



Università degli Studi di Udine

**MASTER IDIFO**

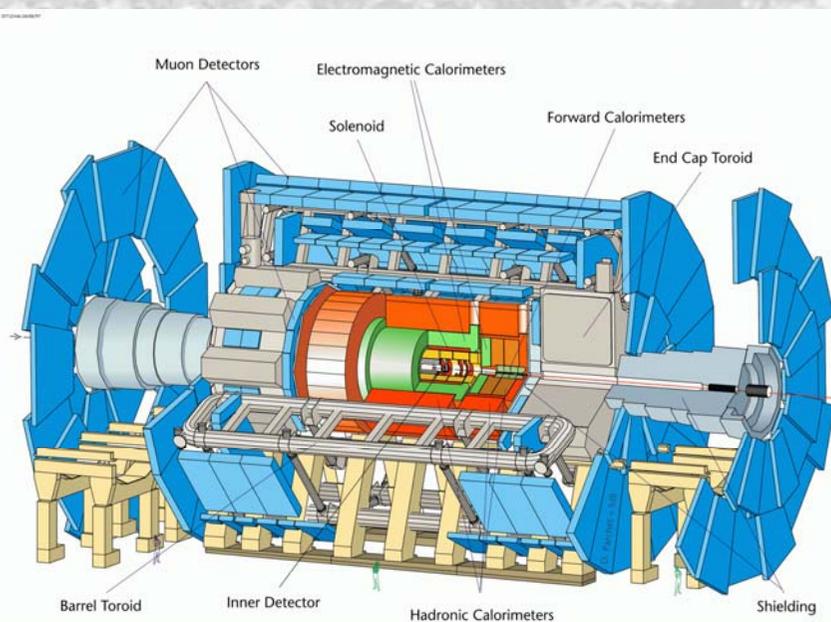
Master universitario di II livello in  
Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

## Sperimentazione Maior MODULO E Problem Solving per l'orientamento

Orientamento di genere  
in scienza

LHC e le questioni  
aperte nel MODELLO  
STANDARD

di Patrizia Colella



Università degli Studi di Udine

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



**...Il programma di ricerca negli anni '20 era raccogliere tutte le possibili informazioni sulla radiazione che giunge alla terra dal cosmo per studiarne la natura...**

- Ma i raggi cosmici arrivano con energia varia e imprevedibile e collidono con i nuclei dell'atmosfera ad altezze diverse

**Sorgeva la necessità di nuovi strumenti e nuovi contesti**

Nuovi contesti: creare condizioni sperimentale totalmente controllabili:

- a) un "fascio" di particelle di energia nota diretto contro
- b) un "bersaglio" preparato
- c) vicino ad un "dispositivo" di rivelazione dei prodotti delle collisioni

Nasce così l'avventura dei **acceleratori di particelle artificiali** come strumenti per studiare la fisica delle particelle elementari:

***i microscopi dell'infinitamente piccolo***



# Da dove si parte? Dalla lezione di Rutherford!!!

Particelle di alta energia come esploratori del microcosmo

**Negli acceleratori non solo produzione di nuove particelle attraverso la conversione di energia in materia, ma anche indagine della possibile struttura interna delle particelle stesse**

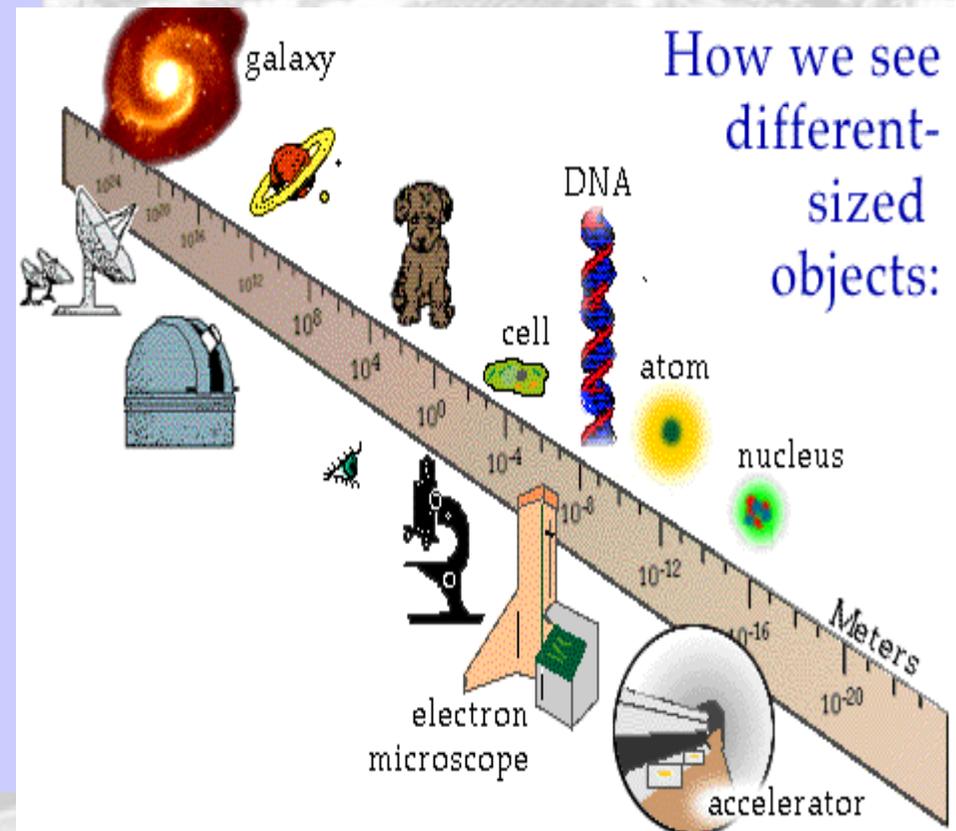
Per poter sondare sempre piu' "in piccolo" occorre disporre di particelle-sonda di energia sempre piu' elevata

$$\lambda \propto 1/p = h/p$$

**(Relazione di De Broglie)**

*Una particella e' in grado di sondare oggetti-bersaglio di dimensioni dell'ordine della propria lunghezza d'onda:*

*Alte energie → piccole lunghezze d'onda  
→ sondare in piccolo*



# Relazione tra energia e $\lambda$ associata

Per avere  $\lambda$  piccolo è necessario aumentare  $p$  (la quantità di moto) e quindi l'energia delle particelle.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

“quantità di moto relativistica”:

$$\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Maggiore è la quantità di moto di una particella (energia relativistica),  
Minore è la sua lunghezza d'onda associata

proiettile

un fascio di particelle di una data energia può “vedere”  
un oggetto di dimensioni COMPARABILE alla sua  $\lambda$  associata

bersaglio



**La dimensione tipica di una particella subatomica (per esempio il protone) é dell'ordine di  $10^{-15}$  m (0.0000000000001 mm). Questa misura la chiamiamo: **1 Fermi (fm)****

La luce visibile é fatta di onde con lunghezza d'onda compresa tra 0.4 e 0.8  $\mu\text{m}$ : non può quindi essere usata per vedere qualcosa piu piccolo di 1  $\mu\text{m}$ !

Che onda serve, in termini di frequenza ed energia per per vedere  $10^{-15}\text{m}$  o meno?

| $\lambda$ (m) | $\nu = c / \lambda$ (Hz) | $E = h \nu$ (MeV) |
|---------------|--------------------------|-------------------|
| $10^{-15}$    | $\sim 3 \cdot 10^{23}$   | $\sim 200$        |
| $10^{-16}$    | $\sim 3 \cdot 10^{24}$   | $\sim 2000$       |
| $10^{-17}$    | $\sim 3 \cdot 10^{25}$   | $\sim 20000$      |



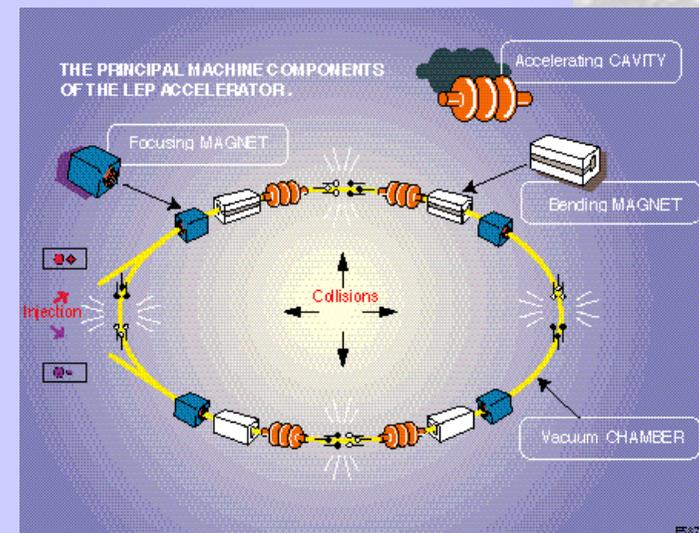
# Gli acceleratori di particelle

Consentono di studiare le collisioni tra particelle in maniera più ordinata e "mirata"

componenti base di un acceleratore:

- ❑ **una** sorgente di particelle
- ❑ campi elettrici **che accelerano le particelle**
- ❑ campi magnetici **che curvano e focalizzano i fasci di particelle,**
- ❑ rivelatori **per osservare le particelle e le loro collisioni**

acceleratori **circolari** (ciclotroni o sincrotroni)  
acceleratori **lineari** (linacs)



# I primi acceleratori

Primi tentativi piu ovvi: accelerare una particella elettricamente carica sotto l'azione di un campo elettrico statico:

$$\text{Energia} = q |E| d = q V \quad \text{per un campo uniforme}$$

$V/d$

Serve una tensione continua elevata...

**Generatori Elettrostatici  
“Moltiplicatori di Tensione”**

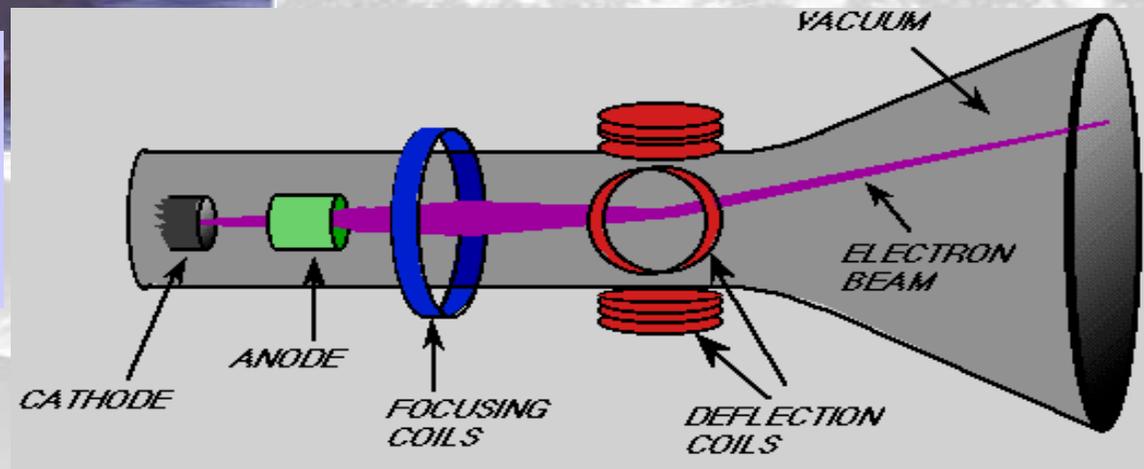


# L'acceleratore che ...avevamo tutti



**Il tubo a raggi catodici, basato sul primo oscilloscopio, realizzato da K. F. Braun (1897)**

L'accelerazione di particelle cariche avviene mediante il campo elettrico



# Il LINear ACcelerator (LINAC)

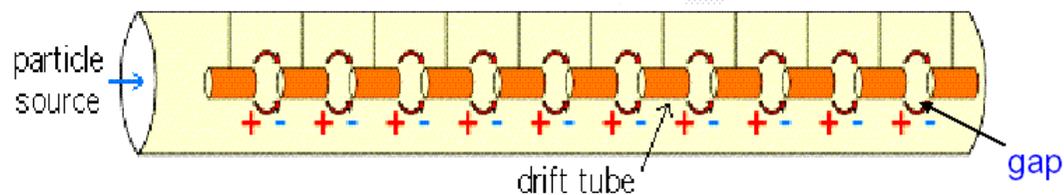
R. Wideröe (1928)

Wideroe (1928)

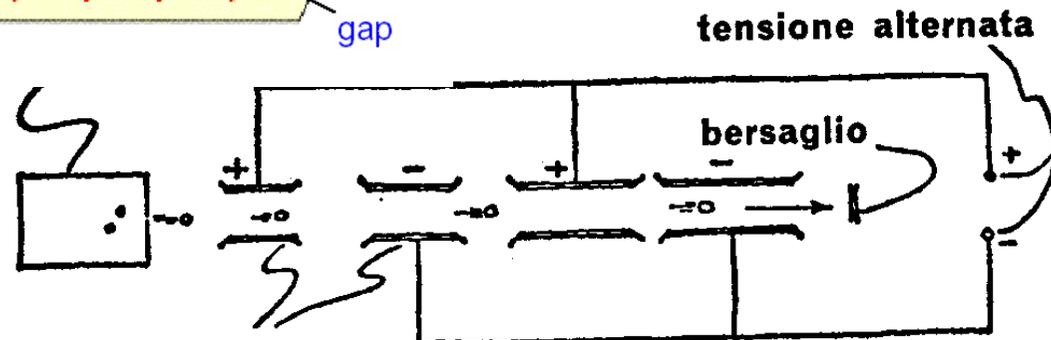
Anziché applicare un elevato campo elettrico statico si applica una tensione variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di *tubi di drift*. In questo caso le particelle non sentono campo accelerante quando si muovono all'interno di ciascun tubo di drift (regione di spazio equipotenziale) e vengono accelerate in corrispondenza dei *gaps*.

La fase si inverte durante il tempo di volo nei tubi e la particella subisce progressive accelerazioni

Una grossa tensione statica non regge: diamo una serie di "spinte" brevi ma "robuste"!



MASTER IDIFO Master univers **tubi acceleratori**



# Acceleratore/generatore Cockroft-Walton

Energia cinetica:

$$T = q \Delta V$$

Tecnologia:

- Alta tensione
- Colonna a vuoto

**1929** G. Gamow **dimostro'** che in meccanica quantistica esiste una **probabilita'** non nulla che una particella di energia 1 MeV **superi per "effetto tunnel" la barriera repulsiva Coulombiana dei nuclei leggeri**

**Questo incoraggio'** J. Cockroft **ed** E. Walton (**collaboratori di Rutherford**) a studiare metodi per accelerare fasci di particelle fino a qualche centinaio di keV:

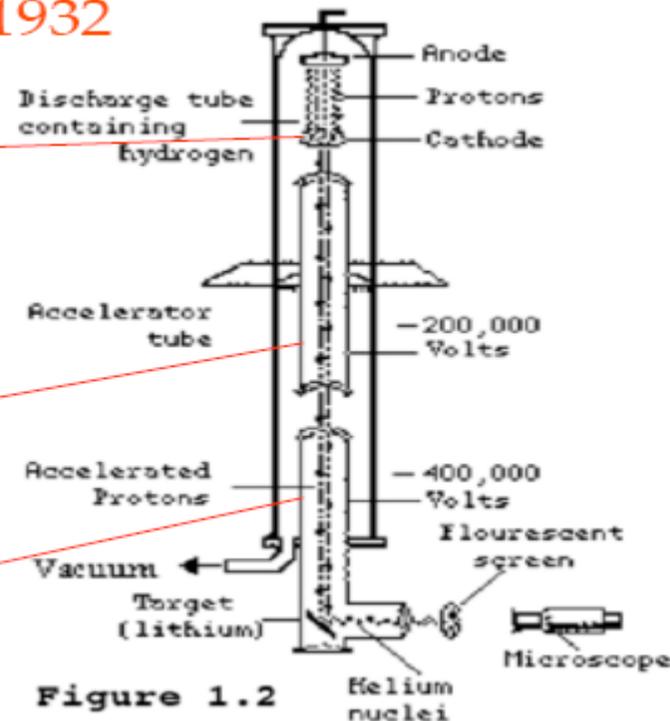
**nel 1932 costruirono il primo vero acceleratore con un fascio collimato di protoni a 400 keV**



© Enquiries to Science Museum

CAS - IC-2006

1932

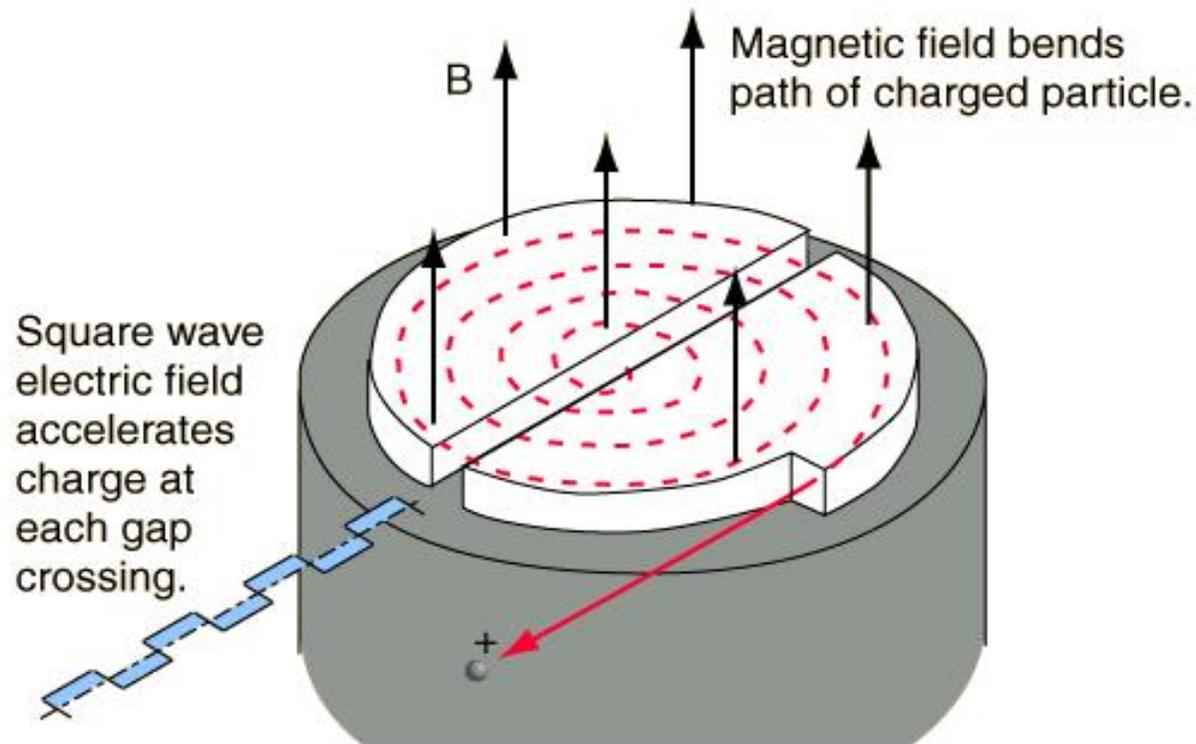


ntamento

**Il primo acceleratore circolare CICLOTRONE**  
*Il ciclotrone fu progettato nel 1932 dal fisico Ernest Orlando Lawrence ed è usato ancora oggi in medicina, per la cura dei tumori.*



E.O. Lawrence



***Nel ciclotrone vengono accelerati fasci di particelle cariche (normalmente ioni leggeri) utilizzando una corrente alternata ad alta frequenza ed alta tensione, in associazione con un campo magnetico perpendicolare. La traiettoria percorsa dalle particelle è a spirale a partire dal centro. Raggiunto il bordo esterno della macchina il fascio fuoriesce ad alta velocità, prossima alla velocità della luce.***



## **Scoperte mancate (a Berkeley) ... una curiosità...**

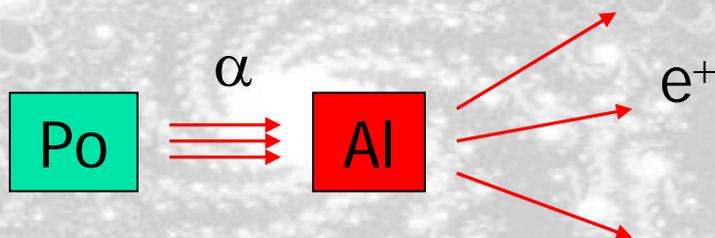
**Nei primi anni del ciclotrone Lawrence era essenzialmente preoccupato dal progetto della macchina e non curò molto gli esperimenti, la conseguenza fu che gli sfuggirono alcune scoperte di fenomeni che fu in grado di riprodurre con il ciclotrone poche ore dopo l'annuncio:**

- **Radioattività artificiale**
- **Radioattività indotta da neutroni**
- **Fissione dell'uranio indotta da neutroni**

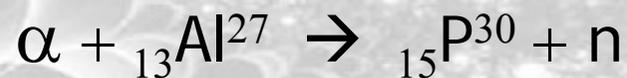


# La radioattività' artificiale

Irène Curie e Frédéric Joliot, Parigi,  
gennaio 1934



L'emissione di positroni  
persiste anche dopo  
l'allontanamento della sorgente



${}_{15}\text{P}^{31}$ : isotopo stabile

${}_{15}\text{P}^{30}$ : isotopo radioattivo  $\beta^+$  non esistente in natura



Università degli Studi di Udine

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

# Il ciclotrone ha un limite relativistico

**La forza centripeta che trattiene le particelle nella traiettoria circolare è generata dal campo magnetico trasversale  $B$  per effetto della forza di Lorentz. L'entità della forza equivale a  $B q v$ , per cui:**

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

**dove  $m$  è la massa della particella,  $q$  è la carica,  $v$  è la velocità e  $r$  è il raggio della traiettoria. Da cui:**

$$\frac{v}{r} = \omega = \frac{qB}{m}$$

**la frequenza di rotazione è correlata alla velocità angolare secondo la relazione:**

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2m\pi}$$

**Si può constatare che per una particella di massa costante la frequenza necessaria è indipendente dal raggio dell'orbita. Mentre il fascio si allarga a spirale la sua frequenza di rotazione non diminuisce, poiché la particella continua ad accelerare, percorrendo la maggiore lunghezza dell'orbita nello stesso tempo. Quando la particella si avvicina alla velocità della luce però incrementa la sua massa inerziale per effetto relativistico, e questo richiede delle correzioni alla frequenza o all'intensità del campo magnetico.**

**Il sincrotrone supera questo problema**



# 1954 Nasce il CERN a Ginevra

video di presentazione da la Fisica di Amaldi CD ROM



E. Amaldi



Il sincrotrone per protoni da 30 GeV

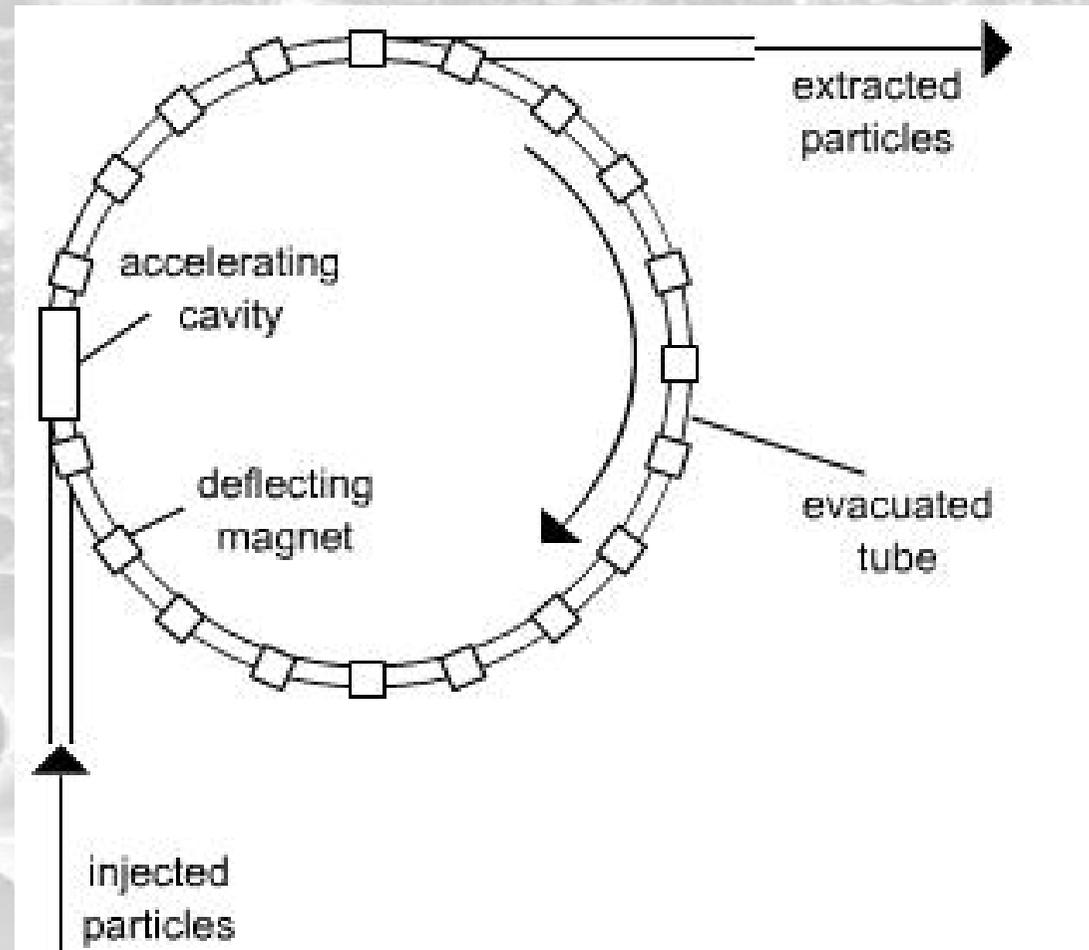
Università degli Studi di Udine

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



## II SINCROTRONE

Una nuova idea proprio per superare i limiti imposti dalla relatività...



# Il sincrotrone supera il problema dello sfasamento relativistico

$$mv^2/r=qvB$$

$$p=mv=qrB$$

$$\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Nel sincrotrone il fascio viene accelerato – cavità risonanti a radiofrequenza

Curvato – dipoli magnetici

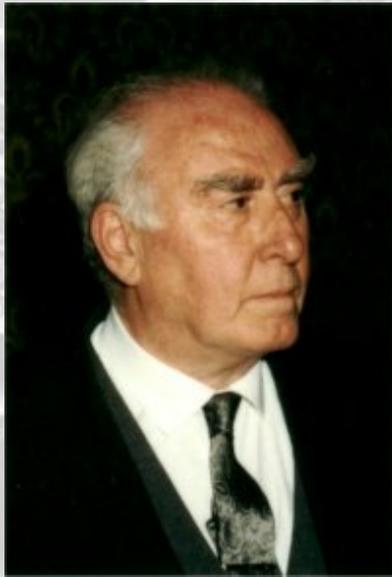
Focalizzato – quadripoli magnetici

Il raggio  $r$  è costante, l'orbita è chiusa,  $B$  è variabile per star dietro a  $p$ .

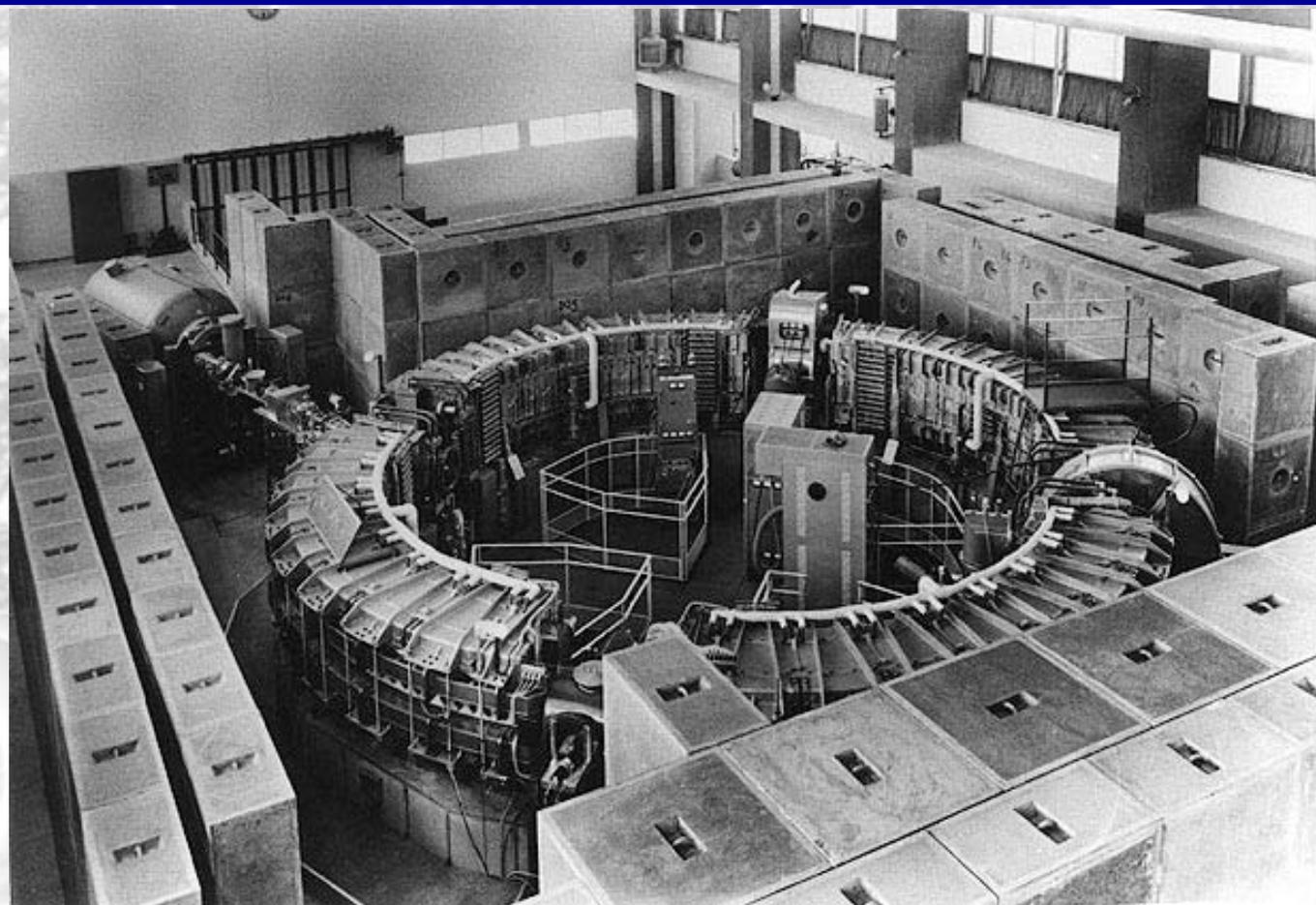
Il sincrotrone ha bisogno di un iniettore, solitamente un LINAC che porti le particelle a velocità relativistica



# 1959: Il primo sincrotrone italiano



G. Salvini



Lab. di Frascati: elettroni 1.5 GeV. Lavorò fino al 1975

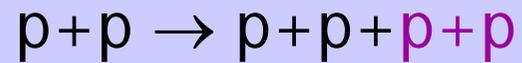
Università degli Studi di Udine

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



# Emilio Segre e la scoperta dell'antiprotone

1955



Uno dei primi grandi sincrotroni ancora operativi è il Bevatron del Lawrence Berkeley Laboratory, costruito nel 1950. È così chiamato perché la sua energia è dell'ordine dei 6,3 Giga elettronvolt, che in inglese era in passato espresso come 6,3 Billion of elettronvolts. Con questa macchina sono stati creati elementi chimici artificiali previsti dalla tavola periodica. In questi stessi laboratori è installata anche una delle prime camere a bolle per la rivelazione delle particelle



Il "Bevatron"  
di Berkley

Università degli Studi di Udine

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



## Per che cosa può essere usata l'antimateria? Come si immagazzina l'antimateria?

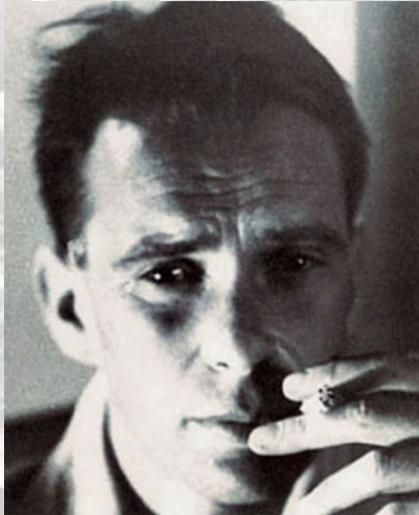
L'utilizzo principale è nella diagnostica medica con la Positron Emission Tomography (PET), dove i positroni vengono usati per identificare malattie, analizzare lo stato del cervello, misurare le funzioni metaboliche e le reazioni biochimiche e sostenere le branche dell'oncologia e della cardiologia.

Le antiparticelle che hanno carica elettrica positiva o negativa possono essere immagazzinate nelle "trappole". Queste hanno un'appropriata configurazione di campi elettrici e magnetici che le tengono confinate in un piccolo spazio. Ovviamente questo deve essere fatto nel vuoto per evitare collisioni con particelle di materia.



**Anni '60: più energia  
una nuova idea sperimentale...  
L'energia di annichilazione**

*made in Italy*



B. Touschek



MAQUETIC DISCUSSION

*Bruno Touschek*

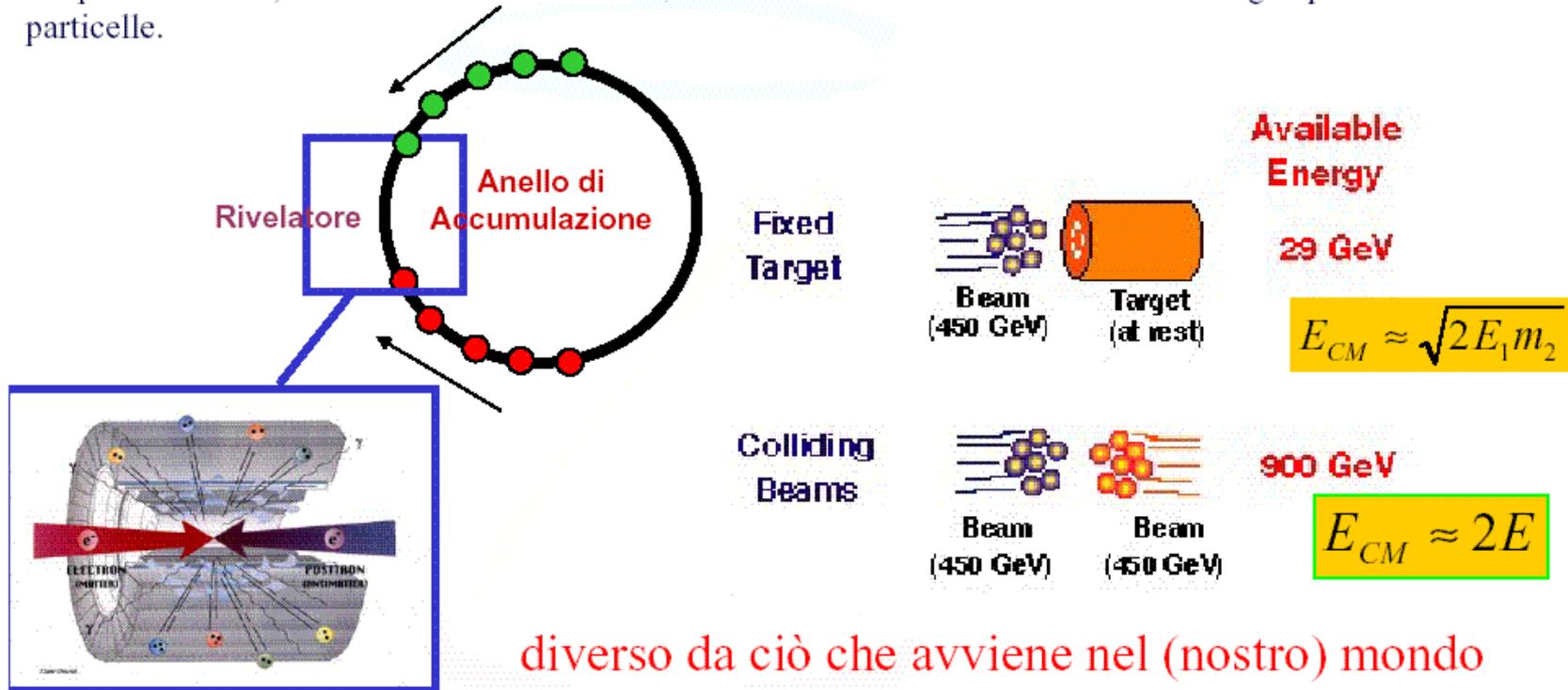


Università di Padova

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

# I colliders

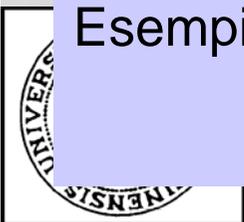
La geniale idea di **Bruno Touschek** fu quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.



diverso da ciò che avviene nel (nostro) mondo non relativistico (es.: auto contro auto)

Esempi di collisionatori: SPS (p-p<sub>bar</sub>), Tevatron (p-p<sub>bar</sub>), LEP (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)

Ed LHC (p-p<sub>bar</sub>)



## grandezze caratteristiche in un collider

In un Collider tutto funziona come in un sincrotrone, ma le particelle non vengono estratte alla fine del ciclo, ma mantenute nell'anello ( $e^+e^-$ , p-antip) o negli anelli (pp) e mandate a collidere l'una contro l'altra.

Gli esperimenti hanno tipicamente *simmetria cilindrica* e si sviluppano attorno al punto di collisione, si raccolgono dati su piani perpendicolari al cilindro (sezioni trasverse)

In un anello di collisione si guadagna moltissimo in energia

Le grandezze caratteristiche sono la LUMINOSITA', l'Energia nel c.m. del fascio

La luminosità non è altro che il numero di interazioni per unità di tempo e per sezione d'urto unitaria.

$$L = N/\sigma$$

L = luminosità - dimensioni [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]

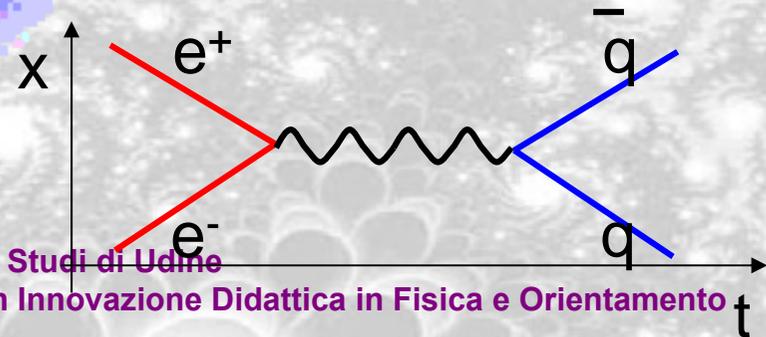
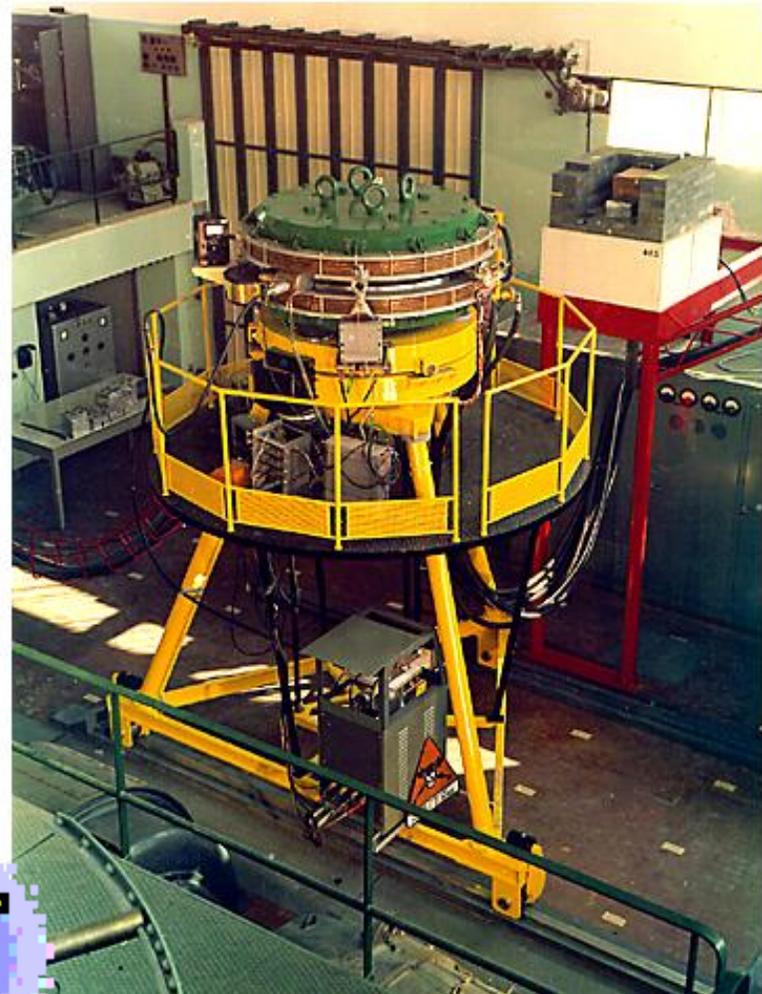
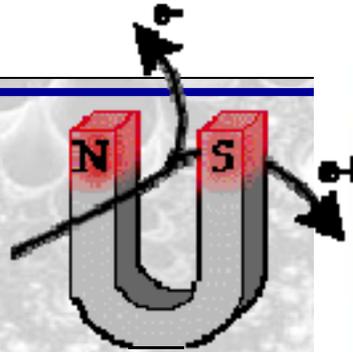
Energia caratteristica  $\sqrt{s} = E_{\text{cm}}$  nel centro di massa di un fascio

Questa energia definisce la soglia osservabile cioè quali processi sono ottenibili fino a quella energia



# Nasce AdA

Anello  
di  
Accumulazione  
(di elettroni e positroni)



# Limiti degli acceleratori circolari gli acceleratori devono essere grandi !!!!!!!

La perdita di energia è maggiore per particelle leggere (elettroni) ad energie elevate e per raggi di curvatura piccoli

Una particella carica che si muove su una traiettoria circolare è sottoposta alla accelerazione centripeta.

L'elettromagnetismo classico ci dice che se una carica elettrica è sottoposta ad accelerazione, emette (cioè perde) energia sotto forma di onde elettromagnetiche

→ ***Radiazione di sincrotrone***

Energia persa per giro

$$U = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

Energia

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria

I fasci molto intensi di fotoni che emergono dalle varie "inserzioni" sull'anello vengono usati per studi sui materiali, sulla fisica medica

Università degli Studi di Udine

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



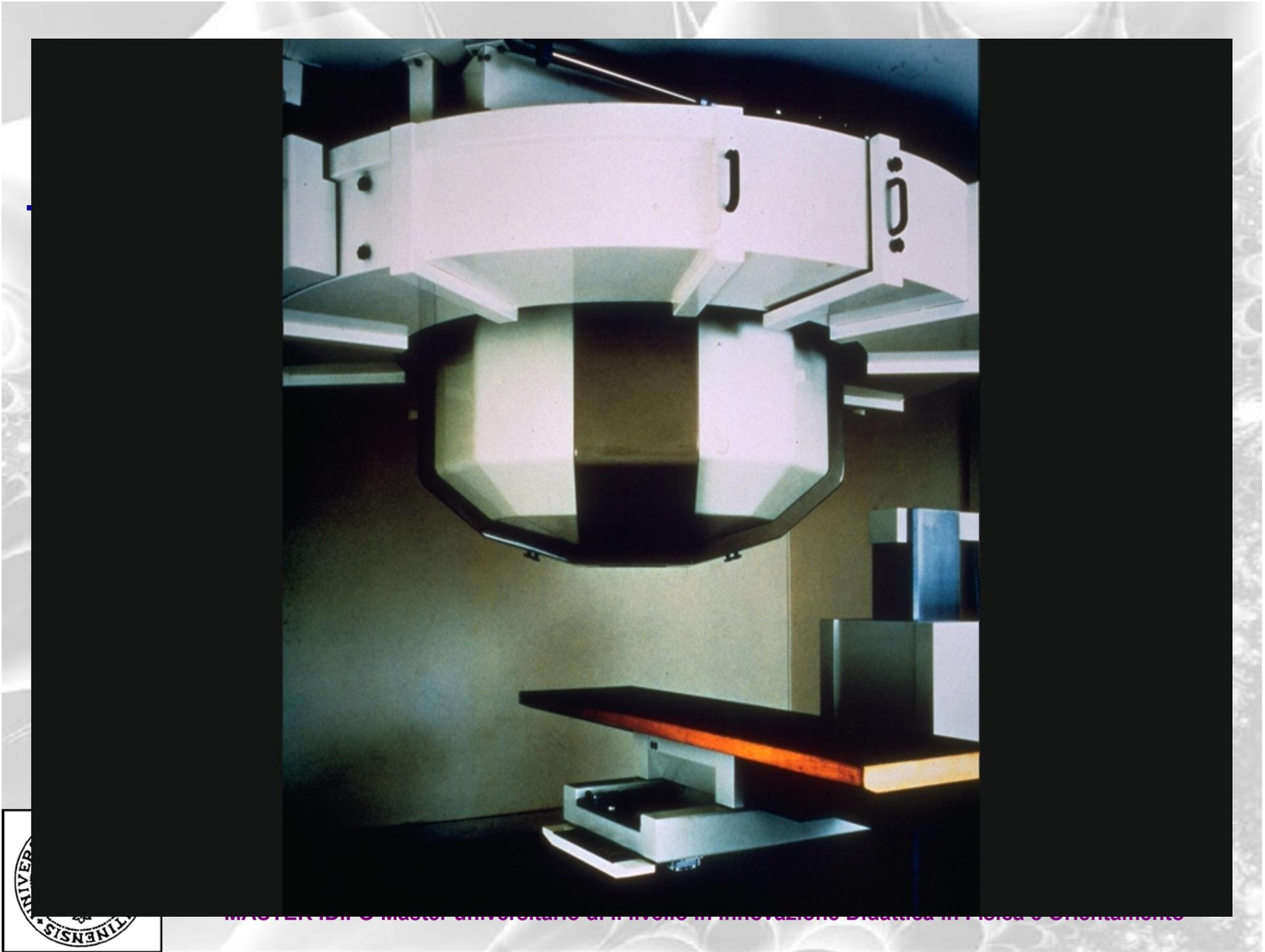
## Acceleratori: oltre la ricerca ...

| Basic and Applied Research |      | Medicine         |              |
|----------------------------|------|------------------|--------------|
| High-energy phys.          | 120  | Radiotherapy     | 7500         |
| S.R. sources               | 50   | Isotope Product. | 200          |
| Non-nuclear Res.           | 1000 | Hadron Therapy   | 20           |
| Industry                   |      |                  |              |
| Ion Implanters             | 7000 |                  |              |
| Industrial e- Accel.       | 1500 | <b>Total:</b>    | <b>17390</b> |

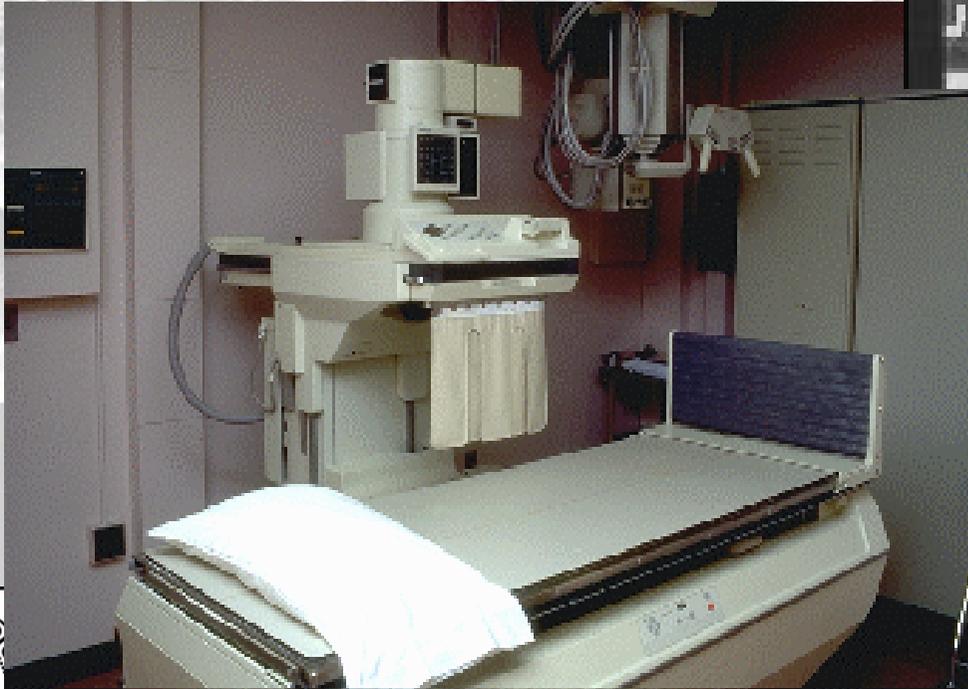
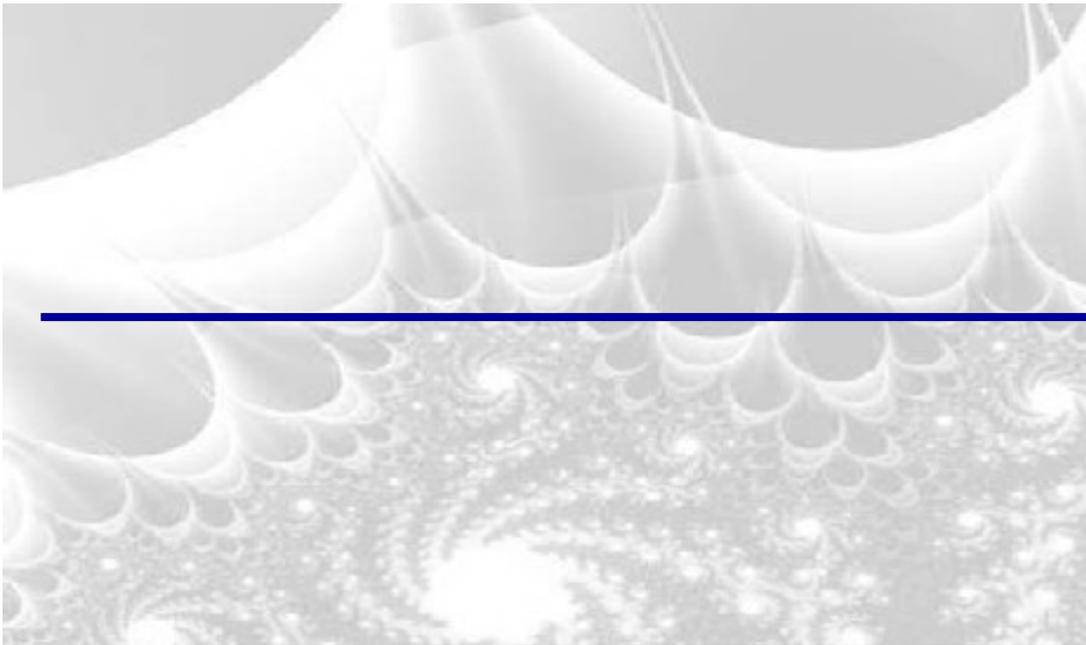
Courtesy: W. Mondelaers JUAS 2004

I sistemi di accelerazione dedicati alla ricerca sono solo il 6.7% del totale, la maggioranza e' dedicata alla medicina e all'industria





INFORMATICA E MACRO UNIVERSITARIO DI INFORMATICA INNOVATIONE E INNOVATIONE IN INFORMATICA

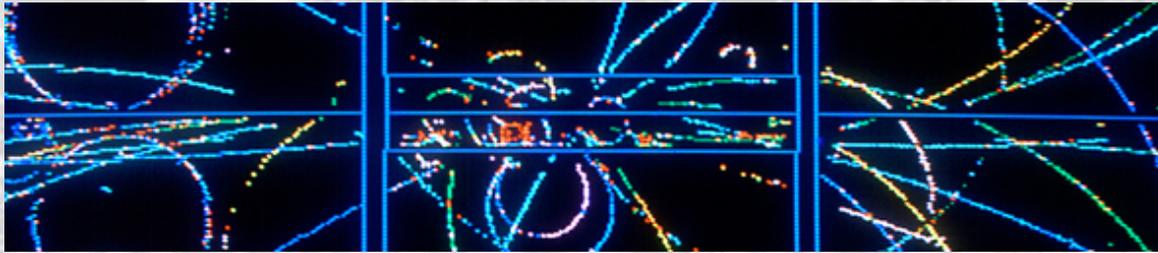


Università degli Studi di Udine  
MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

# I rivelatori di particelle

Come si "identificano" le particelle prodotte negli acceleratori

"Vedono"



**La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.**

I primi rilevatori

Contatore Geiger (1910)

Camera a nebbia di Wilson (1927)

Camera a bolle (1950)

Camere a scintilla

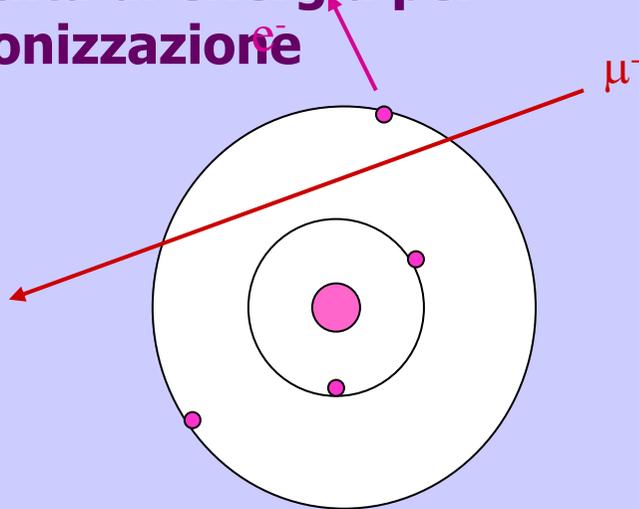


Università degli Studi di Udine

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

# Interazione delle particelle cariche con la materia "le tracce delle particelle" non traiettorie ma fenomeni correlati

## Perdita di energia per ionizzazione

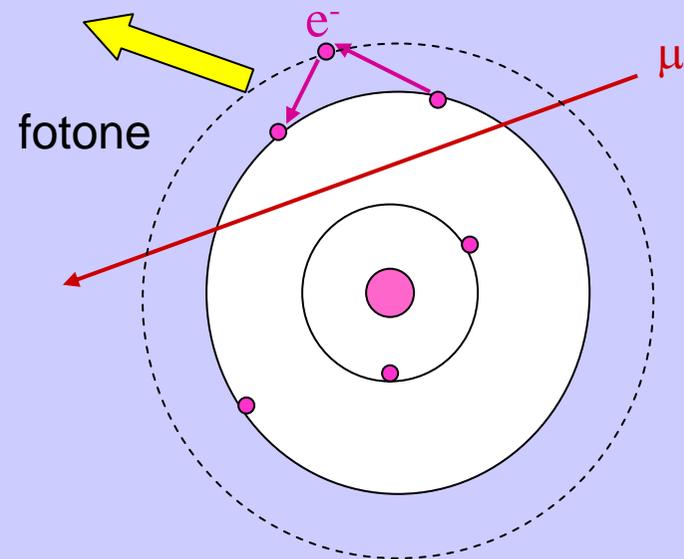


Viene liberato un elettrone...

Si induce un segnale elettrico!!!!

Energia spesa per creare una  
Coppia ione elettrone  $\approx 20\text{eV}$

## Eccitazione e diseccitazione con emissione di luce di scintillazione



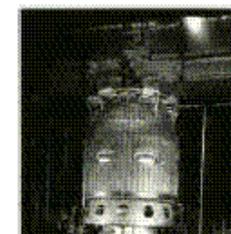
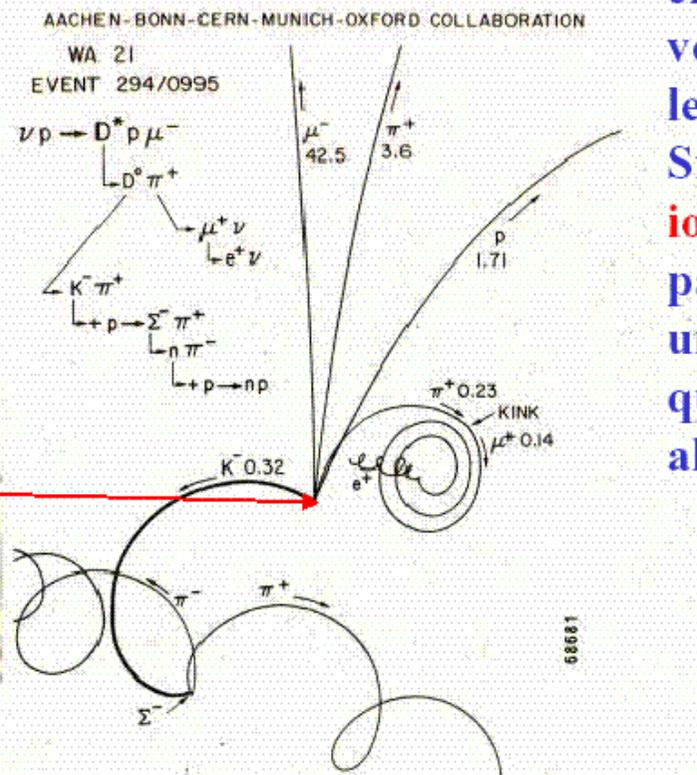
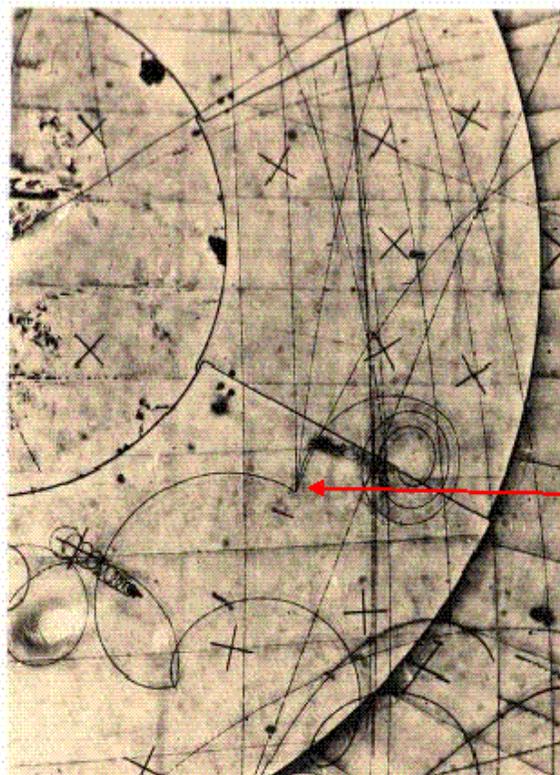
Viene emesso un fotone... da  
convertirsi in un segnale elettrico

Energia spesa per generare  
un fotone  $\approx 1\text{eV}$



# Camera a Bolle

strumento “glorioso”  
che permetteva di  
vedere e fotografare  
le particelle.  
Sfruttando la  
**ionizzazione** delle  
particelle cariche in  
un liquido (H in  
questo caso) prossimo  
all'ebollizione

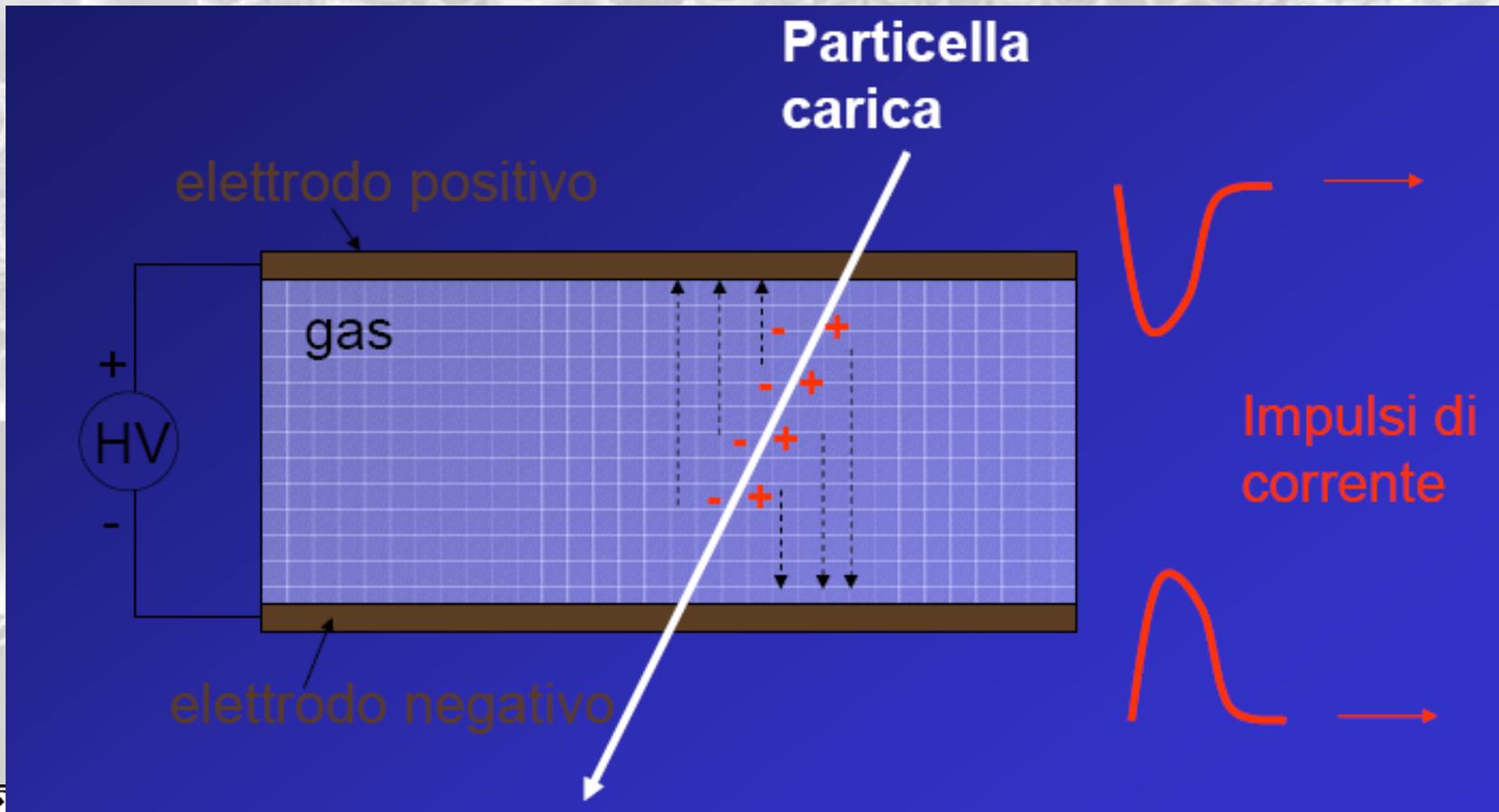


## Cosa si può misurare?

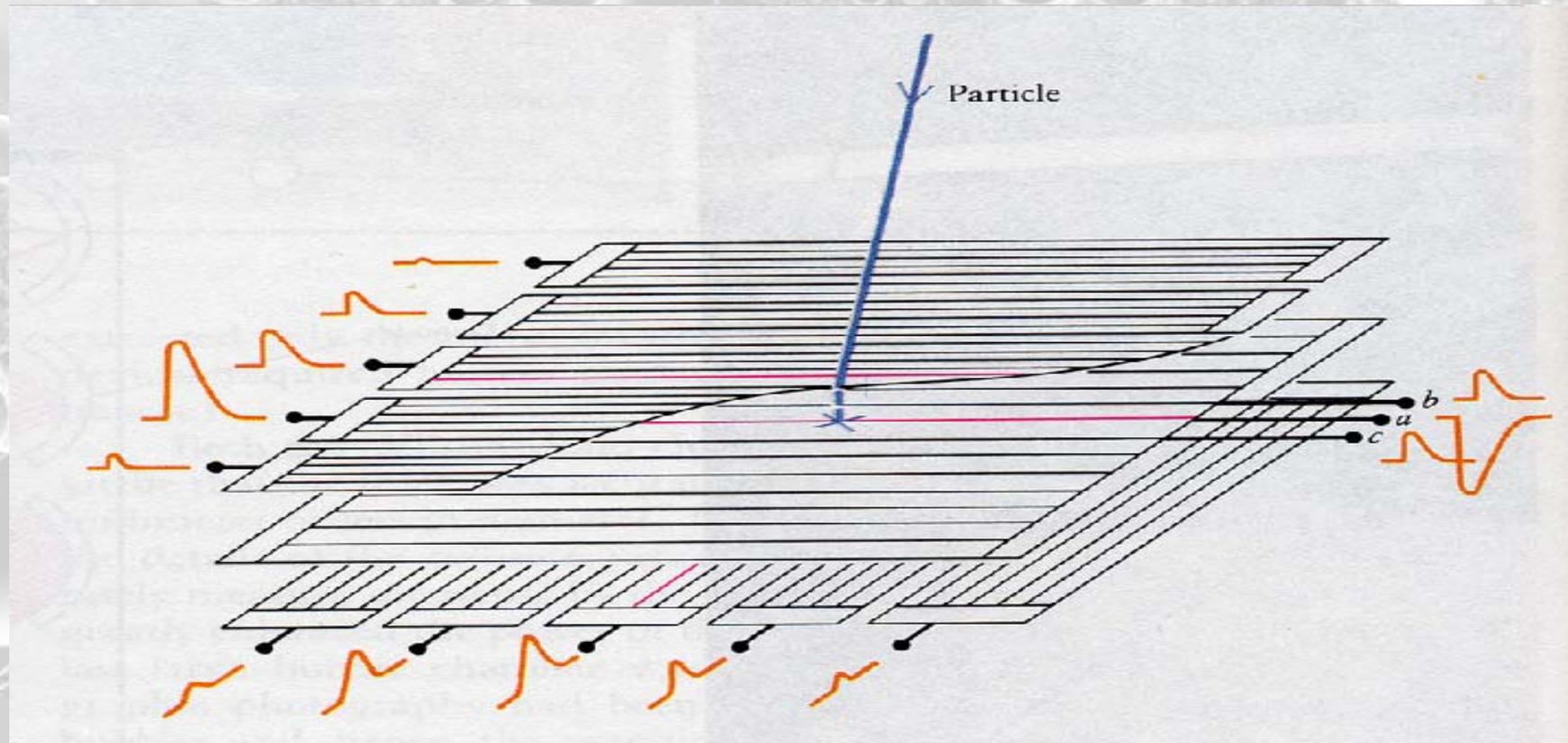
La quantità di moto  $p$  misurando la curvatura  $r$  della traiettoria  
( $p=rqB$ )

Nota  $p$ , la massa  $m$  della particella viene ricavata dalla “densità” delle  
bolle, la densità dipende dalla **ionizzazione** e dunque dalla velocità

# Rivelatori di particelle cariche per IONIZZAZIONE rilevatori a Gas



# Contatori Elettronici STRIP al silicio



Diodi in cui il segnale e' generato dalla raccolta di cariche liberate per ionizzazione dalla particella -Si possono costruire in strisce di  $100\mu\text{m}$

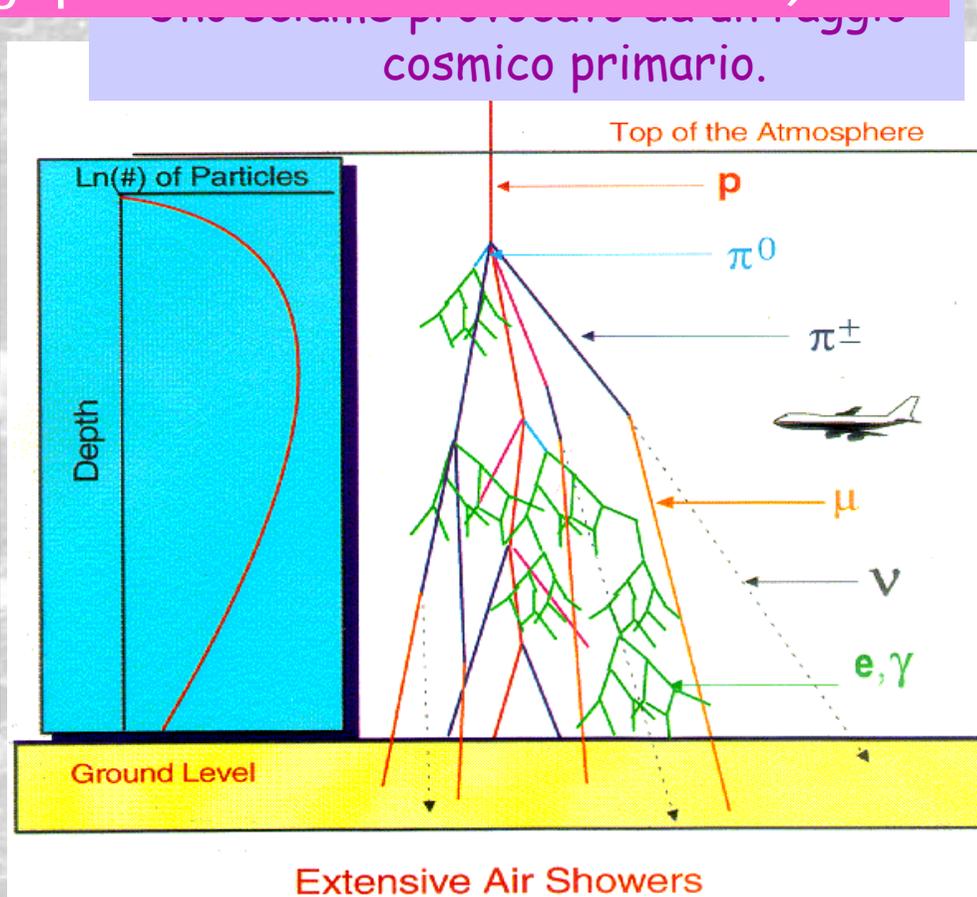


# Rivelatori RPC (Resistive Plate Chamber)

un approfondimento rivelatore EEE –MRPC  
( Multigap Resistive Plate Chamber)

La sezione di Lecce dell'INFN sta costruendo i circa 1000 rivelatori RPC necessari allo spettrometro di muoni dell' esperimento ATLAS.

I rivelatori RPC, prima della spedizione al CERN di Ginevra per essere installati su ATLAS, vengono certificati utilizzando i muoni presenti nei raggi cosmici.



## Scintillatori- Rivelatori di fotoni

Il fotone, raggio gamma, è emesso nella eccitazione/diseccitazione degli elettroni atomici

- Materiali scintillatori → “trasparenti” alla luce da essi stessi emessa in seguito al passaggio di particelle: alcuni cristalli (NaI), materiali plastici “dopati” (fluoro e wavelength shifters)

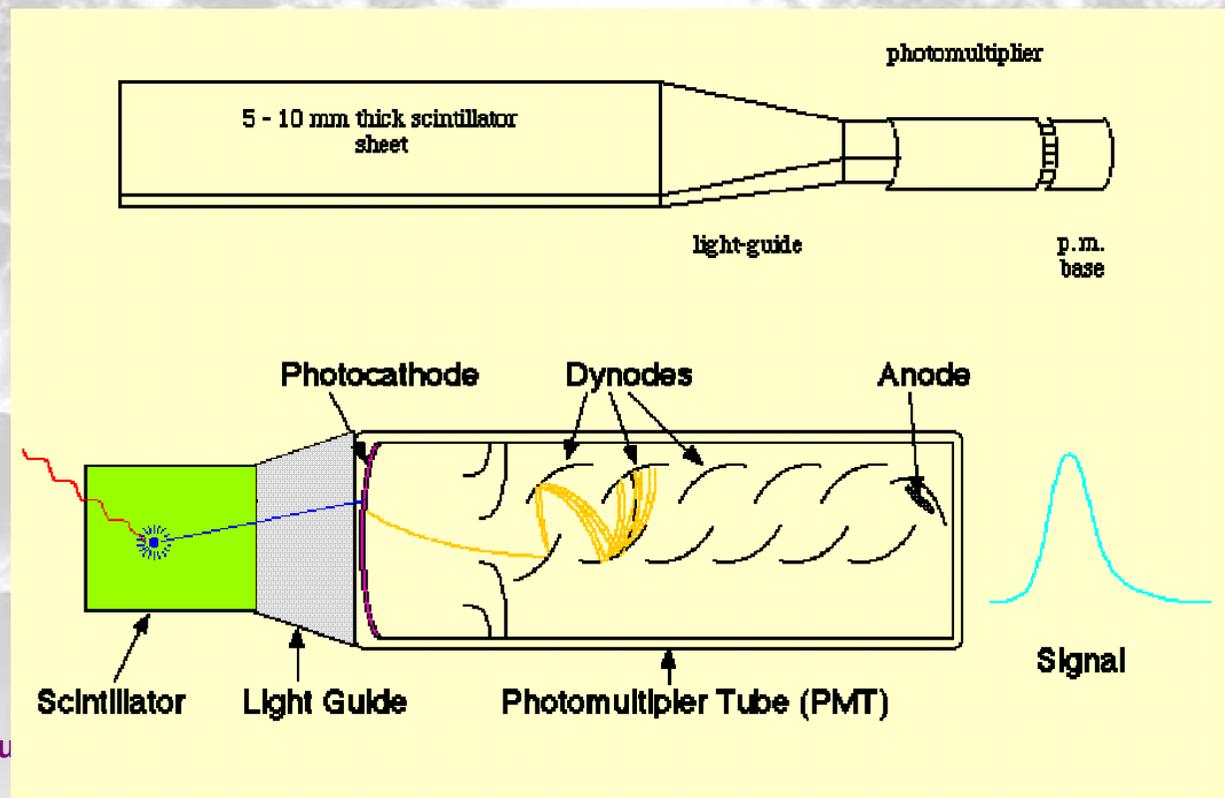
La radiazione viene incanalata mediante opportune guide fino al “fotomoltiplicatore” che converte il segnale luminoso in uno elettrico

Cosa misuriamo?

Il “tempo di volo”  
(risoluzione temporale meglio di 1 ns) e “trigger”



MASTER IDIFO Master u



## E le altre particelle neutre?

Le diverse particelle neutre hanno probabilita' di trasformarsi in particelle cariche in relazione al tipo di interazione con la materia.

p.e. I neutroni vengono rivelati solo dopo il decadimento

- La quantità di materia (cammino) che attraversano prima di produrre cariche e' molto diversa da particella a particella
- Per fotoni e neutroni cio' accade con alta probabilita' in cammini dell'ordine del metro per i neutrini la probabilita' resta molto bassa anche in cammini di Km



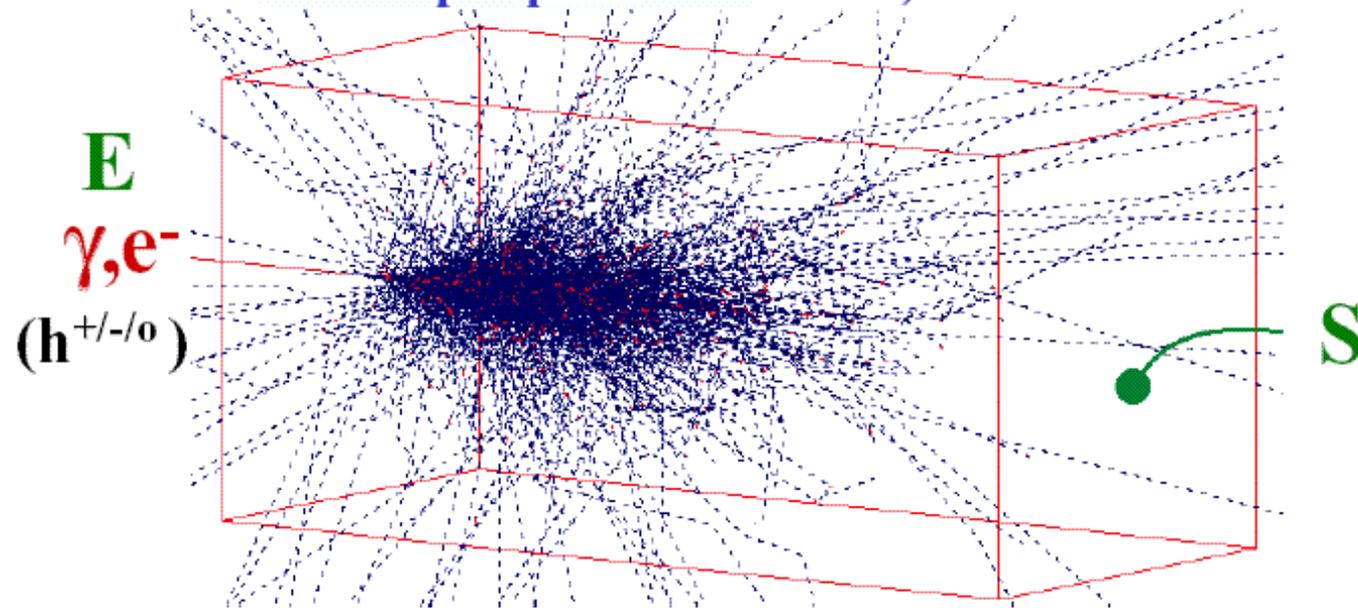
e allora... come rileviamo i neutrini?

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

# I calorimetri

## Per misurare l'energia di particelle cariche e neutre

A differenza dei Tracciatori che devono essere “trasparenti” per misurare le particelle senza modificarne lo stato, i **Calorimetri** sono blocchi di materiale **denso** che devono degradare tutta l'energia in entrata fino a poterla rivelare (metodo distruttivo: vale anche per particelle neutre)

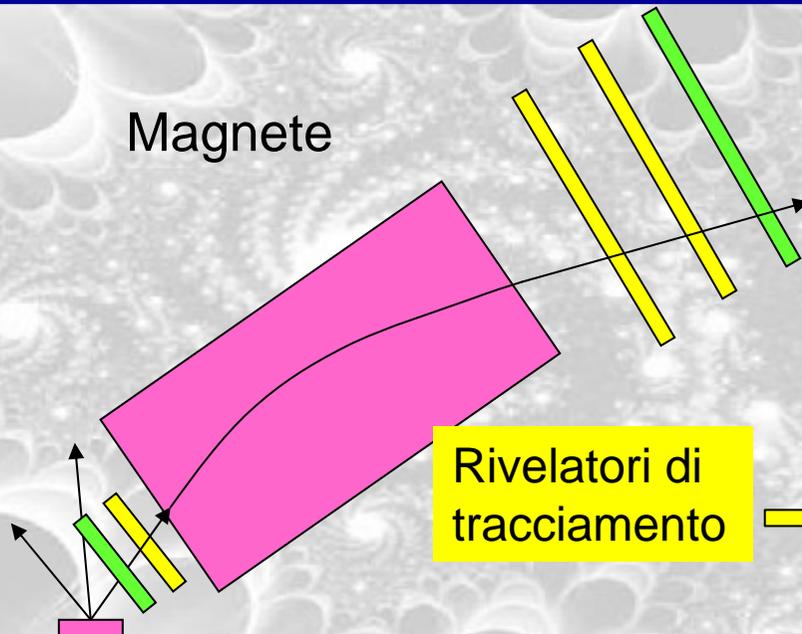


L'energia  $E$  della particella incidente viene convertita in segnale  $S$  del rivelatore

Il segnale misurabile  $S \propto E$

# Esempio: spettrometro magnetico Solo per particelle cariche

Magnete



Rivelatori di tracciamento

Misura del raggio di curvatura  $r$   
→ quantità di moto  $p$

Rivelatori di tempo di volo

Misura della velocità della  
particella

Fascio incidente  
su bersaglio

Determinazione della massa  $m$



Università degli Studi di Udine

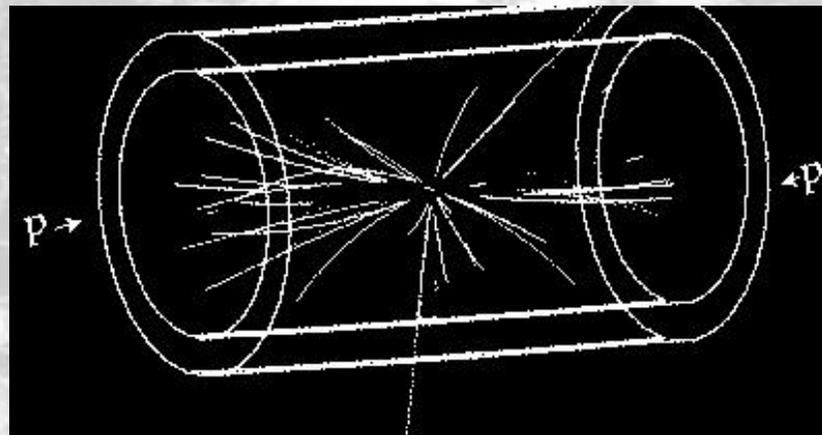
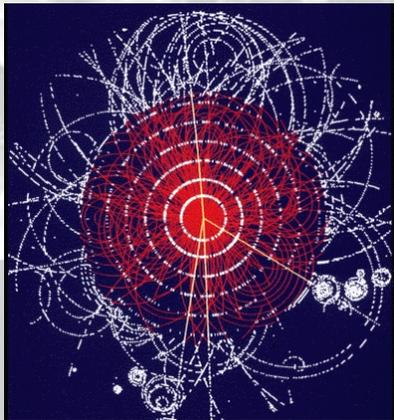
MASTER IDIFO Master universitario di II livello in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

## Il problema del trigger (ovvero la ricerca dell'ago nel pagliaio)

- I rivelatori che misurano i prodotti delle interazioni devono essere in grado di selezionare in tempo reale gli eventi "buoni" da registrare per le analisi successive.**

**Gli eventi di interesse fisico sono dell'ordine di 10-100 al secondo.**

**Il trigger deve decidere quali eventi registrare e la decisione deve essere presa in alcune decine di milionesimi di secondo.**



## Il trigger in un collider

**I collider producono milioni di collisioni ogni secondo**

**I rivelatori ne raccolgono la maggior parte ma non tutte. Infatti quando viene rilevata una collisione, i computer devono decidere se l'evento è di interesse per lo studio in esame (nell'intervallo di tempo che occorre per questa decisione, il rivelatore non può trattare un altro evento)**

**Infatti anche il rivelatore necessita di un piccolo tempo di recupero tra un evento e l'altro. Ecco perché il rivelatore non può rilevare tutte le collisioni. (I fisici tentano di minimizzare questo tempo).**

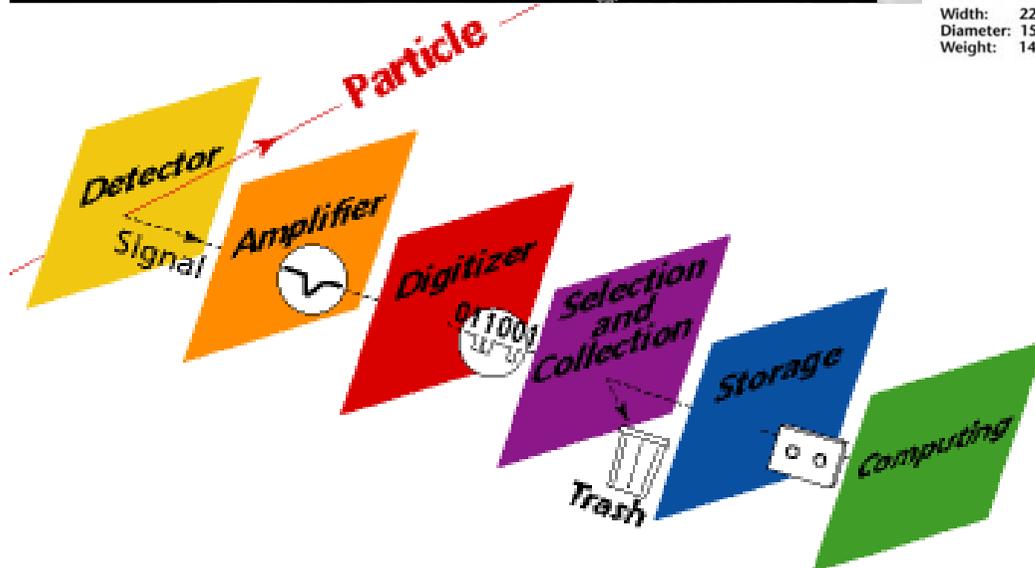
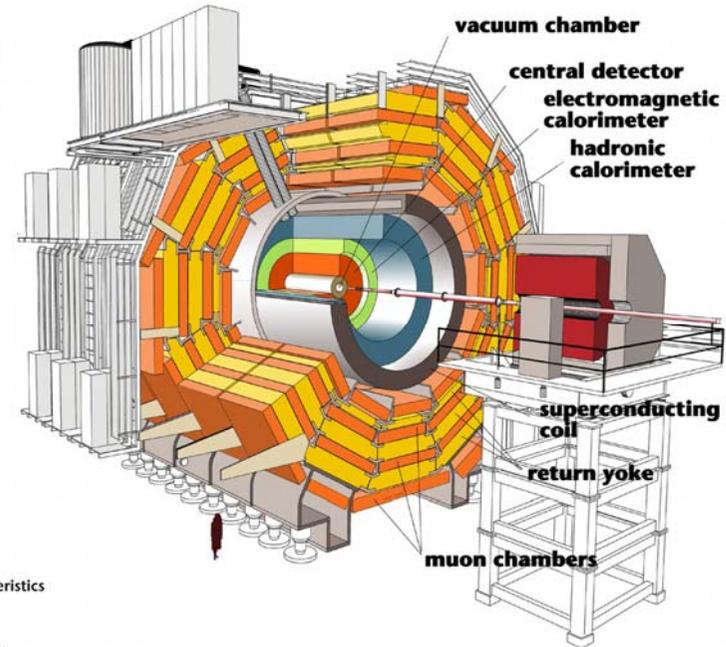
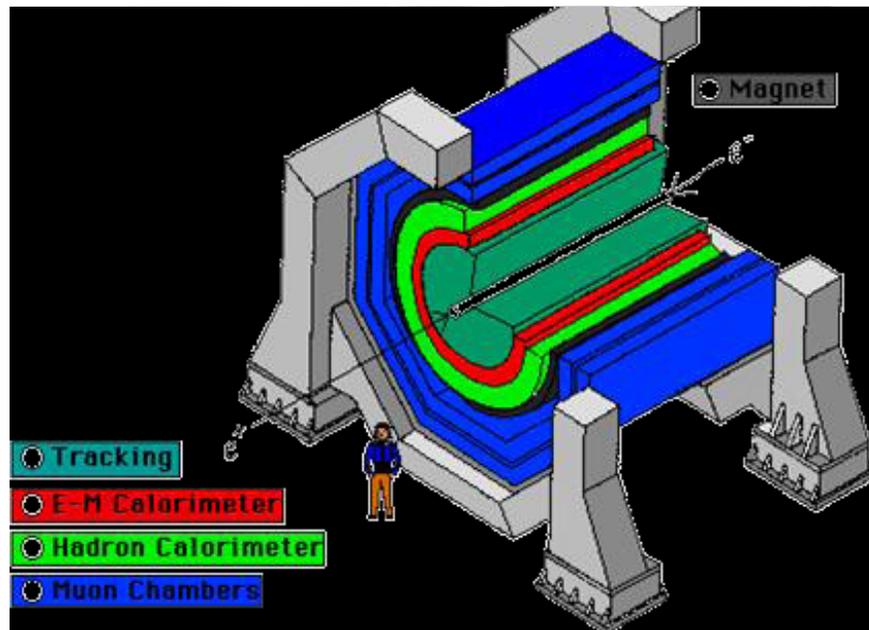
**Per decidere se un evento è interessante, i computer compiono una rapida analisi preliminare dei dati che cerca alcune caratteristiche con una serie di test (valori di soglia). Solo se l'evento supera i test esso sarà registrato e successivamente analizzato.**

**Il trigger di un esperimento ad un collider adronico usualmente è un "OR" logico di varie condizioni (ex. leptoni di alto  $p_T$ , cluster localizzati di energia adronica, evidenza di vertici secondari, ...), corrispondenti ai vari tipi di fisica allo studio;**

- **ciascuna condizione, a sua volta, può risultare da un "AND" logico (ex. per selezionare il decadimento  $W \rightarrow e\nu$  si può richiedere la presenza contemporanea di leptoni e di ETM) oppure da una combinazione di "OR" e "AND", e così via;**
- **lo stesso tipo di condizione può essere imposto in modo diverso (ex. la presenza di leptoni con un certo tipo di  $p_T$  [ex.  $>10$  GeV] richiede anche ETM mentre se il  $p_T$  è più elevato [ex.  $>30$  GeV] non c'è richiesta di ETM);**



Un apparato per collider (come LHC) e' costituito da un insieme di cilindri concentrici in campo magnetico fatti di rivelatori con scopi diversi



gli Studi di Udine  
 o in Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento

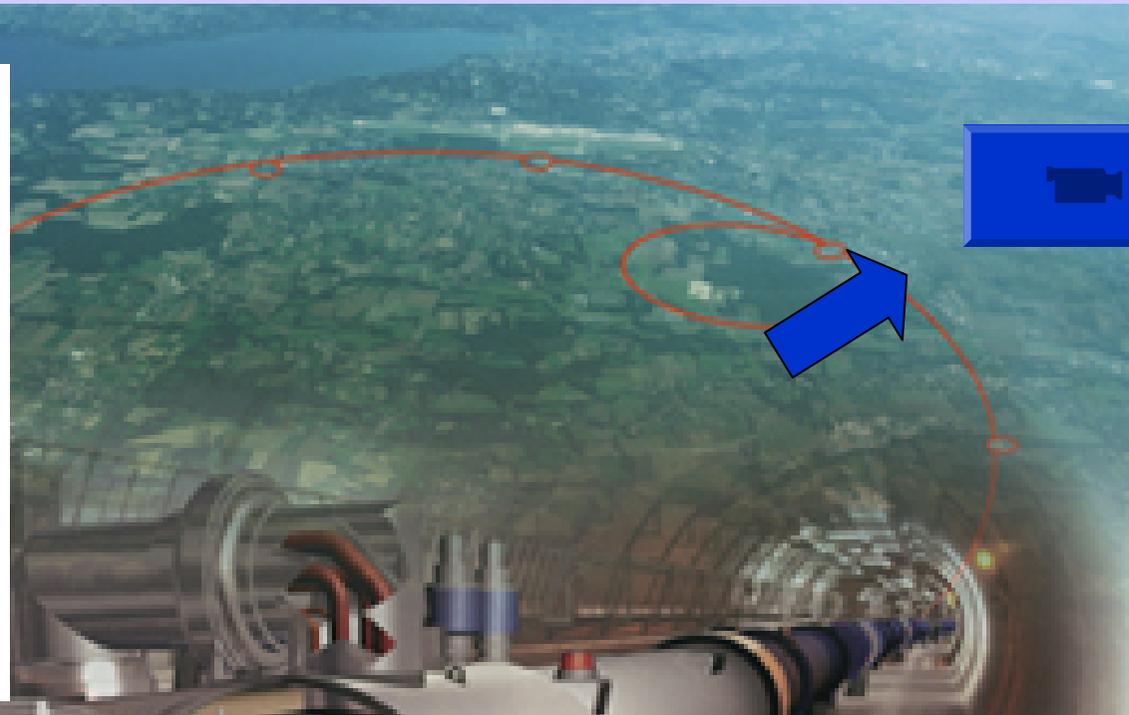
## Lezione 2b

Vai all'indirizzo:

[http://www.hep.ucl.ac.uk/masterclass/Acc\\_sim2/simulator.html](http://www.hep.ucl.ac.uk/masterclass/Acc_sim2/simulator.html)

e fai partire l'animazione

# La nuova macchina del CERN: il **Large Hadron Collider**



## I collaboratori del CERN nel mondo

Europa: 267 istituti, 4942 utenti  
Altrove: 208 istituti, 1752 utenti





## *Il CERN di Ginevra* *European Organization for Nuclear Research*

**LHC** (Large Hadron Collider) interazioni  $pp$  a 14 Tev

Nel centro di massa della collisione si ricreeranno le condizioni fisiche stimate per l'Universo 10-12 secondi dopo il Big Bang quando la temperatura era  $10^{16}$  gradi

I suoi esperimenti

**ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS)

**CMS** (Compact Muon Solenoid)

**ALICE** (A Large Ion Collider Experiment)

**LHCb** (study of CP violation in B-meson decays at LHC)

### **I dati di LHC**

**40 milioni di collisioni al secondo**

**Dopo il filtraggio, 100 collisioni interessanti al secondo**

**Da 1 a 12 MB per collisione  $\Rightarrow$  da 0.1 a 1.2 GB/s**

**10<sup>10</sup> collisioni registrate ogni anno**

**$\sim$  10 Petabytes ( $10^{15}$ B) per anno**

**I dati di LHC data corrispondono a 20 milioni di CD all'anno!**

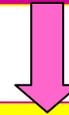


# La luminosità in LHC

Colliding-Beam Experiments



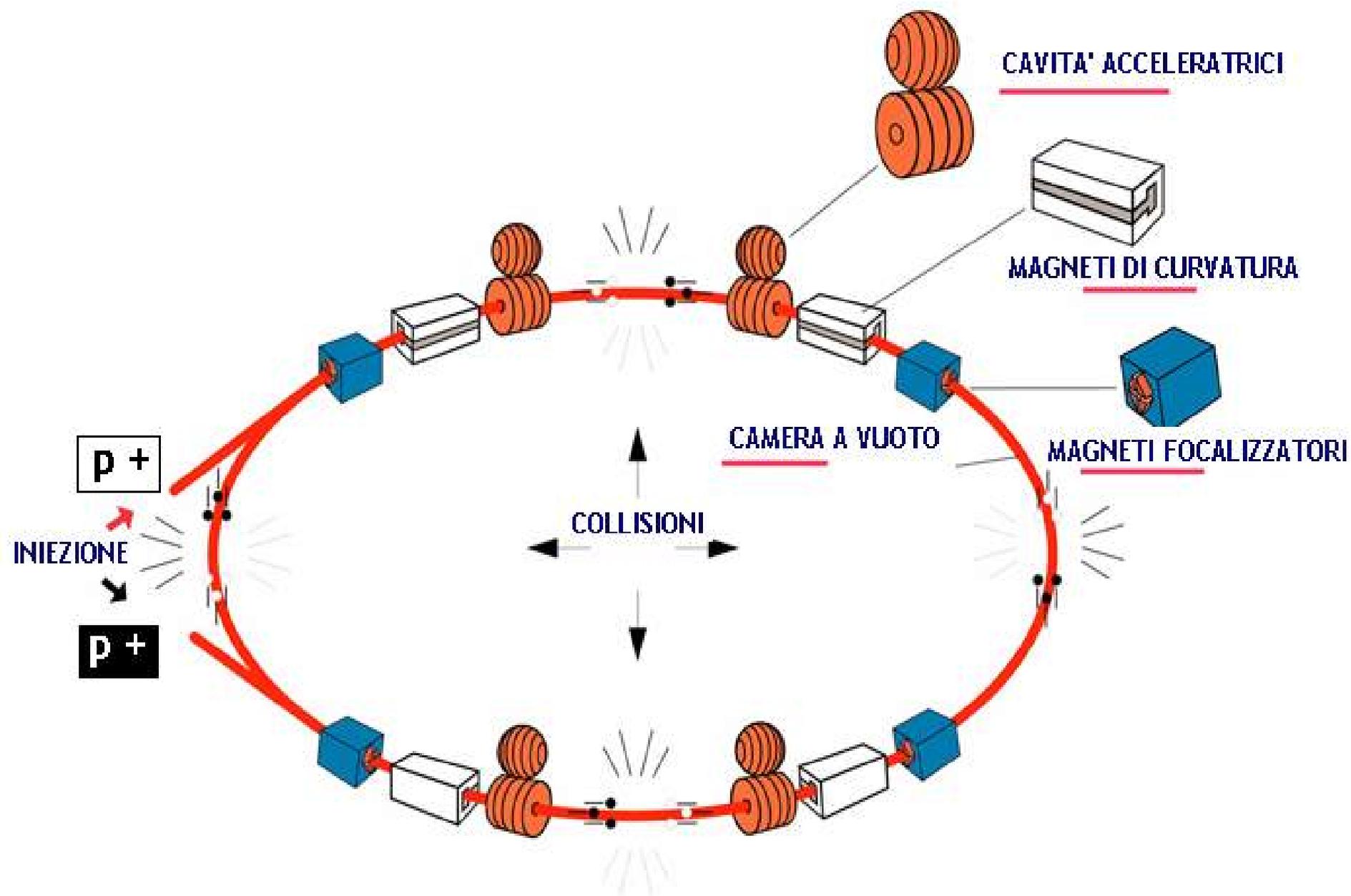
3.600 pacchetti di protoni  
 $10^{11}$  protoni/pacchetto  
incrocio pacchetti ogni  $25 \times 10^{-9}$  secondi

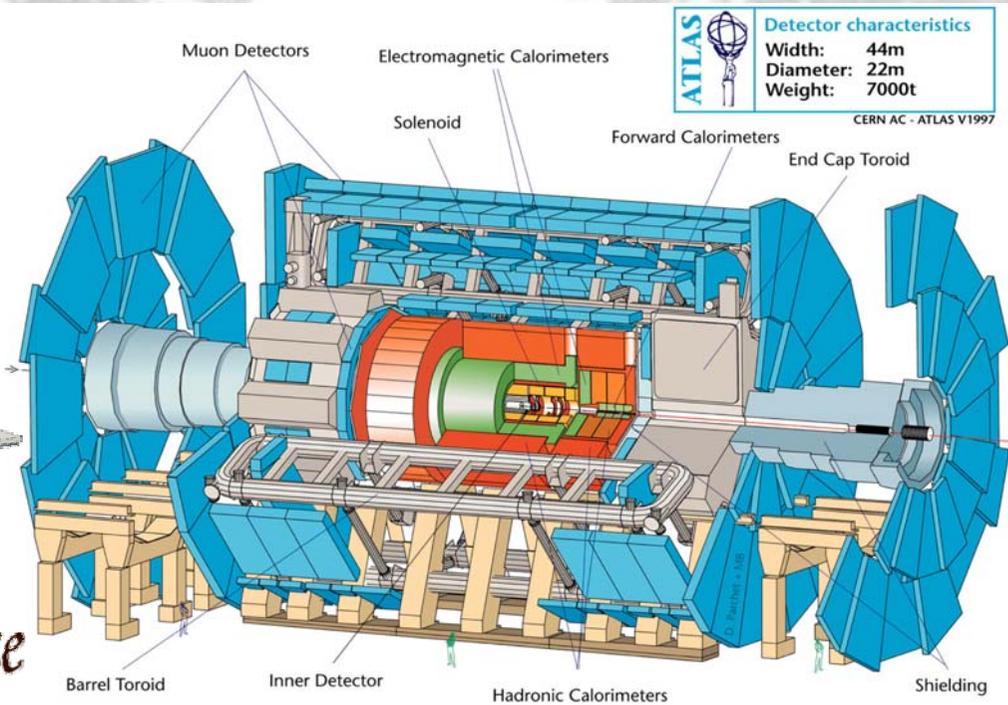
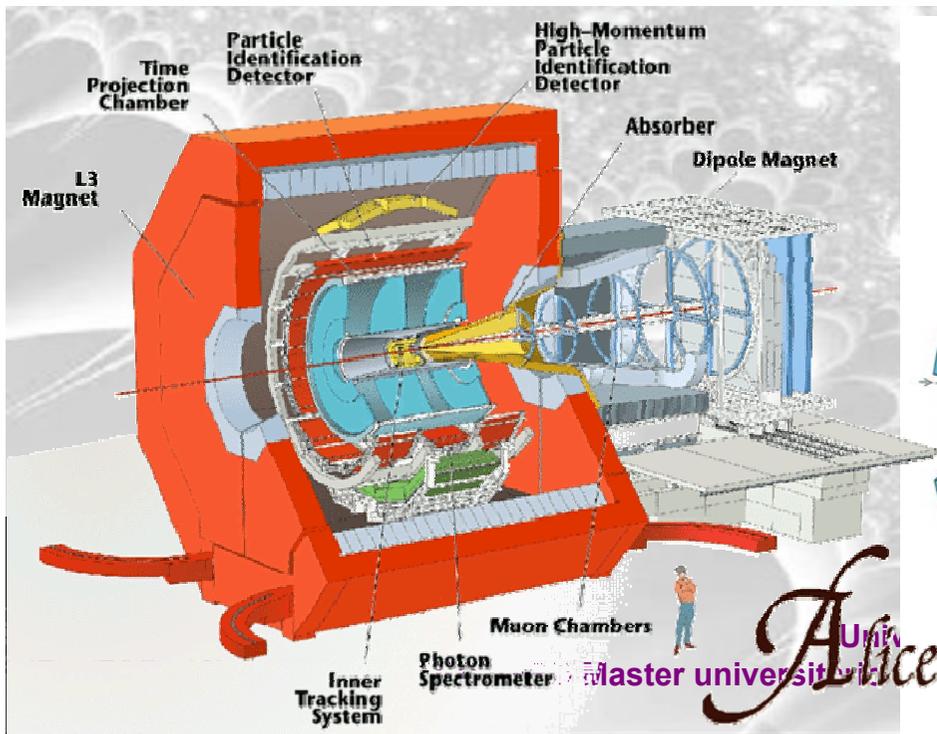
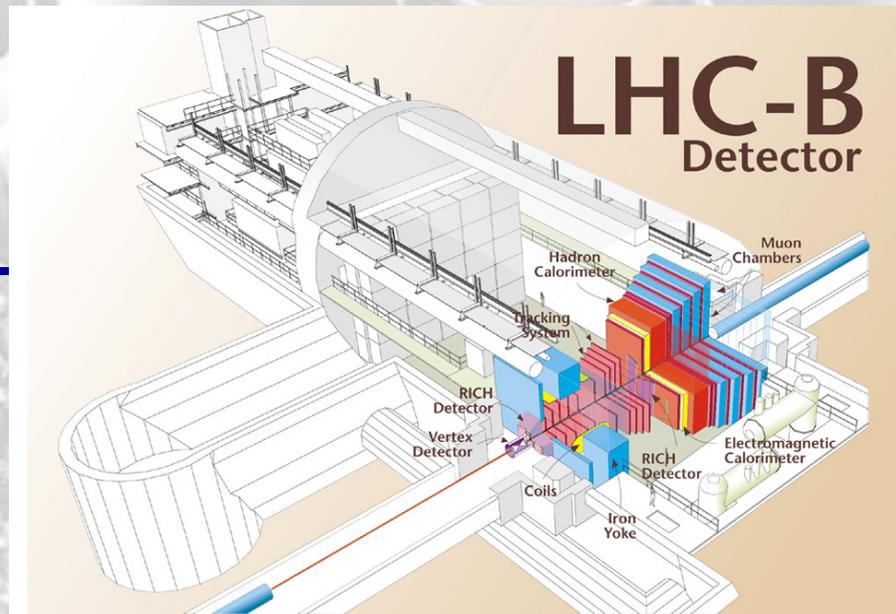
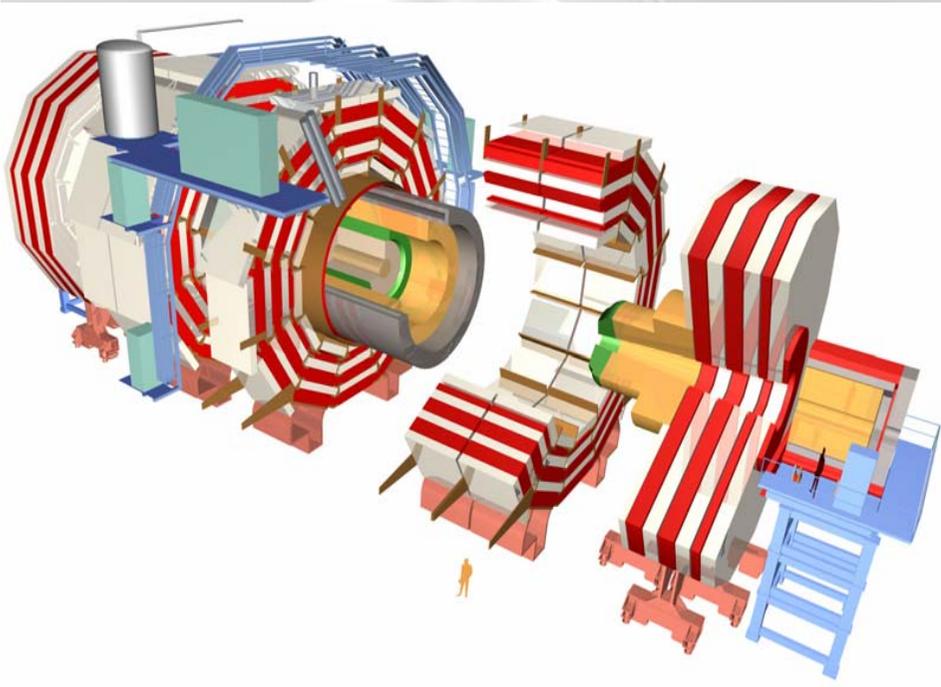


$10^9$  collisioni protone-protone al secondo

Collisioni che producono processi di interesse: 10 -100 al secondo  
Collisioni che producono processi rari di enorme interesse: 1 al giorno

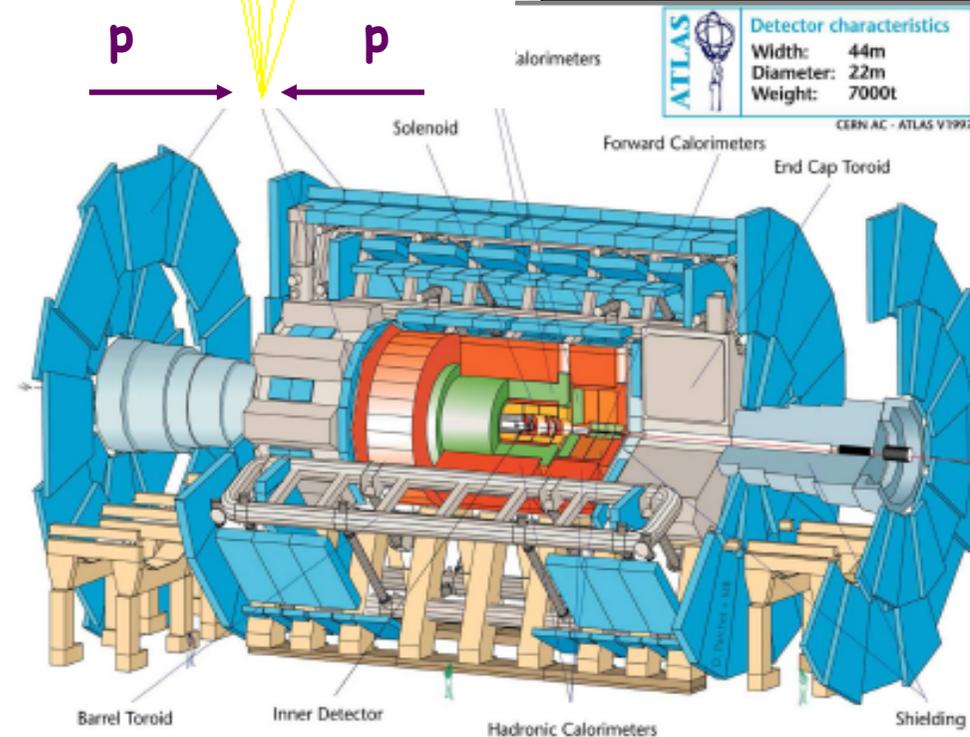
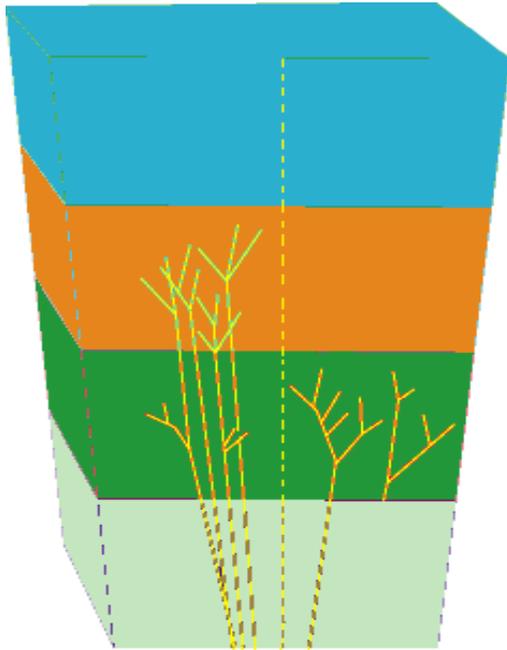




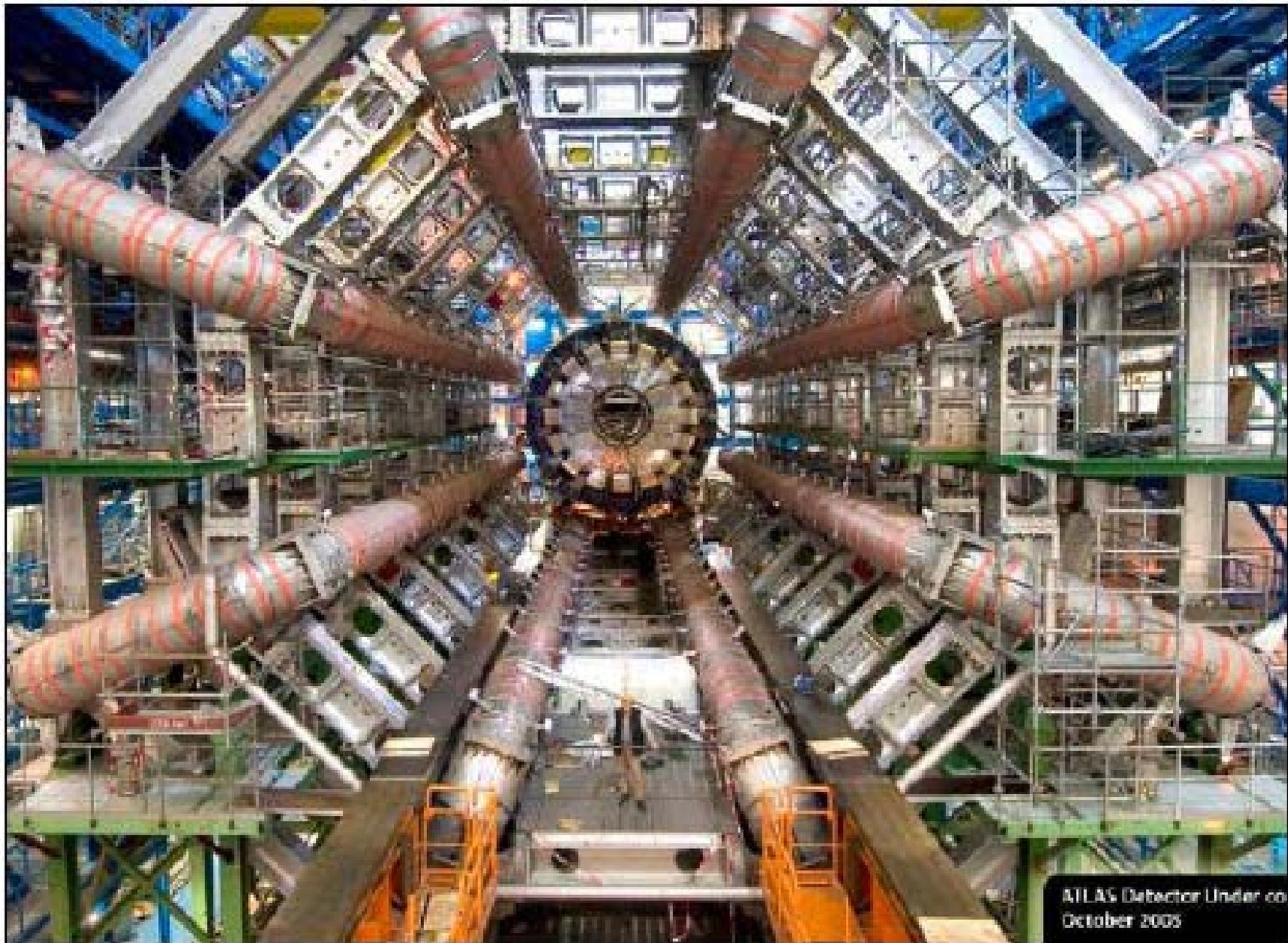


# ATLAS

**ATLAS - Costato in totale 335,44 milioni di euro di cui 35,625 stanziati dall'Infn italiano, è il più imponente dei rivelatori di Lhc, è grande come un palazzo di 5 piani, alto 25 metri e largo 46 m per un peso totale di 7000 tonnellate (più o meno come Notre Dame). Vanta il più grande circuito magnetico mai realizzato al mondo, lungo 26 metri e costruito interamente in Italia.**



La sua caverna



ATLAS Detector Under co  
October 2005



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

# Perchè LHC?

## Il modello standard e i suoi problemi

— Acceleratori e rivelatori ci hanno permesso di capire molte cose riguardo alla fisica nucleare e “subnucleare”.  
Hanno notevoli applicazioni pratiche  
Medicina..beni culturali. Valutazione inquinamento.....  
Con l'avvento di LHC e dei suoi rivelatori la sfida tecnologica in questi due campi sarà portata a livelli senza precedenti ma ce ne sono anche altri....

...i problemi aperti



**LHC**  
**e le questioni ancora**  
**aperte nel**  
**MODELLO**  
**STANDARD**



## *Questioni aperte*

*"Il mistero della massa ovvero la completezza del MS  
Il bosone di Higgs ovvero la "particella di DIO "*

La prima ipotesi è del 1964 (Peter Higgs) ma egli fu sostenuto nella sua ipotesi solo nel 1972.

Le prime informazioni per il bosone di Higgs furono riportate a settembre 2000 al LEP collider del CERN a Ginevra, Svizzera. L'ubicazione della ricerca si è poi spostata al Tevatron Collider del Fermilab che cominciò una corsa quinquennale a marzo 2001....

la caccia non ha avuto **successo.**

**I BOSONE H previsto nel modello standard rimane ancora una ipotesi  
I fisici devono dimostrare con l'esistenza di H anche il meccanismo di Higgs**



Il mistero della massa!



Nella prossima lezione

Problema Solving: Alla ricerca di HIGGS!

mento

# IL BOSONE H e le altre particelle

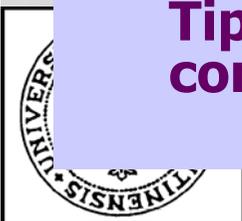
**Le particelle fondamentali e i mediatori spaziano su un ampio range di massa (da mass less a 174.3 GeV), il perche' è misterioso**

Il modello standard della fisica subatomica, prevede l'esistenza di quark, leptoni, gluoni e bosoni, e tra i bosoni anche del misterioso bosone di Higgs -**la particella di dio**- soprannominata così per il ruolo cruciale che svolge all'interno della teoria, infatti la teoria la indica come portatrice di forza del **campo di Higgs** che si ritiene permei l'universo e dia **massa** a tutte le particelle, e sia quindi alla base della gravitazione.

**Come le particelle acquisiscano massa non è ancora chiaro. Nel Modello Standard si suppone che le particelle massive l'acquisiscano attraverso un meccanismo noto come meccanismo di Higgs**

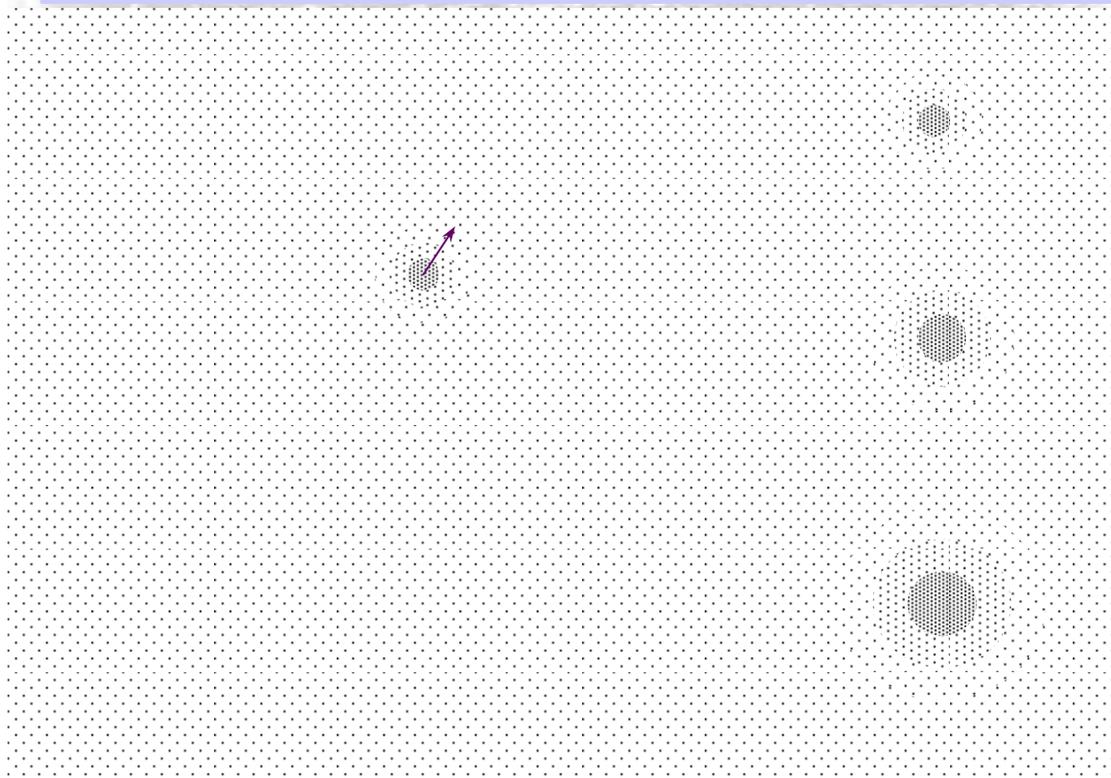
**Si suppone che tutte le particelle massive e i mediatori massivi abbiano interagito, nella loro vita di particelle, con una particella massiva, il bosone di Higgs, e che l'energia scambiata abbia poi determinato l'entità della massa**

**Tipi diversi del bosone di Higgs, se esistono, potrebbero poi condurci in nuovi regni della fisica oltre il Modello Standard**



# Il meccanismo di Higgs

Supponiamo di avere un campo di Higgs e facciamoci correre sopra tre particelle ....



## IPOSTESI

Tanto più grande è l'accoppiamento tra il campo di Higgs (bosone H) e la particella, tanto più grande è la massa ad essa associata !

Raggio di azione



## LHC e il Bosone di Higgs

— Potremmo dire, senza sbagliare, che l'obiettivo di LHC é trovare la particella di Higgs e di aprire le porte alla conferma o al superamento del Modello Standard... (super-gravità, extra-dimensioni, supersimmetria...)

***Se la massa del bosone di Higgs risulterà compresa tra 115 e 180 GeV, allora il Modello Standard potrà essere valido a tutte le scale di energia fino alla scala di Planck (10<sup>16</sup> TeV).***

**Quindi o il bosone salta fuori, oppure saltano fuori particelle ancora più piccole (le particelle minuscole della teoria supersimmetrica) e poi lui (o cinque versioni di lui), oppure, non salta fuori niente.**

**E anche questa è una grande informazione scientifica.**



## Higgs è difficile da trovare!

**La sua massa È grande!**

**Questo vuole dire che occorre molta energia per creare Higgs.**

**Si dice che sia stato creato occasionalmente in collisioni di fasci antiparticella/particella come quelle al CERN e al Fermilab.**

**Per esser certi di osservare Higgs sono necessarie fasci con energie molto alte.**

**Il Modello Standard non predice il valore della massa del bosone di Higgs.**

**Ricerche dirette effettuate al LEP hanno permesso di escludere valori della massa inferiori a 114,4 GeV e i teorici ci forniscono un limite massimo: 1 TeV.**

**Quindi lo spettro di energie da esplorare è ampio: al momento abbiamo un limite inferiore, dato dagli esperimenti, e un limite superiore, suggerito dalla teoria.**

**Misure indirette dalle determinazioni dei parametri elettrodeboli danno indicazioni che i valori più probabili della massa in un intervallo che dovrebbe essere accessibile ad LHC.**

**Molti modelli supersimmetrici predicono che il valore più basso possibile della massa del bosone di Higgs possa essere addirittura appena al di sopra degli attuali limiti sperimentali, intorno a 120 GeV o meno.**



# Le Teorie Unificate

## Teoria ElettroDebole

Nobel 1986  
Teoria  
elettro-debole  
(anni '70)



A. Salam



S. Weinberg



S. Glashow

- Nel 1967 **Glashow**, **Weinberg** e **Salam** proposero una teoria in cui le interazioni elettromagnetica e debole venivano unificate in un'unica interazione: **l'interazione elettrodebole**;

- I mediatori di quest'interazione sono quattro:

$\gamma$        $W^+$        $W^-$        $Z^0$

- I mediatori (**virtuali**) si accoppiano a quarks e leptoni con intensità comparabili, la debolezza delle interazioni mediate da W e Z e' dovuta al fatto che queste particelle (allora ipotetiche!) dovevano avere una massa molto elevata (pari a quella di circa 100 protoni);
- Novita' assoluta: la teoria prevedeva l'esistenza di '**correnti deboli neutre**', cioè processi mediati dalla particella  $Z^0$ , di cui fino ad allora non si aveva alcuna evidenza sperimentale;

- Data l'elevata massa delle particelle W e Z, fu possibile produrle direttamente in un esperimento solo con la costruzione del primo collisore **protone-antiprotone** ( $Spp\bar{S}$ ) al CERN di Ginevra, entrato in funzione nel 1983;
- L'osservazione di alcuni decadimenti delle particelle W e permise di determinare con discreta precisione la loro massa (in ottimo accordo con le previsioni del Modello Standard) e frutto' a Carlo Rubbia la vittoria del premio Nobel;



Nobel 1983  
C. Rubbia  
Scoperta del W e Z



**gli esperimenti  
UA1 e UA2 al CERN  
rivelano i  
mediatori della  
forza  
elettrodebole**

- Il Modello Standard si presentava quindi come una teoria di grande successo, pronta per raccogliere la sfida dei test di altissima precisione imposti dalla successiva macchina acceleratrice: **LEP**;

## ***Questioni aperte*** ***l'Unificazione delle interazioni***

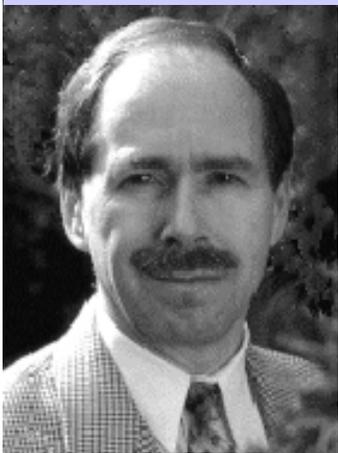
Maxwell → unificazione di elettricità e magnetismo come manifestazioni di un'unica forza elettromagnetica

Glashow, Salam, Weinberg → unificazione dell'interazione elettromagnetica e dell'interazione debole nella **teoria elettrodebole - predizione dell'esistenza dei mediatori  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$**

**I risultati sperimentali mostrano che l'intensità delle forze varia con l'energia in gioco e che ad una certa energia la forza forte dovrebbe avere la stessa intensità di quella elettrodebole.**

**Si cerca la possibilità di includere anche la forza forte in una unica "Great Unified Theory" G.U.T.**

***Nella G.U.T le 3 forze saranno un'unica forza, che a bassa energia si manifesta in modo differente***



G.'tHofft



M.Veltman

Nobel 1999  
Impianto  
per la  
Teoria Unificata

**Le energie di LHC  
permetteranno  
di verificare la  
GUT?**

# La scala delle energie ed le teorie unificatrici

Forza forte



Forza  
debole



Forza elettro-  
magnetica



Forza  
gravitazionale



Forza  
elettrodebole



GUT



Teoria del  
tutto



GeV

$10^2$

$10^{15}$

$10^{19}$



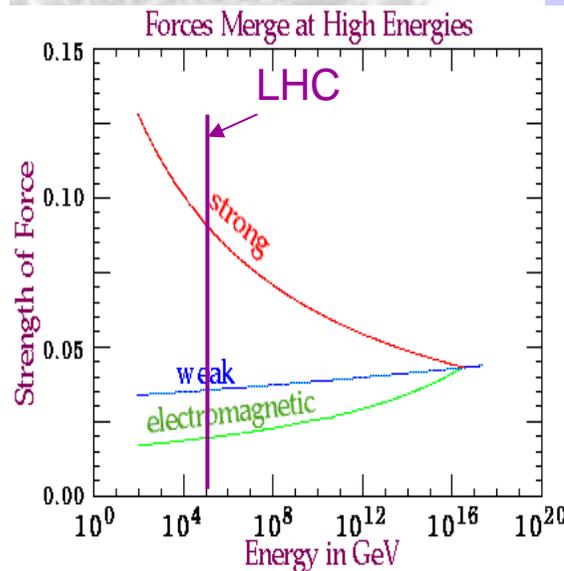
Università degli Studi di Pisa

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

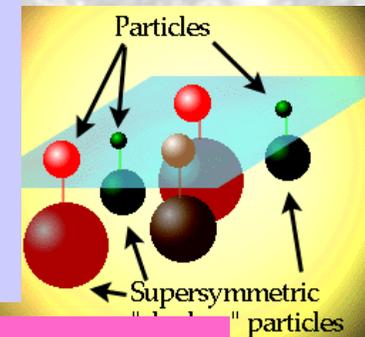
# LHC e la GUT e la supersimmetria

Purtroppo l'energia alla quale si manifesta la GUT - l'intensità di tutte le forze diventa eguale - è circa  $10^{16}$  volte più alta di quella raggiungibile da qualsiasi acceleratore realizzabile.

Le teorie di Grande Unificazione prevedono però anche delle conseguenze verificabili sperimentalmente anche alle energie più basse.



Una delle possibili manifestazioni di una GUT è l'esistenza di partner "supersimmetrici" per ognuna delle particelle elementari del Modello Standard (SuSy).



Le energie di LHC permetteranno di verificare se le particelle supersimmetriche esistono o meno?

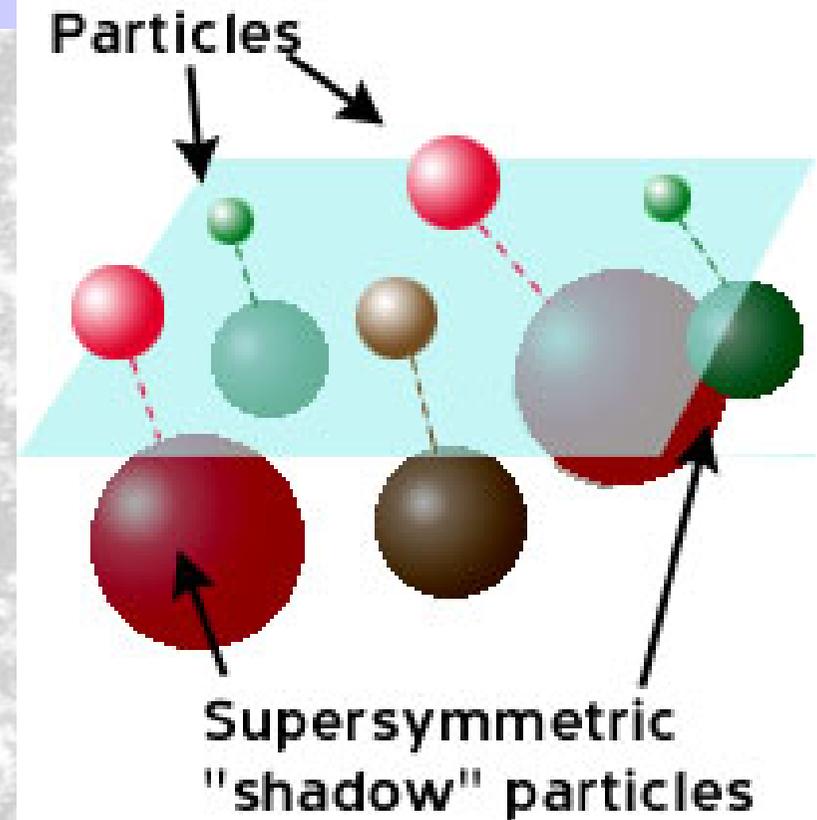


# *Supersimmetria SuSy e la teoria del tutto*

L'ipotesi è che ogni particella fondamentale abbia una particella "ombra" (shadow).

Sono piu' di 20 anni che si cercano le particelle supersimmetriche

La teoria Supersimmetria (SUSY): postula una nuova simmetria tra fermioni e bosoni; La supersimmetria connette i gradi di liberta' interni con quelli esterni dello spazio-tempo  
=> una sua formulazione locale includerebbe automaticamente anche la gravita'





## *Questioni aperte*

# La comprensione dell'Universo

L'ipotesi compatibile con le attuali teorie fisiche sull'origine dell'universo è che esso sia generato da una singolarità (l'inizio del nostro tempo), una fase molto "calda" e a grande densità di energia: **il "Big Bang"**

Per un tempo brevissimo, durante e poco dopo questa fase, tutte le particelle, anche quelle instabili hanno convissuto.

Da allora (~13.7 miliardi di anni fa) solo l'enorme concentrazione di energia che si può raggiungere in un **"acceleratore di particelle"** può riportare in vita quelle particelle che sono decadute.





*Non si tratta certo di tornare indietro nel tempo  
Più alta è l'energia, più profondamente  
possiamo accedere alla struttura della materia ed in definitiva all'origine  
dell'universo*

**“Riprodurremo le condizioni dell'universo quando aveva appena 10 microsecondi dallo scoppio del Big Bang da cui tutto ha avuto origine”**

*In laboratorio si cerca di produrre un “Little Bang”*

ALICE - A large Ion Collider Experiment, Usando nuclei di atomi con molti protoni, l'energia sarà tale che i fisici sperano di osservare un plasma di quark e gluoni, uno stato della materia esistito per pochi miliardesimi di secondo subito dopo il Big Bang, a densità e temperature estreme.

**Limite attuale (Tevatron, Fermilab USA)**

$$2 \cdot 10^{12} \text{ eV} \rightarrow T = 2 \cdot 10^{16} \text{ K} \rightarrow t \sim 2.5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

**Limite futuro (LHC, CERN, 2008) :**

$$2 \cdot 10^{13} \text{ eV} \rightarrow 2 \cdot 10^{17} \text{ K} \rightarrow t \sim 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$



Università degli Studi di Udine

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

## ***Questioni aperte***

### ***Materia e AntiMateria nell'Universo***

**I risultati ottenuti con l'acceleratore che ha preceduto LHC al Cern (LEP) permettono di affermare con certezza che le famiglie di costituenti elementari non sono più di 3.**

**Le domande che i fisici si pongono sono:**

**Perché solo tre famiglie?  
Perché la materia stabile  
dell'Universo è costituita solo da  
componenti della prima famiglia?**

**Abbiamo motivi per credere che quando si è originato l'Universo, circa 14 miliardi di anni fa, c'era la stessa quantità di materia e antimateria.**

**Nell'Universo attuale invece, a parte ciò che si crea nelle collisioni, non vediamo antimateria intorno a noi, anche dai raggi cosmici ne raccogliamo meno di quanta dovrebbe essercene in un universo simmetrico.**

**Questi quesiti sono strettamente legati ad un altro "puzzle": che fine ha fatto l'antimateria?**

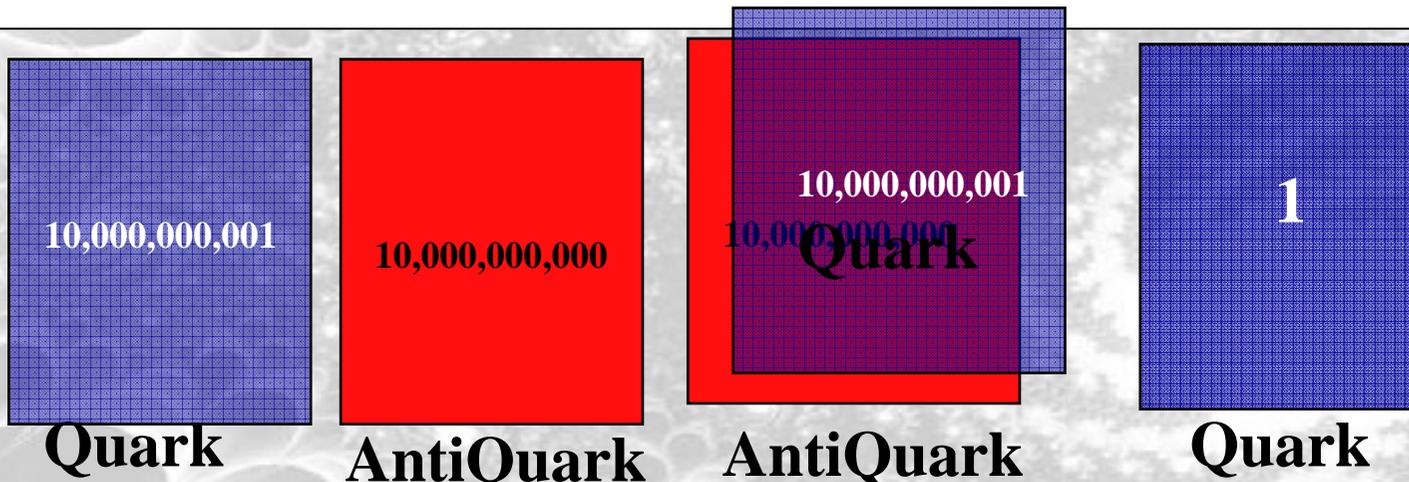
**perché materia e antimateria non si sono annichilate lasciando solo energia nell'Universo?  
LHC cosa ci dirà in proposito?**

Negli esperimenti di fisica agli acceleratori materia ed antimateria sono sempre create in quantità eguali. La stessa cosa deve essere avvenuta al momento del Big Bang. Perché allora non c'è stata una completa annichilazione di materia ed antimateria che ha lasciato posto ad un Universo di sola energia?

L'ipotesi più accreditata è che ci sia stata una piccola ma significativa asimmetria tra materia ed antimateria nelle prime fasi dell'Universo quando i componenti della seconda e terza famiglia erano presenti in abbondanza.

In effetti la violazione di CP (come questa asimmetria si chiama) è stata osservata in sistemi di materia-antimateria costituiti da quark della seconda famiglia.

## IPOSTESI di asimmetria barionica nell'Universo iniziale



**Il nostro universo!**

L'energia iniziale ha prodotto coppie quark-antiquark.

In numero uguale, se il numero barionico è conservato.

FORSE c'era una piccola differenza ( $10^{-10}$ )!

**Il MS prevede anche una differente evoluzione di materia rispetto ad antimateria ("CP violation")**

# LHCb e l'Antimateria

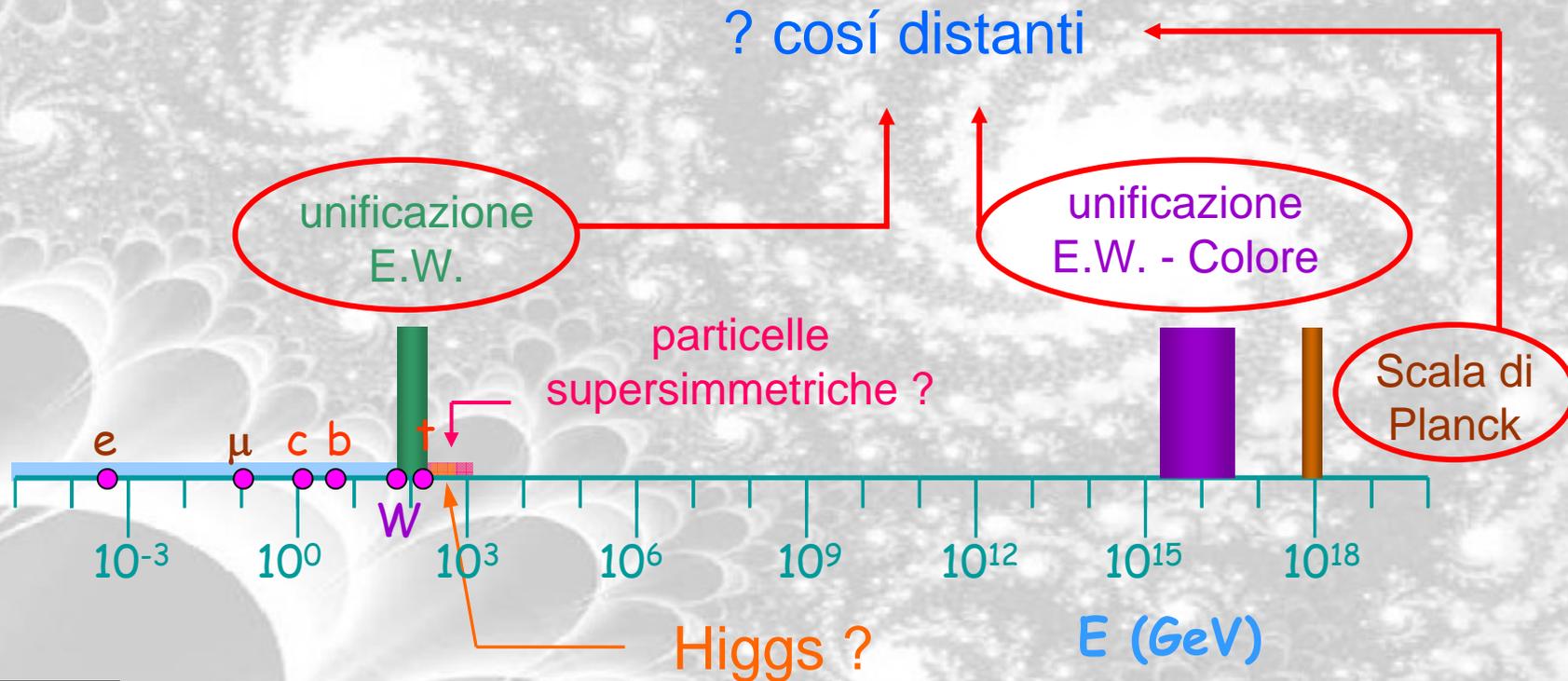
**Large Hadron Collider beauty, è l'esperimento che cercherà di capire il comportamento che hanno avuto materia e antimateria subito dopo il Big Bang. In origine, materia e antimateria dovrebbero essere comparse in quantità uguali, eppure oggi tutto ciò che conosciamo è composto da sola materia. LhcB indagherà perciò la ragione di questa asimmetria.**



Università degli Studi di Udine

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

# La scala delle energie ed i problemi aperti



Ed infine ...

Secondo voi Cosa si aspettano i FISICI?

*Completare il MODELLO STANDARD  
o  
SUPERARE il MODELLO STANDARD?*



Università degli Studi di Udine

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

## Stefano Forte, docente di fisica teorica

**«Nessuno sa se dietro quel buco nel modello standard ci sia solo una faccia oppure sia magari l'imboccatura di un cunicolo, un pozzo che ci potrebbe portare a una visione completamente nuova, e inattesa della fisica e della realtà in cui viviamo....**

**La prima strada, che Higgs salti fuori subito, senza tirare il collo all'Lhc, è la più facile ma in fondo la più noiosa. Confermerebbe il modello standard ma senza aprire nuovi spazi di ricerca. Forse darebbe qualche indizio sulla materia oscura, finora intravista solo da anomalie intergalattiche. Ma poco di più.**

**Se invece saltano fuori, prima o insieme, le conferme della teoria supersimmetrica (che corregge la fragilità del modello standard se lo si analizza a energie più elevate di quelle della nostra vita normale) allora cambia tutto: si spalancherà un campo di ricerca entusiasmante in cui potremo forse capire se esistono altre dimensioni rispetto alla nostra, e farci un'idea dell'universo, e della sua energia, molto più profonda».**



Università degli Studi di Udine

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

## LHC e...l'imprevisto... ....aprirà nuove strade?

L'esperienza passata mostra che molto spesso, quando si esplorano nuove regioni di energia, vengono rivelati **fenomeni inattesi** che permettono al quadro teorico esistente di progredire sensibilmente.

Verso la fine degli anni 60, l'entrata in funzione di Adone presso i laboratori di Frascati dell'INFN, permise di osservare per la prima volta una **abbondante produzione di adroni** (particelle soggette alla forza forte) in interazioni  $e^-$  e  $e^+$  (tipicamente elettromagnetiche).

Nel 1974 l'inattesa scoperta di una **nuova particella ( $J/\Psi$ )** rappresentò la prima conferma sperimentale del **4° quark (charm)** in quanto a quei tempi ne erano noti solo 3 (up, down, strange).

Ma ...l'imprevisto è controllabile?

