



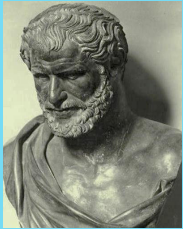
# Quando l'energia diventa materia: viaggio nel mondo delle particelle elementari

Luciano Libero Pappalardo

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra  
Università degli Studi di Ferrara  
e-mail: [pappalardo@fe.infn.it](mailto:pappalardo@fe.infn.it)

# Cosa sono le particelle elementari?

- Mattoni fondamentali di cui è costituita tutta la materia
- Oggetti privi di struttura interna, cioè non composti da altri oggetti più piccoli



**Democrito** (460 – 370 a.C.) **Atomo**: costituente fondamentale della materia, eterno, immutabile e indivisibile!

Le prime prove scientifiche della **natura corpuscolare della materia** arrivarono dalla chimica agli inizi del XIX secolo (Dalton, Gay-Lussac, Avogadro, etc)

Seconda metà del XIX secolo:  
gli atomi considerati i costituenti fondamentali della materia, alla base dei vari **elementi chimici**

**Mendeleev (1869)** scoprì che gli elementi sono caratterizzati da proprietà chimico-fisiche che si ripetono ad intervalli regolari

**Tavola Periodica degli Elementi**

**Legenda:**

- Metalli Alcalini (Giallo)
- Metalli Alcalino-Terrosi (Arancione)
- Lantanidi (Rosso)
- Attridi (Verde)
- Elementi di Transizione (Violetto)
- Metalloidi / Non Metalli (Azzurro)
- Alogeni (Ciano)
- Gas Nobili (Verde scuro)

**STATI DI AGGREGAZIONE A 20°C:**

- SOLIDI (Nero)
- LIQUIDI (Rosso)
- GASSOSI (Verde)
- ARTIFICIALI (Bianco)

**Gruppo:** 1 IA, 2 IA, 3 IIA, 4 IVA, 5 VA, 6 VIA, 7 VIIA, 8 VIIIA, 9 VIIIA, 10 VIIIA, 11 IB, 12 IIB, 13 IIIA, 14 IVA, 15 VA, 16 VIA, 17 VIIA, 18 VIIIA

**Periodo:** 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

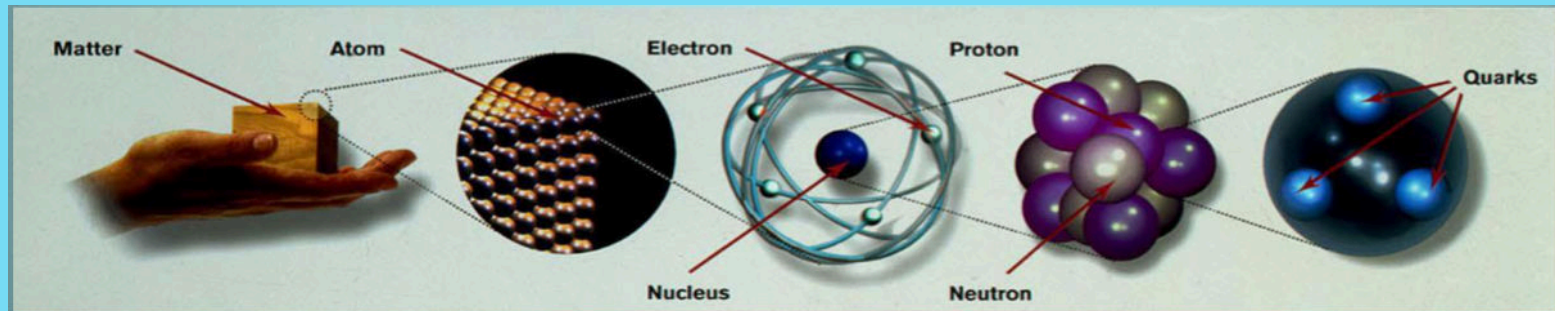
**Elementi:** H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Rn, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

# Cosa sono le particelle elementari?

- Si intuì che atomi diversi devono essere costituiti da diverse combinazioni di un numero limitato di oggetti più fondamentali al loro interno!
- **L'atomo non è indivisibile!!!**



Negli ultimi 100 anni, grazie al continuo sviluppo degli acceleratori di particelle, la nostra concezione di **particella elementare** si è evoluta notevolmente

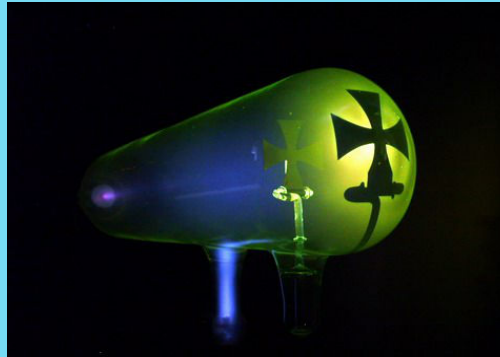
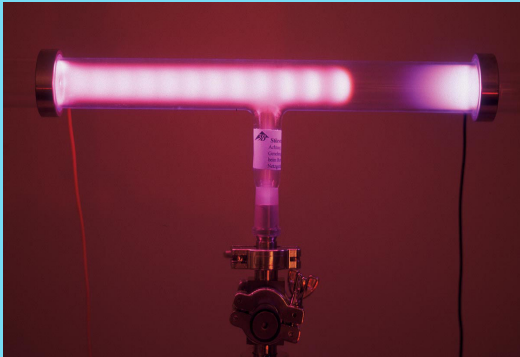


- Oggi si considerano particelle elementari i **quark** e i **leptoni** (elettrone, etc)
- oggetti "puntiformi": dimensione  $< 10^{-18}$  m ( $< 0.0000000000000000001$  m) !!!

# La scoperta delle particelle elementari

# Strani bagliori e la scoperta dell'elettrone

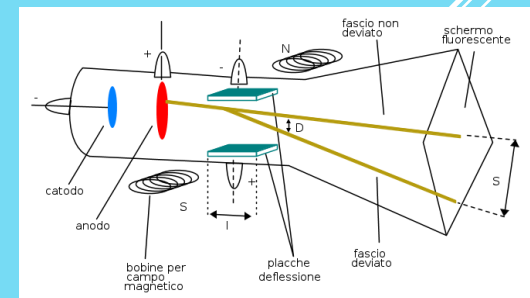
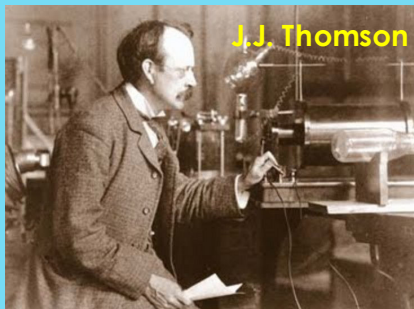
**H. Geissler (1857)**: applicando una differenza di potenziale di alcune decine di KV tra due elettrodi posti alle estremità di un tubo di vetro riempito di aria molto rarefatta ( $10^{-3} atm$ ) si genera una scarica luminescente tra catodo e anodo ("raggi catodici")



- Da cosa erano composti i raggi catodici?
- Si trattava di un nuovo tipo di radiazione o di particelle sconosciute?

**J.J. Thomson (1897)**: studiò la deflessione dei raggi catodici soggetti a campi elettrici e magnetici

- i raggi catodici sono costituiti da particelle di carica negativa
- sono circa 2000 volte più leggeri dell'atomo di H ( $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} Kg$ )
- L'**elettrone** fu la prima particella sub-atomica ad essere scoperta (Nobel nel 1906)

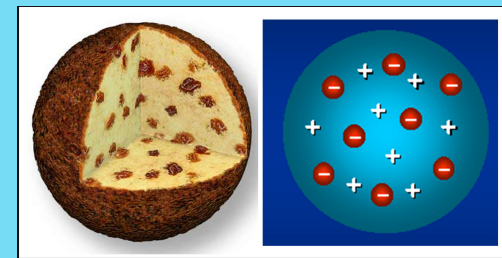


# ...ma come sono fatti gli atomi???

Nei primi del '900 si sapeva che:

- L'atomo è elettricamente neutro ma può emettere elettroni (raggi catodici)
- Deve quindi esistere all'interno dell'atomo "qualcos'altro" di carica positiva, tale da bilanciare quella negativa degli elettroni
- Essendo gli elettroni leggerissimi, questo "qualcos'altro" deve contribuire quasi totalmente alla massa dell'atomo

**Modello atomico di Thomson (1904):** l'atomo è costituito da una distribuzione di carica positiva diffusa all'interno della quale sono inserite le cariche negative ("**modello a panettone**")



L'atomo di Thomson è elettricamente neutro e sostanzialmente pieno

Per capire come è fatto l'atomo bisogna guardarci dentro!

- le dimensioni dell'atomo sono dell'ordine di  $10^{-10}\text{m}$
- Per studiarne la struttura interna abbiamo bisogno di una risoluzione almeno 10/100/1000 volte più piccola delle sue dimensioni ( $< 10^{-11}\text{m} - 10^{-13}\text{m}$ )

# Osservare l'infinitamente piccolo



Potere risolutivo dell'**occhio umano**:  $\sim 0.1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-4} \text{ m}$



**Lente di ingrandimento:**

- Max ingrandimento  $\sim \times 10 \rightarrow \sim 10 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$



**Microscopio ottico**

- Costituito da un sistema di lenti
- Illumina il campione con un fascio di **luce visibile**
- Max ingrandimento  $\sim \times 1000 \rightarrow \sim 0.2 \mu\text{m} = 2 \times 10^{-7} \text{ m}$



**Microscopio elettronico**

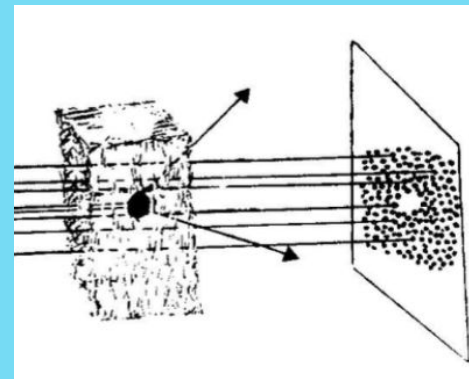
- Costituito da un sistema di lenti
- Illumina il campione con un **fascio di elettroni**
- **Gli elettroni urtano il campione e vengono deflessi su un rivelatore che emette impulsi elettrici analizzati da un PC**
- Max ingrandimento  $\sim \times 1000000 \rightarrow \sim 1 \text{ \AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$

# Osservare l'infinitamente piccolo

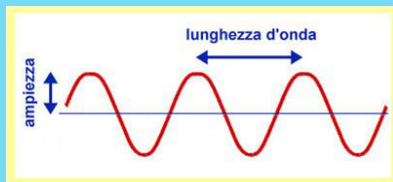
... Ma come è possibile osservare un oggetto con un fascio di elettroni?

**Analogia classica:** Un pezzo di metallo prezioso è stato nascosto all'interno di una balla di fieno e lo si vuole scoprire senza distruggere la balla.

Sparando con un fucile ad aria compressa in diversi punti della balla ed esaminando la distribuzione finale dei proiettili è possibile risalire approssimativamente alla posizione, alle dimensioni e alla forma del pezzo di metallo!



**Effetti quantistici:** Le particelle sub-atomiche hanno comportamento sia corpuscolare che ondulatorio (**De Broglie, 1924**). E' quindi possibile associare ad ogni particella caratteristiche tipiche delle onde, come la **lunghezza d'onda**:



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

**h = costante di Planck** =  $6,63 \cdot 10^{-34}$  (J · sec)

**p = m · v** (quantità di moto)

La **risoluzione spaziale** del microscopio elettronico è data dalla **lunghezza d'onda di De Broglie** del fascetto di elettroni, ed è tanto maggiore ( $\lambda$  piccola) quanto maggiore è la quantità di moto  $p$  degli elettroni!

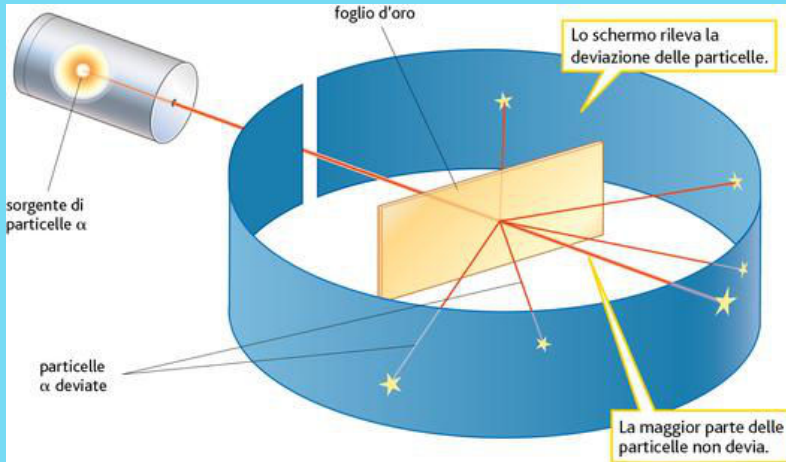
Lo stesso principio si applica agli **acceleratori di particelle**: maggiore è l'energia del fascio, maggiore sarà la capacità di osservare dettagli sempre più piccoli!



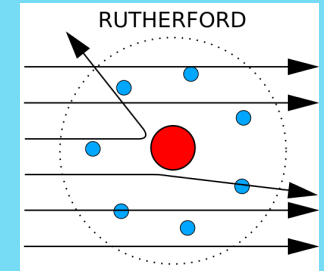
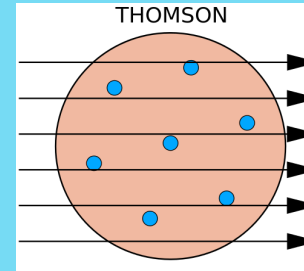
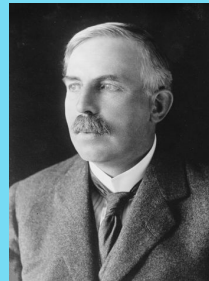
# La scoperta del nucleo atomico

Agli inizi del 1900 non esistevano acceleratori di particelle! ...Per osservare la struttura degli atomi serviva una nuova idea!

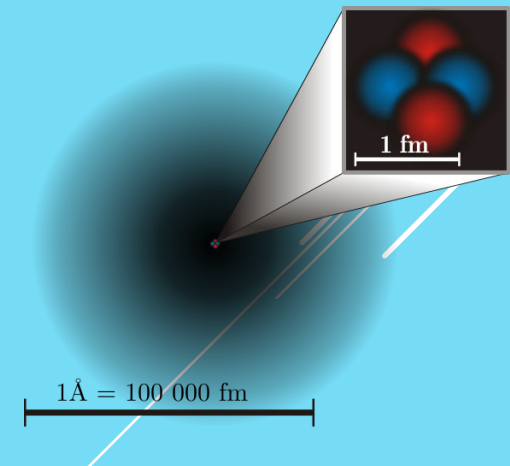
## L'esperimento di Rutherford (1909):



Misurando la deflessione delle particelle  $\alpha$  dopo l'urto si poteva ricavare la distribuzione di carica elettrica all'interno dell'atomo!

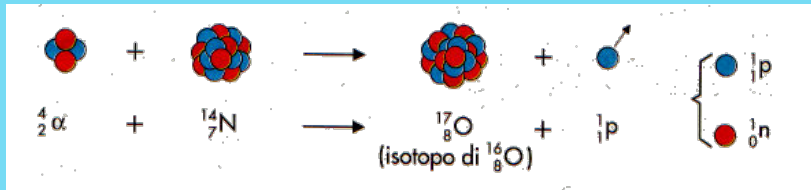


**E. Rutherford (1909):** « Fu l'evento più incredibile di tutta la mia vita. E' come se sparando una cannonata su un foglio di carta velina il proiettile ti rimbalzasse indietro! L'unica possibilità è considerare l'atomo come un sistema in cui quasi tutta la massa è concentrata in un **nucleo estremamente piccolo, denso e carico positivamente!** »



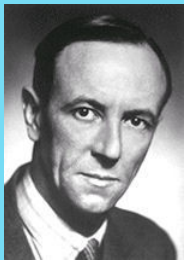
# La struttura del nucleo atomico

**Rutherford (1919)**: Bombardando atomi di azoto con una sorgente di particelle  $\alpha$  osservò l'emissione di particelle cariche positivamente e più penetranti delle  $\alpha$ . Concluse che nell'urto l'atomo di azoto si fosse modificato e che un costituente leggero del suo nucleo fosse stato emesso

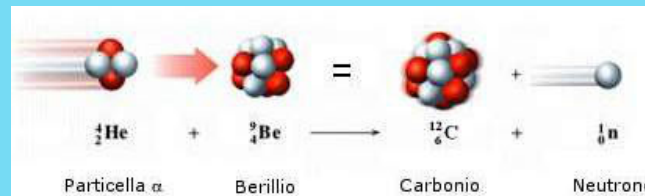


Questa particella misteriosa coincideva con il nucleo dell'atomo di idrogeno (**protone**), che fu dunque identificato come uno dei costituenti "elementari" del nucleo atomico.

...ma può il nucleo atomico essere costituito solo da protoni?



**J. Chadwick (1932)**: irraggiò nuclei di berillio con una sorgente  $\alpha$  ed utilizzò la radiazione neutra emessa nella reazione come proiettile su bersagli di idrogeno, di cui misurò le energie di rinculo.



Da studi di cinematica comprese che la particella neutra non poteva essere un fotone, ma doveva avere una massa molto simile a quella del protone. Fu chiamata **neutrone**.

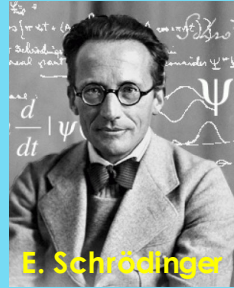
# Le grandi rivoluzioni teoriche del '900

## Meccanica quantistica



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

1924: proprietà ondulatorie della materia



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right] \Psi(x, t)$$

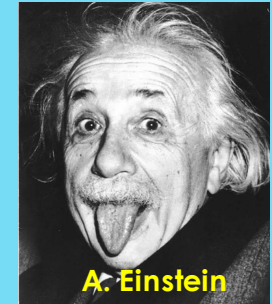
1925: determina l'evoluzione temporale dello stato di una particella sub-atomica descritto dalla funzione d'onda (di probabilità)  $\Psi$



$$\begin{cases} \Delta x \cdot \Delta p > \frac{\hbar}{2} \\ \Delta E \cdot \Delta t > \frac{\hbar}{2} \end{cases}$$

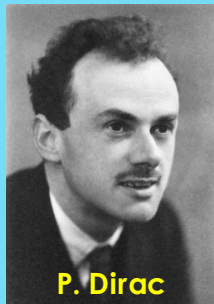
1927: principi di indeterminazione

## Relatività ristretta



$$E = mc^2$$

1905: Equivalenza massa-energia

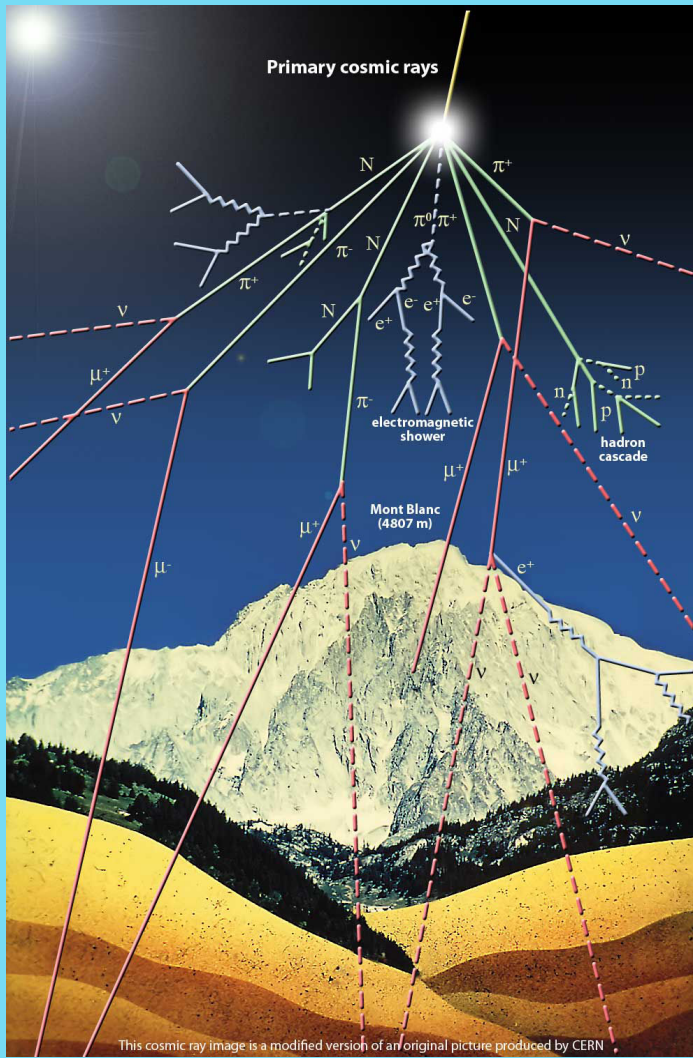


$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

- Estensione relativistica dell'equazione di Shrodinger (1928)
- descrive l'evoluzione temporale degli elettroni relativistici
- Segna un passo fondamentale verso l'unificazione della meccanica quantistica e della relatività ristretta nella teoria quantistica dei campi
- Ammette soluzioni a energia negativa! ...di cosa si tratta?

L'eq. di Dirac prevede l'esistenza dell'**antimateria**! ...ma serviva la prova sperimentale!

# I raggi cosmici e la scoperta dell'antielettrone (positrone)



Dallo spazio arrivano nuclei dall'idrogeno fino al ferro anche con energie enormi. Urtando con i nuclei degli atomi dell'atmosfera terrestre producono **sciami di particelle** come pioni, muoni, elettroni, fotoni, neutrini, etc.....

Ma come si formano gli sciami di particelle?

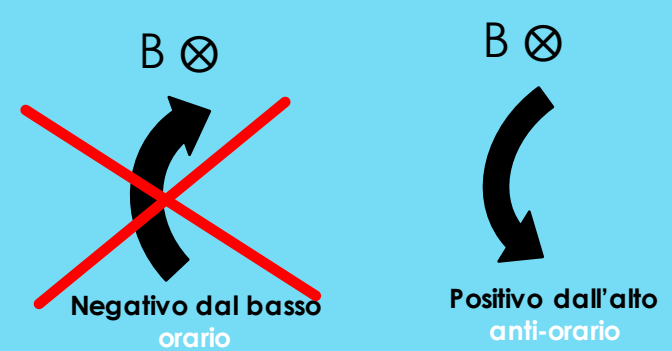
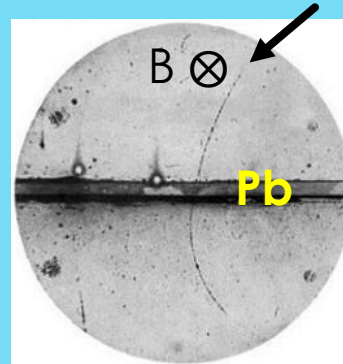
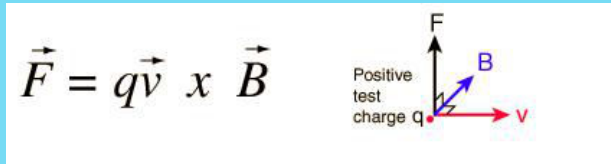
$$E = mc^2$$

**Equivalenza massa-energia:** l'enorme energia cinetica della particella primaria si converte nella massa di nuove particelle!

Lo stesso principio si sfrutta negli **acceleratori di particelle!**

# I raggi cosmici e la scoperta dell'antielettrone (positrone)

**C. Anderson (1932)**: studiando gli sciami cosmici con un piccola camera a nebbia notò delle strane tracce lasciate da alcune particelle cariche!



- Le curvatura delle tracce era compatibile con una particella negativa proveniente dal basso o con una positiva proveniente dall'alto
- Nel 1932 le uniche particelle cariche note erano l'**elettrone** (-) e il **protone** (+)
- il tipo di traccia indicava però una particella molto più leggera del protone
- Tutto lasciava pensare ad un elettrone dal basso... ma i cosmici arrivano dall'alto!

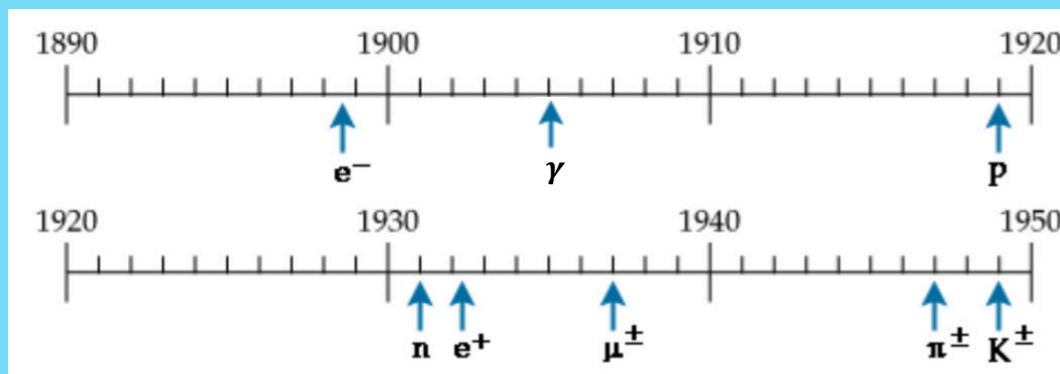
La differenza di curvatura indicava che la traccia osservata apparteneva ad una particella proveniente dall'alto (quindi positiva) e con la massa dell'elettrone!

**Anderson aveva scoperto l'anti-elettrone (positrone) previsto da Dirac!**

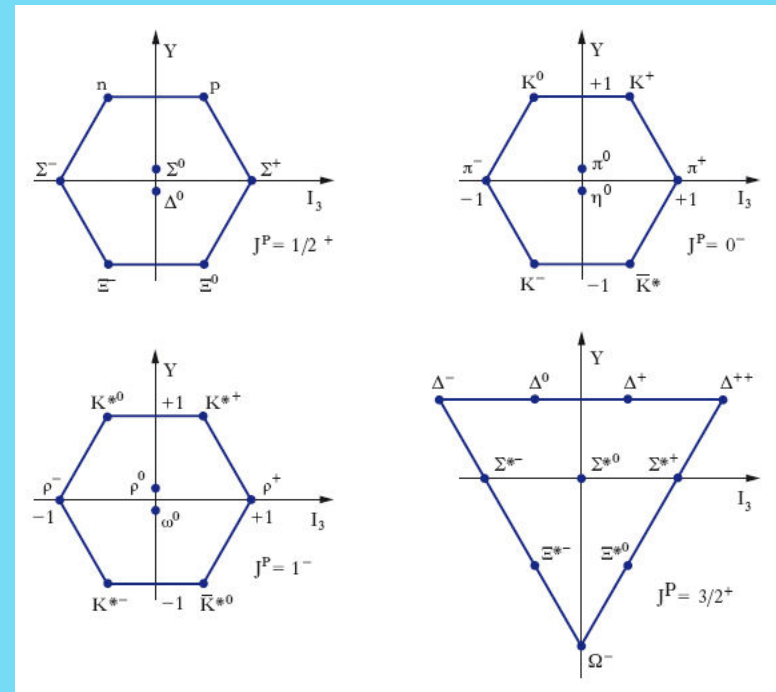
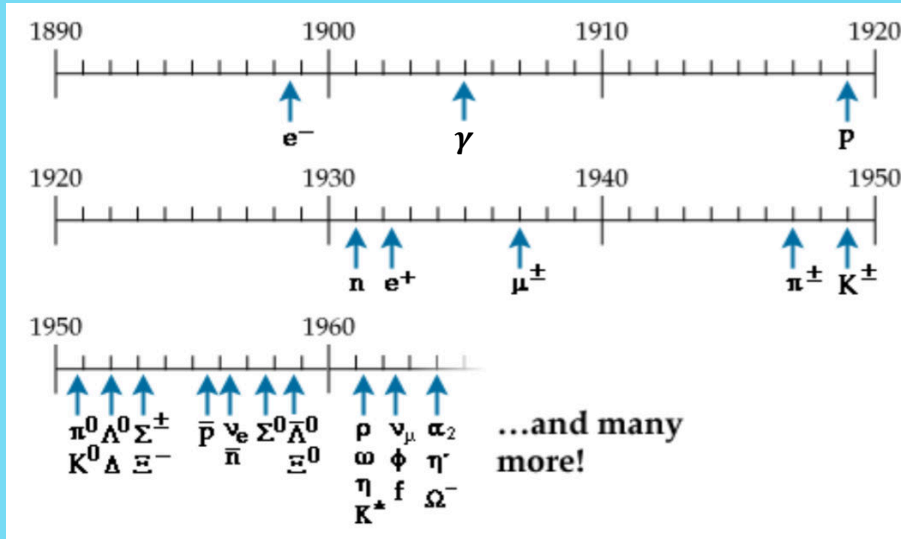
Nel 1936 scoprì il **muone** ( $\mu$ ), il "fratello maggiore" dell'elettrone!

# Le particelle note fino al 1950

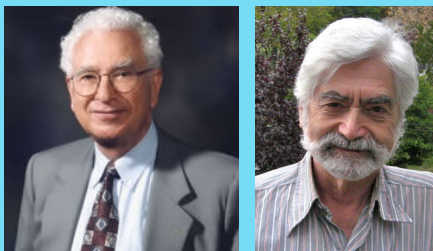
anno	scopritore	metodo	particella	simbolo
1897	Thomson	Tubi catodici	elettrone	$e^-$
1905	Einstein	Effetto fotoelettrico	fotone	$\gamma$
1919	Rutherford	$\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + p$	protone	$p$
1932	Chadwick	$\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$	neutrone	$n$
1932	Anderson	Raggi cosmici	positrone	$e^+$
1936	Anderson	Raggi cosmici	muone	$\mu^\pm$
1947	Occhialini et al.	Raggi cosmici	pione	$\pi^\pm$
1947	Rochester & Butler	Raggi cosmici	kaone	$K^\pm$



# La proliferazione degli anni '50 e '60



- troppe per essere particelle elementari!
- Mostravano delle strane regolarità
- raggruppate in **multipletti** in base ad alcuni numeri quantici (*spin*, *parità*, *ipercarica*, *isospin*)
- Le simmetrie osservate suggerivano l'esistenza di una struttura interna! (...tavola periodica)



**M. Gell-Man & G. Zweig (1964):** le particelle osservate sono costituite da oggetti più elementari, i **quark!**

# Il Modello a quark

## Interazione nucleare forte

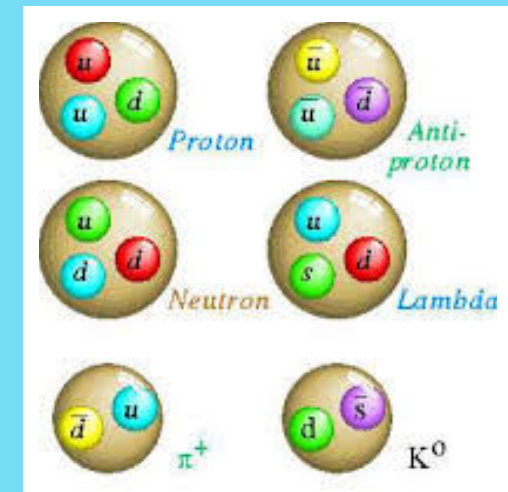
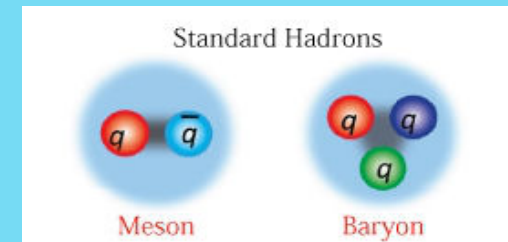
- E' una delle 4 interazioni fondamentali in natura
- tiene legato il nucleo atomico, contrastando la repulsione Coulombiana tra i protoni
- Su scala nucleare è circa 100 volte più forte della forza elettromagnetica!
- ha un raggio di azione piccolissimo ( $\sim 10^{-15}$  m)
- a livello microscopico agisce tra i quark

**Quark:** particelle elementari soggette all'interazione forte

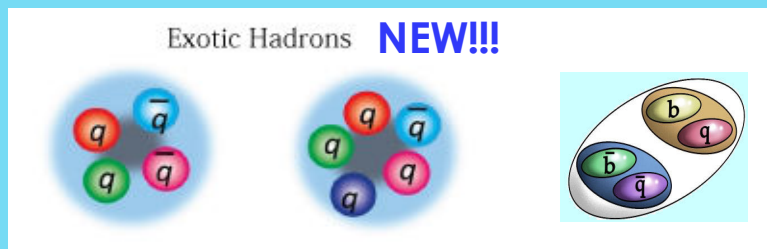
- ne esistono di 3 tipi: “**up**” (**u**), “**down**” (**d**), “**strange**” (**s**)
- **carica elettrica frazionaria** ( $q_u = +\frac{2}{3}e$ ,  $q_d = -\frac{1}{3}e$ ,  $q_s = -\frac{1}{3}e$ )

**Adroni:**

- particelle composte da quark, soggette all'interazione forte
- **Barioni:** (3 quark): protone, neutrone, Delta, Lambda, etc
- **Mesoni:** (quark + antiquark): pioni, kaoni, etc



**Esotici:** tetraquark, pentaquark, stati molecolari, etc





# A caccia dei quark

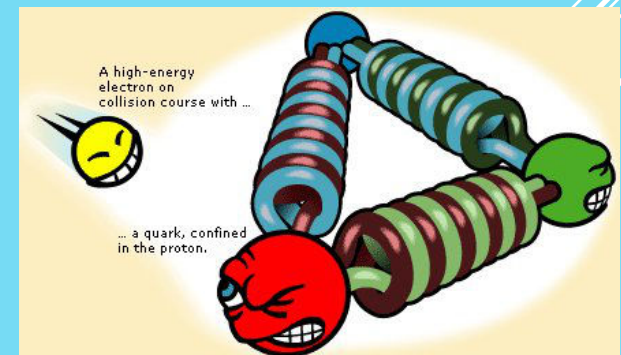
Il modello a quark riusciva a spiegare molte caratteristiche delle particelle osservate (carica elettrica, massa, spin, etc)! ...ma serviva la conferma sperimentale!

## Metodo 1:

- Facciamo scontrare protoni ad altissima energia
- Cerchiamo tra i detriti particelle con carica frazionaria (...in principio facili da rivelare)



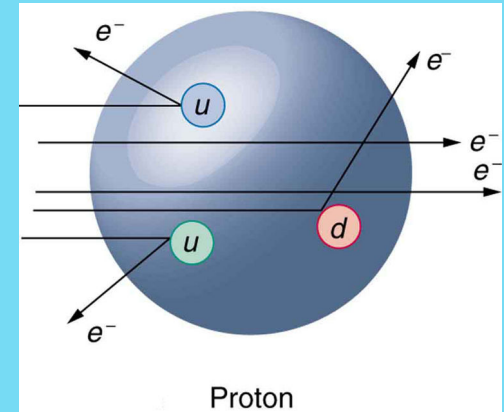
- tentato per decenni, a energie sempre maggiori
- non ha mai portato ad alcun risultato!
- non è possibile in nessun modo osservare quark liberi
- I quark esistono solo “confinati” all’interno degli adroni
- Il “**confinamento dei quark**” è previsto dalla teoria moderna dell’interazione forte ( **Cromodinamica Quantistica**) ed è oggi universalmente accettato.



# A caccia dei quark

## Metodo 2:

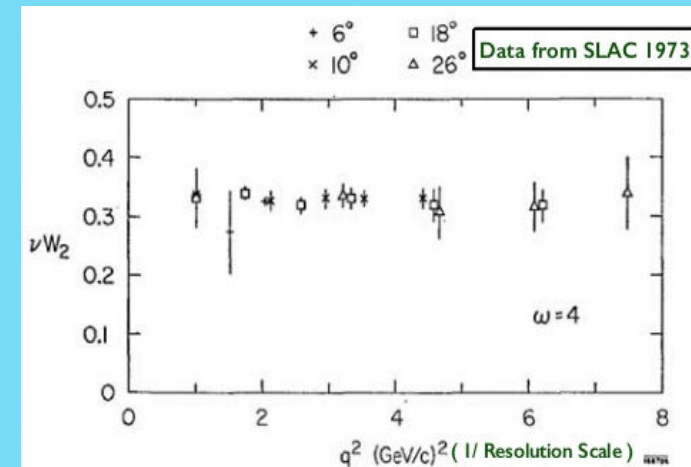
- “Esperimento alla Rutherford”: Scrutiamo l'interno del protone con sonde opportune e ricaviamo indizi indiretti della presenza dei quark studiando il modo in cui le sonde “rimbalzano”
- Gli elettroni sono le sonde perfette: privi di struttura interna (puntiformi), penetranti e non soggetti all'interazione forte



- Primi esperimenti a SLAC (USA) nei primi anni '70

- La distribuzione degli elettroni dopo l'urto era incompatibile con l'ipotesi che l'urto fosse avvenuto con “tutto il protone” (unico blocco rigido)

- La probabilità di collisione rimaneva pressoché costante all'aumentare della quantità di moto trasferita dal proiettile al bersaglio (indipendente dalla lunghezza d'onda di De Broglie!)



- Questo può essere compreso solo assumendo che gli elettroni urtassero elasticamente contro qualcosa di puntiforme e rigido all'interno del protone!

- I risultati erano compatibili con l'esistenza dei quark previsti da Gell-Man e Zweig!!

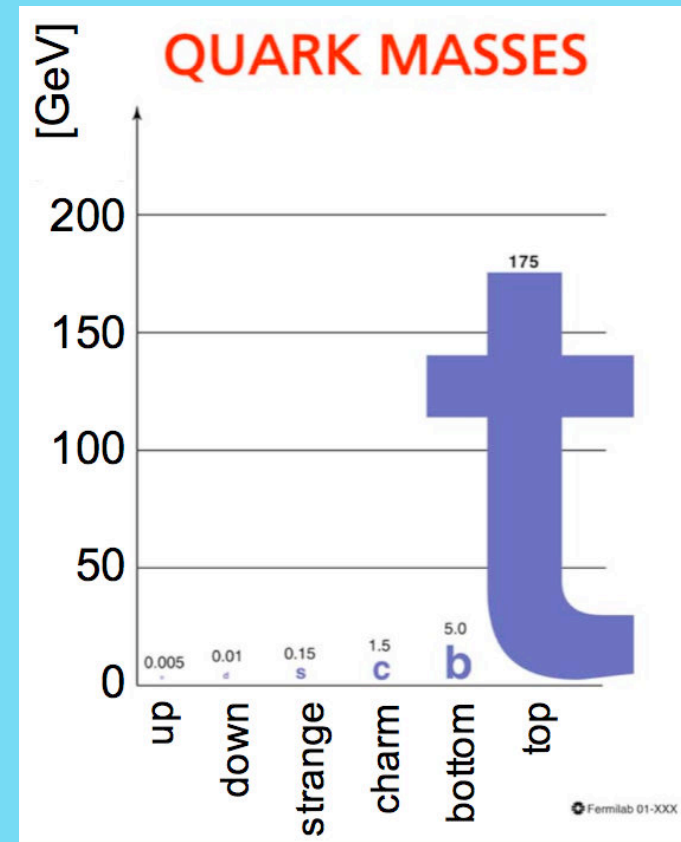
# La scoperta dei quark pesanti

L'esistenza di un quarto quark fu prevista nel 1970 da Glashow, Iliopoulos e Maiani per spiegare alcune inconsistenze tra dati e teoria (meccanismo GIM).

- Il quark **charm** fu osservato per la prima volta nel 1974 con la scoperta del **mesone  $J/\psi$  ( $c - \bar{c}$ )** contemporaneamente da due esperimenti, uno a SLAC e l'altro a BNL
  - Il charm ha carica  $+\frac{2}{3}e$  e **massa**  $\gtrsim m_{protone}$  !

Nel 1973, per spiegare uno strano fenomeno osservato (**violazione di CP**) venne teorizzata da **M. Kobayashi** e **T. Maskawa** l'esistenza di altri 2 quark

- Il quark **bottom** fu osservato nel 1977 al Fermilab tramite la scoperta del **mesone  $\Upsilon$  ( $b - \bar{b}$ )**
  - Il bottom ha carica  $-\frac{1}{3}e$  e **massa**  $\sim 5 \times m_{protone}$  !!
- Il quark **top** fu osservato nel 1994 al Fermilab (CDF)
  - Il top ha carica  $+\frac{2}{3}e$  e **massa**  $\sim 180 \times m_{protone}$  !!!
  - E' la particella più pesante scoperta finora!
  - Non si lega con altri quark per formare adroni



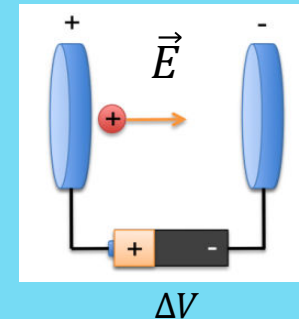
# Il Large Hadron Collider

# Come funziona un acceleratore di particelle ?

Una particella carica (es. elettrone, protone, nucleo atomico) può essere accelerata mediante una differenza di potenziale

$$F = qE = ma \Rightarrow a = \frac{qE}{m}$$

$$K = q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2$$



e mantenuta su un'orbita circolare mediante un campo magnetico

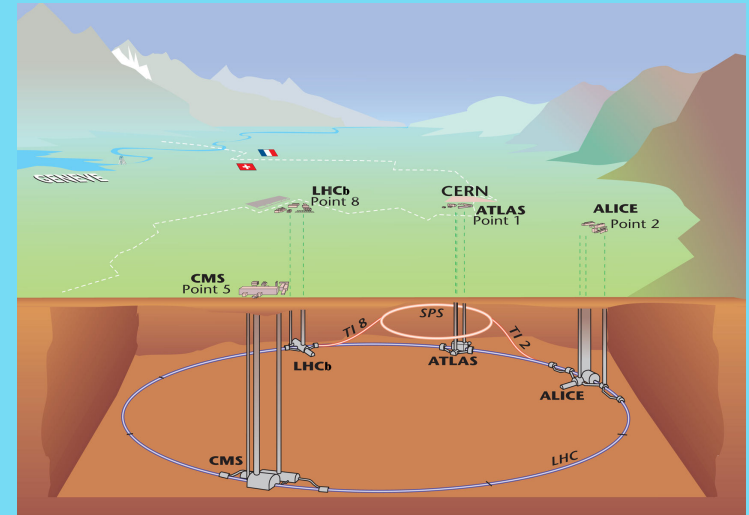
$$F = qvB = ma = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

L'**elettronvolt (eV)** è l'energia cinetica acquisita da un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di 1V ( $1.6 \times 10^{-19}$  Joule)

- **Kiloelettronvolt (KeV):**  $1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$  → fisica atomica
- **Megaelettronvolt (MeV):**  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$  → fisica nucleare
- **Gigaelettronvolt (GeV):**  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  → fisica "adronica" (protone)
- **Teraelettronvolt (TeV):**  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$  → fisica delle particelle elementari

Per l'equivalenza energia-massa ( $E = mc^2$ ) le stesse unità vengono utilizzate per le masse delle particelle. Es, il **protone "pesa" 938 MeV**

# LHC: “la macchina più complessa costruita dall’uomo”



- Collider protone-protone (nucleo-nucleo)
- Tunnel: 27km di circonferenza, 100m sotto terra
- Fasci da 2800 pacchetti da 100 mld di protoni
- Energia massima: 7 TeV per fascio
- $v_p = 0.999999991c \rightarrow 11000$  giri al secondo!
- 1232 magneti superconduttori ( $1.9K = -271.3^\circ C$ )
- 7600 Km di cavi elettrici
- Bolletta della luce: 19 M€/anno!
- 4 grossi esperimenti: **CMS, ATLAS, LHCb, ALICE**
- ~ 1GB dati/s (dati in un anno: pila di CD alta 20 km)
- In funzione al CERN dal 2009
- Ha consentito la scoperta del **bosone di Higgs**, è a caccia di nuova fisica oltre il MS

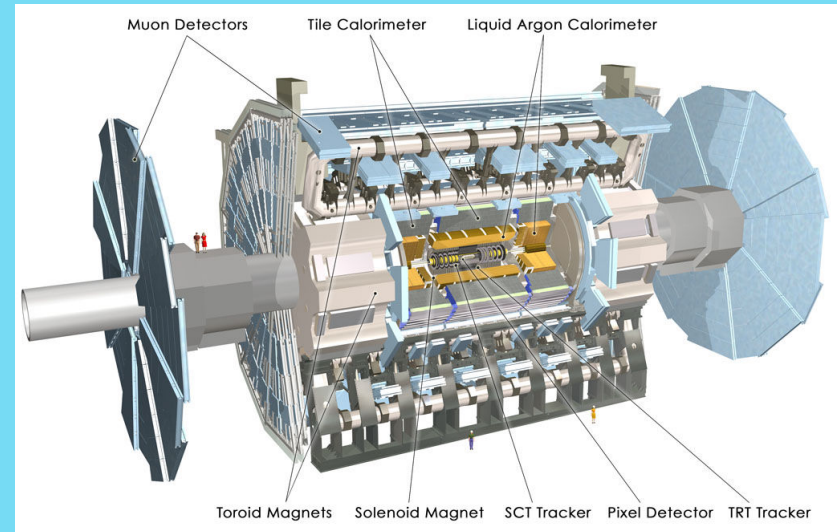
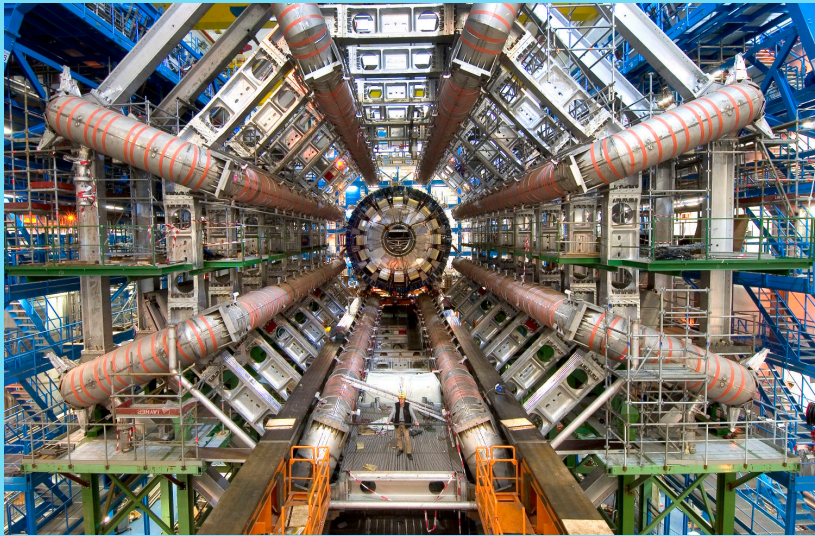


# LHC: “la macchina più complessa costruita dall’uomo”

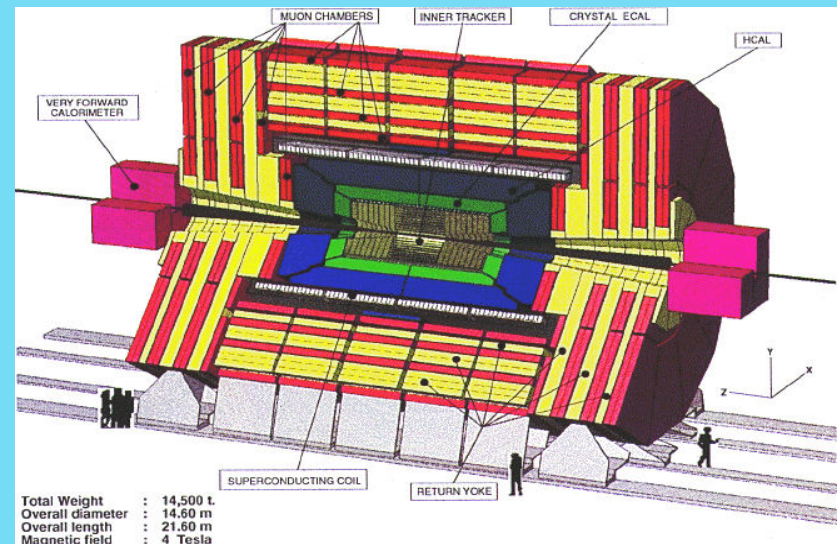
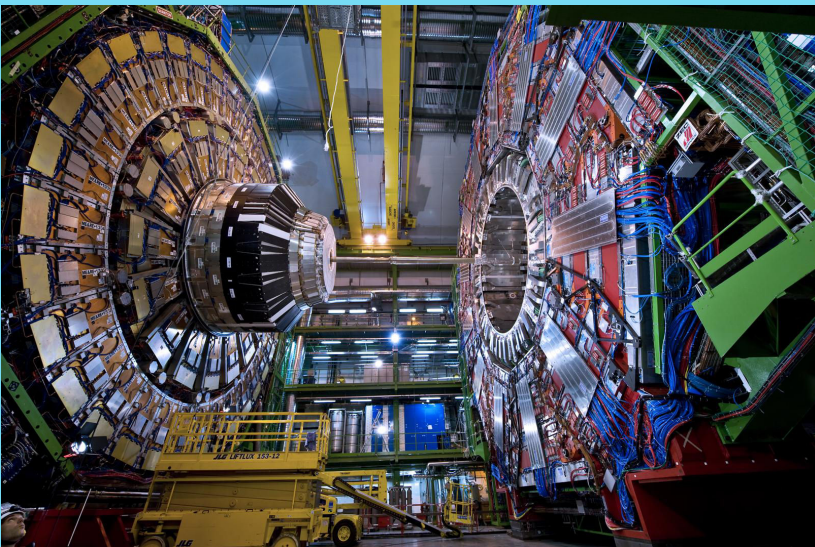


# I due giganti: ATLAS e CMS

**ATLAS** (46m x 25m x 25m, 7000 t) Il più grande rivelatore di particelle mai costruito



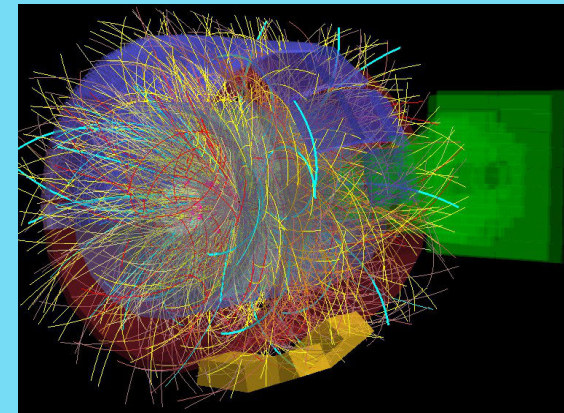
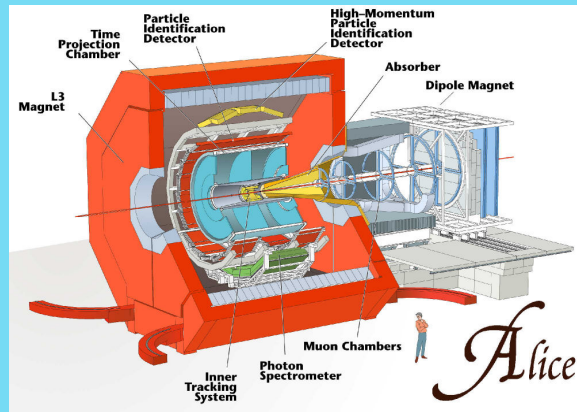
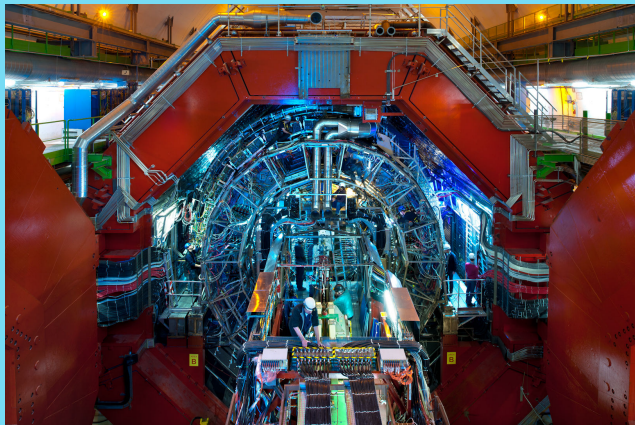
**CMS** (21m x 15m x 15m, 12500 t) specializzato nella rivelazione dei muoni



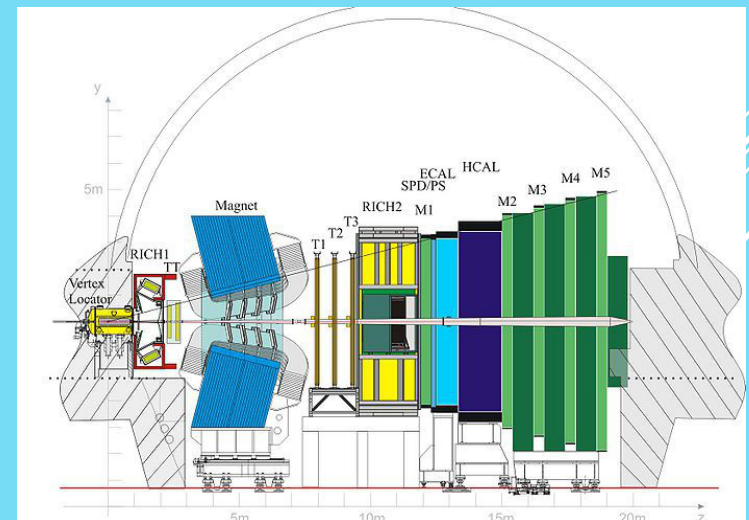


# I due più “specialistici”: ALICE e LHCb

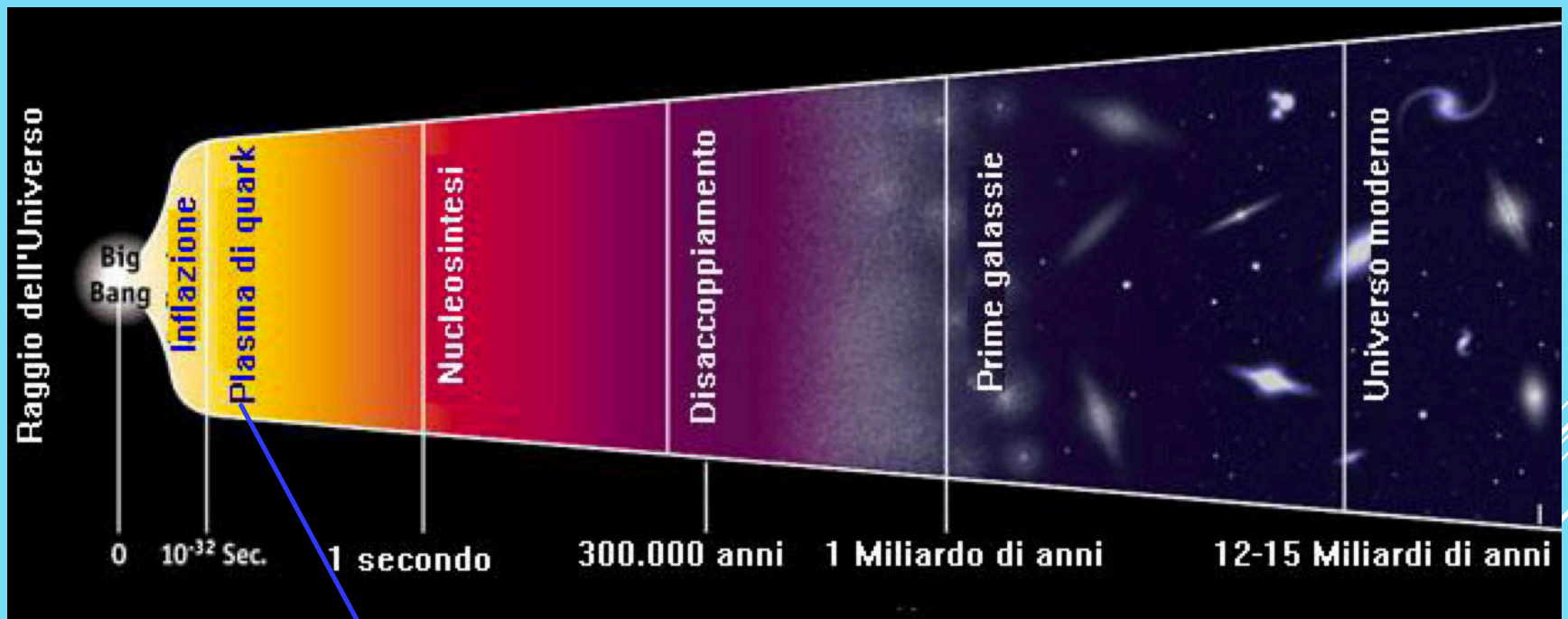
**ALICE** (26m x 16m x 16m, 10000 t) a caccia del quark-gluon-plasma



**LHCb** (21m x 10m x 13m, 4500 t) studia l'asimmetria tra materia e antimateria



# La macchina del tempo!

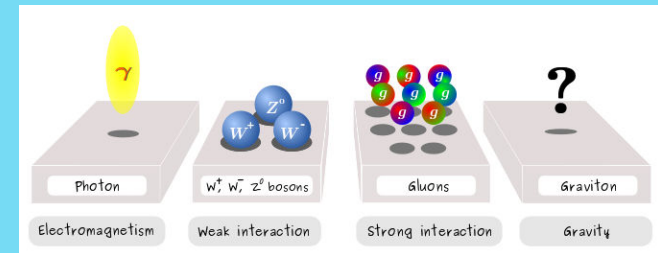
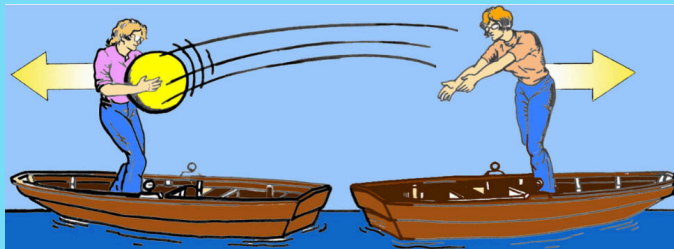
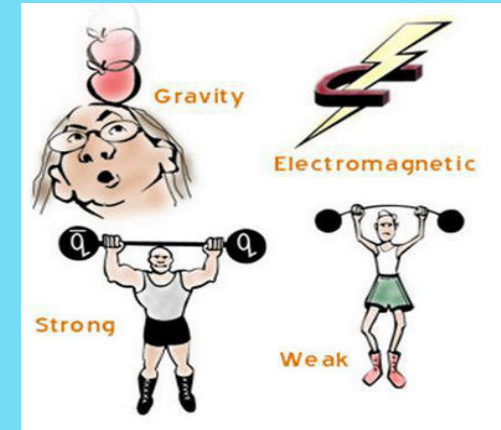


$\sim 10^{-25}s$  ( $T = 10^{17}K$ ) limite raggiungibile da **LHC**

# Il Modello Standard

# Le interazioni fondamentali

- sono le 4 forze fondamentali esistenti in natura
- Solo delle interazioni gravitazionale ed EM abbiamo esperienza diretta nella vita quotidiana, le altre due rimangono confinate nel mondo subatomico
- L'interazione tra due particelle avviene mediante lo scambio di mediatori detti **bosoni di gauge**

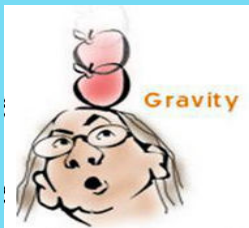


## L'interazione gravitazionale:

- mediata dal **gravitone** (non ancora scoperto)
- del tutto trascurabile su scala atomica e subatomica!
- non esiste una teoria quantistica della gravità. Resta esclusa dal Modello Standard.

## L'interazione elettromagnetica:

- mediata dal **fotone**
- Compresa a fondo con l'unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici (Maxwell)
- responsabile di numerosissimi fenomeni su scala atomica e sub-atomica
- ha un ruolo molto importante nella fisica delle particelle elementari!



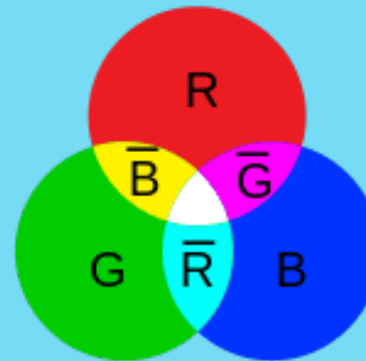
# Le interazioni fondamentali



## Interazione forte (cromodinamica quantistica):

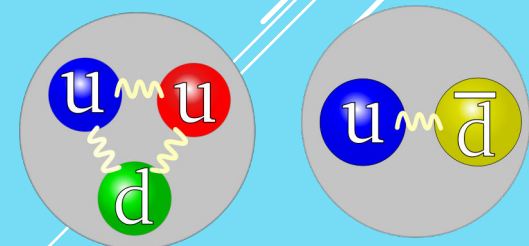
- tiene legato il nucleo atomico, contrastando la repulsione Coulombiana tra i protoni
- Su scala nucleare è circa 100 volte più forte della forza elettromagnetica!
- ha un raggio di azione piccolissimo ( $\sim 10^{-15}\text{m}$ )

- agisce tra i quark, in quanto dotati di **carica di "colore"** (**Rosso, Verde, Blu**)
- Ad ogni colore corrisponde un anti-colore (cariche opposte)



- Mediata da **8 gluoni**: particelle di massa nulla dotate di colore e anti-colore (es. **rosso-antiblu**, **blu-antiroso**, etc)

- **Le cariche di colore non possono essere isolate!**
- **In natura si osservano solo combinazioni neutre di colori**

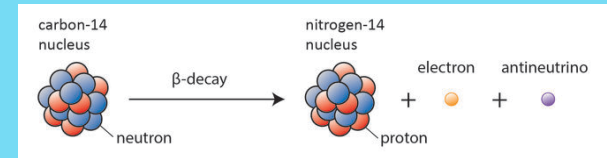
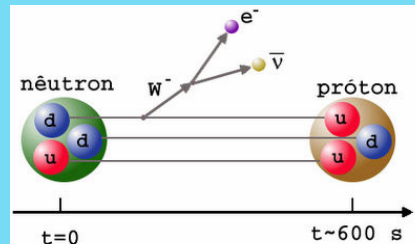
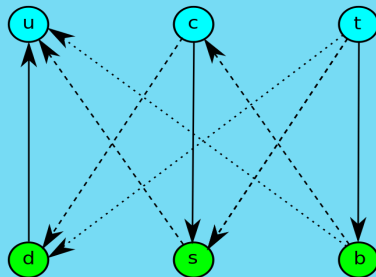


# Le interazioni fondamentali

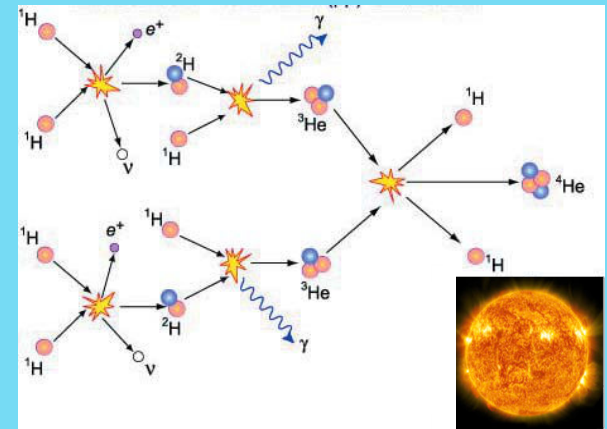


## Interazione debole:

➤ Consente trasmutazioni tra quark di tipo diverso



➤ Ha un ruolo cruciale nella **fusione termonucleare nelle stelle**: permette la formazione del deuterio a partire da due protoni consentendo la formazione dell'elio (**catena p-p**)



➤ E' molto meno intensa della forza forte ed EM

➤ Ha un raggio di azione piccolissimo:  $\sim 10^{-18}m$  ( $\sim 1/1000$  dim. del protone!)

➤ E' la sola interazione cui è sensibile il neutrino (difficilissimo da rivelare!)

➤ Mediata da 3 particelle "pesantissime" ( $\sim 100$  volte il protone!):  $W^+, W^-, Z^0$

➤ scoperte al CERN (1983) → Nobel a **C. Rubbia** e **S. Van der Meer** nel 1984

➤ **Viola alcune "simmetrie fondamentali"** delle altre 3 interazioni:

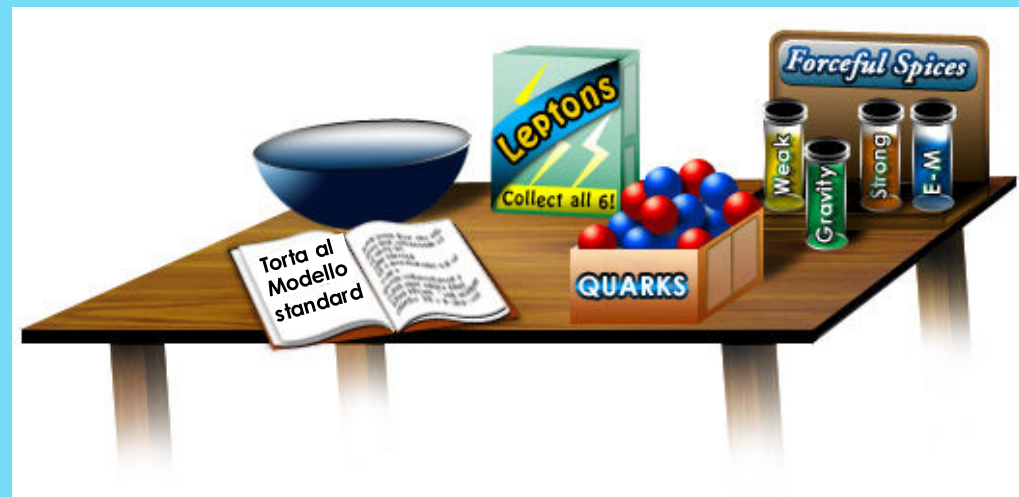
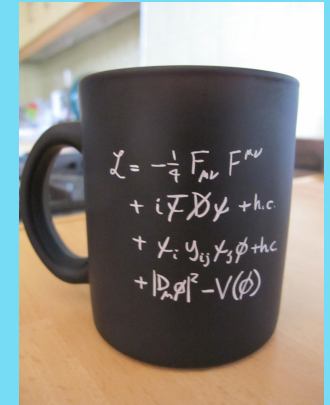
- processi visti allo specchio si comportano in modo diverso!
- particella e antiparticella possono avere comportamenti diversi!



# Il Modello Standard

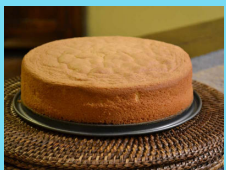
Teoria fisica che descrive tre delle quattro interazioni fondamentali (forte, EM, debole) e tutte le particelle elementari ad esse collegate

- Proposto da **Glashow, Weinberg e Salam** nel 1967 (Nobel nel 1979)
- Interazioni EM e debole unificate nell'interazione "elettrodebole"
- Descrive molto bene tutte le proprietà delle particelle osservate
- Testato in grande dettaglio in diversi esperimenti
  - misurati con grande precisione i parametri incogniti della teoria
  - verificate moltissime sue previsioni



# Il Modello Standard: gli ingredienti base

**Spin:** grandezza caratteristica di ciascuna particella (**momento angolare intrinseco**)  
 Si tratta di una quantità puramente quantistica (non ha corrispettivo in fisica classica)



**Fermioni** (spin =  $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ )  
 (particelle di materia)

**Bosoni** (spin = 0, 1, 2, ...) (messaggeri delle forze + Higgs)



**Leptoni**

**quark**

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_L$ lightest neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0
<b>e</b> electron	0.000511	-1
$\nu_M$ middle neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_H$ heaviest neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0
$\tau$ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.002	2/3
<b>d</b> down	0.005	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	173	2/3
<b>b</b> bottom	4.2	-1/3

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.39	-1
<b>W<sup>+</sup></b> W bosons	80.39	+1
<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	91.188	0

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

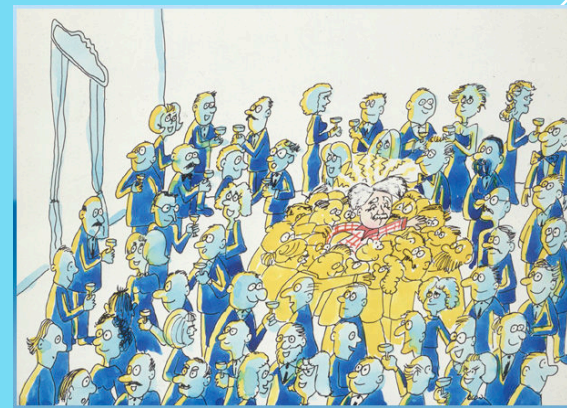
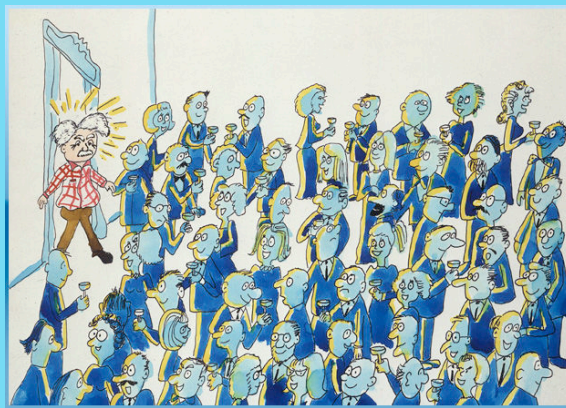
Higgs Boson spin = 0		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>H</b> Higgs	126	0



# Il bosone di Higgs: la ciliegina sulla torta



- Nel Modello Standard tutte le particelle hanno massa nulla!
- Serve un meccanismo capace di dare massa alle particelle “massive” (quark, leptoni, bosoni deboli  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  pur lasciando senza massa il fotone e i gluoni
- **Meccanismo di Higgs** (P. Higgs, F. Englert, R. Brout, 1964) genera le masse delle particelle mediante la “rottura spontanea della simmetria elettrodebole”
- Questo meccanismo richiede l'esistenza di un nuovo bosone: il **bosone di Higgs**
  - Non è il mediatore di una forza
  - Non è una particella di materia
  - Genera un campo che permea tutto lo spazio (**campo di Higgs**)
  - le particelle acquistano massa interagendo più o meno intensamente col campo di Higgs



# Il bosone di Higgs: la ciliegina sulla torta



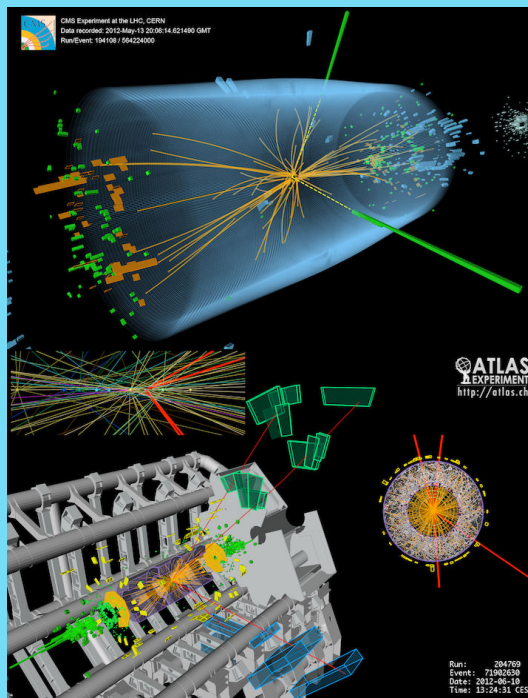
Ricercato speciale da 50 anni!



# Il bosone di Higgs: la ciliegina sulla torta



La scoperta del bosone di Higgs è stata annunciata al CERN il 4 luglio del 2012 dagli esperimenti **ATLAS** e **CMS** dell'**LHC**

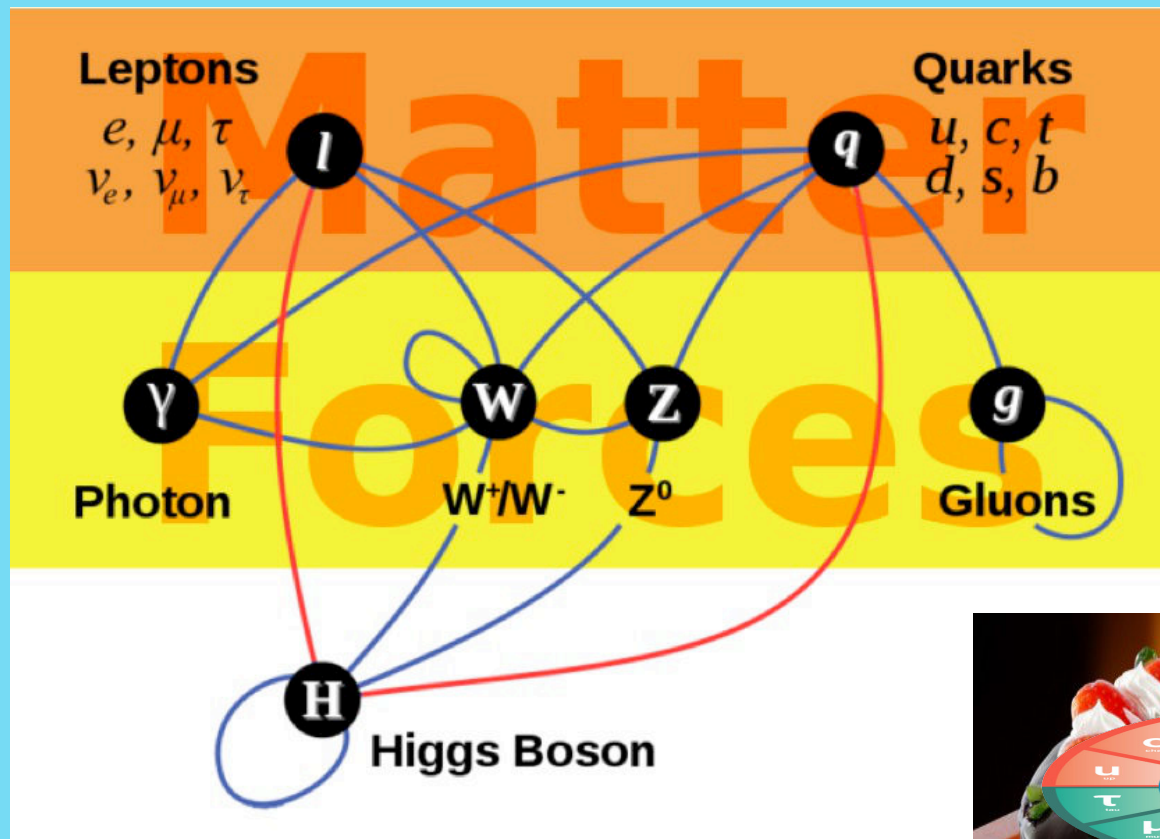


- particella neutra, di spin=0 e massa  $\sim 125 \text{ GeV}$  ( $> 100$  il protone)
- Osservata in diversi canali di decadimento
- Ulteriori ricerche negli anni successivi ne hanno confermato le proprietà

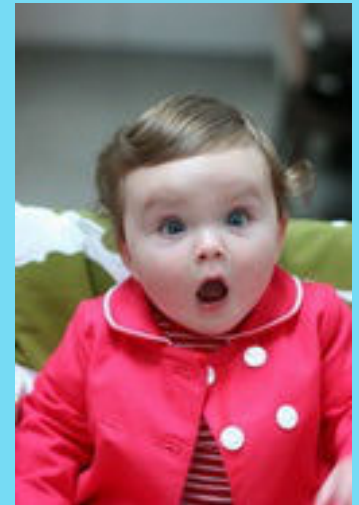


**Nobel nel 2013** per la “scoperta teorica del meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell’origine delle masse delle particelle subatomiche”

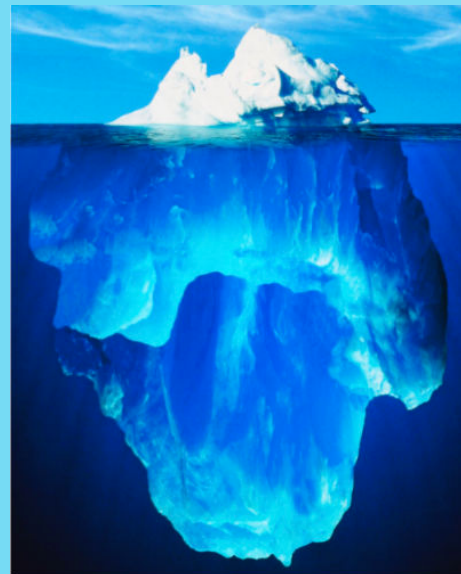
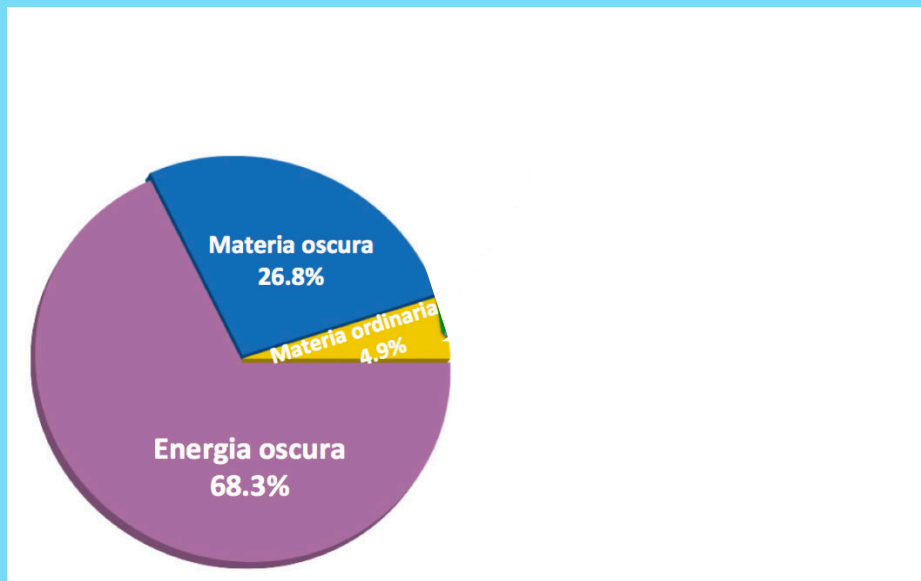
# Il Modello Standard pronto da gustare!



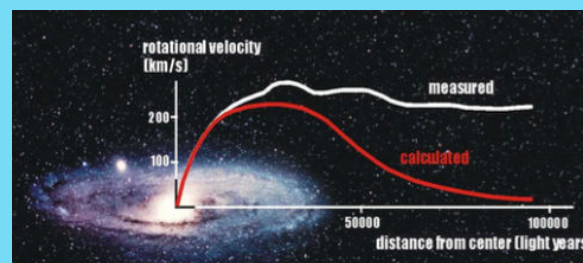
**Attenzione:** quello di cui vi ho parlato finora riguarda solo il 5% dell'Universo!!!



# Di cosa è fatto l'Universo?



L'esistenza **Materia Oscura** è dimostrata dai suoi effetti gravitazionali sulla velocità di rotazione delle galassie, ma non sappiamo di cosa è fatta!



**L'Energia oscura** è responsabile del fatto che da 5 miliardi di anni l'espansione dell'Universo sta accelerando

Di cosa è fatta? **...non ne abbiamo la più pallida idea!**

# L'asimmetria materia-antimateria nell'Universo

Il Big-Bang ha generato una uguale quantità di materia e antimateria, ma l'Universo ci appare fatto solo di materia!

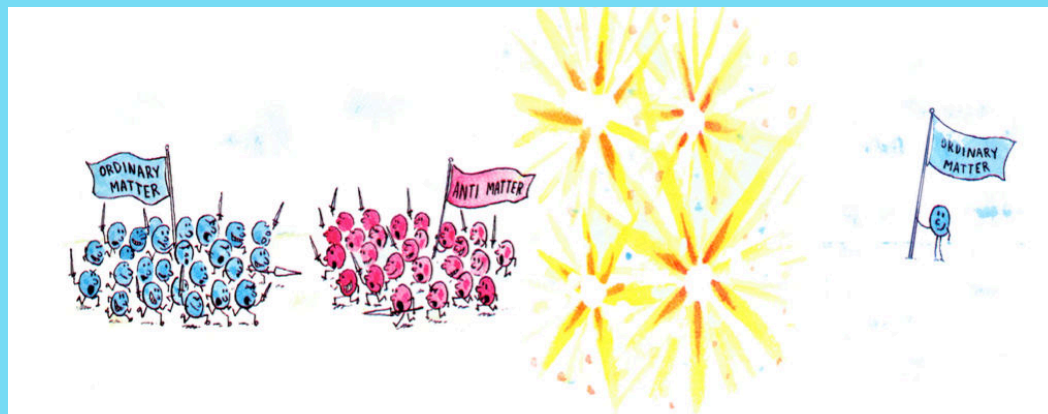
**Che fine ha fatto l'antimateria?**

- **Materia e antimateria si annichilano producendo energia.** In assenza di una asimmetria tra materia e antimateria nell'Universo primordiale, queste si sarebbero completamente annichilate lasciando un Universo fatto solo di radiazione!



- Il MS prevede un meccanismo che spiega la violazione della simmetria materia-antimateria (**violazione di CP**)

- l'entità di tale asimmetria è troppo piccola rispetto a quella osservata nell'Universo!



- **Si devono cercare nuovi fenomeni al di là di quelli previsti dal MS!**

# La torta era buona, ma la nostra fame non si è placata!

Il Modello standard descrive molto bene le proprietà delle particelle e delle interazioni elementari. Tuttavia restano molte questioni fondamentali irrisolte:

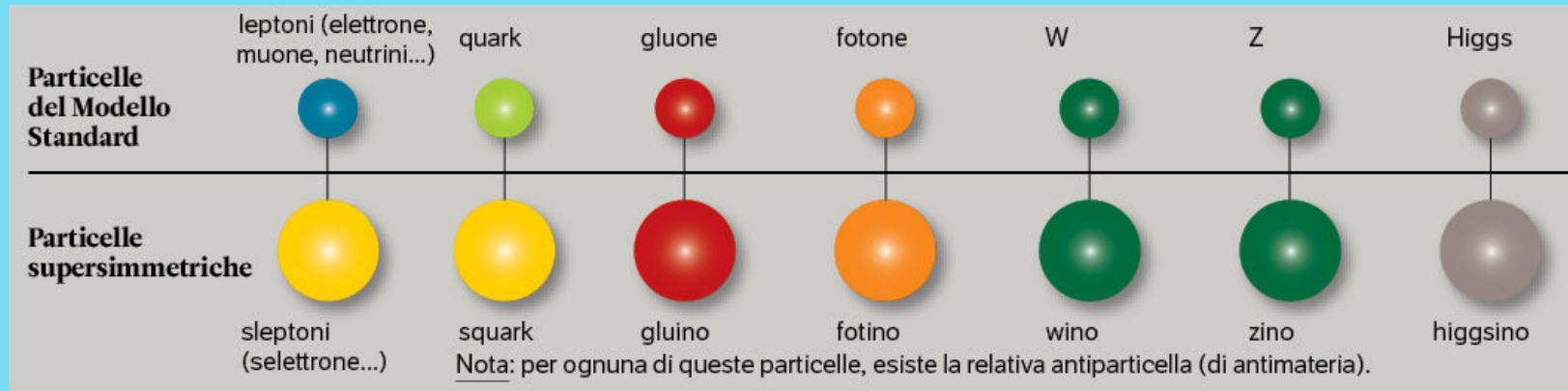
- perché esistono 3 famiglie di quark e leptoni? Non ne bastava una?
- Perché le particelle hanno masse così diverse:  $m_\nu < 1 \text{ eV}$ ,  $m_t = 173 \text{ GeV}$ ?
- Perché sono 4 le interazioni fondamentali? Perché ci appaiono così diverse?
- Che fine ha fatto l'antimateria nell'Universo?
- Che cos'è la Materia Oscura? ...e l'Energia Oscura?
- ....



# La supersimmetria

Molti dei problemi aperti del Modello Standard potrebbero essere risolti da una teoria più generale detta “**Supersimmetria**”

Ad ogni fermione del MS (elettrone, quark) corrisponde un bosone nel modello supersimmetrico, e ad ogni bosone corrisponde un fermione



Le particelle supersimmetriche, se esistono, hanno masse molto maggiori di quelle dei partner del MS. Fino ad ora non sono state scoperte ...

**...Ma la caccia al LHC è appena iniziata!**



# Cosa ci riserva il futuro?

Il Modello Standard delle particelle elementari spiega una grande quantità di dati sperimentali con una precisione sorprendente!

Ci sono tuttavia diverse questioni fondamentali che non possono essere spiegate dal MS ...per es. **di cosa è fatto il il 95% dell'Universo?**

Nonostante gli incredibili progressi dell'ultimo secolo, la struttura intima della materia non è ancora compresa a fondo

Grazie ad LHC e ad altri esperimenti effettuati nei laboratori di tutto il mondo saremo presto in grado di esplorare la fisica oltre il Modello Standard e di comprendere più a fondo l'origine e l'evoluzione dell'Universo!



# Grazie a tutti per l'attenzione!!!

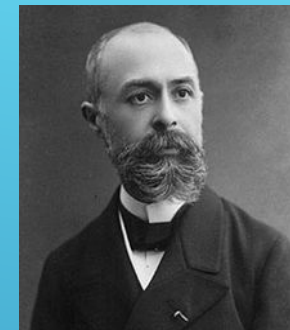


# Back up

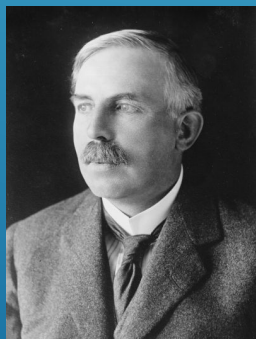
# La scoperta della radioattività naturale

**H. Becquerel (1895):** decise di studiare la fluorescenza di alcuni minerali di uranio esposti alla luce del sole. Prima di effettuare l'esperimento ripose i cristalli in un cassetto per qualche giorno, insieme alla lastra fotografica.

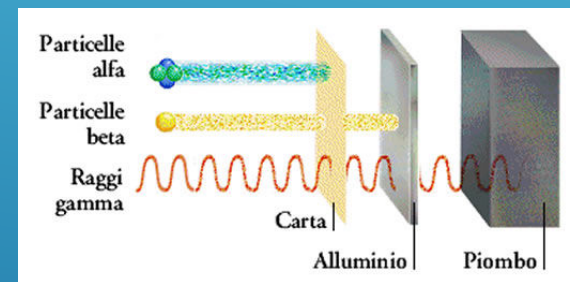
Sviluppando la lastra fotografica ancora inutilizzata notò che questa era stata impressionata anche senza aver indotto la fluorescenza!



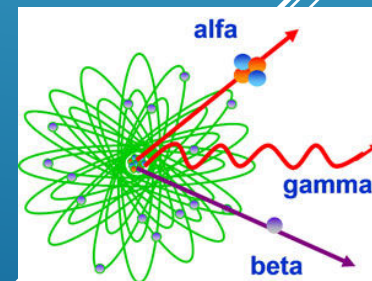
**Una misteriosa radiazione veniva emessa spontaneamente dall'uranio!**



**E. Rutherford (1898):** scoprì che raggi di Becquerel erano costituiti da diversi tipi di radiazioni emesse dagli atomi: i **raggi  $\alpha$  e  $\beta$** , a cui si aggiunsero i  $\gamma$ .



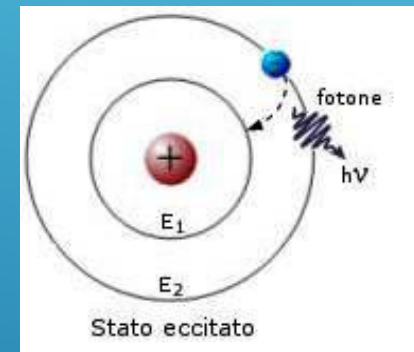
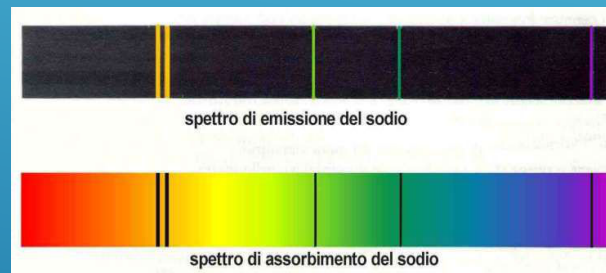
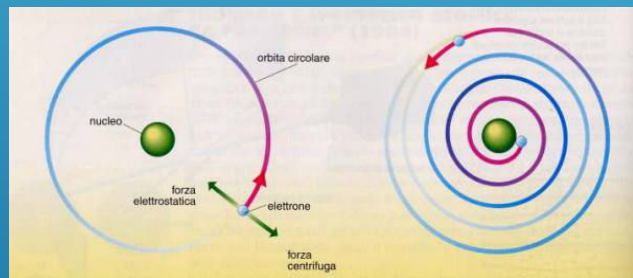
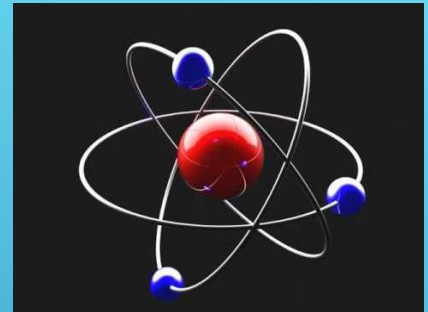
La radioattività era dunque l'emissione spontanea di particelle da parte di alcuni atomi "instabili"  
Questa intuizione gli valse il Nobel in Chimica (1908).



# La struttura dell'atomo

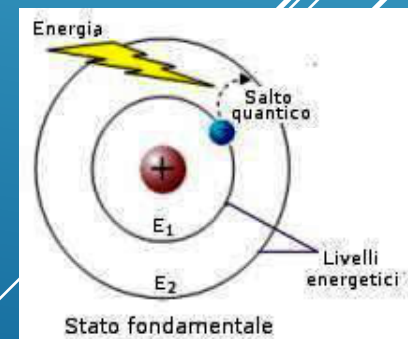
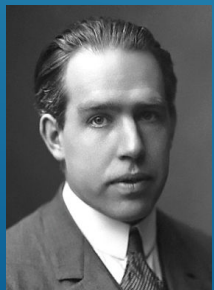
## Modello "planetario" di Rutherford:

- L'atomo è essenzialmente vuoto
- La carica positiva è concentrata in un nucleo estremamente compatto, almeno 10000 volte più piccolo delle dimensioni dell'atomo!
- Gli elettroni orbitano intorno al nucleo come i pianeti intorno alla propria stella
- ...ma anche il modello di Rutherford creava delle difficoltà insormontabili!



## N. Bohr (1913)

- gli elettroni atomici potevano occupare solo determinate orbite, corrispondenti a ben precisi livelli di energia
- Quando l'elettrone percorre un'orbita non irraggia.
- l'emissione o l'assorbimento di energia sotto forma di onde EM (fotoni) avviene solo se l'elettrone 'salta' da un'orbita all'altra.



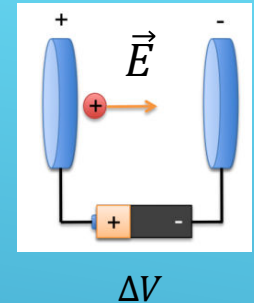
# Acceleratori e rivelatori di particelle

# Come funziona un acceleratore di particelle ?

Una particella carica (es. elettrone, protone, nucleo atomico) può essere accelerata mediante una differenza di potenziale

$$F = qE = ma \Rightarrow a = \frac{qE}{m}$$

$$K = q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2$$



Consideriamo il caso di un **protone** accelerato da una d.d.p.  $\Delta V = 5 \text{ KV} = 5000 \text{ V}$

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 5000 \text{ V}}{1.67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}}} = 978818 \text{ m/s} \sim 10^6 \text{ m/s!}$$



Ma e' davvero tanto veloce?  $\beta = \frac{v}{c} \approx \frac{10^6 \text{ m/s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \frac{1}{300} = 0.0033$

...possiamo trascurare gli effetti relativistici!

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \approx \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{1.67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \approx 4 \cdot 10^{-13} \text{ m} \sim 100 \text{ volte le dimensioni di un nucleo}$$

- ...troppo "lento" per poter studiare la struttura interna di un nucleo atomico ( $< 10^{-14} \text{ m}$ )
- Per ottenere  $\lambda \approx 10^{-15} \text{ m}$  occorrerebbe una d.d.p. enorme:  $\Delta V \approx 8 \cdot 10^8 \text{ V} = 800 \text{ MV!!!}$
- Meglio aggiungere diversi step di accelerazione in sequenza!



# Come funziona un acceleratore di particelle ?

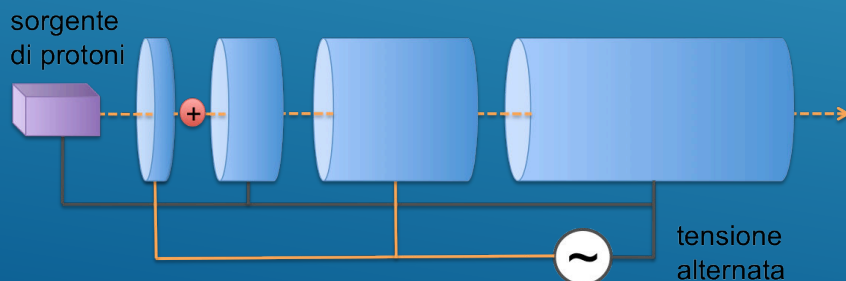


**Ad ogni step il protone acquista energia cinetica pari a  $q\Delta V$**

Se la distanza tra gli elettrodi è costante, il tempo necessario a passare tra il 2° e il 3° elettrodo è inferiore a quello necessario tra il 1° e il 2°, essendo la velocità del protone aumentata.

Soluzioni tipiche:

1. distanziare opportunamente gli elettrodi, aumentando lo spazio tra due accelerazioni successive
2. aumentare il ritmo a cui si inverte la polarità del campo in modo da sincronizzarsi con il passaggio delle particelle (utilizzando una tensione alternata a frequenza variabile)

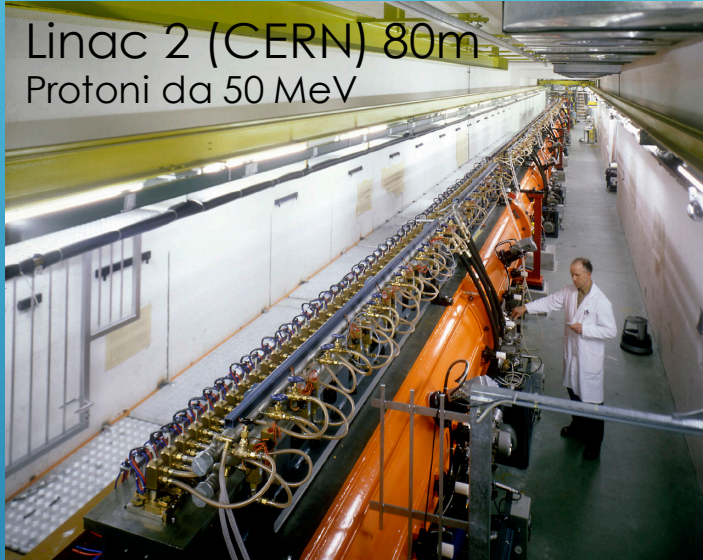


**Cavità risonante**



# Come funziona un acceleratore di particelle ?

Gli acceleratori lineari, detti **linac**, possono raggiungere lunghezze ragguardevoli



Linac (J-PARC) 300 m  
Protoni fino a 400 MeV

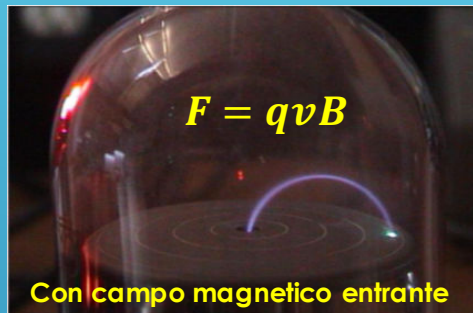
# Come funziona un acceleratore di particelle ?

E' possibile costruire acceleratori più compatti?

Si, sfruttando i campi magnetici per curvare la traiettoria delle particelle!



In assenza di campo magnetico



$$F = qvB$$

Con campo magnetico entrante

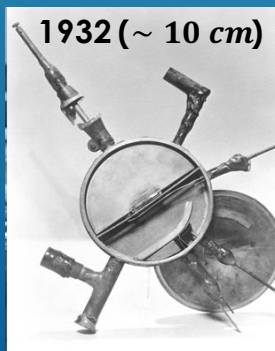
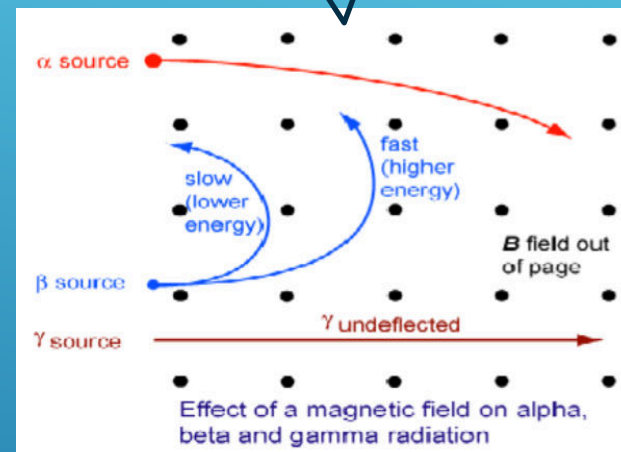
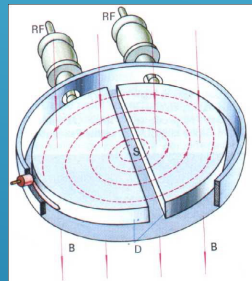
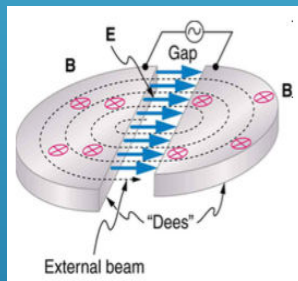
$$r = \frac{p}{qB} = \frac{mv}{qB}$$

## Il ciclotrone

E.O. Lawrence



Nobel nel 1939



1932 (~ 10 cm)



1939 (152 cm)



Ciclotrone superconduttore (LNS)



# Come funziona un acceleratore di particelle ?

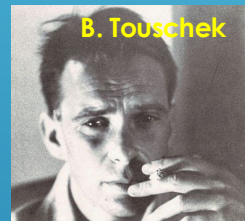
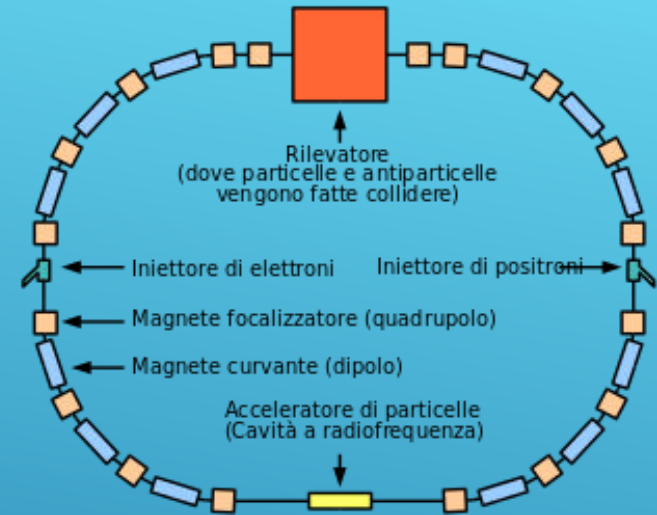
Oggi molto usati anche in medicina, per la cura dei tumori con fasci di protoni o di  $^{12}\text{C}$



# Come funziona un acceleratore di particelle ?

## Il Sincrotrone

- I **dipoli magnetici** curvano la traiettoria della particella mantenendola su un'orbita circolare
- Le particelle, raggruppate in pacchetti, vengono accelerate ad ogni giro da **cavità a radiofrequenza**
- Quando si è raggiunta l'energia voluta il fascio viene focalizzato sul bersaglio (**bersaglio fisso**) o fatto collidere con un altro fascio ruotante in senso inverso (**collider**)
- I **quadrupoli magnetici** "strizzano" il fascio di particelle rendendolo estremamente sottile e concentrato per aumentare il numero di collisioni al secondo (**luminosità**)
- Tutto avviene all'interno di un tubo da **alto vuoto**, in modo da ridurre al massimo gli urti tra il fascio e il gas residuo (che causano il deterioramento del fascio)
- Negli **anelli di accumulazione** i pacchetti di particelle vengono gradualmente aumentati prima di accelerarli e farli collidere (oggi sono gli acceleratori più utilizzati)

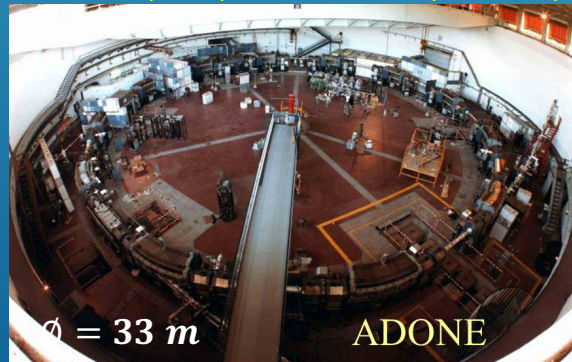


**AdA** (1961) collider  $e^+e^-$  (0.25 GeV)



$\varnothing = 160\text{cm}$

**Adone** (1968) collider  $e^+e^-$  (1.5 GeV)



$\varnothing = 33\text{ m}$

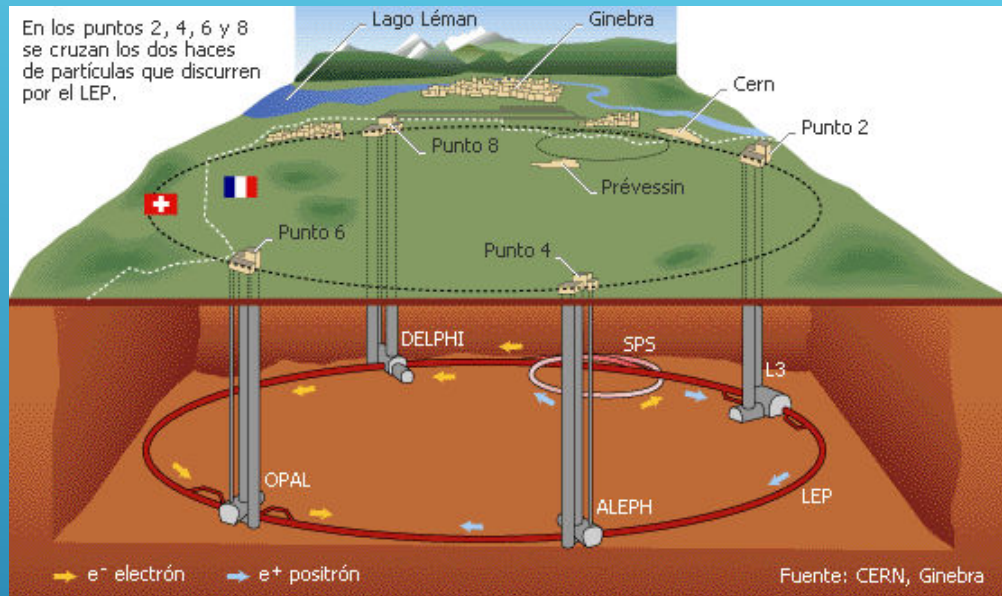
ADONE

**ISR** (1971) collider p-p (30 GeV)



$\varnothing = 150\text{m}$

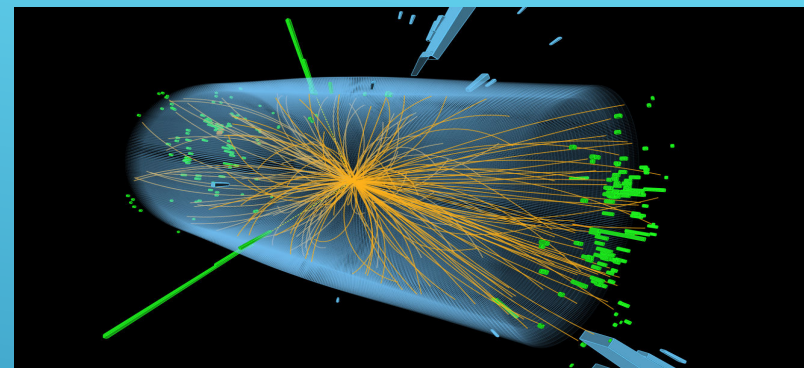
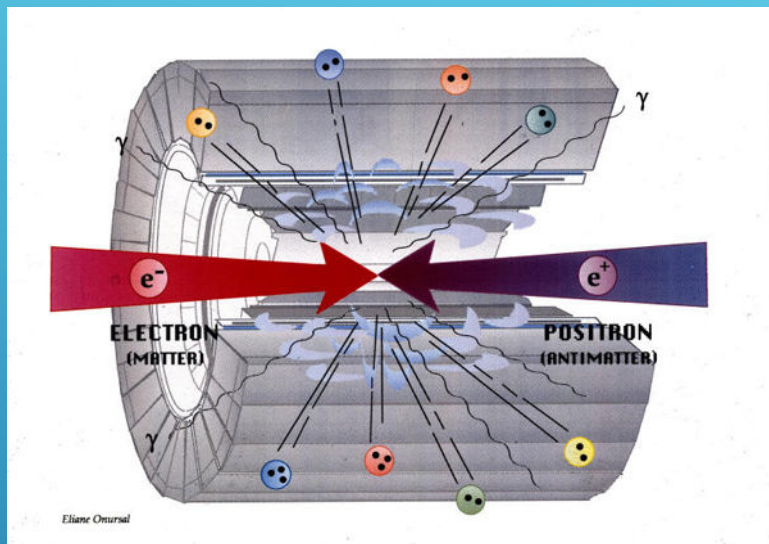
# LEP (Large Electron-Positron Collider)



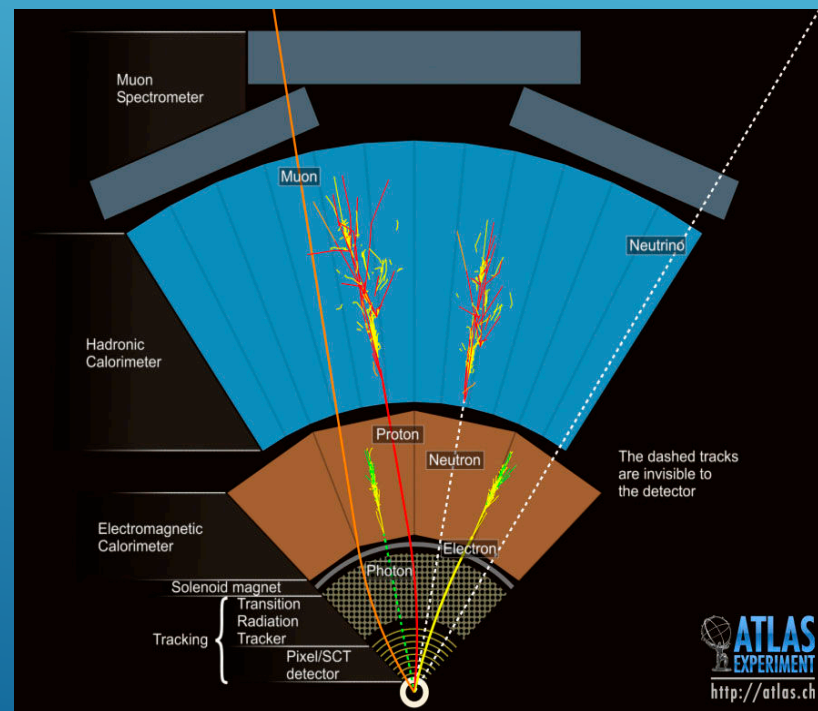
- Collider e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>
- In funzione al CERN dal 1989 al 2000
- Tunnel: 27km di circonferenza, 100m sotto terra
- Energia massima: 104.5 GeV per fascio (344 cavità ris.)
- 4 grossi esperimenti: **ALEPH, DELPHI, OPAL, L3**
- Ha consentito di effettuare misure di altissima precisione dei parametri del **Modello Standard**



# Ma come funziona un rivelatore di particelle?



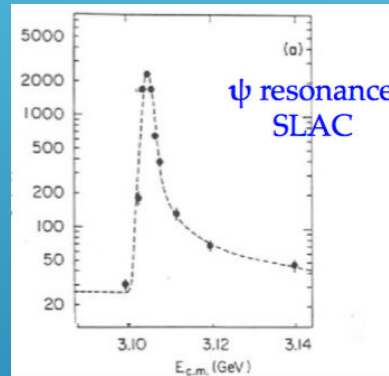
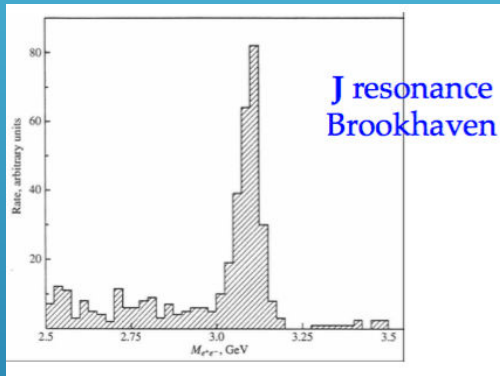
	camera a deriva	colorimetro elettromagnetico	colorimetro adronico	rivelatore muoni
fotoni				
elettroni				
muoni				
$\pi$ , protoni				
neutroni				



# La scoperta dei quark pesanti

L'esistenza di un quarto quark ("charm") fu prevista nel 1970 da Glashow, Iliopoulos e Maiani per spiegare alcune inconsistenze tra dati e teoria (meccanismo GIM).

Fu osservato per la prima volta nel 1974 con la scoperta del **mesone J/ψ**, contemporaneamente da due esperimenti, uno a SLAC e l'altro a BNL

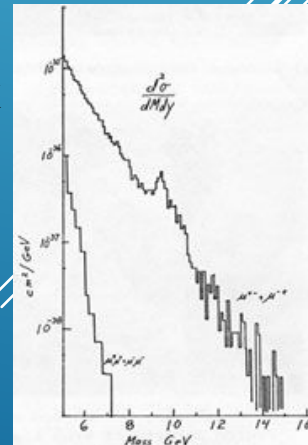


- Il charm ha massa  $\approx$  al protone e carica  $+\frac{2}{3}e$
- Successivamente vennero scoperti mesoni e barioni che sono combinazioni di un quark charm e di un quark leggero

Nel 1973, per spiegare uno strano fenomeno osservato (**violazione di CP**) venne teorizzata da **M. Kobayashi** e **T. Maskawa** l'esistenza di altri 2 quark

L'esistenza del quark **bottom** fu confermata nel 1977 al Fermilab con la scoperta del **mesone Υ**

- Il bottom ha massa  $\sim 5$  quella del protone e carica  $-\frac{1}{3}e$
- Successivamente vennero scoperti mesoni e barioni che sono combinazioni di un quark bottom e di un quark leggero o un charm

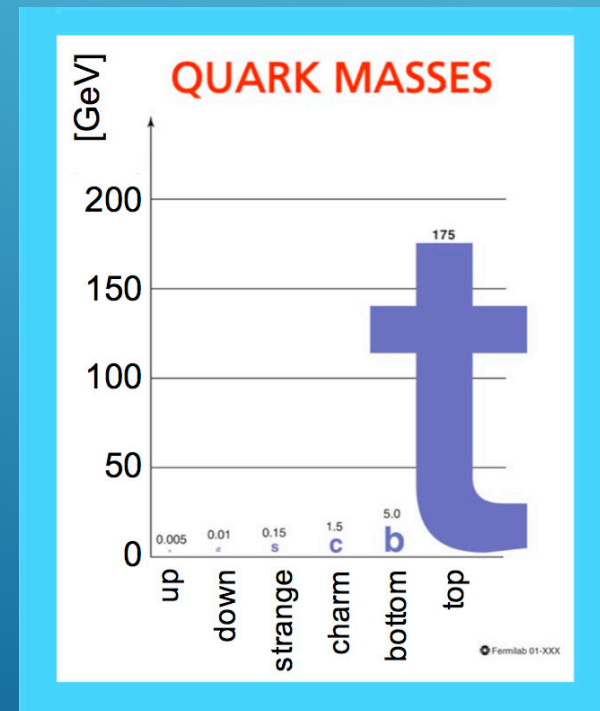
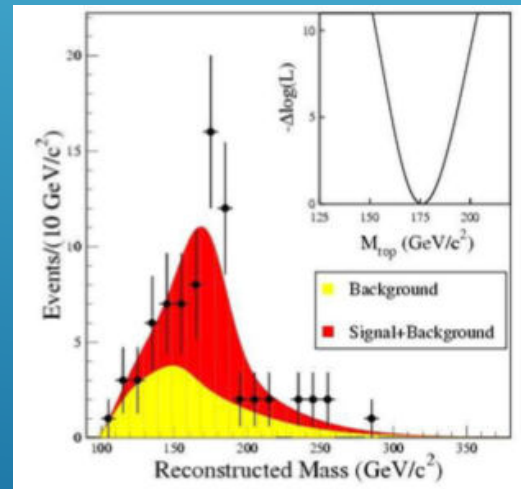
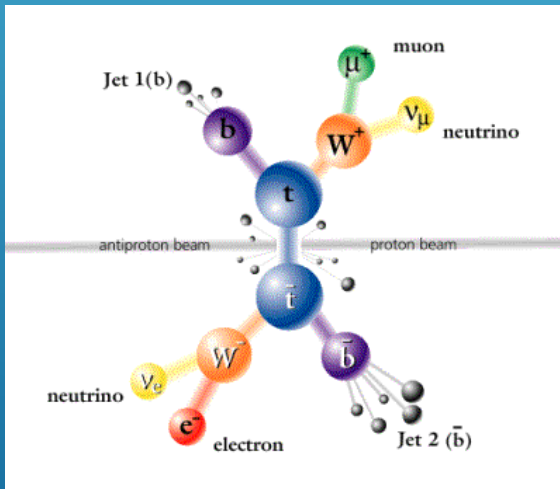
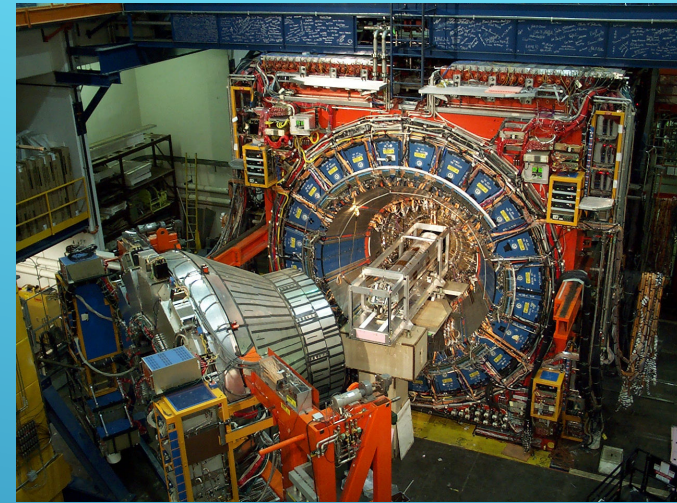




# La scoperta dei quark pesanti

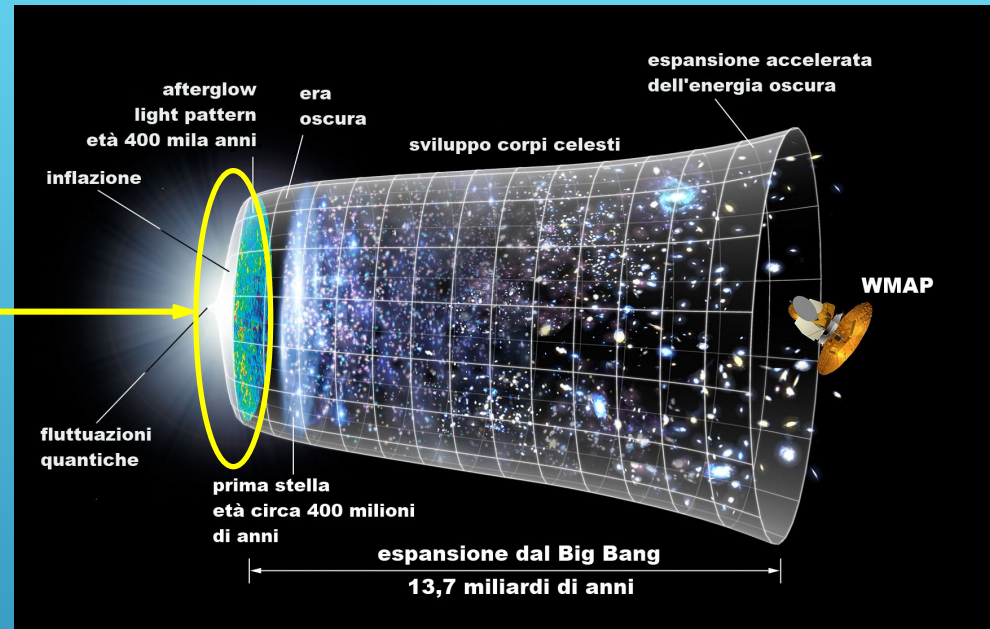
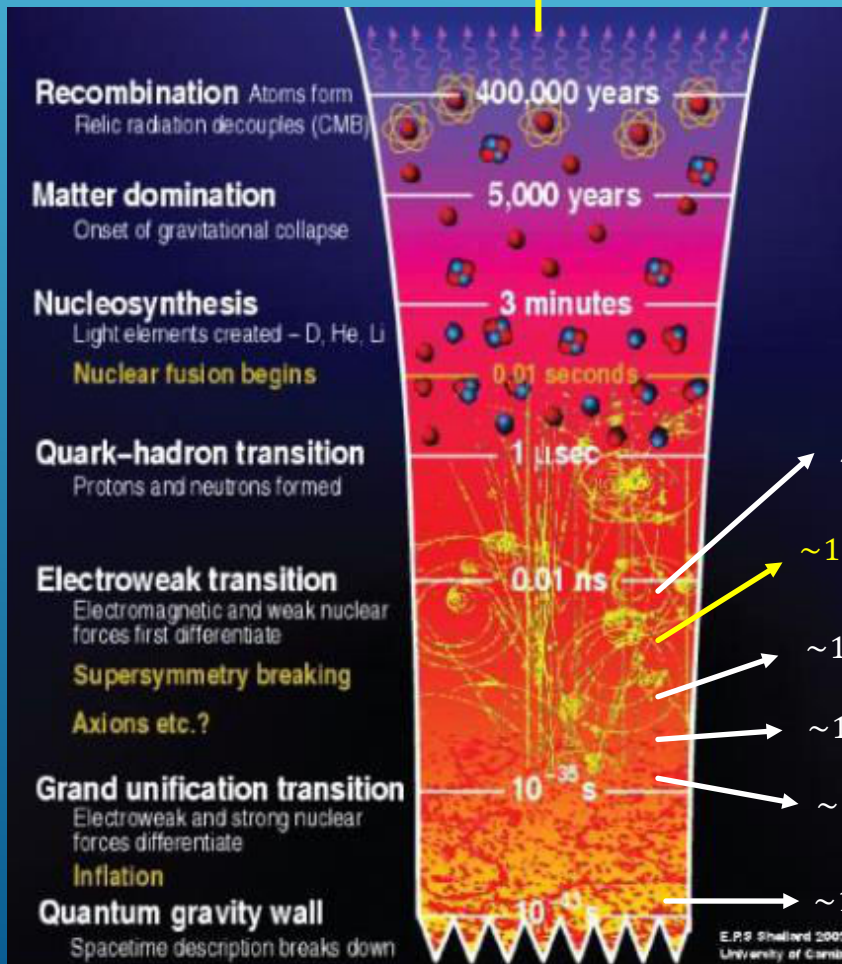
La scoperta del sesto quark è avvenuta dopo molti anni di ricerche infruttuose, per via della sua enorme massa (quasi 200 volte quella del protone!).

Il quark **top** fu scoperto nel 1994 in collisioni protone-antiprotone di altissime energie presso l'acceleratore Tevatron del Fermilab (Chicago) con l'esperimento **CDF**



- E' la particella più pesante scoperta finora!
- Ha carica elettrica  $+\frac{2}{3}e$
- Non si lega a nessun altro quark per formare adroni

# L'Universo primordiale



- ~10<sup>-12</sup>s ( $T = 10^{15}$  K) int. debole ed elettromagnetica si separano
- ~10<sup>-25</sup>s ( $T = 10^{17}$  K) limite raggiungibile da LHC (materia deconfinata)
- ~10<sup>-28</sup>s asimmetria materia-antimateria
- ~10<sup>-30</sup>s probabile formazione della materia oscura
- ~10<sup>-32</sup>s ( $T = 10^{27}$  K) interazioni forte ed elettrodebole si separano
- ~10<sup>-43</sup>s ( $T = 10^{32}$  K) la gravità si separa dalle altre forze

# L'evoluzione dell'Universo

