20 Eletticità statica | 305 |
| Laboratorio 21 Legge di Coulomb..... | 308 |
| Laboratorio 22 Sovrapposizione di campi elettrici | 314 |
| Laboratorio 23 Condensatori..... | 326 |
| Laboratorio 24 Circuito elettrico..... | 354 |
| Laboratorio 25 Prima Legge di Ohm | 359 |
| Laboratorio 26 Seconda Legge di Ohm | 362 |
| Laboratorio 27 Legge di Faraday--Neumann-Lenz | 446 |
| Laboratorio 28 Spettro corpo nero | 476 |
| Laboratorio 29 Diffusione di Rutherford | 491 |

Sitografia bibliografica

Testi cartacei consultati

Esploriamo la fisica. Una navigazione nella realtà. Volume 2 - Sergio Fabbri e Mara Masini. SEI Editore

FISICA: il calore le onde e la luce le cariche e la corrente elettrica l'elettromagnetismo fisica moderna. Volume 2 - Massimo Govoni Alessandro Cordelli. Atlas Editore

Fisica 3 - Antonio Caforio Aldo Ferilli. LE Monnier Editore

Sitografia

Wikipedia: <http://it.wikipedia.org>

Paolo Bernacchioni, Ludovica Battista e Lorenzo Bernacchioni:

<http://www.openfisica.com/testo.php>

Istituto Tecnico "Rondani" di Parma: <http://www.itg-rondani.it/>

DreamStime: <http://it.dreamstime.com/>

<http://it.dreamstime.com/fotografia-stock-libera-da-diritti-catapulta-%28medioevale%29-image10159945>

Istituto Tecnico Statale per geometri "Sandro Pertini" di Pordenone:

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/misure1.html>

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/pressione.html>

Università degli studi di Messina:

<http://ww2.unime.it/cclchim/generale/significative.htm>

Prof. Salvatore Santorelli: <http://elementidifisica.altervista.org/forze.html>

Università degli Studi di Napoli "Federico II": <http://www.cpdm-tid.unina.it/ud/Attritoradente/Lezione%202/Esercizi%20Lezione%202/Esercitazione%20guidata/EsercizioGuidato1lez2.htm>

I.I.S. "Cesare Pesenti" di Bergamo:

www.istitutopesenti.it/dipartimenti/meccanica/.../LezForze.pdf

SpiritoLiberoMag: <http://www.spiritoliberomag.it/2012/07/fondamentali-di-ikebana-di-michele-proclamato/>

Cam2:

<http://www.cam2.ti.ch:4899/autoformazione/matematica/geometria/1teoremi.htm>

MatemaLex: <http://matemalex.altervista.org/trigo2bis.htm>

Giancarlo Zilio:

<http://www.chihapauradellamatematica.org/Volume3/Trig/Trigonometria11TeoremiSuiTriangoliRettangoli.htm>

Rossiprof: <http://rossiprof.blogspot.it/2012/08/breve-storia-della-trigonometria.html>

Patrizia

Ale:

http://www.patrizia-ale.it/portale/index.php?option=com_content&task=view&id=168&Itemid=9

Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri "G.B. Hodierna":

<http://www.itfisica.it/le-condizioni-di-equilibrio-di-un-punto-materiale/>

<http://www.itfisica.it/mrua/>

Studenti.it: <http://www.studenti.it/materie/fisica/3anno/equilibrio.php>

Slideshare.it: <http://www.slideshare.net/voglio10/equilibrio-del-corpo-rigido>

Cetris: <http://www.cetris.it/manualedemo/4fisica/forza/momento.htm>

Claudio Cancelli: <http://www.claudiocancelli.it/>

Skuola.net: <http://www.skuola.net/fisica/concetti-general/fisica-le-leggi-di-proporzionalita.html>

Economia

Italiana.it:

<http://www.economiaitaliana.it/it/articolo.php?LT=PUNTO&ID=1390>

Università degli studi di Camerino: www.unicam.it/farmacia/FisicaFitness/.../5-Macchine%20semplici.pdf

Scuola media Statale "E. Filippini" di Cattolica:

<http://fisica.cattolica.info/biblioteca/scoperte/forza/leve.htm>

Fisica per la scuola superiore

http://fisica.cattolica.info/biblioteca/scoperte/moto/quantita_moto.htm

G. Trivia- Scienza a Scuola: <http://www.scienzaatscuola.it/>

Associazione Rete Civica Veronese:

<http://www.rcvr.org/scuole/negrar/media/lavori/archimed/archimed.htm>

Università degli Studi di Calabria:

<http://galileo.cincom.unical.it/pubblicazioni/editoria/libri/Fisica/fisica1/MFM4L3.htm>

www.fis.unical.it/Mat_didattico/falcone/fisica1-cap3.pdf

<http://galileo.cincom.unical.it/pubblicazioni/editoria/libri/Fisica/fisica1/MFM3L6.htm>

OK Salute: <http://www.ok-salute.it/dizionario/medico/pressione-arteriosa.shtml>

Notizie.it: <http://salute.notizie.it/qual-e-il-significato-della-pressione-sanguigna/>

Università degli studi di Pavia, Dip. "A vol-

ta": <http://fisicavolta.unipv.it/didattica/idrostatica/ITA/pascal-1/index.html>

Giovanni Caruso: http://web.tiscali.it/vanni_38/idra22.htm

Darfo Boario Terme (BS) - Costa Volpino:

http://www.soardionline.it/servizi_officina_meccanica.htm

Università di Bologna, I S H T A R:

<http://ishtar.df.unibo.it/mflu/html/esempi1.html>

Meteo Adriatico.com: <http://www.meteoadriatico.com/Altitude-Instrumentation/Barometri.html>

Educazione Tecnica.com, di Davide Betto:

<http://educazionetecnica.com/tag/tridimensionale/#axzz299zTIpsZ>

Kart Attack: <http://www.kartattack.it/racing/teoria/traiettorie/traiettorie.htm>

SV640S.net:

<http://www.sv650s.net/fondamentali%20di%20guida/le%20traiettorie.htm>

Lega Nerd: <http://leganerd.com/category/scienze/fisica-scienze/>

Eco di Bergamo: <http://www.ecodibergamo.it/stories/apcom/154701/>

Amelia Carolina Sparavigna: <http://physics-sparavigna.blogspot.it/2011/04/domanda-di-teoria.html>

Comune di Verona:

http://www.poliziamunicipale.comune.verona.it/nqcontent.cfm?a_id=28055

Franco Maria Boschetto: www.fmboschetto.it/didattica/Moti/accel_centripeta.htm

Fisica Onde Musica: http://fisicaondemusica.unimore.it/Moto_armonico.html

Fabio Noli: <http://www.fabiobonoli.it/?p=1174>

Liceo Classico "L. Galvani" di Bologna: <http://www.liceogalvani.it/lavori-multimediali/moto/moto/parabolico.htm>

Niccolò Loret, Andrea Maselli:

<http://www.accastampato.it/2012/09/non-si-sorpassa-in-tunnel/>

Giuseppe Nicosia: <http://miaplacidusedaltriracconti.blogspot.it/2011/02/secondo-principio-della-dinamica-la.html>

David P. Stern: <http://www.phy6.org/stargaze/Inewton3.htm>

Quantum 2008:

http://digilander.libero.it/quantum2008/Dinamica/gravitazione_universale.htm

Viva la Scuola: <http://www.vivalascuola.it/come-calcolare-la-forza-peso-apparente-di-un-corpo-112738.html>

Carlo Elce su Matematicamente.it:

http://www.matematicamente.it/appunti/fisica_per_le_superiori/moto_di_una_molla_200808103608/

Info Notizia: <http://www.infonotizia.it/esercizi-sulla-quantita-di-moto-4/>

Blog argomenti di fisica:

<http://argomentidifisica.wordpress.com/category/momento-della-forza/>

Università degli studi Trentino:

http://www.science.unitn.it/~fisica1/fisica1/appunti/termo/cap_5/entropia/entropia.htm

Rosario Berardi: www.rosarioberardi.it/sitoberardi/.../unitapprendienergia.pdf

Sapere.it: <http://www.sapere.it/sapere/strumenti/studiafacile/fisica/La-meccanica/Lavoro--energia-e-potenza/Il-lavoro.html>

Università degli studi di Catania:

http://www3.unict.it/fisfarm/spiegazioni/2_meccanica_dei_fluidi.pdf

Vincenzo

Pappalardo

www.scuolainweb.altervista.org/.../Condivisione/.../Esercizi%20-...

Ubaldo

Pernigo:

www.mathubi.com/.../Raccolta_problemi_Tipo_Fisica_MathUbi.pdf

Istituto "Italo Calvino di Rozzano":

<http://www.istitutocalvino.it/studenti/siti/mathgreca/archim.htm#LA%20VITA>

Liceo

Cantonale

di

Locarno:

www.liceolocarno.ch/Liceo_di_Locarno/Internetutti/.../serie9-I.pdf

Nando

Marturano:

http://digilander.libero.it/nando.marturano/fisica/Gravitazione/ind_gravitazione.htm

Piero Stroppa: <http://xoomer.virgilio.it/pierostroppa/Fisica/Unit11/eserciz.htm>

Virgilio.it: <http://gogreen.virgilio.it/news/ambiente-energia/2050-sole-vento-75-elettricit.html>

<http://www.matepratica.info>

www.scuolainweb.altervista.org

<http://www.biologiamarina.eu/Temperatura%20e%20Calore.html>

(Autore N. Castronuovo)

www.liceodavincifi.it%2F_Rainbow%2FDocuments%2FCALORE%2520E%2520TEMPERATURA.pdf

<http://iisvittone.mdl2.com/mod/page/view.php?id=45> (prof. De Benedetti)

<http://www.okpedia.it/materia>

<http://www.cpdm.unina.it/>

<http://www.studenti.it/materie/fisica/4anno/dilatazione2.php>

www.skuola.net/materiale/calorimetria.pdf

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/calorespecifico1.html>

http://www.itg-rondani.it/dida/chimica/modulo1/ud1_1/ud1_1_pag5.htm

<http://www.fmboschetto.it/> temperatura critica

http://www.intratext.com/IXT/ITA3203/_PV.HTM

http://www.matematicamente.it/appunti/fisica_per_le_superiori/pressione_dei_gas_200808153632/ (ho cambiato il verso della forza F perchè a mio avviso è al contrario)

http://www.matematicamente.it/appunti/fisica_per_le_superiori/pressione_dei_gas_200808153632/

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/gasideali.html>

www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/...-/6_CAP.pdf

<http://scienzalaterale.blogspot.it/2012/01/trasformazione-adiabatica.html>

www.fisicachimica.it/word/gas/ADIABATICA.doc

<http://www.megistone.it/> <http://www.vialattea.net>

Ciclo di Carnot

<http://www.unitn.it/scienze>

www.pcfarina.eng.unipr.it/DispenseFTI-02/bertei145772.pdf

www.castfvg.it/articoli/fisica/principi_termodinamica.pdf

www.pcfarina.eng.unipr.it/DispenseArch01/.../bontempi139133.doc

kelvin

<http://biografieonline.it/biografia.htm?BioID=1457&biografia=William+Thomson>

http://www.larapedia.com/fisica_onda/onde.html

<http://doc.studenti.it/appunti/fisica/caratteristiche-general-onda.html>

<http://galileo.cincom.unical.it/pubblicazioni/editoria/libri/Fisica/fisica2/MFM8L4.htm>

<http://qinf.fisica.unimi.it/~paris/caffettiera.html>

<http://daily.wired.it/news/scienza/2012/11/02/natura-luce-onda-particella-123456.html>

www.liceorecanati.it/index.php/albo.../57-dualismo-onda-corpuscolo

www.unisi.it/fisica/dip/pers/mariotti/dida/misurediottica.pdf

http://www.mi.infn.it/~phys2000/waves_particles/lightspeed_evidence.html

www.lnl.infn.it/~sperim/sperimentando/2006/.../rel_riflessione.pdf

http://scienzamateria.blog.tiscali.it/2009/02/01/la_dispersione_della_luce_1964947-shtml/

www.fisicachimica.it/pdf/ottica%20fisica.pdf

www.issgreppi.gov.it/web/sezioni/fisica/otticagiometrica.ppt

www.labfisbiol.unina.it/pages/ottica/ottica2.pdf

Fisica per la scuola superiore

<http://www.presbiopialaser.it/chirurgia-laser-miopia/miopia.html>

Attrito volvente

http://www.albertone.eu/scienza_tecnica/automobile/Fisica/telaio/attrito_volvente.htm

Oscillazione della molla

<http://fisica.unipv.it/Mihich/1A-Oscillazioni.pdf>

Sotto lo zero assoluto

http://www.lescienze.it/news/2013/01/08/news/temperature_negative_zero_assoluto_quantistico_entropia-1447748/?refresh_ce

elettrizzazione per strofinio

<http://www.skuola.net/fisica/elettricit-magnetismo/carica-elettrica-tipi-elettrizzazione-conduttori-legge-coulumb-2.html>

Legge di Coulomb

share.dschola.it/itcpascal.../LEGGE%20DI%20COULOMB.ppt

Concetto di Campo

www.cvespia.altervista.org/fisica/elettromagnetismo/campo.pdf

campo conservativo

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/conservativo.php

campo prodotto da un filo conduttore

<http://www.mineman.org/fisica/flusso5.php>

flusso di un vettore

<http://www.fisicamente.net/FISICA/index-35.htm>

flusso di campo

Openfisica

<http://www.fisicamente.net/FISICA/index-35.htm>

distribuzione cariche elettriche su un conduttore

http://www.atuttascuola.it/collaborazione/fortini/campo_elettrico.htm

Teorema di Gauss

<http://www.atuttonet.it/forum/bacheca-studenti/62812-legge-di-gauss.html>

polarizzazione

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/polari.php

densità superficiale di cariche

Fisica 3 Caforio Ferilli- Vol. 3 pag. 49-50

condensatore piano

www.df.unipi.it/~ferrante/condensatore.pdf

capacità condensatore piano

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/cc/capacita_piano.php

energia condensatore

www.fisica.uniud.it/~soramel/.../fisica2/condensatoribianco.pdf

Fisica 3 Caforio Ferilli- Vol. 3 pag. 83-84

Condensatori in serie e in parallelo

Fisica 3 Caforio Ferilli- Vol. 3 pag.80-81

Carica in un campo elettrico uniforme

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/carica_in_campo.php

Capitolo 19 pagine 2 e 3 -estensione online del corso Amaldi, L'Amaldi 2.0 - Zanichelli

Corrente elettrica

www.relisys.it/Anno3/3UD_8b_Corrente_elettrica.pdf

Generatore

http://it.over-blog.com/Definizione_e_funzionamento_di_un_generatore_di_corrente_elettrica-1228321781-art248180.html

Voltmetro ed amperometro e Osservazioni sulle resistenze

www.fisicachimica.it/.../ohm/PRIMA%20LEGGE%20DI%20OHM.doc

seconda legge di Ohm e Resistività

http://www.parodos.it/storia/argomenti/leggi_di_ohm.htm

energia elettrica

<http://www.energianoproblem.it/tag/energia-elettrica-definizione/>

<http://ishtar.df.unibo.it/em/elet/potenza.html>

Effetto Joule

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/corrente2.html>

www.galois.it/drupal/materiali/scuole/ipcl/va/corrente_elettrica.pdf

Resistenza di shunt

http://www.microst.it/tutorial/strumenti_misura_3.html

Circuito RC

<http://www.robertobigoni.it/Fisica/Studenti/Condensatore/Vecchi/circuitiRC.html>

disputa Galvani-Volta

<http://ospitiweb.indire.it/~copc0001/liceo/disputa.html>

Corrente elettrica nei Gas

www.luzzago.soluzione-web.it/.../Lacorrenteeticaneiliquidi.doc

Corrente elettrica nel vuoto

www.diee.unica.it/~musai/.../RETI_IN_REGIME_STAZIONARIO1.p...

I semiconduttori

www.antoniosantoro.com/.../I%20semiconduttori.pdf

Diodo a giunzione

www.micro.dibe.unige.it/maurizio_valle/.../Capitolo%202.pdf

http://www.elettronicaincorso.it/diodi_e_giunzione_p-n.html

George Ohm - Biografia

<http://biografieonline.it/biografia.htm?BioID=2288&biografia=Georg+Ohm>

Campo magnetico

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/campob.html>

analogie e differenza tra campo elettrico e magnetico

<http://sezioned.files.wordpress.com/2008/05/il-magnetismo2.doc>

Campo magnetico terrestre

<http://www.mateliber.it/scienze/LA%20TERRA%20COME%20CORPO%20CELESTE/I%20poli%20magnetici.html>

Esperienza di Oersted

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/magnetismo/oersted.php

Legge di Biot-Savart

http://decapoa.altervista.org/librodifisica/index.php?cp=19_Magnetismogalileo.cinc

om.unical.it/centro/Newmedia/fisica/modulo2/.../biot.pdf

Dipolo Magnetico

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/spira.php

Dipolo magnetico terrestre

<http://www.ecoage.it/campo-magnetico-terrestre.htm>

Campo magnetico al centro di una spira circolare

www.labfisbiol.unina.it/pages/elm_pillole/Biot_Savart/curloo.htm

Ipotesi Ampere sul magnetismo

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/campob2.html>

Azione di un campo magnetico su una spira percorsa da corrente

www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/def_azioni_B.pdf

Moto di una carica in un campo magnetico

www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/def_azioni_B.pdf

Aurora boreale

www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/def_azioni_B.pdf

Correnti indotte

http://www.cpdm-td.unina.it/ud/magnetismo/correnti_indotte.htm

Autoinduzione

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/induzione3.html>

Corrente alternata

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/induzione3.html>

Energia Elettrica

<http://doc.studenti.it/appunti/fisica/2/energia-elettrica.html>

Energia magnetica

ams.pg.infn.it/~bertucci/Didattica/Fisica2/2005/Lezione21.pdf

Onde elettromagnetiche

http://www.arpa.emr.it/pubblicazioni/cem/generale_27.asp#

La Natura della luce

http://astrocultura.uai.it/tesi/stella2006/alessandro_sacco/nuova_pagina_13.htm

Equazioni di Maxwell

http://www.fmboschetto.it/tde/0_2.htm

Fisica per la scuola superiore

Crisi della fisica classica

www2.pv.infn.it/~boffi/a2-b.pdf

Effetto Compton

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/viewtopic.php?p=92>

Meccanica quantistica

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/viewtopic.php?f=3&t=57>

Gatto di Schrödinger

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/viewtopic.php?f=3&t=43>

lunghezza d'onda di una particella

www3.unisi.it/fisica/dip/dida/ftaingfmod/FisMod5.pdf

Il principio di indeterminazione di Heisenberg

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/>

Il Principio di Complementarietà di Bohr

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/>

L'Effetto Tunnel

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/>

Forze nucleari

http://www.oocities.org/energia_nucleare/nucleare/energia_nucleare_forza_nucleare.htm

Radioattività

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica5/curie.php

Modello atomico

http://www.scienzeoetiche.it/forum/nico/images/fisica/modelli_atomici.jpg

Le particelle elementari

<http://www.orianapagliarone.it/ParticelleSA/constituenti.htm>

Teoria del tutto

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/viewtopic.php?f=3&t=157>

Relatività di Einstein

<http://www.scienzeoetiche.it/forum/viewtopic.php?f=3&t=160>

trasformazioni di Lorentz

http://www.fmboschetto.it/tde/3_1.htm

NOTA: CHIUNQUE NON SI VEDA CITATO PER UN PROPRIO ARTICOLO O PARTE DI ESSO, POTRA' CONTATTARE L'AUTORE PER UN RICONTO E L'EVENTUALE CITAZIONE DEL PROPRIO ARTICOLO.

Problemi svolti

Trasformazioni termodinamiche

www.scuolainweb.altervista.org/...%20Salerno/.../prin%20termod.pdf

Onde

<http://sezioned.wordpress.com/fisica/onde/esercizi-sulle-onde-2/>

<http://www.lyra.it/scuola/moodle/mod/resource/view.php?id=73>

Luce e Ottica

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/specchi5.html>

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/olimpiadi/lenti.htm>

<http://kappi.altervista.org/ITA/scuola/fisica/esercizi/luce-mult.html>

Elettrostatica

www.ipsiabellini.it/files/pdf/Lab_Fisica/campo%20elettrostatico.pdf

www.liceofermicanosa.it/index.php?option=com_docman...

zyxel-nsa210.lilu2.ch/...%20Elettrostatica/Fonte%20esterna%20-...

www.liceoaselli.it/.../Problemi%20sui%20condensatori.doc

http://elementronic.altervista.org/Pagine_sito/Esercizi_e_considerazioni_pratiche_sulla_legge_di_ohm_e_la_potenza.html

<http://pzlezioniesercizioonline.blogspot.it/2012/02/esempio-di-risoluzione-di-un-esercizio.html>

poisson.phc.unipi.it/~fidanza/.../2009.../esercizi_problemi_circuiti.pdf...

corrente elettrica

<http://www.ge.infn.it/~patrign/didattica.html>

magnetismo

www.pd.infn.it/~cattapan/dida/SFA/quesiti_sfa_lezione_IV.pdf

<http://digilander.libero.it/danilo.mauro/temi/olimpiadi/magnetismo.htm#sthash.7zsOH5UJ.dpuf>

elettromagnetismo

<http://www.galileimirandola.it>
Università

Roma1:

http://ishtar.df.unibo.it/Uni/bo/ingegneria/all/villa/stuff/.../SScircuiti_AC.pdf

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica5/induttanza.php

corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/13AUON/pdf/Sched-08.pdf

<https://docs.google.com/document/d/1sw1W2duRNckX326PcOf3FB94rbQQoeXZsFT6W1cmo/preview?pli=1>

francescomarchi.wordpress.com

fisica moderna

http://www.padova.infn.it/borghesani/esercizi_Struttura_risolti/Principio_Indet.html

<http://www.ge.infn.it/~patrign/didattica.html>

<http://digilander.libero.it/diogenes99/Relativistica/Relativistica.htm>

Immagini usate nel libro

Le immagini non citate sono opensource o su licenza Creative Commons

Sollevatrice pesi Jennifer Lombardo

<https://static.leonardo.it/uploads/sites/17/2014/08/unnamed-13.jpg>

cariche elettriche

www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/carica_campoE.pdf

metalli: struttura atomica

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/41/Nuvola_di_elettroni.svg/357px-Nuvola_di_elettroni.svg.png

fulmine sull'albero

http://tg24.sky.it/static/contentimages/original/sezioni/tg24/mondo/2011/11/17/flickr_image_fulmine_classifica_top.jpg

Distribuzione superficiale di cariche

<https://slideplayer.it/slide/590223/2/images/9/Campo+di+una+distribuzione+di+carica+piana.jpg>

Distribuzione sferica di cariche

http://www.openfisica.com/fisica_ipertesto/openfisica4/immagini/sferacarica.jpg

sfera

<http://img379.imageshack.us/img379/3995/sfera3gj9.jpg>

codice colori resistenze

<http://programmifree.myblog.it/archive/2010/02/20/i-codici-colori-e-le-serie-delle-resistenze-elettriche.html>

tabella delle resistività

<http://ishtar.df.unibo.it/em/elet/resistivita.html>

Carica del condensatore

http://www.peduto.it/condensatori/carica_C.jpg

Disputa Galvani-Volta

<http://alessandrovolta.it/wp-content/uploads/2011/07/131.png>

bussola

http://tirolatlas.uibk.ac.at/kids/modules/learnmaps/media/605_abweichung_it.jpg

<http://www.satiro.org/sopravvivenza-parte-6/>

Oersted

http://www.dima.unige.it/~denegri/PLS2/PENSIERO_SCIENTIFICO%20DEF/MAGNETISMO/Pages/campo%20elettromagnetico.htm

esperienza di Faraday

<http://digilander.libero.it/autelettrica/11.0-L%27induzione%20elettromagnetica,%20base%20del%20motore%20elettrico.htm>

Esperienza di Ampere

<http://www.mineman.org/fisica/magnetico4.phpb>

Solenoido attraversato da corrente

http://lempel.pagesperso-orange.fr/geomag/solenoido_R.jpg

Porte emergenza - elettrocalamita

<http://www.pighiantincendi.it/public/mat/image/porte.jpg>

Dipolo magnetico terrestre

<http://www.bo.astro.it/uni-verso/venere/Sole-Pianeti/planets/terimm/cmagt.jpg>

Ipotesi di Ampere sul Magnetismo

Fisica per la scuola superiore

http://digilander.libero.it/albert1960/materiale%20fisicamente/origine%20scienza%20elettrica%204_files/ampere3.jpg

Moto di una carica in un campo magnetico, aurora boreale

www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/def_azioni_B.pdf

Correnti indotte

http://www.cpdm-td.unina.it/ud/magnetismo/correnti_indotte.htm

Alternatore industriale

http://www.parks.it/parco.nazionale.app.tosco.emil/gallery_dettaglio.php?id=213

Tralicci alta tensione

<http://www.vitaciociara.it/notizie/energia.jpg>

Spettro elettromagnetico

<http://www.astroala.it/images/didattica/sole/spettroem.jpg>

Natura della luce

http://astrocultura.uai.it/tesi/stella2006/alessandro_sacco/Spettro%20della%20luce2.jpg

Equazioni di Maxwell

http://www.fmboschetto.it/tde/0_2.htm

Correnti indotte

http://www.cpdm-td.unina.it/ud/magnetismo/correnti_indotte.htm

Alternatore industriale

http://www.parks.it/parco.nazionale.app.tosco.emil/gallery_dettaglio.php?id=213

Tralicci alta tensione

<http://www.vitaciociara.it/notizie/energia.jpg>

Spettro elettromagnetico

<http://www.astroala.it/images/didattica/sole/spettroem.jpg>

Natura della luce

http://astrocultura.uai.it/tesi/stella2006/alessandro_sacco/Spettro%20della%20luce2.jpg

Equazioni di Maxwell

http://www.fmboschetto.it/tde/0_2.htm

Quark

http://www.scienzeoetiche.it/forum/nico/images/fisica/atomo_quark.jpg

Bosoni e fermioni

http://www.scienzeoetiche.it/forum/nico/images/fisica/bosoni_fermioni.jpg

Buchi neri

<http://www.sidereus-nuncius.info/wp-content/uploads/2008/06/m81-b.jpg>

Foto di copertina

Creata con <https://www.canva.com/>

NOTA: CHIUNQUE NON SI VEDA CITATO PER UNA PROPRIA IMMAGINE O DISEGNO O PARTE DI ESSO, POTRA' CONTATTARE L'AUTORE PER UN RISCONTRO E L'EVENTUALE CITAZIONE DELL'IMMAGINE IN OGGETTO.

Videografia

Affianco a molti titoli di paragrafo vi sono dei link diretti ad alcuni video, quasi tutti reperiti su www.youtube.it

Museo Galileo: <http://catalogo.museogalileo.it/indice.html>

DocSity: <http://www.docsity.com>

Zanichelli Editore: <http://online.scuola.zanichelli.it/fisicainlaboratorio/>

Sono presenti inoltre molte video lezioni sono presenti nel canale youyube del docente (nome canale: gerardo troiano).

Contributi

- Stesura argomenti teorici:** Gloria Rocci
- Stesura esercizi:** Ubaldo Pernigo su www.mathubi.com
- Stesura esercizi:** Mimmo Sestito su www.ms2000.it
- Stesura esercizi:** G. Trivia su <http://www.scienzaatscuola.it>
- Stesura esercizi:** Claudia Patrignani Università di Genova su <http://www.ge.infn.it>
- Stesura esercizi:** Giuseppe Zollo, Emanuele Anelli e Andrea Annunziata, Dipartimento di Energetica, Università di Roma “Sapienza” su <http://eng55.ing2.uniroma1.it>
- Stesura esercizi:** <http://www.matepratica.info>
- Laboratorio virtuale di Fisica:** Lorenzo Bernacchioni su www.openfisica.com
- Alcuni Materiali teoria:** Paolo Bernacchioni, Ludovica Battista e Lorenzo Bernacchioni su www.openfisica.com
- Revisioni:** Marino Arzilli, Antonio Bernardo.

Note finale e segnalazioni

Chiunque ritenga che sia stato inserito proprio materiale in questo volume (articoli, immagini,), senza aver citato la fonte, potrà segnalare all'autore argomento e pagina. Lo stesso dopo i dovuti controlli, in caso provvederà ad inserire l'autore in bibliografia o a rimuovere l'argomento qualora sia richiesto dallo stesso.

Per segnalazioni scrivere a gerardo.troiano@istruzione.it
GERARDO TROIANO.

MATEMATICAMENTE.IT

GERARDO TROIANO GLORIA ROCCI

FISICA PER LA SCUOLA SUPERIORE

EQUILIBRIO MECCANICA
TERMOLOGIA ONDE
ELETTROMAGNETISMO
QUANTI RELATIVITA'

SECONDA EDIZIONE
CREATIVE COMMONS BY SA

ISBN 9788896354421

FISICA PER LA SCUOLA SUPERIORE - SECONDA EDIZIONE

Matematicamente.it



Fisica per la Scuola Superiore

Gerardo Troiano

Gloria Rocci

RISORSE MULTIMEDIALI

canale youtube

<https://www.youtube.com/user/gerardotroiano1>

Nel canale sono disponibili numerose video lezioni su argomenti teorici e problemi svolti per aiutare meglio ad assimilare i vari argomenti. Questo volume e le video lezioni, fanno parte integrante di un progetto didattico che utilizza la metodologia **Flipped Classroom**, che tiene conto dei diversi stili di apprendimento dei discenti. Da settembre 2017 il prof. Gerardo Troiano insegna FISICA al Liceo Scientifico G.C. Rispoli di San Severo (FG)

la Seconda edizione nasce dalla necessità di ulteriori ampliamenti circa gli argomenti e la correzione di refusi riscontrati nella prima edizione del 2013

il libro è liberamente utilizzabile e condivisibile, tranne che per usi commerciali.

ISBN 9788896354421

Matematicamente.it