



Università degli Studi di Udine
MASTER IDIFO
Master universitario di II livello in
Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Sperimentazione Major MODULO E
Problem Solving per l'orientamento



LHC e le questioni
aperte nel
MODELLO STANDARD

di Patrizia Colella

Lezione 1



LHC è un acceleratore di particelle ed è una delle macchine più grandi mai costruite

E' una macchina da record, la più ampia collaborazione, le più alte energie, l'anello più grande, le temperature più basse, il vuoto più spinto....

Ma c'è un altro record di LHC, che val la pena di essere sottolineato: l'elevato numero di ricercatrici provenienti da tutto il mondo, in cui si distinguono le italiane.

Molte di loro hanno raggiunto elevati livelli di responsabilità e ricoprono incarichi di primo piano e massima visibilità nel panorama internazionale.

Tra le più importante c'è la responsabile del progetto ATLAS l'italiana Fabiola Gianotti.



Scopriamo insieme la fisica del Large Hadron Collider del CERN

Lezione 1: Un po' di storia per arrivare al Large Hadron Collider
(LHC)

Lezione 1b: Il Modello Standard: i costituenti della materia

Lezione 1c: Il Modello Standard: le interazioni

Lezione 2a: Gli acceleratori e I rivelatori di particelle

Lezione 2a Le questioni aperte nel Modello Standard

Lezione 3: Problem Solving

Lezione 4: Le donne nella Scienza

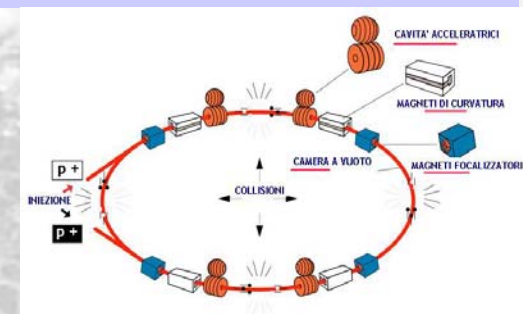


Il Large Hadron Collider rappresenta la tappa più recente di una lunga storia

Esistono degli elementi fondamentali a partire dai quali possiamo costruire tutto il nostro mondo?

La risposta a questa domanda, cioè la ricerca dei costituenti ultimi della materia e delle origini dell'universo è uno dei problemi più antichi e più affascinanti della scienza

Questa ricerca ha portato negli anni alla costruzione ed allo sviluppo di acceleratori sempre più grandi e potenti.



Un po' di storia per arrivare al Large Hadron Collider (LHC)

E' una storia vecchia...

Empedocle



Il filosofo greco Empedocle fu il primo ad effettuare una classificazione degli elementi fondamentali: fuoco, acqua, aria e terra.



Democrito (~400 AC):

- Tutto costituito da particelle invisibili e indivisibili: atomi
- Hanno peso e forma diversa e si combinano a formare nuove sostanze

Parecchio tempo dopo...

Dalton (1808)

ELEMENTS		
○	Hydrogen	1
⊖	Azote	5
●	Carbon	5
○	Oxygen	7
⊕	Sulphur	13
⊕	Strontian	46
⊕	Barytes	68
⊖	Iron	50
⊖	Zinc	56
⊖	Copper	56
⊖	Lead	90

Sviluppo della scienza moderna: Dall' Alchimia alla Chimica (1780 - 1870)

– Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche

Evidenza di una "periodicità" (Mendeleev, 1869)

Indicazioni di una struttura comune degli elementi

La Tavola Periodica

IA												0						
1	H											2	He					
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VII	IB	IIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
19	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113					

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

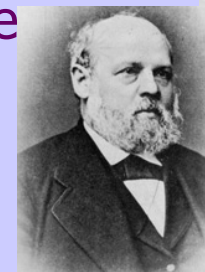


La strada verso la scoperta dell'elettrone e la struttura dell'atomo: il secolo dei primi grandi esperimenti

•**1795** Alessandro Volta realizza un dispositivo che produce energia elettrica da una comune reazione chimica.



1857 Geissler riuscì a costruire un tubo di vetro nel quale vennero introdotti gas a bassissime pressioni.



•**1860** W. Crookes usò il **tubo di Geissler** inserendovi due lamine metalliche, collegandole ad un generatore a 30000 V e osservò piccoli corpuscoli di materia (**raggi catodici**) con carica negativa, poco penetranti, capaci di muovere un mulinello posto sul loro cammino.



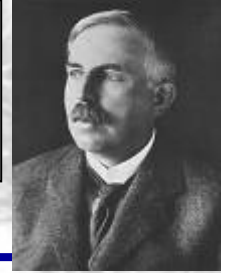
•**1895** Thomson lavorò sui raggi catodici e applicando un campo magnetico ed elettrico calcolò il rapporto tra la carica elettrica e la massa. Queste particelle vennero chiamate elettroni.





1900

Il 900 secolo dell'atomo e dei suoi modelli che devono tenere conto della fenomenologia...



Se l'elettrone è carico negativamente questo implica che:

- L'atomo *non* è elementare

Ci deve anche essere una carica positiva!

1911 E. Rutherford bombardò una sottile lamina di oro con particelle positive α , costituite da atomi di elio privati dei due elettroni. Tali raggi attraversavano la lamina senza quasi mai esserne disturbati, salvo un $\sim 1\%$ che veniva deviato, anche in modo notevole o addirittura, completamente respinto.

Sulla base di questa fenomenologia e sulla base della conservazione delle grandezze negli urti elastici (energia e quantità di moto) Rutherford propose un modello di atomo con quasi tutta la massa concentrata in un nucleo molto piccolo carico positivamente e gli elettroni che vi ruotano attorno



...ancora importanti esperimenti e
l'individuazione di nuove particelle ...
la scoperta del neutrone

- 1930 W. Bothe e H. Becker bombardarono berillio con particelle α molto energetiche producendo radiazione neutra e assai penetrante. $\text{Be} + \text{He} \rightarrow \text{C} + \text{n}$



Due anni dopo F. Joliot e I. Curie scoprirono che particelle neutre possono espellere protoni dalla paraffina.



1932 J. Chadwick identificò tali particelle come simili ai protoni, ma senza carica: i neutroni

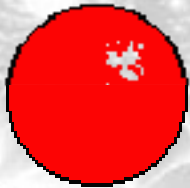


E ancora nuove ipotesi ... Sulla base dell'applicazione delle leggi di conservazione ...

Lo studio della radioattività naturale condusse all'identificazione di processi come il decadimento alfa e beta

Conservazione dell'energia e della quantità di moto nei decadimenti radioattivi

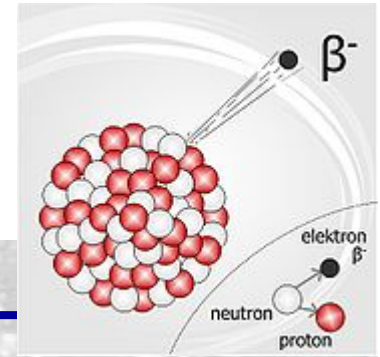
Nelle reazioni Nucleari la quantità di moto e l'energia si conservano - per un sistema chiuso la quantità di moto totale e l'energia delle particelle presenti dopo la reazione deve essere uguale alla quantità di moto totale e all'energia delle particelle prima della reazione



Nella maggior parte dei decadimenti, le particelle od il nucleo che rimangono hanno una massa totale minore della massa della particella o del nucleo originario. La massa mancante si è trasformata in energia cinetica dei prodotti di decadimento.

Nel caso in cui una particella alpha è emessa da un nucleo instabile la quantità di moto della particella alpha e del nuovo nucleo è la stessa del nucleo instabile originale

... osservazioni e leggi di conservazione ...
allora nuove ipotesi
p.e. l'ipotesi del neutrino



Ma le cose non tornavano per il decadimento beta!

Il neutrone è instabile e si disintegra secondo il cosiddetto decadimento β .

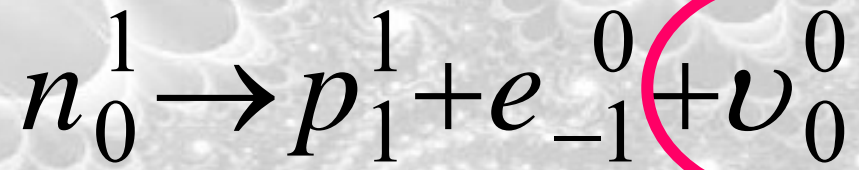
Inizialmente si pensava che fosse la seguente trasformazione:

$n \rightarrow p + e^-$ In questa ipotesi l'elettrone deve essere "monocromatico" Lo spettro deve presentare un picco in corrispondenza dell'energia dell'elettrone, energia mancante, unica incognita nella reazione...

Invece le misure davano uno "spettro continuo"...



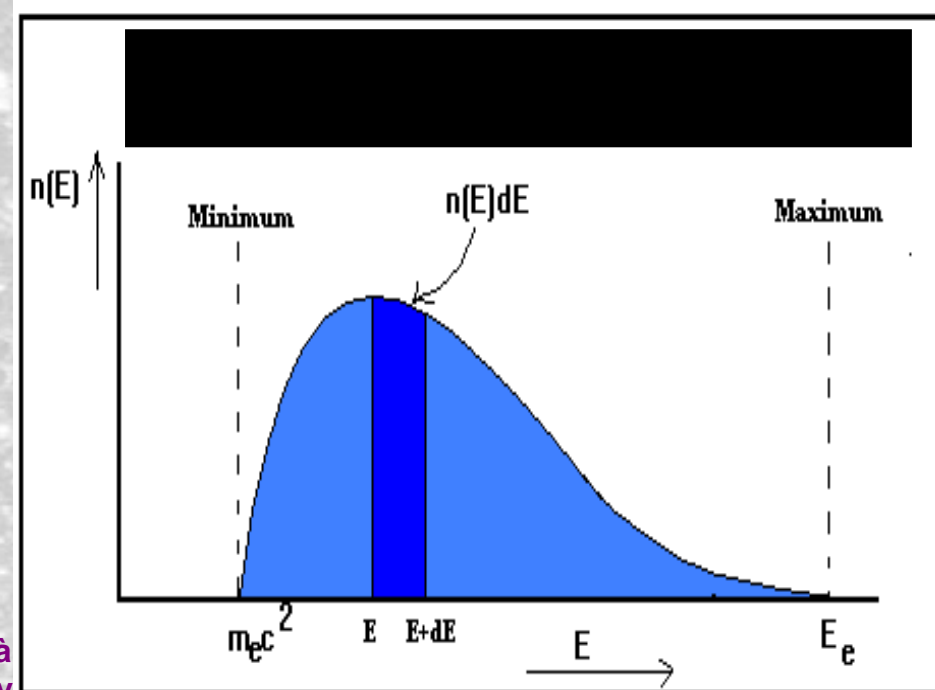
Senza neutrino la LEGGE di CONSERVAZIONE appare violata



• La grande dispersione nelle velocità di emissione della particelle β (ci si aspettava un picco nello spettro di emissione) sembra indicare che energia e q. di moto non si conservano,.

1934 E. Fermi e W. Pauli ipotizzarono una reazione a TRE e quindi l'esistenza di un terzo elemento del decadimento il neutrino, una particella senza massa né carica che giustificasse il bilancio energetico

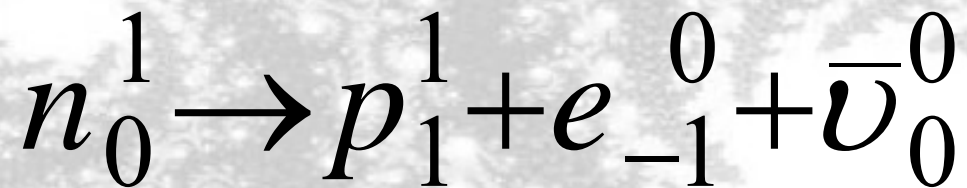
Per molti anni non vi fu evidenza sperimentale...fu evidenziato solo nel 1956.



$$E = mc^2$$

Compito 1

Calcola l'energia cinetica liberata nella reazione di decadimento beta (energia cinetica di elettrone + neutrino)



1.008665 u

1.007825 u

0.0005486 u

$$1 \text{ u} = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ J} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ eV}$$

Vai al [calcolo](#)



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Ancora ipotesi sulla base del modello teorico
Il modello è esso stesso ontologia....

Meccanica quantistica relativistica

La relatività applicata alla Meccanica Quantistica produce una nuova "equazione del moto" (L'equazione di Dirac) che prevede delle soluzioni inaspettate...

Essa può avere due soluzioni, una con elettroni con energia positiva e una con elettroni con energia negativa

Dirac ipotizzò che per ogni particella esiste una corrispondente antiparticella identica in tutto ma con carica opposta

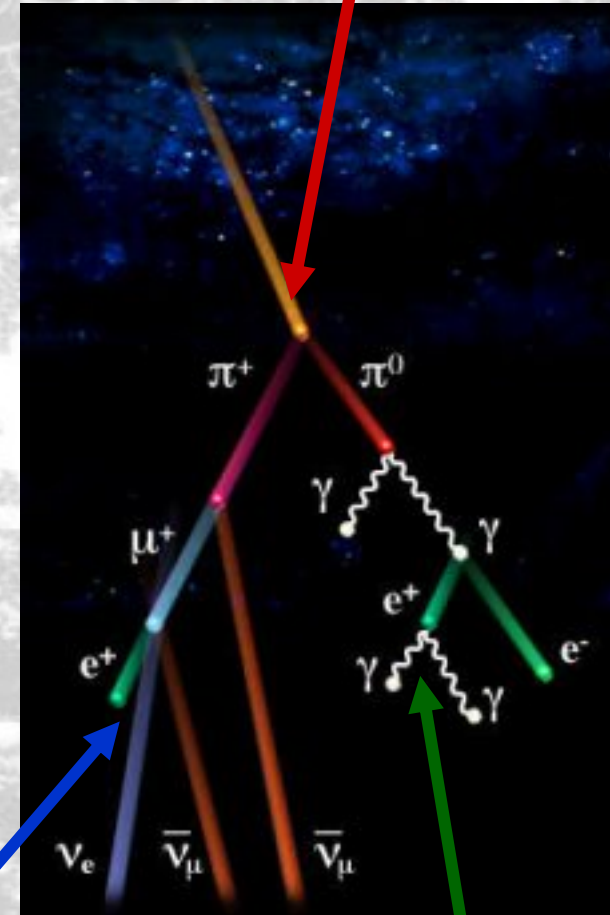


L' ANTIMATERIA ESISTE veramente o è solo una conseguenza matematica, solo una ipotesi?



L'avventura dei raggi cosmici e la scoperta del positrone (antimateria)

Collisioni con produzione di particelle



Univ **Decadimenti**

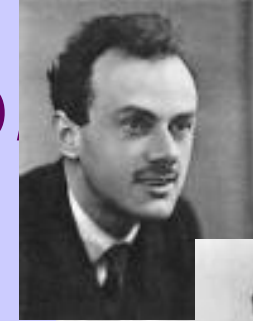
Annichilazione

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

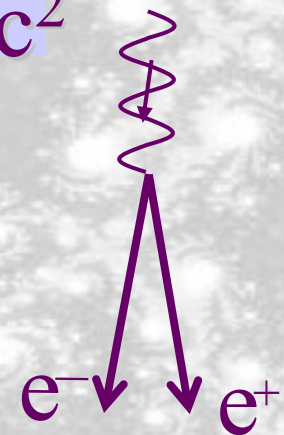


Scoperta dell'antimateria

1931 A conferma della teoria di Dirac che prevedeva stati a *energie negative* (1928) proprio dallo studio dei raggi cosmici, C. D. Anderson scoprì il positrone, l'antiparticella dell'elettrone



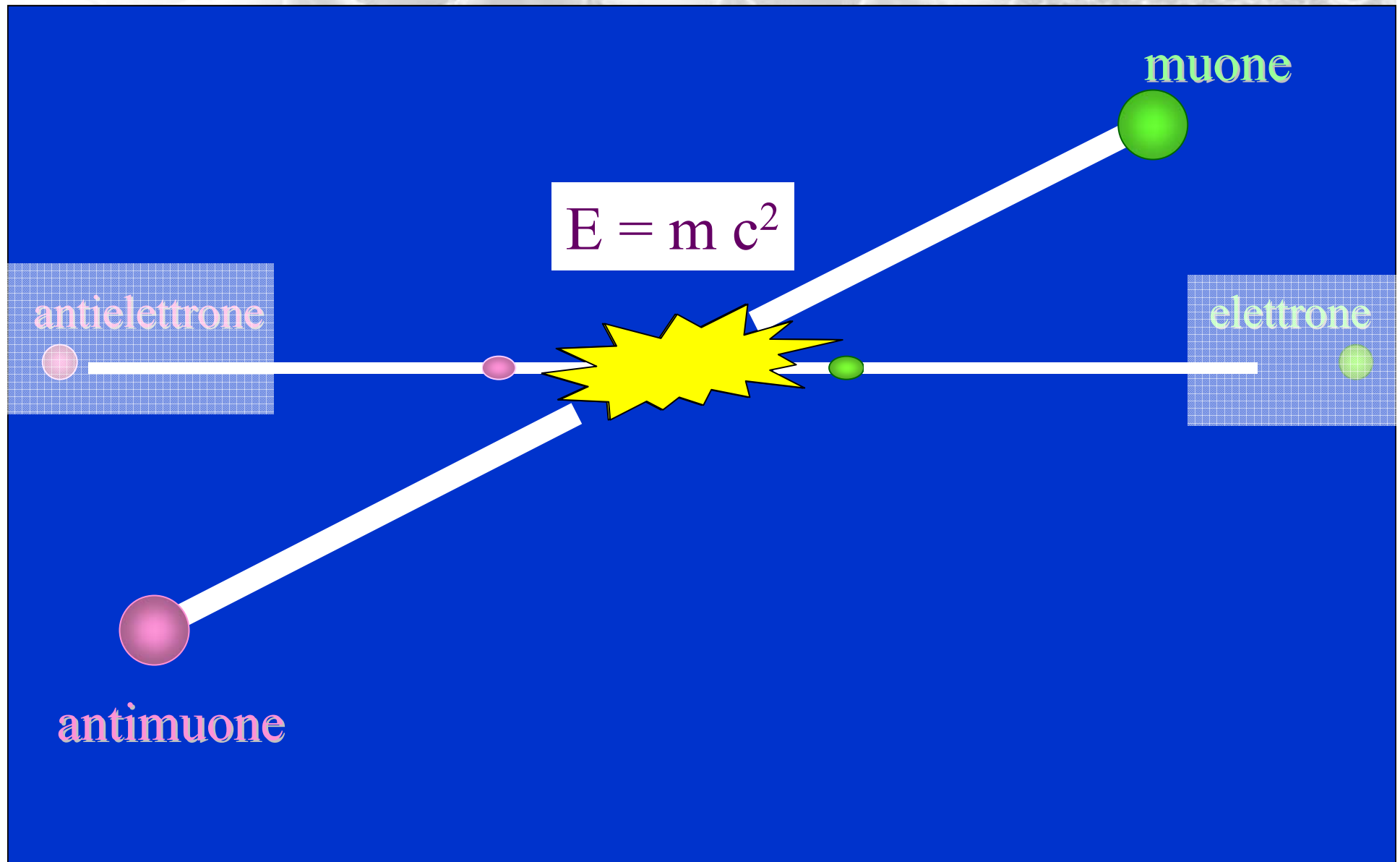
Quando una particella e un' antiparticella interagiscono, si annichilano producendo energia



Avviene anche il contrario: un fotone può produrre una coppia e^+e^-

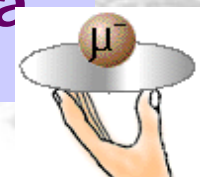


Collisione materia antimateria



Dai raggi cosmici ancora **altre particelle!!**

1936 Sempre dallo studio delle interazioni dei raggi cosmici Anderson scoprì una particella non presente in atomi ordinari: il **muone** μ , con massa 207 volte maggiore dell'elettrone.



I. I. Rabi commentò

"Who ordered that?"

cioè del muone...non se ne sentiva la necessità!

Lo studio delle interazioni dei raggi cosmici portò alla scoperta di un grande numero di nuove particelle:

- 1931 - Il positrone (e^+)
- 1936 - il muone (μ)
- 1947 - Pioni, kaoni, iperoni
-



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Scoperta del pione

Il muone fu ritenuto per oltre 10 anni il mediatore delle interazioni nucleari previsto da H. Yukawa già nel 1935. Tuttavia la sua vita media ($\tau \sim 2 \cdot 10^{-6}$ s) è \gg del τ atteso per le forze nucleari ($\tau \sim 10^{-23}$ s).

1947 In emulsioni nucleari esposte ad alta quota C. Powell osservò eventi con pioni $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ Mentre il μ^- è assai penetrante, il π^- si fa catturare dal nucleo, come previsto da Yukawa.

1956 Scoperto anche il pione neutro π^0 , J. Steinberger et al., che tipicamente decade in $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

$$m(\pi^+) = 139.57 \text{ MeV}/c^2$$

$$m(\pi^0) = 134.98 \text{ MeV}/c^2$$

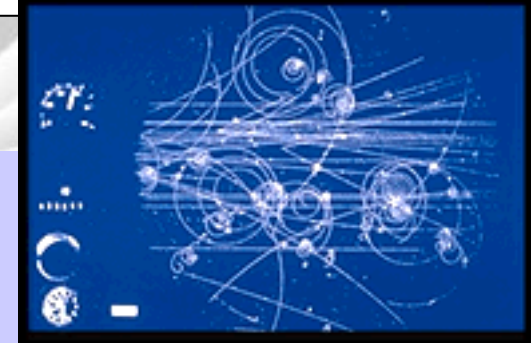


ica e Orientamento



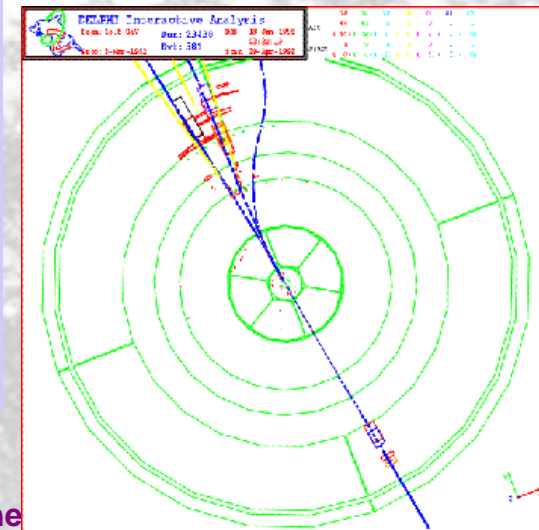
La fisica delle alte energie e le particelle

Quando particelle ad alta energia collidono artificialmente negli acceleratori emerge una enorme quantità di particelle elementari a vita media, breve o brevissima

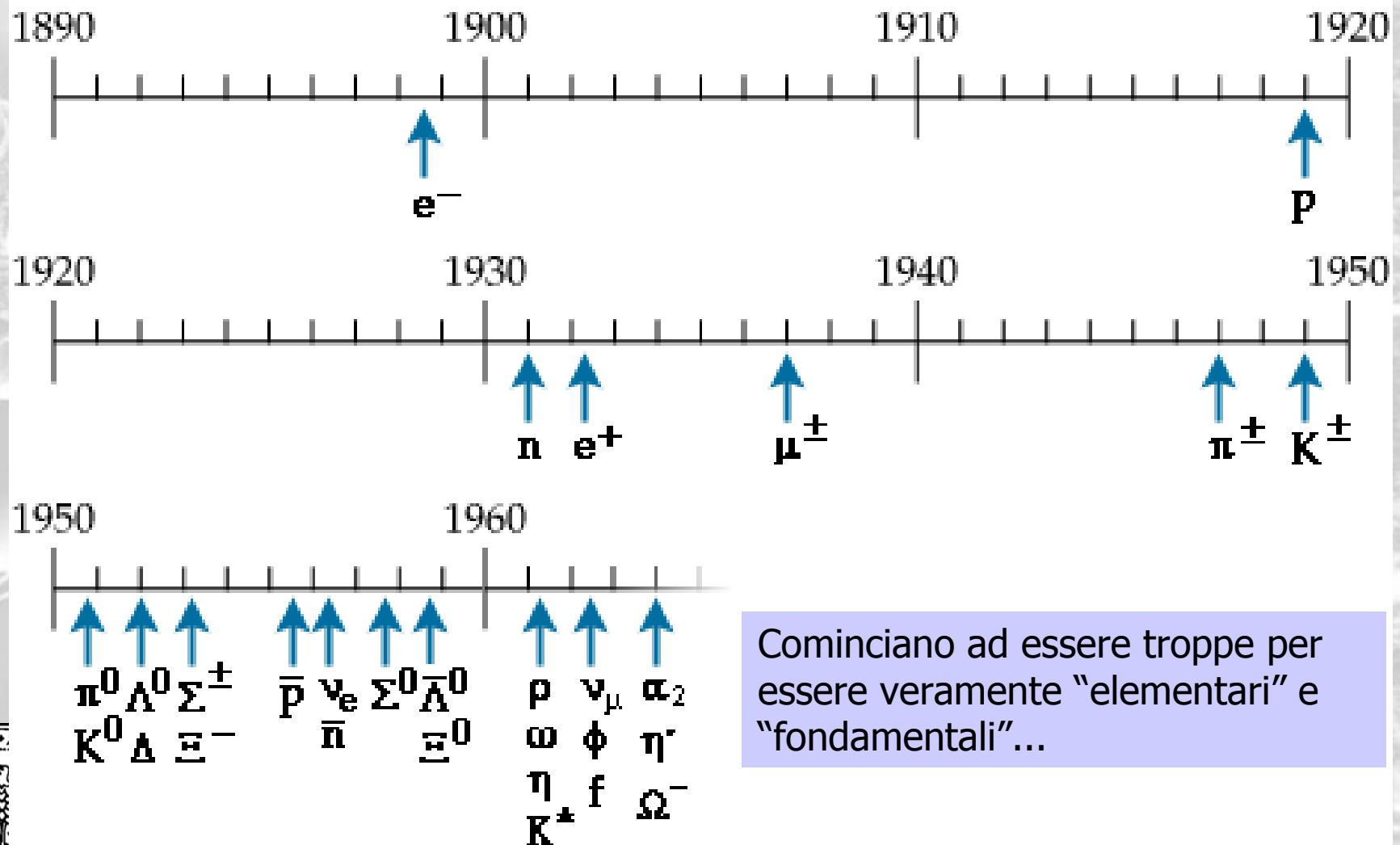


Una delle prime particelle rivelate è una terza particella carica, senza struttura interna, come elettrone e muone ma molto più pesante con vita media $0.3 \cdot 10^{-12}$ s: il tau

In n qualsiasi modo il tau decada, esso è sempre associato, come elettrone e muone, alla sua controparte leggera neutra: il **neutrino tau**
Come vedremo in tutto **6 leptoni**



...in pochi anni lo "zoo" cresce...



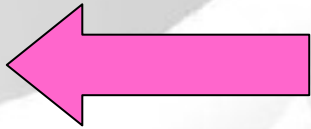
Cominciano ad essere troppe per essere veramente "elementari" e "fondamentali"...



**Le nuove domande di quegli anni
tante particelle
Come fare per saperne di più?
....come fare per vedere l'interno delle particelle
stesse?**

**La fisica ha i suoi metodi...
Le sue procedure....
Costruire esperimenti ad hoc per validare se stessa
questa è la strada
Parte l'avventura della costruzione di acceleratori di
particelle in laboratorio ed LHC è la tappa più
recente e grandiosa**





Calcolo

– Differenza di massa

$$= 1.008665 - (1.007825 + 0.0005486)$$

$$= 0.0002914 \text{ u}$$

$$= 0.0002914 \times 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$= 4.83724 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

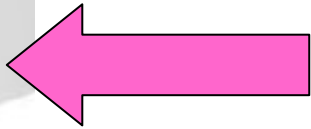
$$E = mc^2 = (4.83724 \times 10^{-31})(3.0 \times 10^8)^2 \text{ J}$$

$$= 4.353516 \times 10^{-14} \text{ J}$$

$$= \frac{4.353516 \times 10^{-14}}{1.602 \times 10^{-19}} = 271755 \text{ eV}$$

$$= 0.272 \text{ MeV}$$





Approfondimento sul calcolo

Senza neutrino

Supponendo che il neutrone sia fermo, si può ragionevolmente ritenere che anche il protone creato sia immobile, quindi l'unica particella a muoversi dovrebbe essere l'elettrone.

Per la conservazione dell'energia si ha: $m_n c^2 = E_p + E_e$ con energie date da

$$E_p = \sqrt{m_p^2 c^4 + p_p^2 c^2}$$

$$E_e = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

Nell'ipotesi di protone fermo (assenza di rinculo del protone)

si ha che l'unica è incognita è l'energia cinetica dell'elettrone, una riga di emissione appunto :

$$m_n c^2 \sim m_p c^2 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

Con il neutrino

Sempre trascurando l'energia cinetica del protone e la massa del neutrino.

la conservazione dell'energia diventa:

$$m_n c^2 \sim m_p c^2 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2} + p_\nu c$$



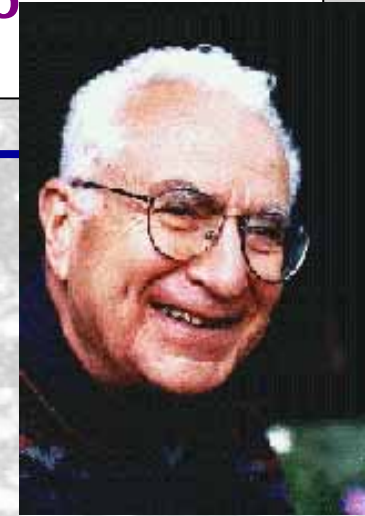
Lezione 1b

METTIAMO UN PO' D'ORDINE

Un nuovo modello semplifica lo zoo delle particelle...

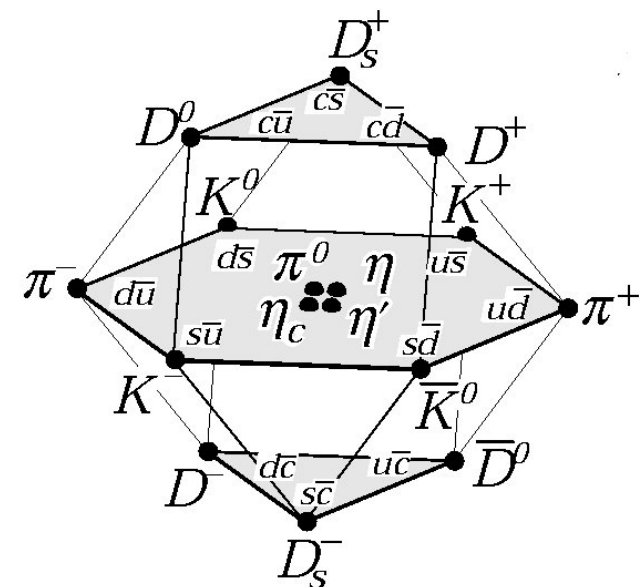
IL MODELLO STANDARD

I costituenti della materia



M. Gellman

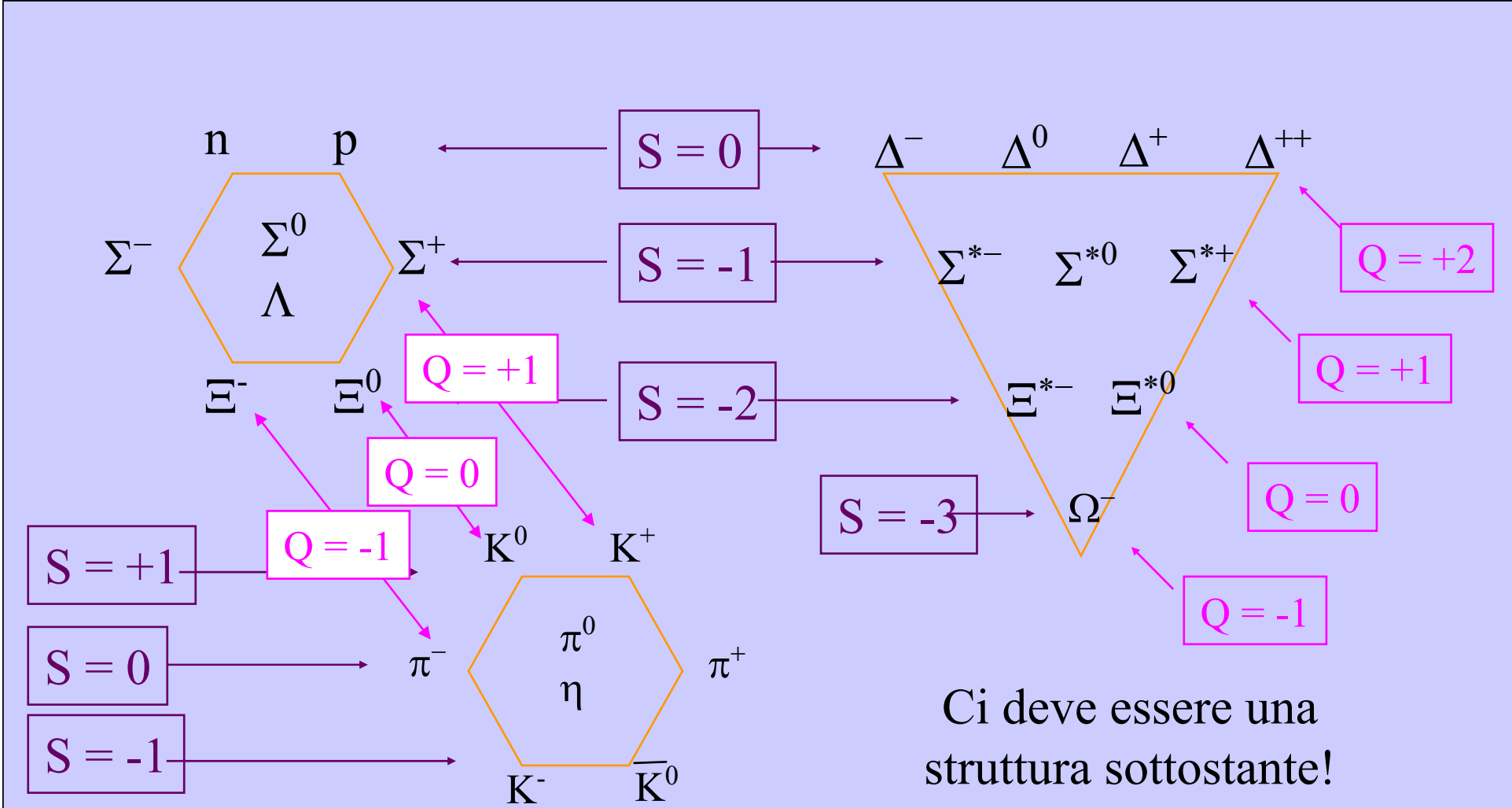
L'algebra (Teoria dei Gruppi) irrompe nella fisica teorica...



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Nel 1961 Gell-Mann & Ne'eman fecero per le particelle "fondamentali" cio che Mendeleev aveva fatto 100 anni prima per gli atomi "fondamentali".

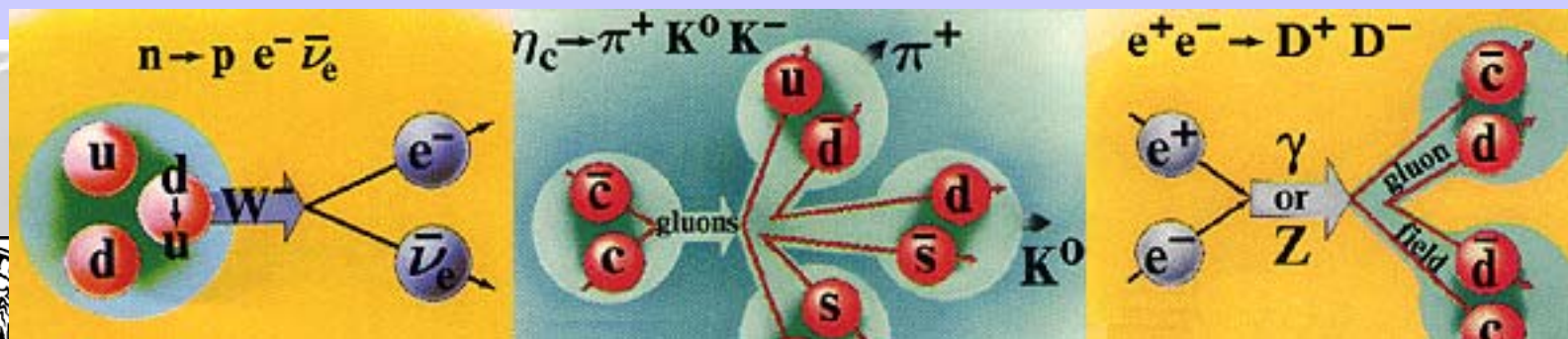


II MODELLO STANDARD

Tutte le scoperte e le teorie elaborate da migliaia di fisici dall'ultimo secolo ad oggi hanno portato all'elaborazione di un quadro consistente ma non completo sulla struttura fondamentale della materia che chiamiamo:

il Modello Standard delle Forze e delle Particelle.

Esso richiede: 12 particelle (6 leptoni e 6 quark) che costituiscono la materia e 4 particelle che sono "mediatori" delle forze.



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento



... ma da cosa è composta la materia

Costituenti materiali

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptoni	ν_e e-neutrino	ν_μ μ -neutrino	ν_τ τ -neutrino
	e elettrone	μ muone	τ tau
	I	II	III
Famiglie di materia			

In questo modello tutto nell'universo è composto a partire da un piccolo numero di "mattoni elementari" di base: sono le particelle elementari (subatomiche), che sono governate da poche forze fondamentali.

12 fermioni

suddivisi in tre famiglie

6 LEPTONI e 6 QUARK

Alcune di queste particelle sono stabili e formano la materia *consueta* (*prima famiglia*).

Altre invece "vivono" solo per frazioni di secondo e "decadono" in particelle stabili (seconda e terza famiglia).

La Materia stabile



I LEPTONI

Il membro più noto di questa famiglia è l'elettrone, altre particelle simili (più energetiche) sono il muone e il tau.

Per ognuna di queste particelle, c'è un piccolo "partner" chiamato neutrino, il neutrino elettrone (già incontrato nel decadimento beta), il neutrino muone, ed il neutrino tau.

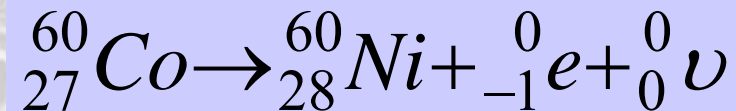
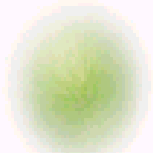
Ognuna di queste 6 particelle ha una analoga antiparticella.

Queste particelle, come vedremo a differenza dei quark, possono vivere di esistenza autonoma

Electron



Electron
Neutrino



In particolare

Se $Q = -1e$ sono legati (intrappolati negli atomi)

Se $Q = 0$ sono liberi di muoversi nell'universo



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

PROPRIETA' dei LEPTONI

Elettroni, muoni e Tau hanno massa.
Il neutrino non ha massa.

Elettroni. Muoni e Tau hanno carica -1 ,
e le loro antiparticelle hanno carica $+1$.
Il neutrino ha carica nulla .

Tutti I Leptoni hanno spin
Può essere $+1/2$ or $-1/2$.
Quindi FERMIONI

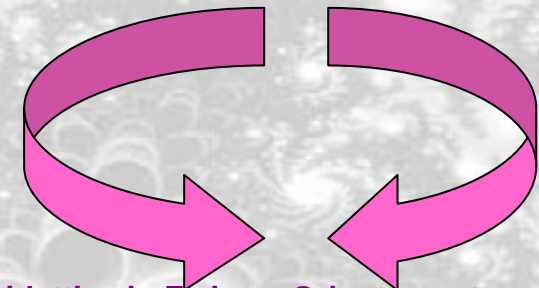


TABELLA DI SINTESI PER I 6 LEPTONI

	Sapore	Massa (GeV/c ²)	Carica Elettrica
Prima Famiglia	ν_e elettrone neutrino	$< 1 \times 10^{-8}$	0
	e electron	0.000511	-1
Seconda Famiglia	ν_μ muone neutrino	< 0.0002	0
	μ muon	0.106	-1
Terza Famiglia	ν_τ tau neutrino	< 0.02	0
	τ tau	1.7771	-1

I simboli degli anti-leptoni e^+ , μ^+ , τ^+ , $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$, $\bar{\nu}_\tau$.

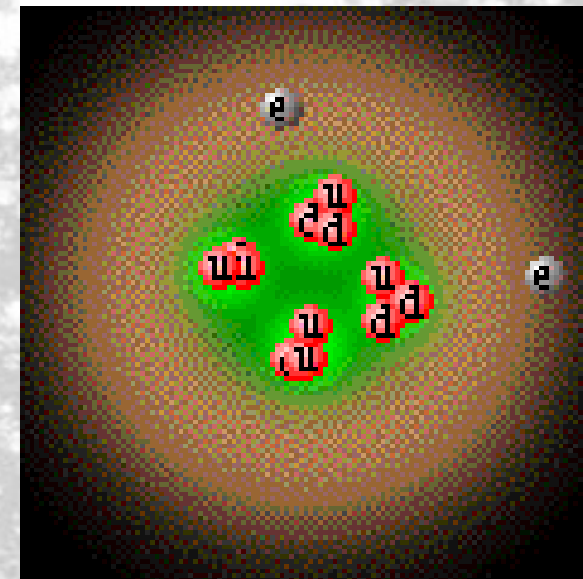
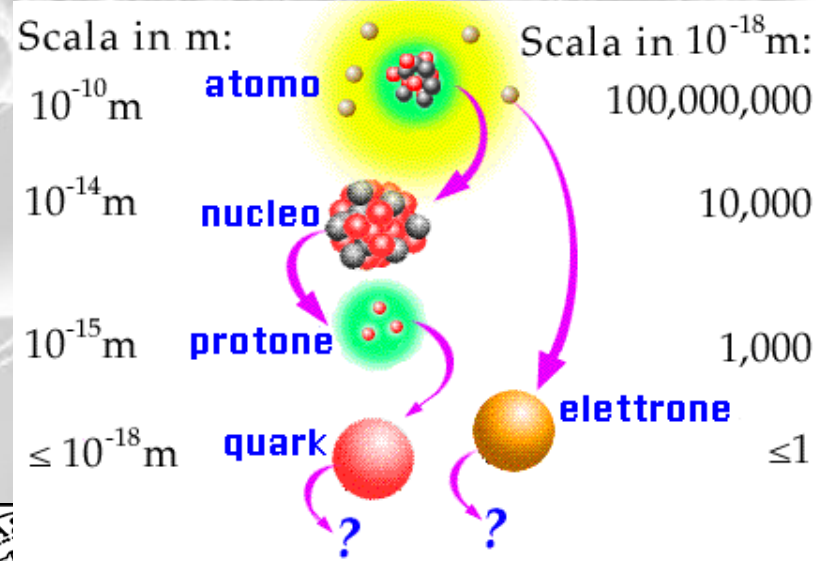




I quark

Le particelle interne al nucleo (nucleoni) , protoni e neutroni, mostrano struttura interna, ognuno è composto da 3 "quarks".

Per fare i protoni e i neutroni servono 2 tipi di quark, quelli della prima famiglia, chiamati "up" e "down".



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

PROPRIETA' dei Quark

Esistono 6 quarks, chiamati up, down, charm, strange, bottom and top.

Come abbiamo detto quelli "consueti/di ogni giorno" sono up and down quarks (prima famiglia).

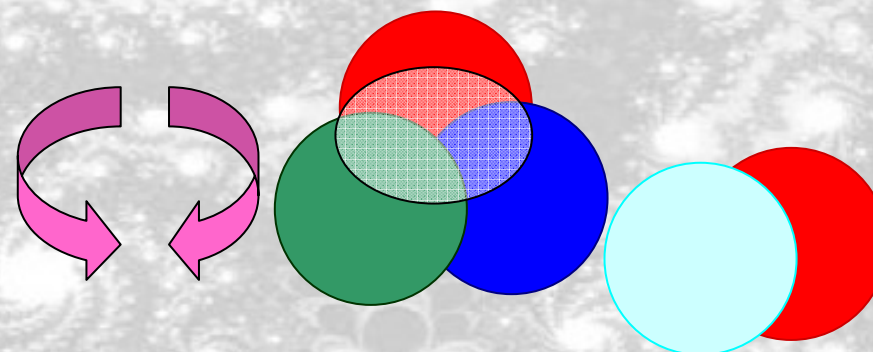
Ovviamente per ogni quark c'è un anti-quark.

I quark hanno massa e carica elettrica

La carica vale $\frac{2}{3}$ o $-\frac{1}{3}$ per i quark e quindi $-\frac{2}{3}$ o $\frac{1}{3}$ per gli anti-quark



Essi hanno spin $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$ (FERMIONI) ed hanno una ulteriore proprietà detta colore di carica: rosso, verde e blu, importante per la loro combinazione. Ovviamente gli anti quark hanno anti colore



Le REGOLE degli stati legati BARIONI e MESONI

Le particelle con carica di colore (come i quark) non si possono trovare isolate ma solo in gruppi di colore "neutro" (adroni).

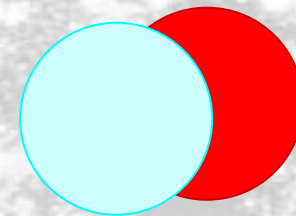
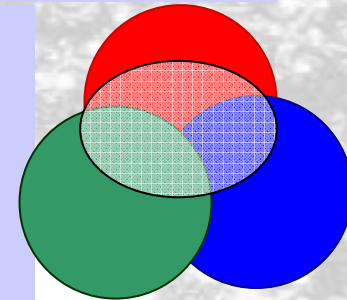
Questo significa che sono permessi solo due tipi di gruppi: 3 quarks (or 3 anti-quarks), o una coppia di quark-antiquark.

Le particelle del primo tipo sono dette BARIONI
(le più note sono protone e neutrone)

Il secondo tipo è detto MESONI

TUTTI sono detti HADRONI

Come conseguenza di queste regole, gli stati legati possono avere solo carica intera ($0, \pm 1, \pm 2$).



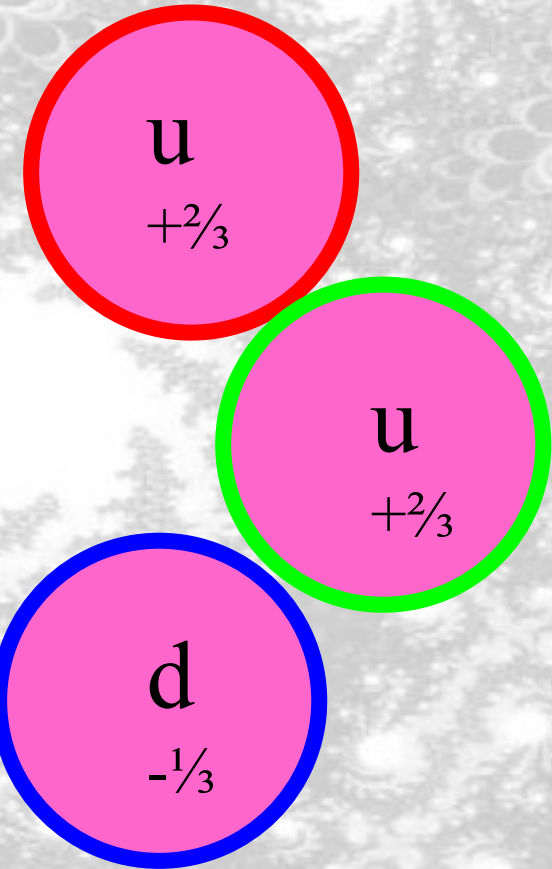
LE PARTICELLE CONSUETE

Il protone ha carica +1.

E' un barione composto da 3 quark

Dato che il quark up ha carica $+2/3$ e il down quark ha carica di $-1/3$, il solo modo per costruire un protone e uud. ($2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$).

I quark saranno di colore diverso per rendere il protone di colore neutro, e tutte le regole saranno rispettate



neutrone

protone

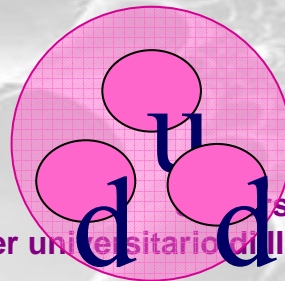


TABELLA DI SINTESI PER I QUARK

	Sapore	Massa (GeV/c ²)	Carica Electtrica
Prima Famiglia	u up	0.003	+²/₃
	d down	0.006	-¹/₃
Seconda Famiglia	c charm	1.3	+²/₃
	s strange	0.1	-¹/₃
Terza Famiglia	t top	175	+²/₃
	b bottom	4.3	-¹/₃

I simboli per gli anti-quarks sono: $\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b}$.



Le forme di materia meno ordinaria

Neutrini, muoni e le altre particelle instabili creati nelle collisioni della materia cosmica che arriva dallo spazio o nelle collisioni prodotte con acceleratori ad alta energia ed anche....
"l'immagine speculare" di tutto questo, cioè l'antimateria.

1965	Tomonaga, Schwinger e Feynman, premio Nobel per la formulazione della QED.
1969	Gell-Mann, premio Nobel per il suo contributo alla classificazione delle particelle e delle loro interazioni.
1979	Glashow, Salam e Weinberg, premio Nobel per l'unificazione delle interazioni forte ed elettromagnetica.
1999	'tHooft e Veltman, premio Nobel per la formulazione quantistica della teoria elettrodebole.



COMPITO 2

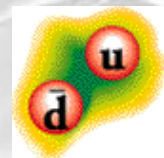
1. Determinate la composizione in quark del neutrone, che è un barione neutrale
2. In condizioni normali di energia (low-energy), le combinazioni uuu e ddd non vengono osservate. Perché?
3. Le particelle della prima famiglia (simili a protoni e neutroni ma con differente spin) sono Δ^{++} , Δ^- , Δ^0 , e Δ^+ , trova la composizione quark di ciascuna .
4. Il π^+ è il mesone che ha carica $+1$. Da quali quark and anti-quark di prima famiglia è composto?
5. Ora completa lo zoo della particelle della prima famiglia costruendo una tabella



Alcuni numeri su barioni e mesoni



Particelle Materiali:			
Fondamentali: (per quanto ne sappiamo)	<table border="1"> <tr> <td>Quark (q)</td> </tr> <tr> <td>Leptoni (l)</td> </tr> </table>	Quark (q)	Leptoni (l)
Quark (q)			
Leptoni (l)			
Composte:	<table border="1"> <tr> <td>Barioni (qqq)</td> </tr> <tr> <td>Mesoni (q\bar{q})</td> </tr> </table>	Barioni (qqq)	Mesoni (q \bar{q})
Barioni (qqq)			
Mesoni (q \bar{q})			



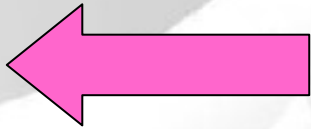
barioni = qq \bar{q} *	quark	carica elettrica	massa (GeV/c ²)	spin
p protone	u u d	+1	0.938	1/2
\bar{p} antiprotone	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	-1	0.938	1/2
n neutrone	u d d	0	0.940	1/2
Λ^0 lambda	u d s	0	1.116	1/2
Ω^- omega	s s s	-1	1.672	3/2
Σ_c sigma-c	u u c	+2	2.455	1/2
e tanti altri ...				

mesone = q \bar{q}	quark	carica elettrica	massa (GeV/c ²)	spin
π^+ pione	u \bar{d}	+1	0.140	0
K^- kaone	s \bar{u}	-1	0.494	0
K^0 kaone	d \bar{s}	0	0.498	0
ρ^+ rho	u \bar{d}	0	0.770	1
D^+ D	c \bar{d}	+1	1.869	0
η_c eta-c	c \bar{c}	0	2.980	0



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento



BARIONI

MESONI

<i>Protone p</i>	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>d</i>
<i>Neutrone</i>	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
Δ^{++}	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>u</i>
Δ^{-}	<i>d</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
Δ°	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>d</i>
Δ^{+}	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>d</i>

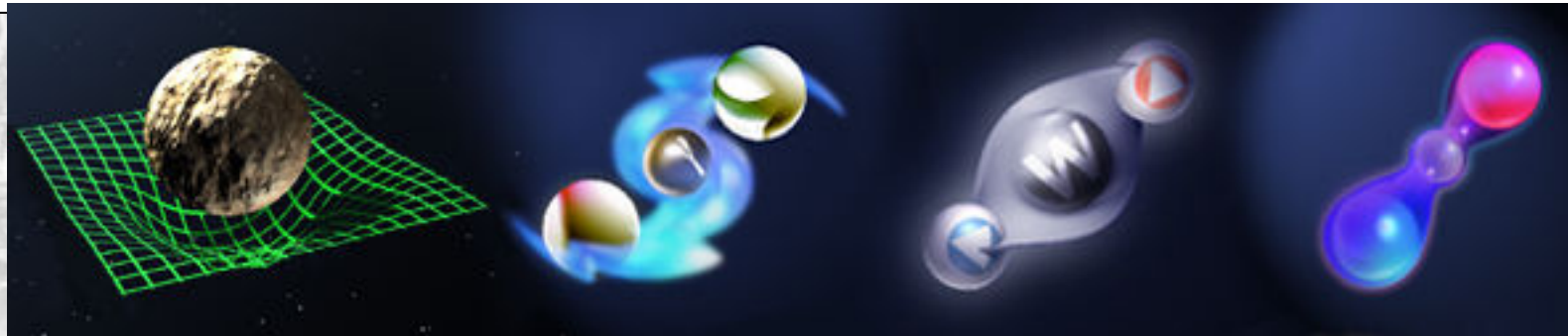
π^{+}	<i>u</i>	\bar{d}
π°	<i>u</i>	\bar{d}
π^{-}	<i>u</i>	\bar{u}

E per ciascuna la sua antiparticella!



IL MODELLO STANDARD LE INTERAZIONI

che cosa tiene insieme la materia?



Le particelle fondamentali si legano fra di loro per formare strutture a tutte le scale di grandezza: dal protone che é fatto di 3 quarks, agli atomi, poi alle molecole e quindi i liquidi i solidi ecc., fino agli enormi conglomerati di materia nelle stell, nelle galassie.

Questo é possibile per mezzo di sole 4 interazioni di base, quelle che noi chiamiamo forze.



Come possiamo descrivere le interazioni?

La relatività di Einstein **IMPONE** di superare il concetto classico di “azione a distanza” :

Nulla può essere trasmesso a velocità maggiore della luce

Ciascuna *forza*, ha una particella associata ad essa “**mediatore**”, un *bosone di gauge*, che permette alla forza di agire a distanza.

forza = interazione = scambio di un mediatore

4 particelle che sono “mediatori” delle forze.

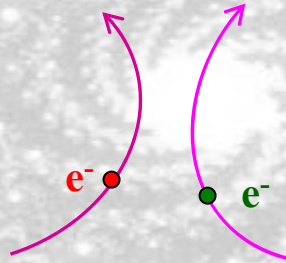


Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Interazioni tra Campi

Fisica Classica

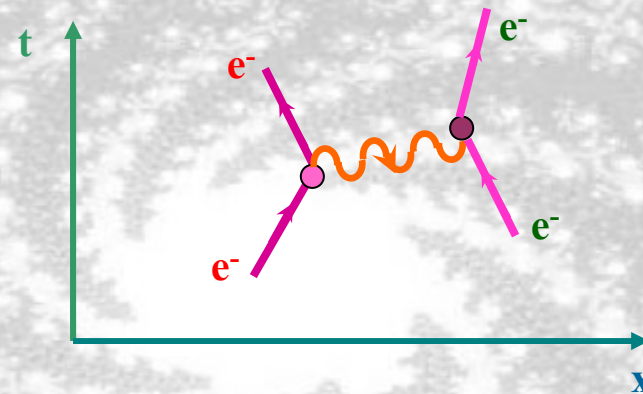


elettroni si avvicinano →
mutua repulsione →
rallentati e deviati



Azione a distanza

Fisica Quantistica



- e^- emette γ → cambia velocità
- e^- assorbe γ → cambia velocità



Interazione = scambio del γ



Università degli Studi di Udine

MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

LE 4 INTERAZIONI FONDAMENTALI come già le conosciamo

Gravità

agisce solo tra **particelle e corpi dotati di massa**
solo attrattiva
debole sulla scala delle singole parti-
celle, domina quando la materia è
addensata in bulk (noi) o su più larga
scala in pianeti, stelle e galassie

Elettromagnetica

agisce tra **particelle e corpi dotati di carica non nulla**
attrattiva e repulsiva
tra due elettroni $F_e/F_g \cong 10^{42}!!$
lega gli elettroni carichi negativamente ai nuclei positivi, è alla
base delle interazioni che danno luogo alla formazione di
molecole, determina fenomeni su più larga scala come la
tensione superficiale o l'attrito



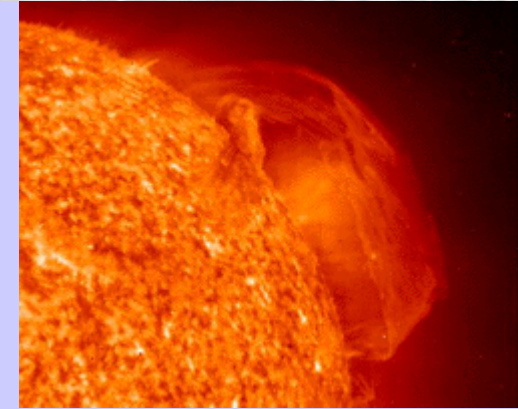
**FISICA
CLASSICA**



Forza nucleare debole

responsabile dei **decadimenti** di molte particelle (neutrone, pione, muone, ecc.) e dei fenomeni di radioattività naturale

responsabile del processo di **formazione di deuterio** a partire dall'idrogeno, primo anello della fusione nucleare al centro delle stelle



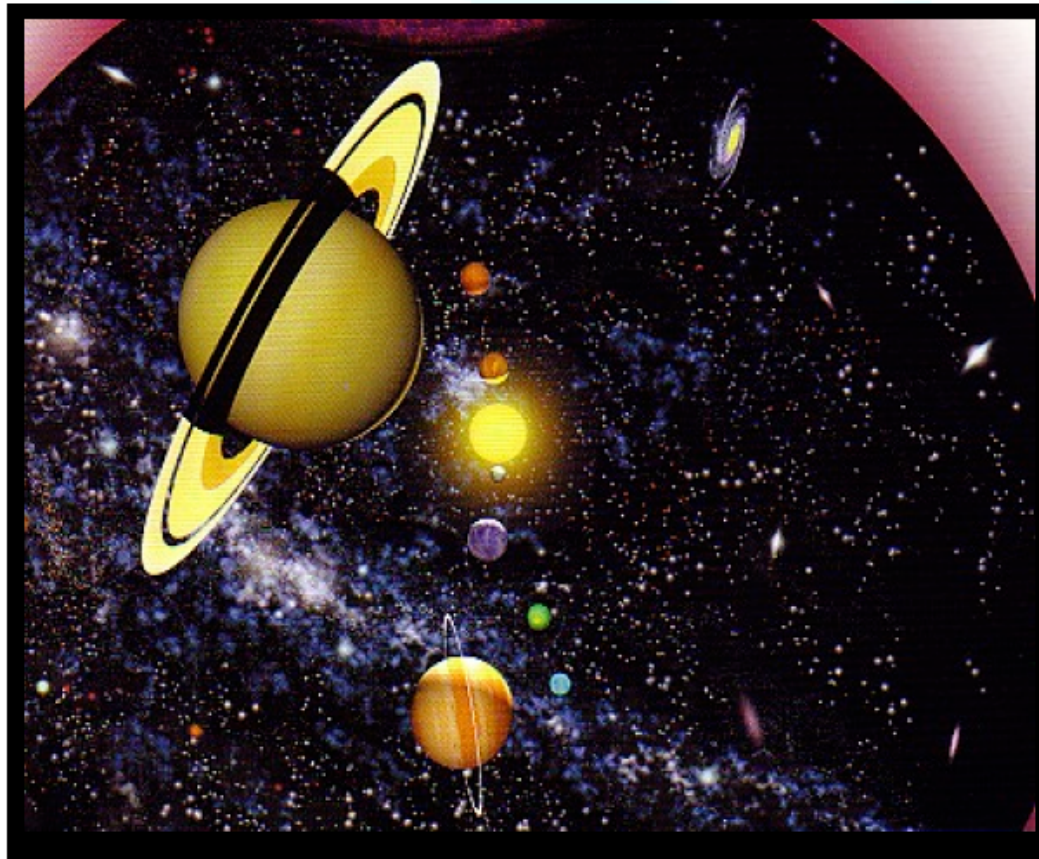
Forza nucleare forte **interazioni sulla scala dei nuclei atomici**

Le particelle che sentono l'interazione nucleare forte sono gli "adroni" (barioni e mesoni), tiene **uniti i quark** nei barioni e nei mesoni (**libertà asintotica**, i quark non appaiono mai liberi)
Evita anche che i protoni nel nucleo si respingano elettricamente, tra due protoni $F_f/F_e \cong 10^2$



L'interazione gravitazionale

E' probabilmente la forza che ci è più familiare!



- Anche se la gravità agisce su ogni cosa, è una forza molto debole qualora le masse in gioco siano piccole
- La particella mediatrice di forza per la gravità si chiama gravitone: la sua esistenza è prevista ma non è ancora stata osservata



L'interazione elettromagnetica

- Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute alle interazioni elettromagnetiche nella materia: tengono assieme gli atomi e i materiali solidi
 - la carica elettrica (positiva/negativa) e il magnetismo (nord/sud) sono diverse facce di una stessa interazione, l'elettromagnetismo.
 - cariche opposte, per esempio un protone e un elettrone, si attirano, mentre particelle con la stessa carica si respingono.



- La particella mediatrice dell'interazione elettromagnetica si chiama fotone.
 - In base alla loro energia, i fotoni sono distinti come: raggi gamma, luce (visibile), microonde, onde radio, etc.

Per la forza elettromagnetica la teoria di riferimento è l'elettrodinamica quantistica **QED** e il bosone di gauge è il **fotone**.

MASTER IDIFO master universitario di II livello in InnoVazione Digitale in Fisica e Orientamento



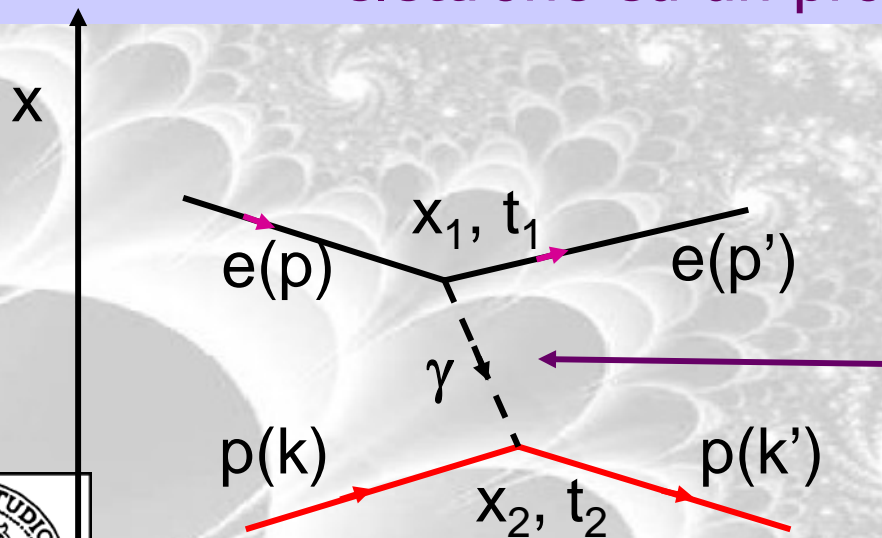
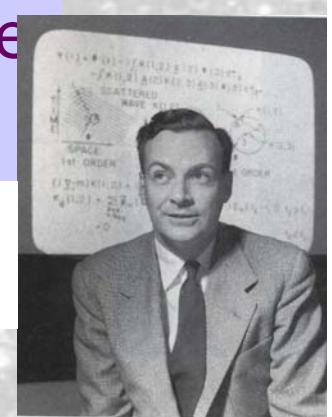
La descrizione delle interazioni

quantisticamente, i campi agiscono per mezzo di **"mediatori"**, ogni campo ha il proprio (o i propri) mediatori e può agire solo su alcune delle particelle

Con i "diagrammi di Feynman" è possibile rappresentare le interazioni - interazione elettromagnetica fra un elettrone ed un protone

Questi diagrammi non sono soltanto rappresentazioni grafiche ma autentiche formule matematiche che ci permettono di calcolare l'intensità dell'interazione.

R.P. Feynman
(1948)



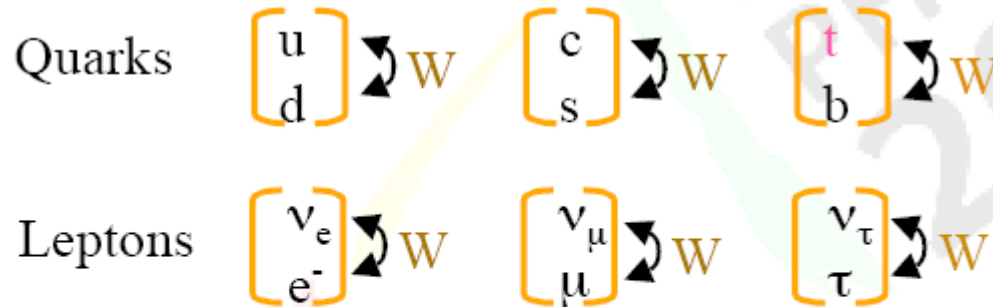
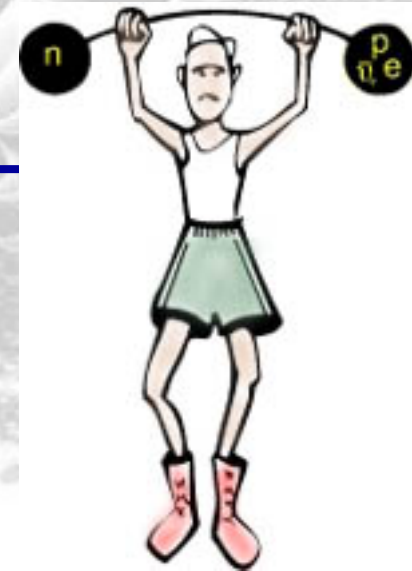
Un fotone viene "scambiato" fra la 2 particelle: esso **media** l'interazione elettromagnetica



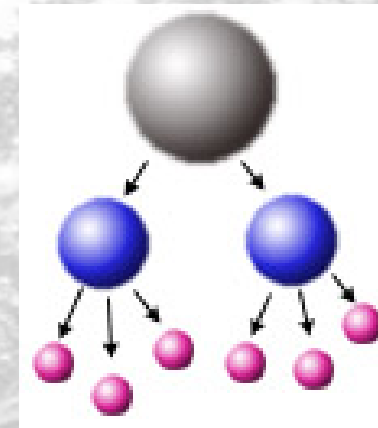
La forza debole

L'interazione debole e' responsabile del fatto che tutti i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore

I mediatori dell'interazione debole sono le particelle: W^+ , W^- e Z^0

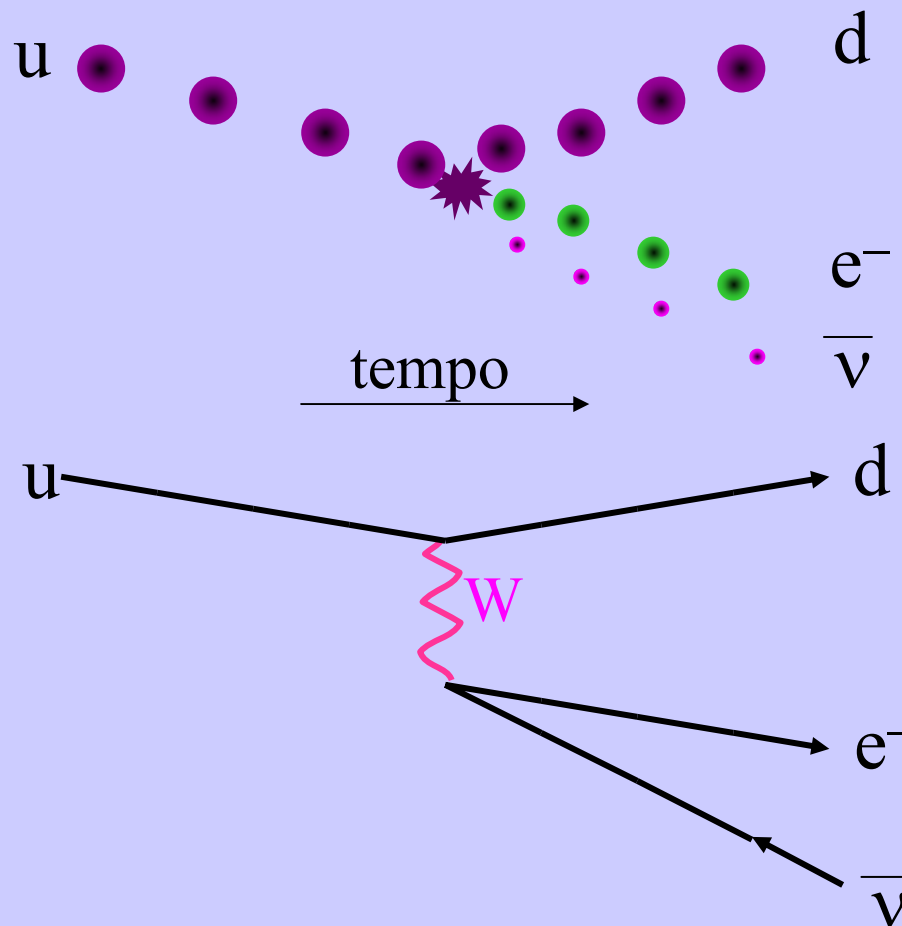


Cambiamenti di tipo (detto "sapore") governati dall'interazione debole



Il bosone W

Ma come avviene l'interazione debole ?

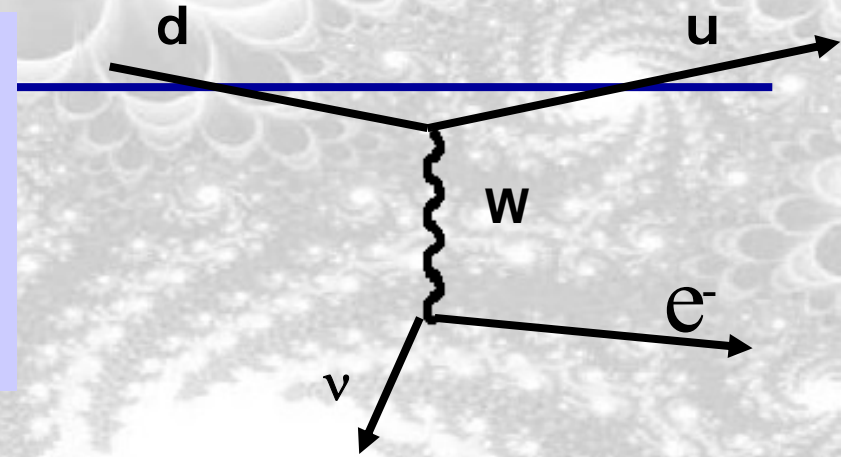


Il bosone W interagendo con il fermione ne cambia il "sapore"

Quello che rende debole l'interazione è il fatto che il bosone W ha una massa molto elevata (probabilità più bassa di emissione)

La forza debole: Decadimento del neutrone

L'interazione debole non contribuisce tanto alla coesione della materia quanto alla sua *trasformazione*. Come esempio consideriamo una particolare manifestazione delle interazioni deboli, il *decadimento beta*: la trasformazione di un neutrone in un protone più un elettrone e un antineutrino elettrone



La forza magica che trasforma i neutroni

Le forze della natura si manifestano spesso come attrazione o repulsione fra particelle. Ma la forza nucleare debole, scoperta negli anni '30 (soprattutto grazie agli studi di Enrico Fermi), è l'unica capace di trasformare la materia. Ecco un esempio.



Un neutrone isolato: è composto da 2 quark down e da 1 quark up.



Dopo circa 12 minuti, in media, si avvia un processo di "decadimento".



Un quark down si tramuta in up, e il neutrone diventa protone (emettendo una particella W⁺).



La particella W⁺, che trasmette la forza debole, si trasforma a sua volta.



Alla fine, rimangono un protone, un elettrone e un antineutrino (ν⁻).

L'interazione forte

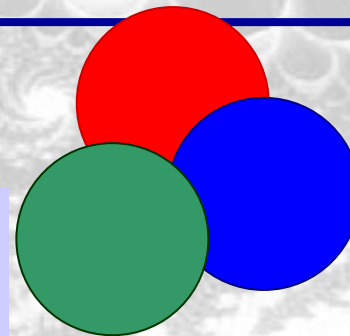
Perche' la repulsione elettromagnetica fra i protoni del nucleo non fa esplodere l'atomo?

Come abbiamo visto, i quarks hanno una carica di un nuovo tipo che è stata chiamata **carica di colore**.

– Ogni quark puo' avere uno dei tre colori: **rosso, blu o verde**

• Tra particelle dotate di carica di colore l'interazione è molto forte, tanto da meritarsi il nome di **interazione forte**.

– La sua particella mediatrice è stata chiamata **gluone**: perche' “**incolla**” i quark fra di loro



Anti-rosso

Anti-blu

Anti-verde



Le regole dell'interazione forte

La carica di colore si conserva sempre.

- quando un quark emette o assorbe un gluone, il colore del quark deve cambiare, per conservare la carica di colore
- *Per esempio, consideriamo un quark rosso che diventa un quark blu ed emette un gluone rosso/anti-blu: il colore "netto" è sempre rosso.*

Un gluone porta una carica di colore ed una di anti-colore



La forza forte aumenta se aumenta la distanza Mai quark liberi!!!

La forza di colore cresce al crescere delle distanze

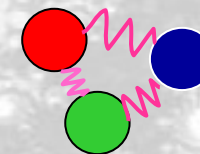
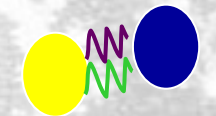
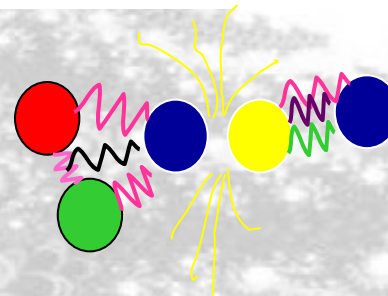
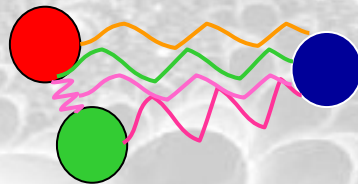
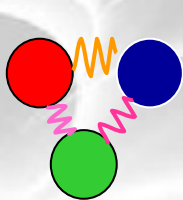
Cosa succede se si cerca di "spezzare" un adrone?

Se uno dei quark di un adrone viene allontanato dai suoi compagni, il campo di forza di colore "si allunga" per mantenere il legame.

In questa maniera cresce l'energia del campo di forza di colore, e cresce quanto più vengono allontanati i quark tra loro.

La teoria del modello standard prevede che portando la materia ad altissime densità o ad altissime temperature, si raggiunga uno stato in cui i quark sono liberi, non più confinati. Questo stato viene detto Quark Gluon Plasma (QGP).

Il passaggio dalla materia ordinaria allo stato di QGP viene detto: transizione di fase.



Energia del campo di colore cresce...

$E=mc^2$ sufficiente per creare un'altra coppia quark-antiquark

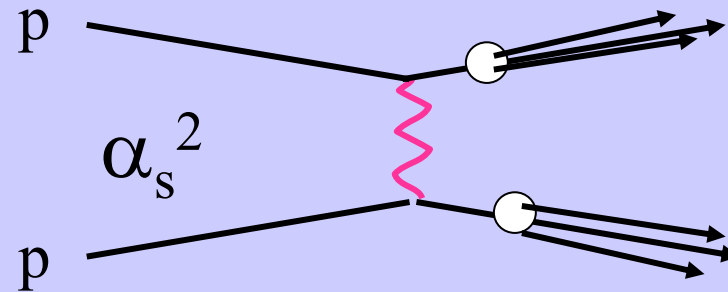
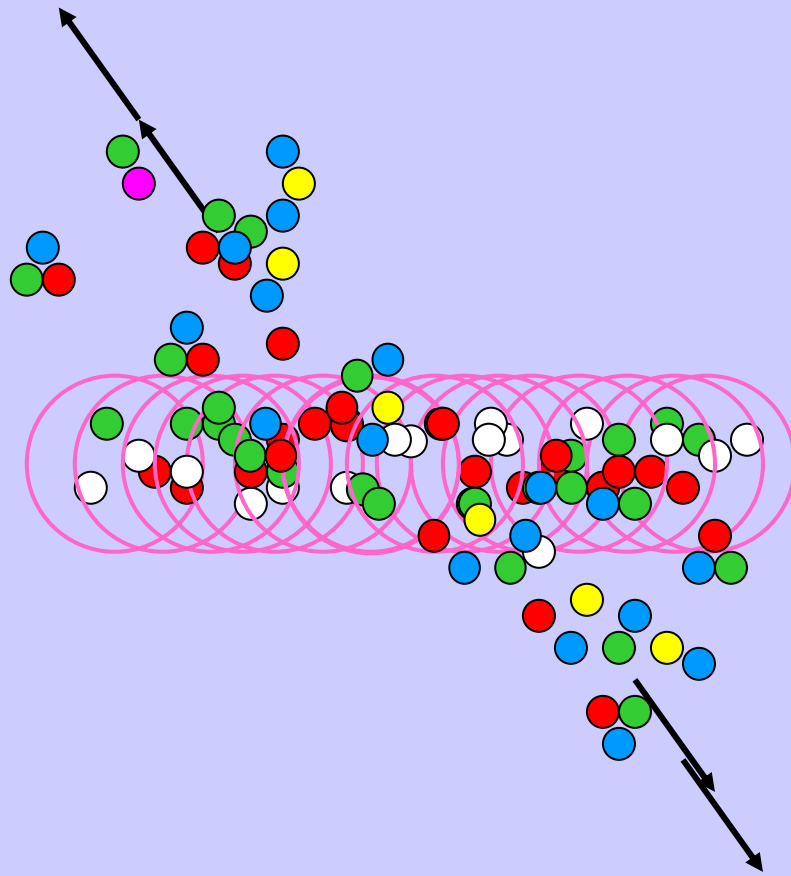


Università degli Studi di Udine

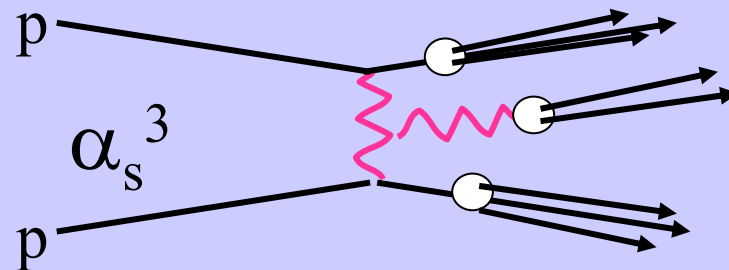
MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

Evidenza della QCD

La QCD (Cromo Dinamica quantistica) mi dice che non posso vedere dei quark liberi. Quindi, cosa succede se provo a far scontrare due protoni ad energie sempre più elevate?

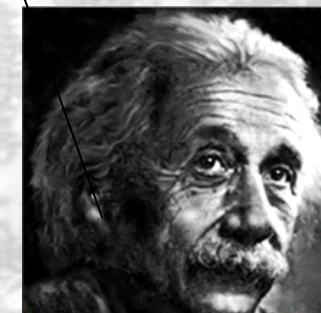
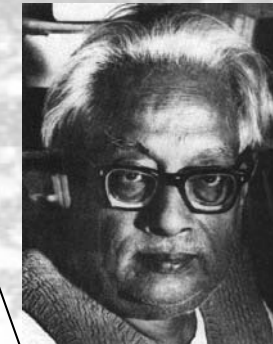


Ma i gluoni possono interagire tra di loro in quanto anche loro sono colorati !!



Una ulteriore classificazione che ha a che fare con lo spin (momento della quantita' di moto intrinseca...)

Fermioni		Bosoni	
Leptoni Quark	$\frac{1}{2}$	1	Bosoni mediatori $\gamma W^+ W^- Z^0 g$
Barioni (qqq)	$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	0, 1, 2, ...	Mesoni (q \bar{q})

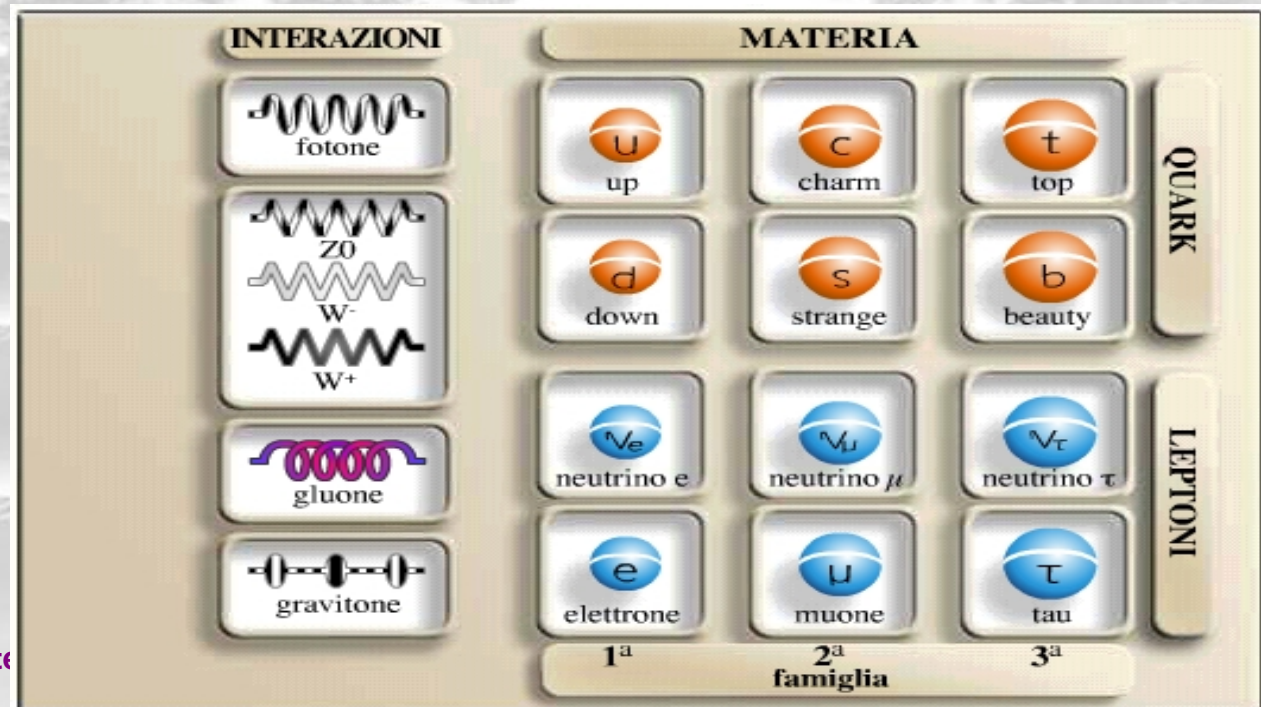
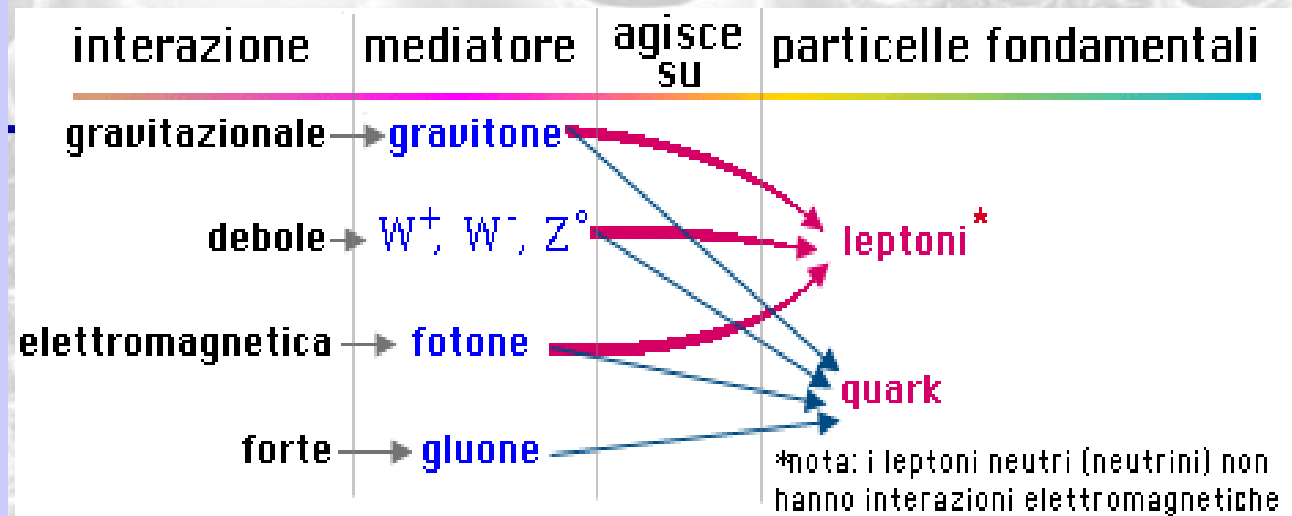


Sulla base dello spin (intero/semintero) classifichiamo le particelle come Bosoni o Fermioni. I fermioni, particelle di materia consueta obbediscono al principio di esclusione di Pauli, secondo cui due particelle simili interagenti non possono esistere nello stesso stato, il principio è importantissimo perchè spiega perchè i fermioni non si contraggono in uno stato di densità elevata sotto l'azione dei Bosoni (Condensazione di Bose Einstein)



SINTESI mediatori

- ❖ Il gravitone (interazione gravitazionale) agisce su tutte le particelle
- ❖ Il gluone (interazione forte) agisce su tutti i quark
- ❖ Il fotone (il bosone più famoso) (interazione elettromagnetica) agisce su tutte le particelle dotate di carica elettrica, quindi su tutti i quark e sui leptoni (*elettrone, muone e tau*) *non sui neutrini*
- ❖ I bosoni intermedi Z^0 , W^+ e W^- (interazione debole), agiscono su tutte le particelle (i segni hanno a che fare con la carica delle particelle con cui interagiscono)



Le 6 particelle che mediano i campi

❖ Per descrivere un'interazione è importante definire due quantità: il *raggio d'azione* e l'*intensità*

Il *raggio d'azione* di un'interazione è 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 pianeti lontanissimi come Plutone.

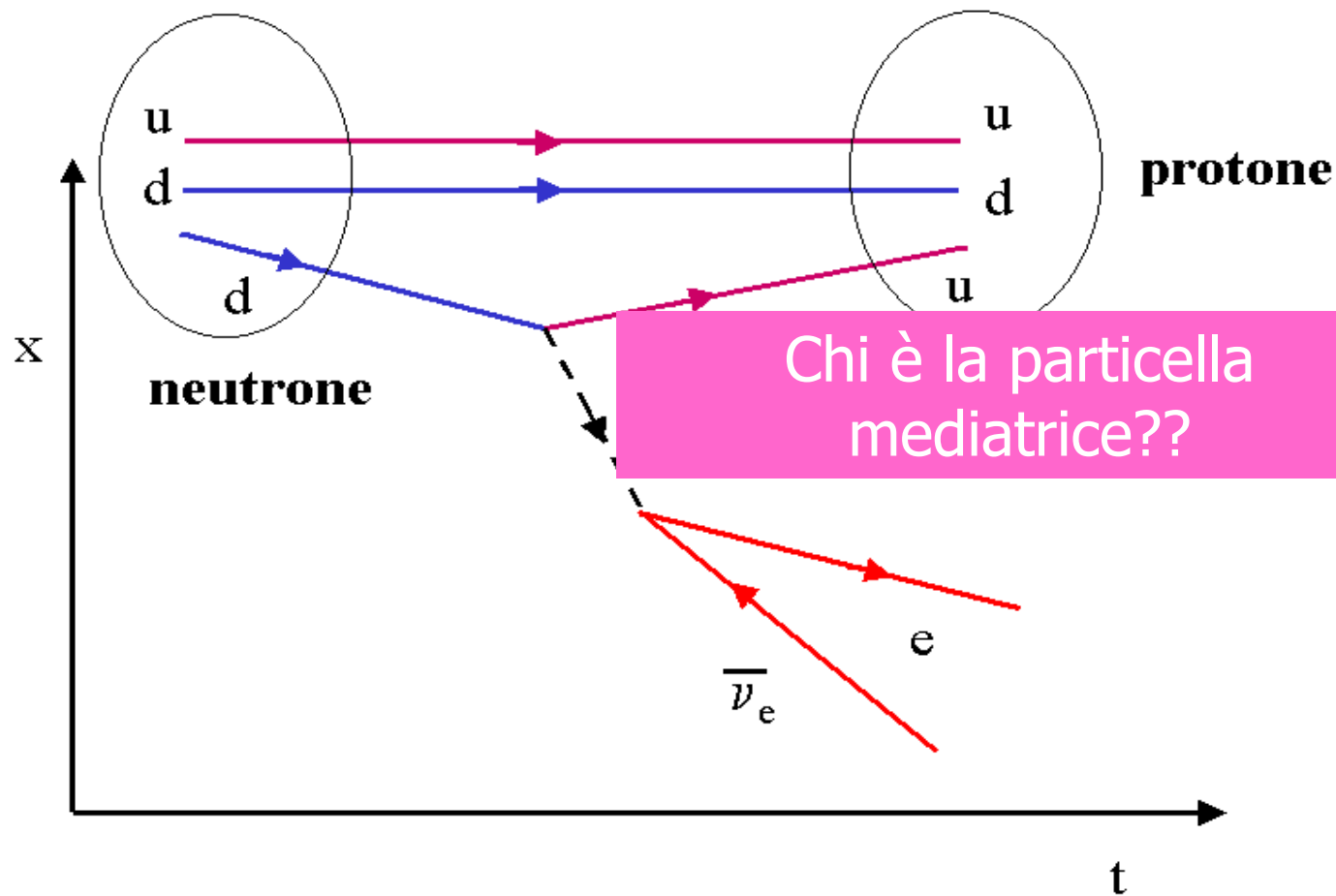


Le 6 particelle che trasmettono le forze				
	Nome	Massa*	Carica**	Spin ^o
forza elettromagnetica				
	fotone	0	0	1
forza nucleare debole				
	W-	80,4	-1	1
	W+	80,4	+1	1
	Z ^o	91,187	0	1
forza nucleare forte				
	gluoni	0	0	1
forza di gravità				
	gravitone	0	0	2
Quattro forze. In natura esistono quattro forze fondamentali, ognuna trasmessa da una o più particelle. Sono state tutte osservate in laboratorio, tranne il gravitone.				
* La massa è espressa in GeV/c ² , unità pari a 1,79 · 10 ⁻²⁷ kg (poco più della massa del protone).				
** La carica elettrica è espressa in termini della carica dell'elettrone (che è negativa e vale -1).				
° Lo spin indica il senso di rotazione della particella su se stessa.				

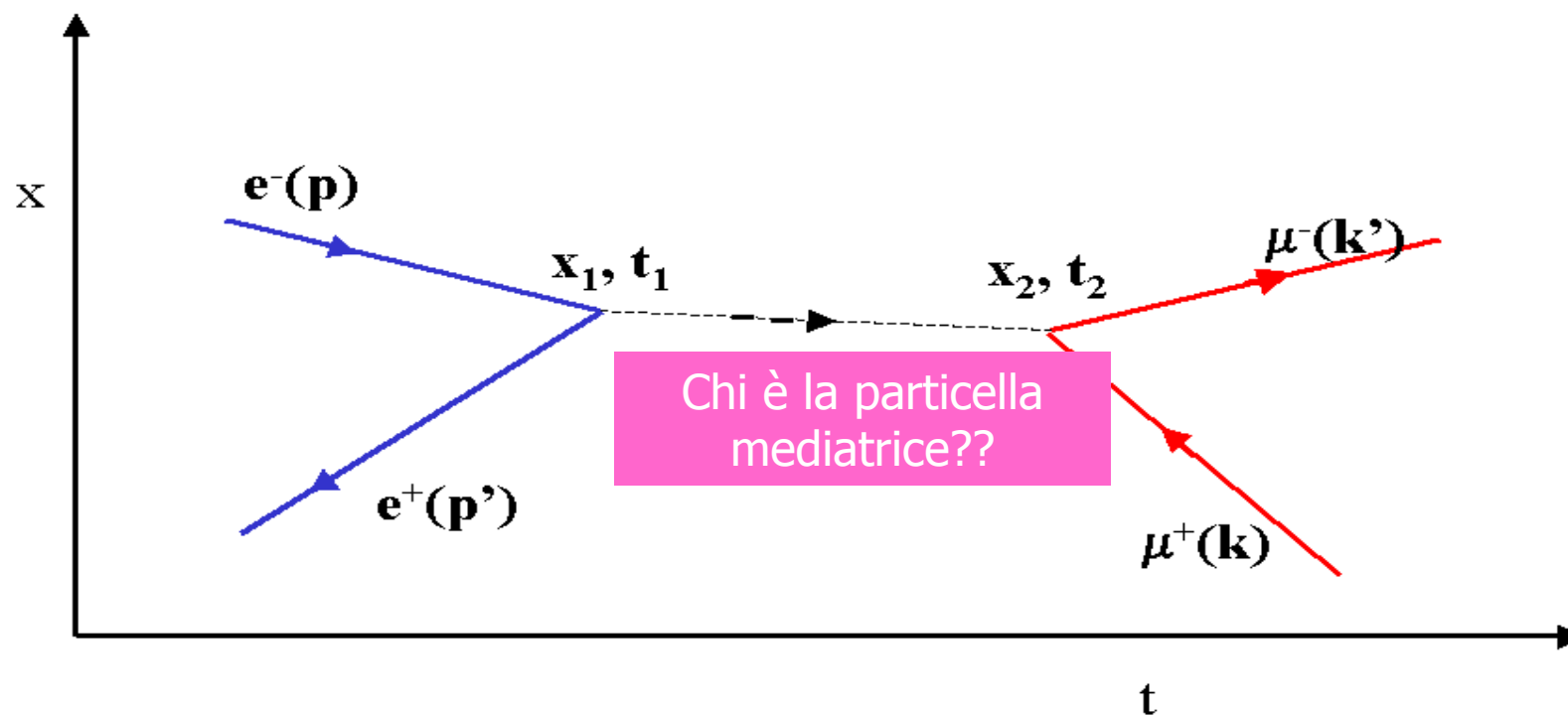
degli Studi di Udine
ello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

COMPITO 3

Un esempio di diagramma di Feynman per
l'interazione debole: il decadimento β del neutrone:



**Un altro esempio: l'annichilazione materia-antimateria
elettrone + positrone $\longrightarrow \mu^+ \mu^-$**



Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

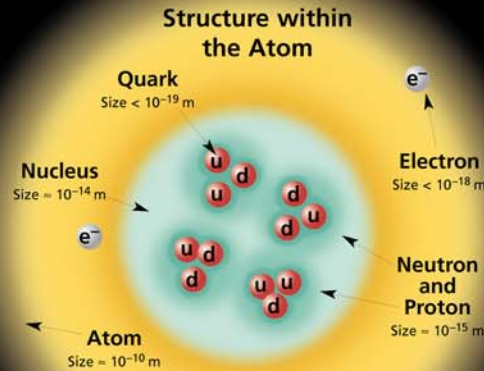
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c² = 1.67×10^{-27} kg.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		Mass - Energy	(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60		
for two protons in nucleus		10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

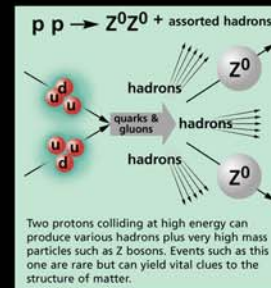
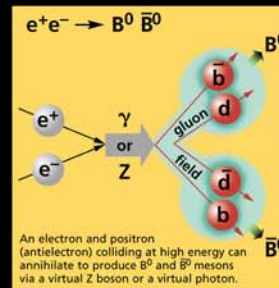
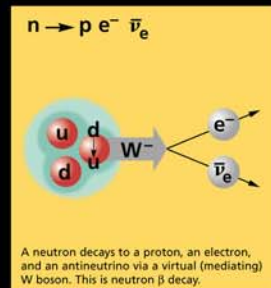
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are **not** exact and have **no** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>