

# Viaggio nell'infinitamente piccolo

## La fisica delle particelle elementari

Concezio Bozzi

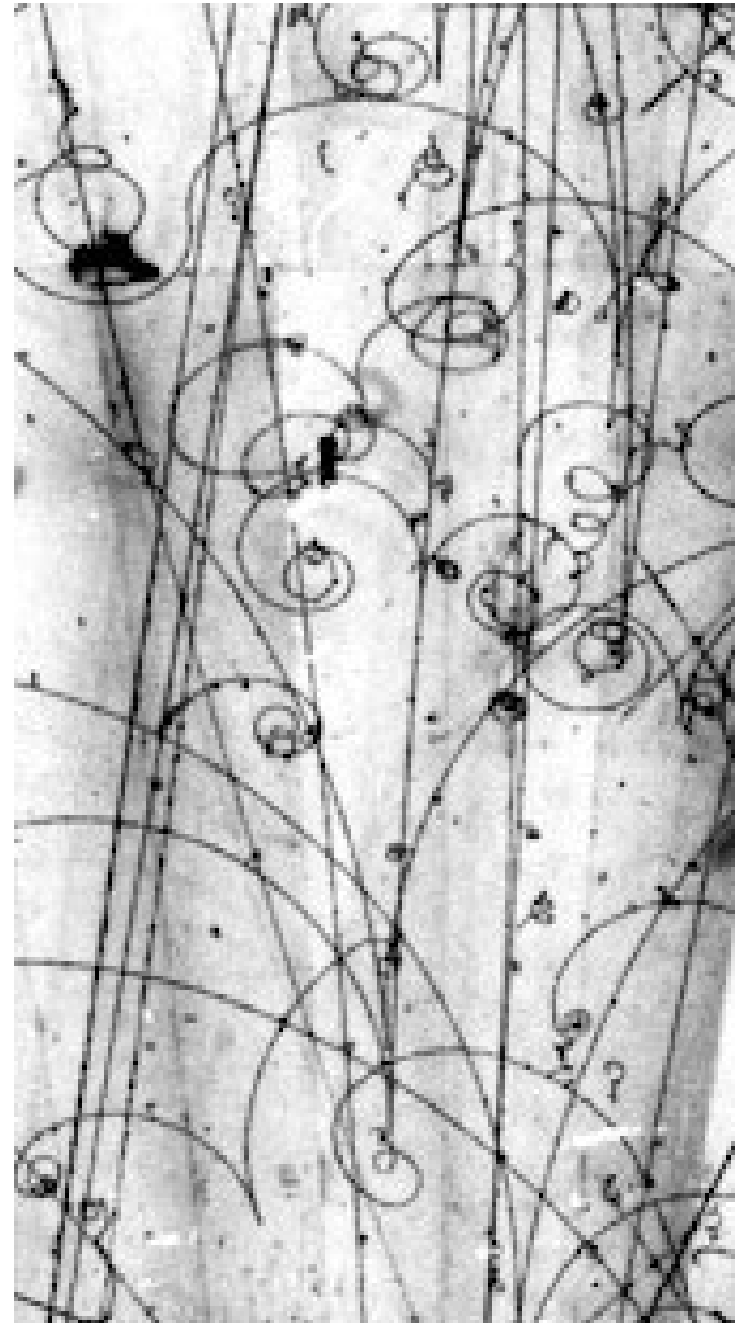
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Ferrara



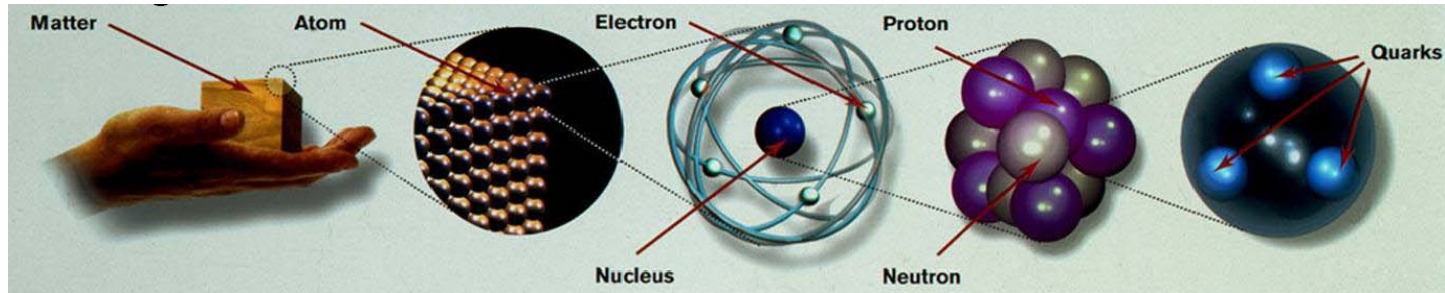
Corso di Eccellenza, Ferrara, 21 Aprile 2010

# Sommario

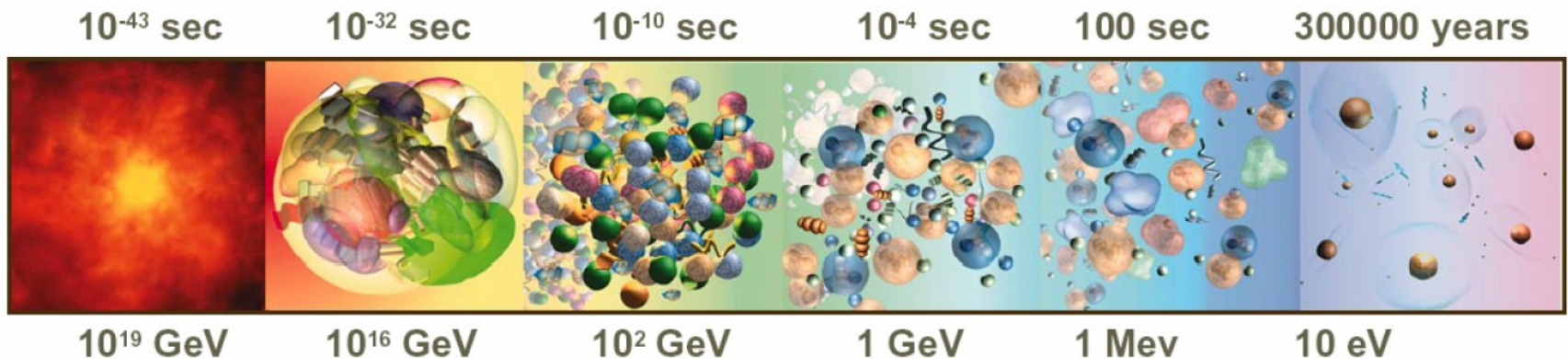
- Introduzione
  - Scopo del Gioco
  - Regole del Gioco
  - Strumenti del Gioco
- Il Gioco:
  - Excursus storico
  - Lo stato attuale
  - Le prospettive



# Lo Scopo del Gioco



- Identificare i costituenti fondamentali della materia
- Identificare le forze cui essi sono soggetti
- Ricreare in Laboratorio particelle estinte dai primi istanti del Big Bang e capire i meccanismi all'origine dell'Universo



# Le Regole del Gioco

## Su scala microscopica

### MECCANICA QUANTISTICA

- Dualismo onda-particella
- Relazione di indeterminazione
- Probabilismo

### RELATIVITA' RISTRETTA


$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- $c$  velocità assoluta
- Dilatazione dei tempi
- Non-conservazione della massa

# Meccanica Quantistica

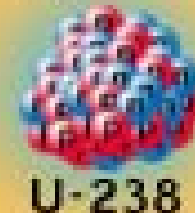


- Le interazioni e i decadimenti delle particelle sono descritte dalla **meccanica quantistica** (più precisamente, dalla teoria dei campi quantistico-relativistica)
- Le particelle si comportano in una maniera **parecchio diversa** dal senso comune
  - **Dualismo** onda-corpuscolo: fenomeni di interferenza
  - **Principio di esclusione** di Pauli (-> chimica)
  - La M.Q. spiega il mondo microscopico in **termini probabilistici**
  - Non possiamo predire cosa **succederà** ma solo quello che **potrebbe succedere**
  - Vite medie, rapporti di diramazione, sezioni d'urto, etc.

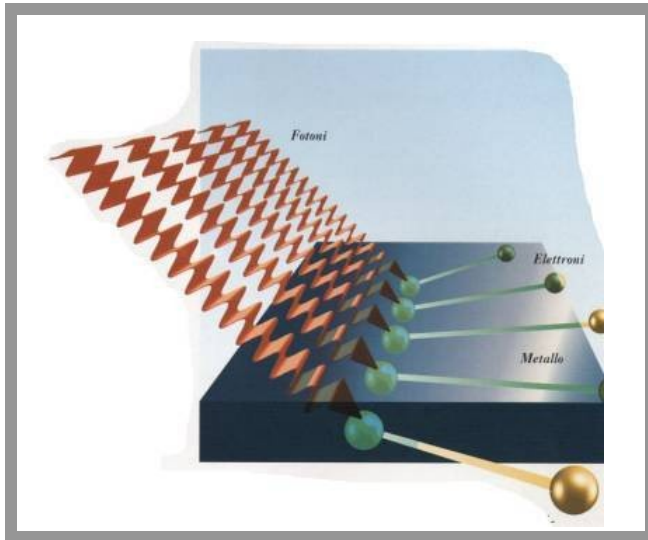


You think the lottery has bad odds? I only have a 50/50 chance of decaying once every 4,460,000,000 years. Sheesh. Bunch of whiners.

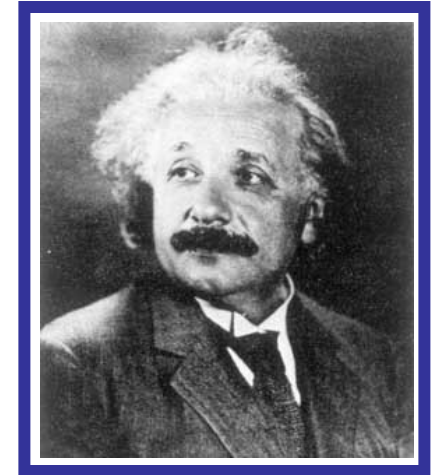
bi



# Le onde sono particelle...



Scoperta:  
Hertz 1887



Teoria: Einstein  
1905

## EFFETTO FOTOELETTRICO

- ◆ Effetto a soglia:  $\nu > \nu_s$
- ◆  $N_{\text{elett.}} \sim$  intensità dell' onda
- ◆  $E_{\text{elett.}} \sim$  frequenza  $\nu$  dell'onda

Quanti di luce: FOTONI

$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W$$

# ...e le particelle sono onde!

Processi di diffrazione:

De Broglie 1923:

anche le "particelle"  
sono "onde"

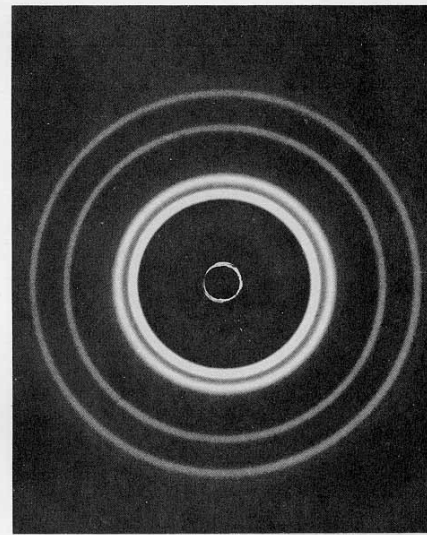


$$p = h/\lambda$$

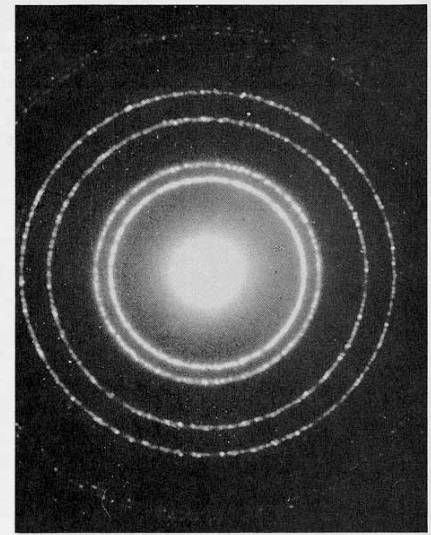


$$\lambda = h/p$$

Raggi X



Elettroni

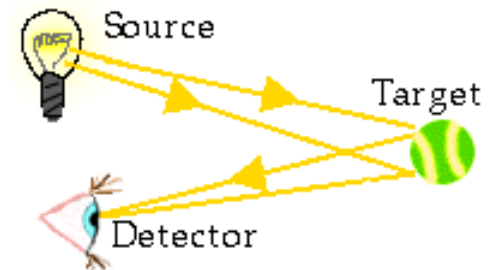


Davisson e Germer 1927

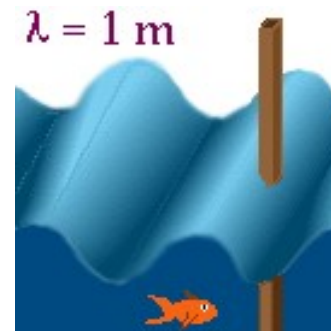
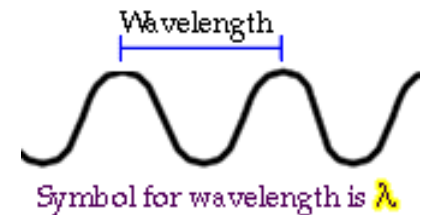
- relazione di indeterminazione  $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
- determinismo  $\rightarrow$  probabilismo

# Una conseguenza interessante

Noi *percepriamo il mondo* tramite un meccanismo *sorgente-bersaglio* (I pipistrelli usano le onde sonore)



Il livello di dettaglio è limitato dalla **lunghezza d'onda**. La luce visibile non ci consente di “vedere” oggetti *più piccoli di una cellula*





# Lunghezze d'onda piccole

DeBroglie: le particelle hanno

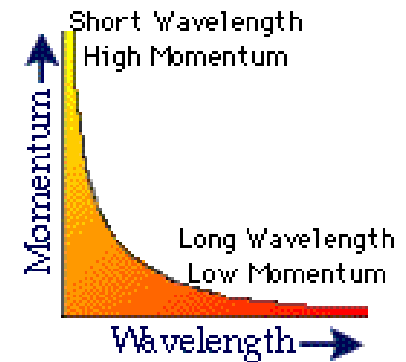
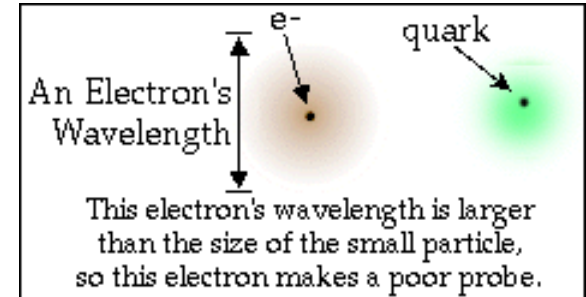
*Proprietà ondulatorie*


→ usiamo le particelle come *sonde*

Ad esempio: **microscopio elettronico!**

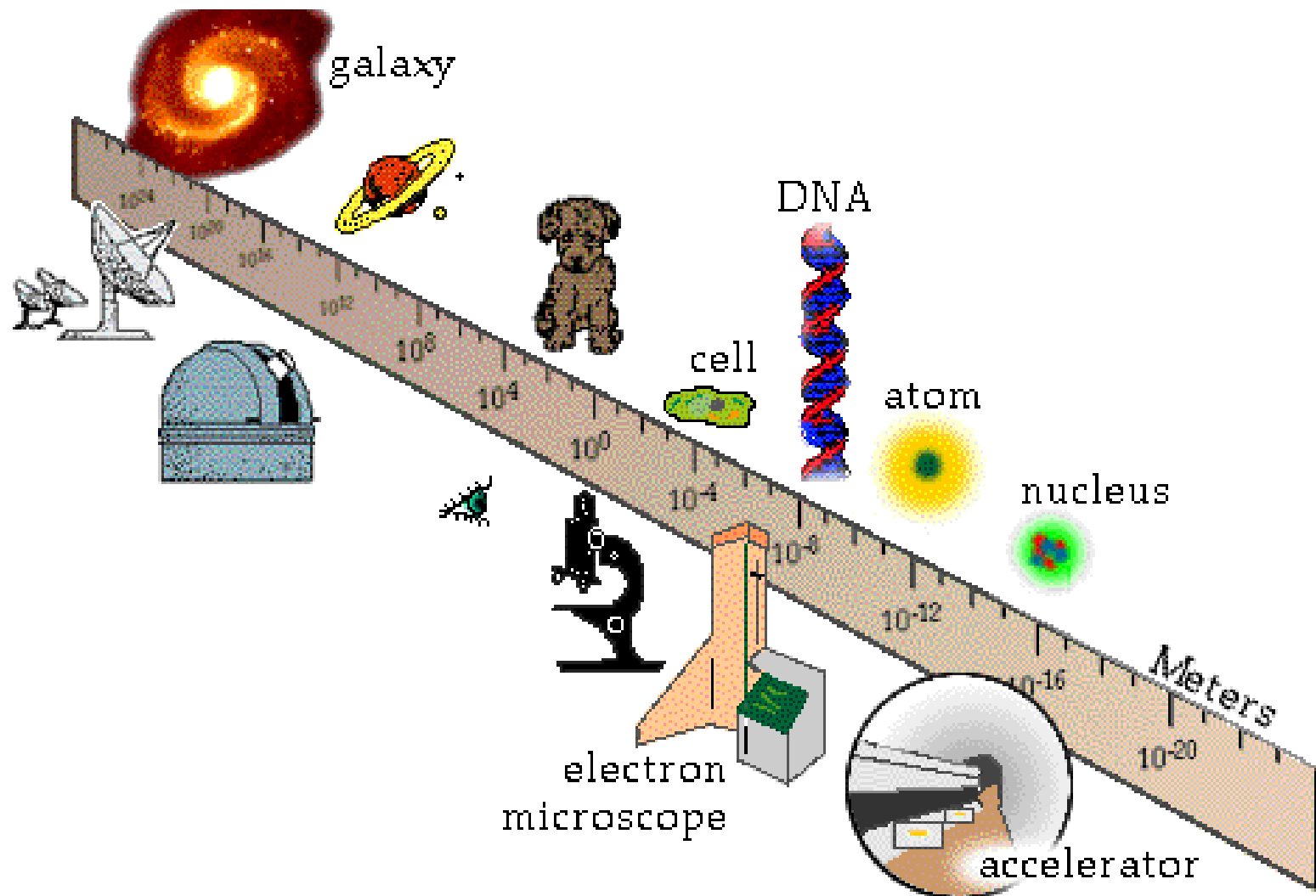
**Lunghezza d'onda inversamente  
proporzionale all'impulso!  $\lambda = h/p$**

- Si accumulano particelle in un **acceleratore**.
- *Si dà loro un impulso grande* accelerandole a *velocità molto vicine alla velocità della luce*.
- Dato che le particelle hanno un impulso grande, la loro *lunghezza d'onda* è *molto piccola*.
- *Si fanno collidere* le particelle-sonda sul **bersaglio** e si *registra* ciò che succede.

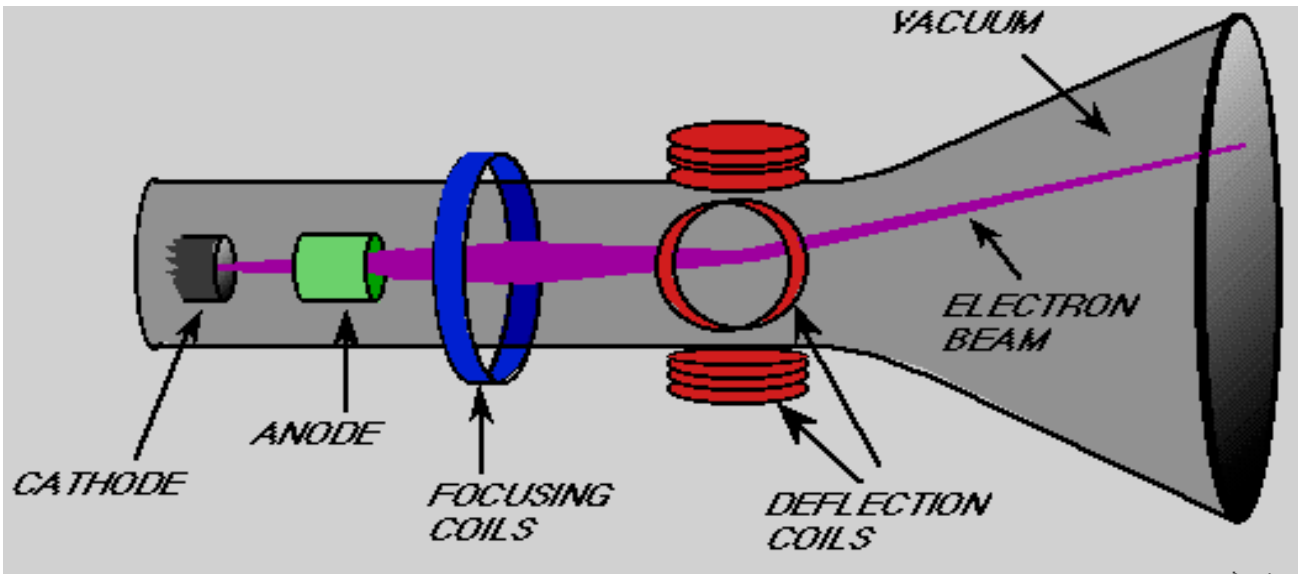


Yeeeeeeehaaaaaaaaa!!! 

# Come vediamo il mondo?

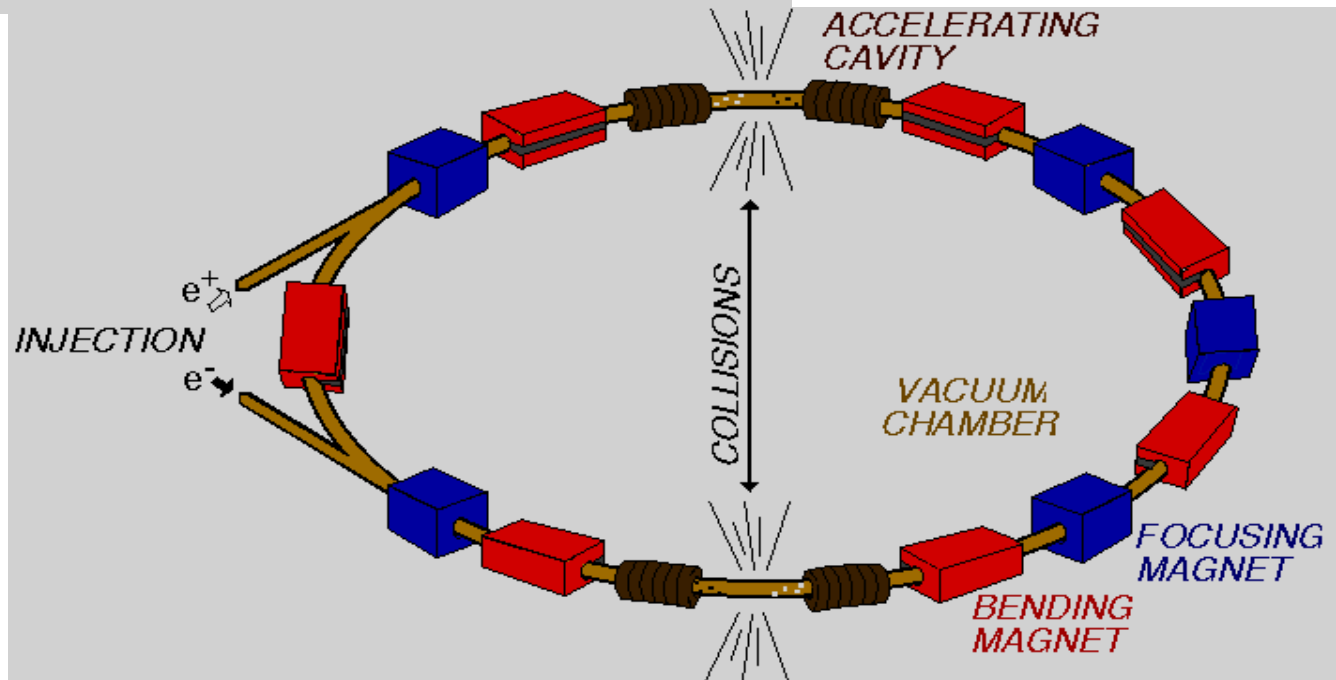


# Acceleratori di particelle



Il tubo catodico:  
L'acceleratore  
“domestico”

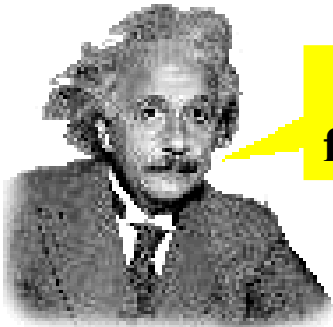
Un acceleratore  
Circolare  
(collisore)



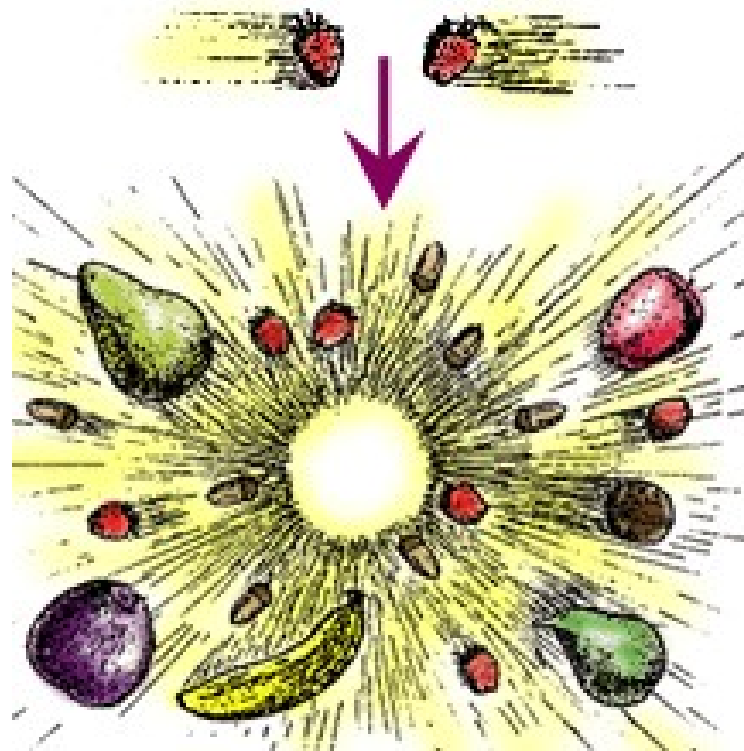
# Massa ed energia

I fisici studiano **particelle pesanti** utilizzando **proiettili leggeri**

$$E=mc^2$$

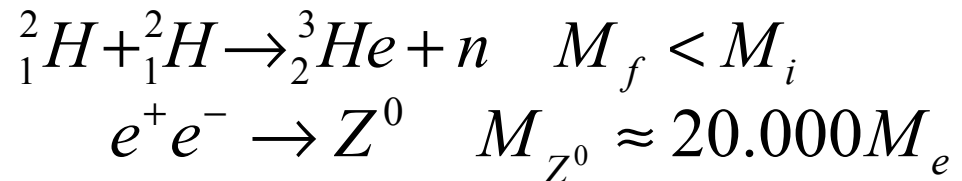


La massa è una  
forma di energia!



## Evidenze sperimentali:

- Reazioni nucleari
- Acceleratori di particelle



# Gli Strumenti del Gioco

## Sorgenti di particelle :

### - **Naturali**

- Sostanze Radioattive
- Raggi Cosmici

### - **Artificiali**

- Acceleratori
- Reattori

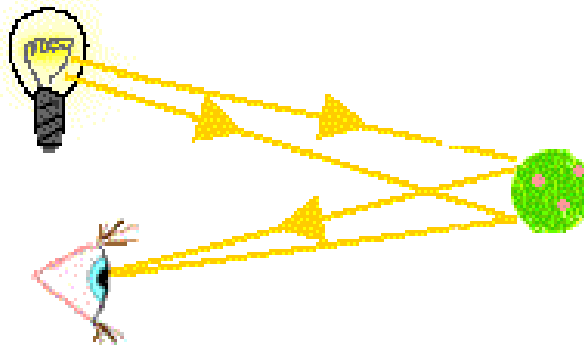
## Rivelazione delle particelle

### - **Cariche:**

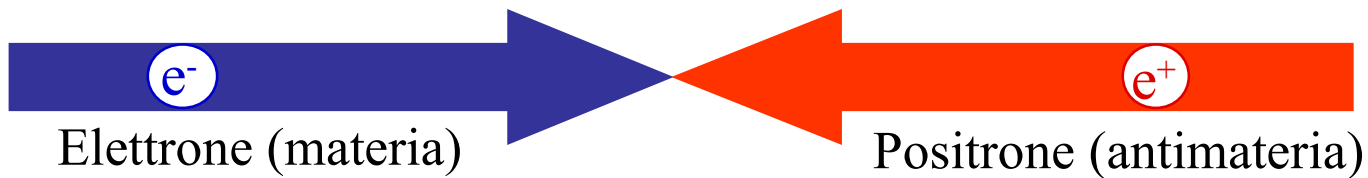
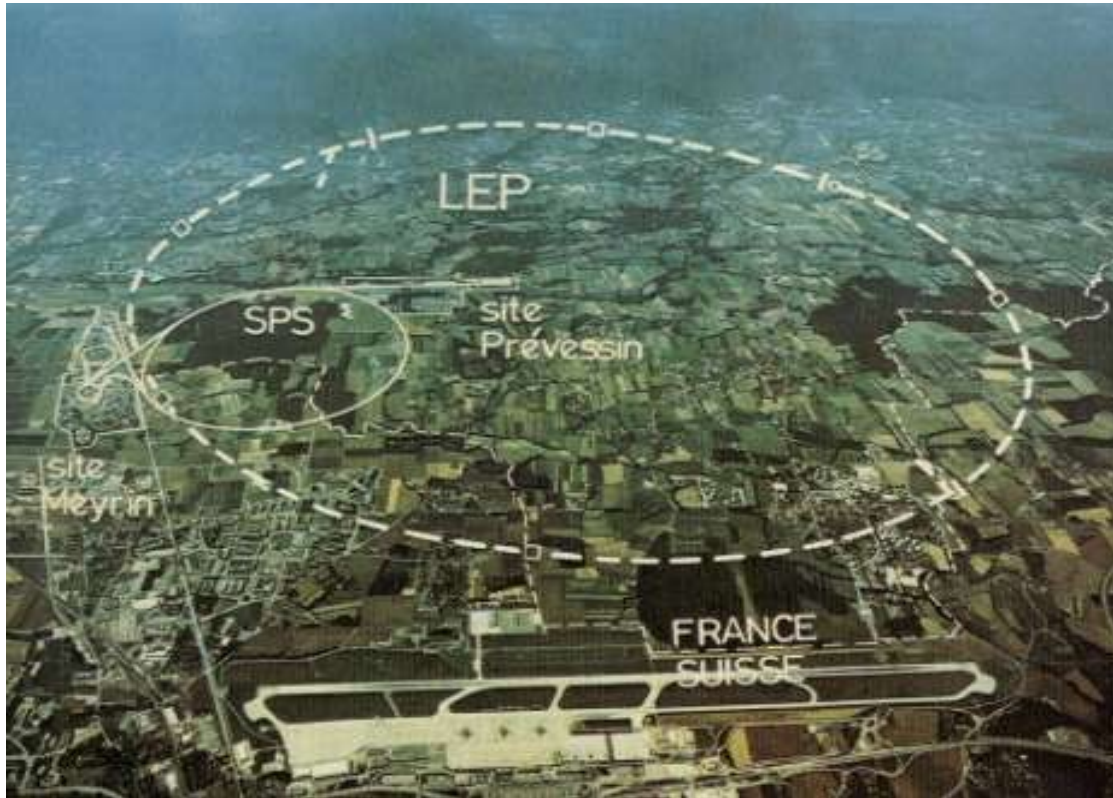
- Ionizzazione

### - **Neutre**

- Sciame



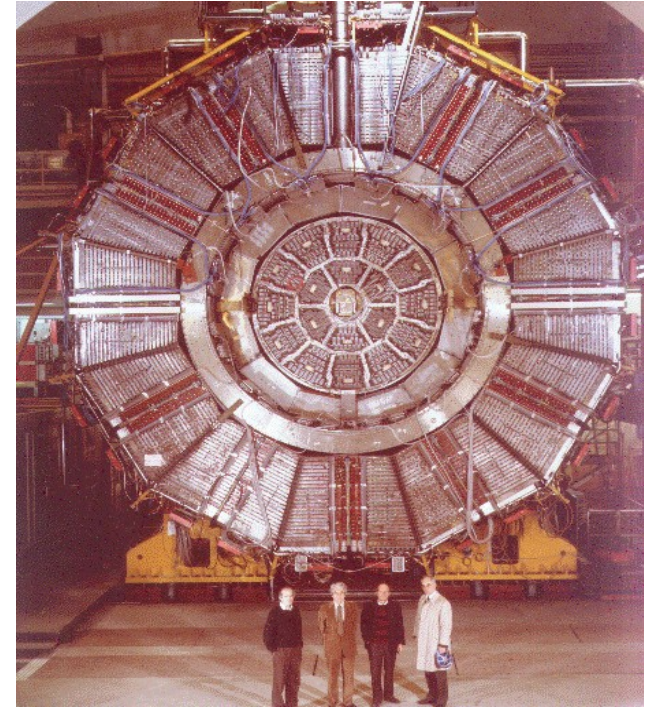
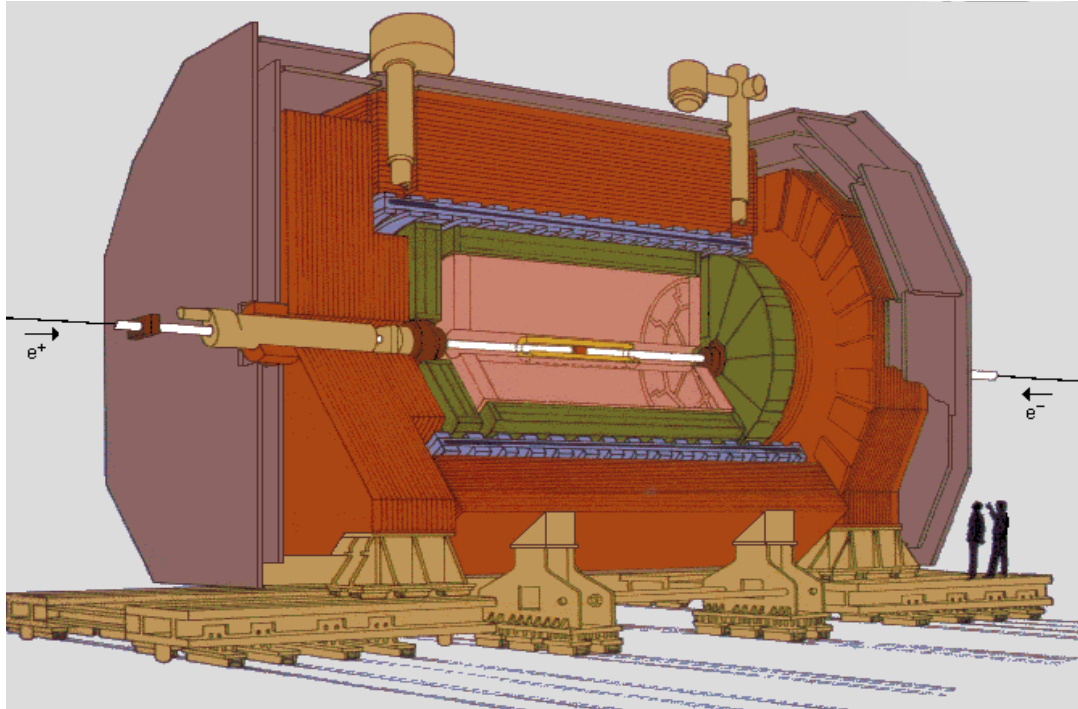
# LEP al CERN (Ginevra, 1989-2000)



L'annichilazione produce energia  
(un "mini big-bang")

Vengono prodotte particelle  
e antiparticelle

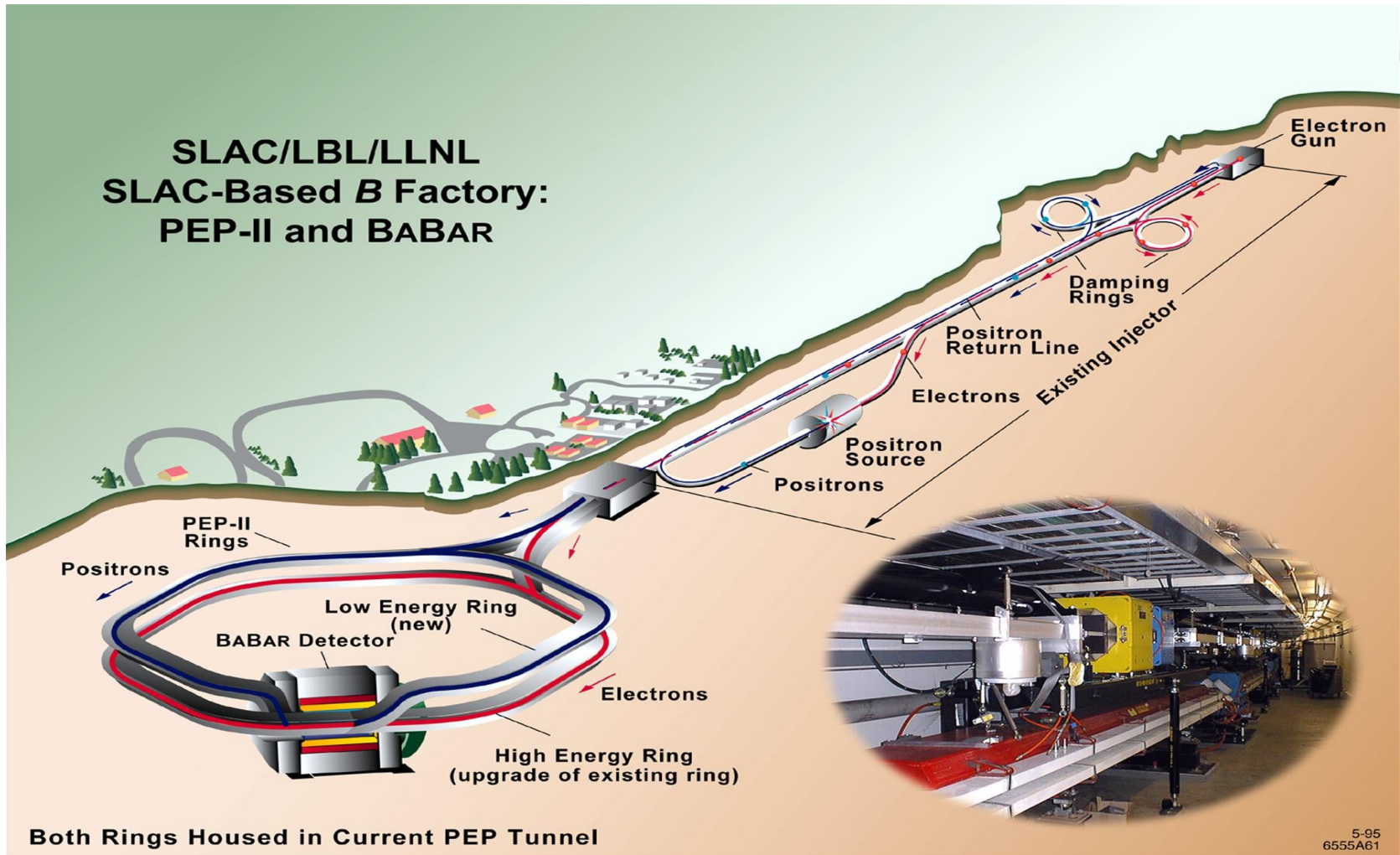
# Il rivelatore ALEPH



Vista trasversa

ALEPH, DELPHI, L3, OPAL: collaborazioni internazionali  
~500-1000 fisici/collaborazione da tutto il mondo. Costi: 100s M€

# L'acceleratore lineare di Stanford

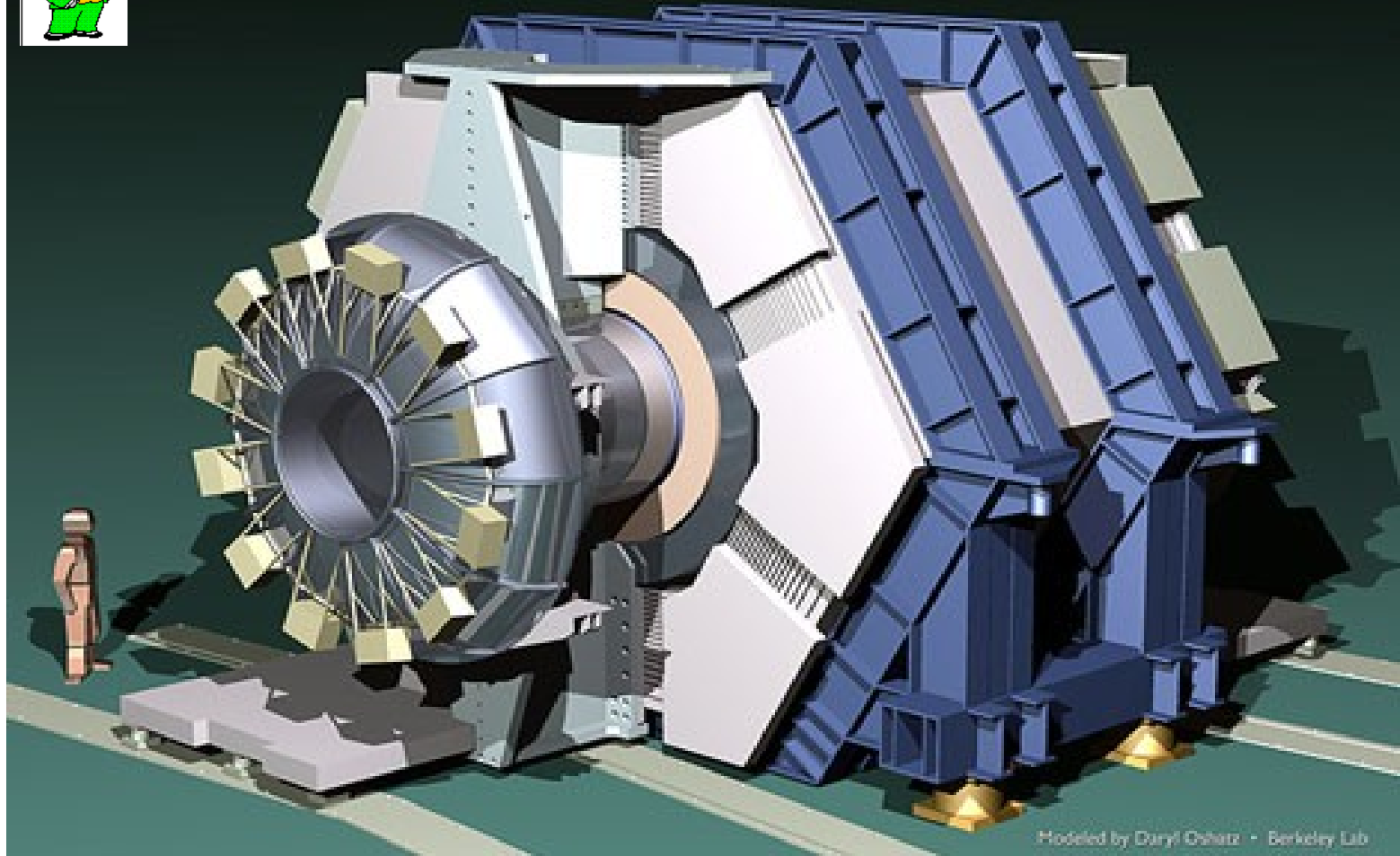




# Il rivelatore Babar



## BABAR DETECTOR FOR THE PEP-II B FACTORY

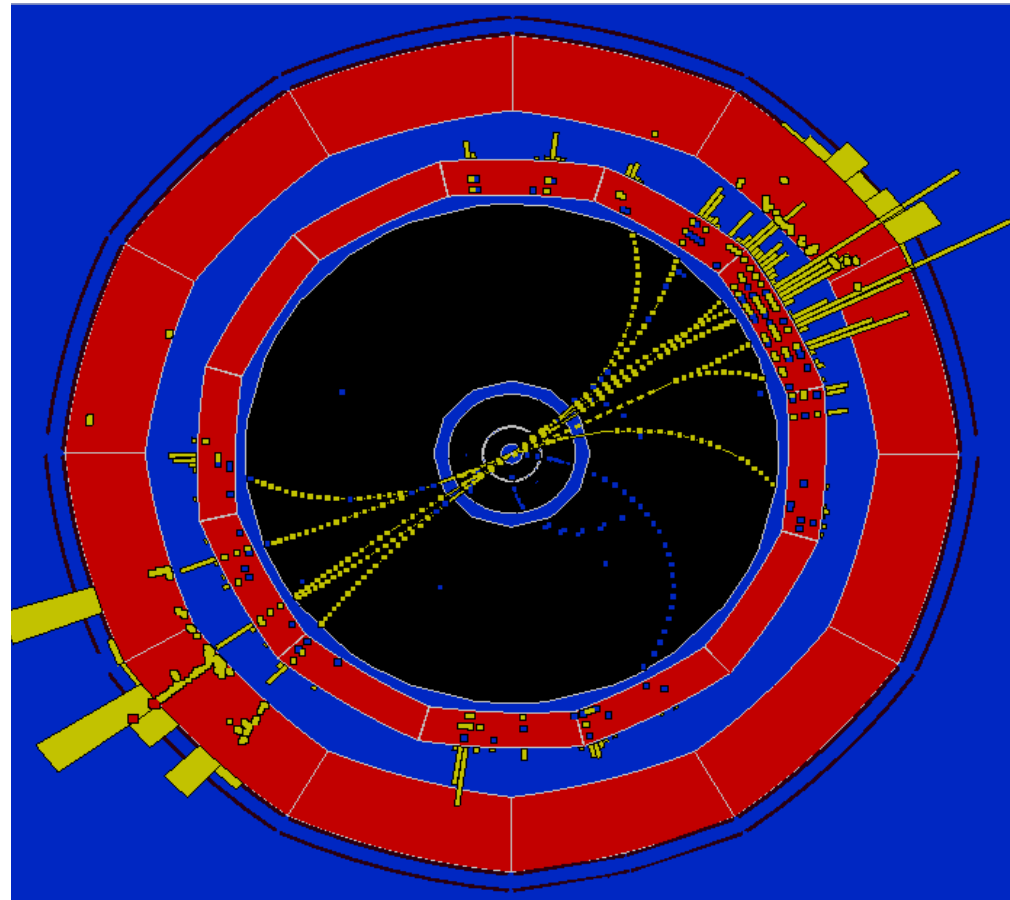


Modelled by Daryl Dehartz - Berkeley Lab

# Un “evento”

Un **evento** è il risultato di una **collisione**. Noi *isoliamo* ciascun evento, ne *raccogliamo informazioni*, e *verifichiamo* se i processi coinvolti *sono compatibili con la teoria* sotto studio.

Gli eventi sono complicati dato che vengono prodotte parecchie *particelle*. La maggioranza di esse hanno **vite medie** talmente corte che *decadono in altre particelle, senza rilasciare segnali rivelabili*. Studiamo i **prodotti di decadimenti e deduciamo** da essi l'esistenza di una particelle e le sue proprietà

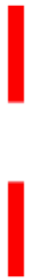


# Termini del Gioco

- L'unità di misura dell'energia delle particelle elementari è l'elettronVolt:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

- Corrisponde all'energia cinetica acquisita da un elettrone sottoposto alla differenza di potenziale di un Volt



- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  = l'energia consumata da una torcia in 0,000.000.0001 secondi !

- Massa e impulso si esprimono in  $\text{eV}/c^2$  e in  $\text{eV}/c$

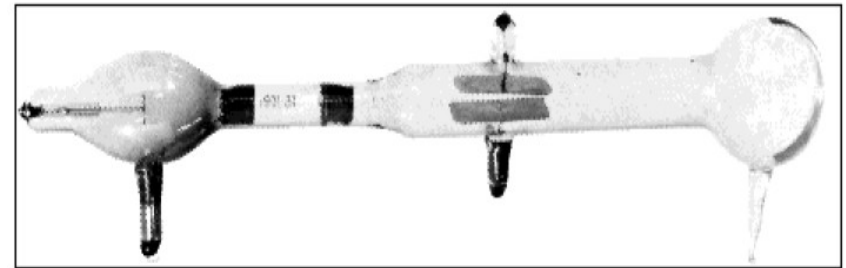
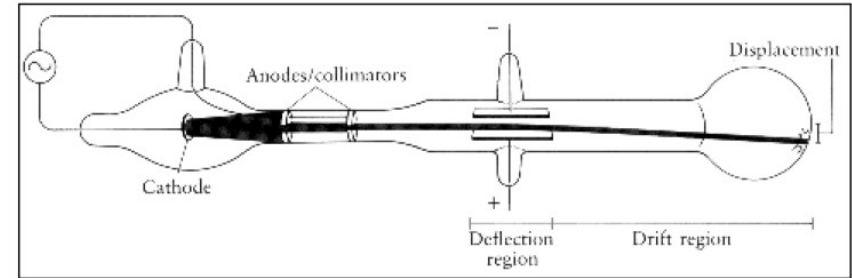
$$M_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg} = 0.511 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2 \sim \frac{1}{2} \text{ MeV}/c^2$$

$$M_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} = 0.939 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$$

**IL GIOCO**

# Lo sviluppo storico: gli elettroni (1897)

- Fasci di particelle di carica negativa vengono facilmente estratti da superfici metalliche riscaldate
- Combinando le misure di moto in campo magnetico con le misure di Millikan si determinano la massa e la carica dell'elettrone



$$m = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ Kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -e$$

Tutte le particelle elementari hanno carica in modulo pari a multipli di  $e$

# Lo sviluppo storico: i nuclei

- La materia tuttavia è neutra
- Come sono distribuite le cariche (positive e negative) al suo interno ?
- Nota : le particelle sono così minuscole che non possono essere osservate dal più preciso microscopio ottico
- Come possiamo risolvere la struttura della materia ?

# Un'analogia

- Uno dei due sacchi contiene solo sabbia, e un'altro anche pepite d'oro
- Come faccio a scegliere se non posso toccarli ?



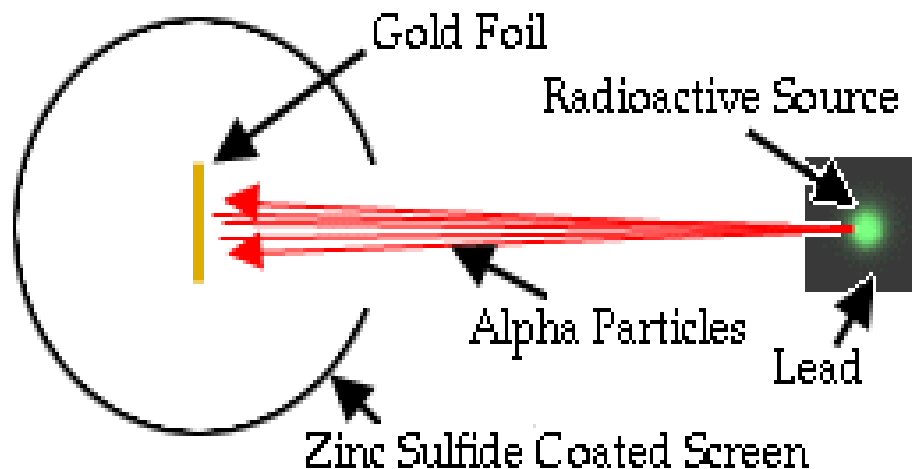
# Il metodo di Tex Willer





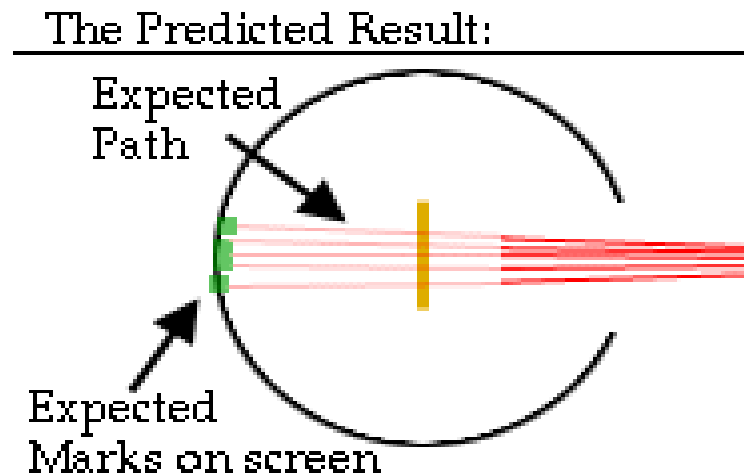
# L 'esperimento di Rutherford (1910)

- Pallottole : particelle  $\alpha$  (  $q = 2 e, m \sim 8000 m_e$  ) prodotte da sorgente radioattiva
- Bersaglio : sottile lamina d'oro
- Osservo la deflessione delle particelle dopo l'urto



# Il pregiudizio : modello di Thomson

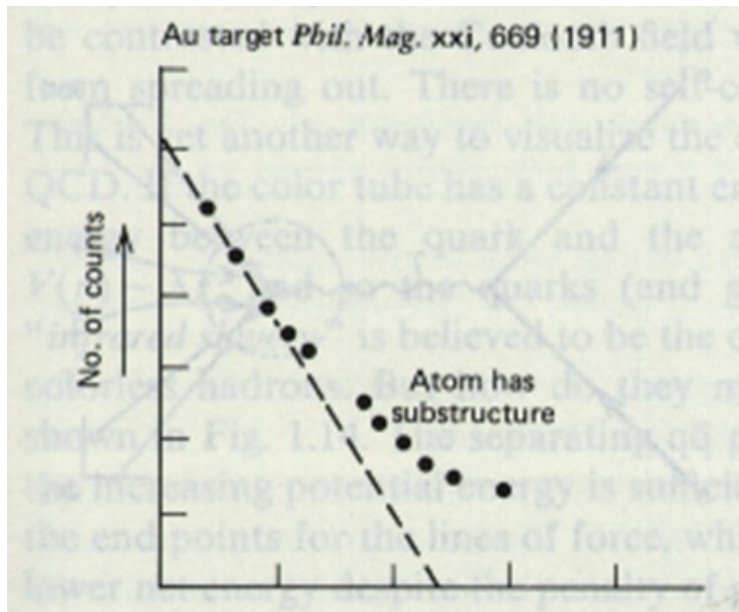
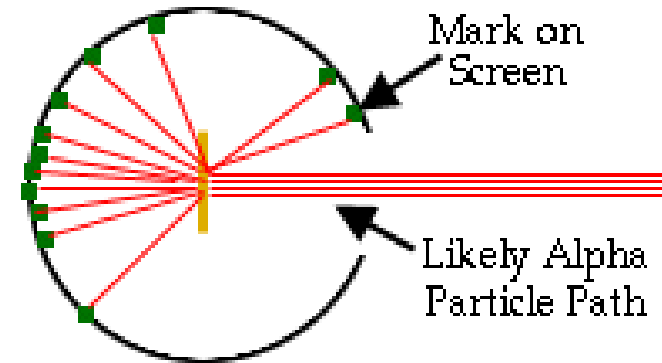
- Il panettone: la carica positiva è distribuita uniformemente su una sfera (la pasta) su cui sono incastonati gli elettroni (l'uvetta)
- Predizione: le particelle  $\alpha$  non subiscono apprezzabili deviazioni (la sabbia)



# La misura : il risultato inatteso

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !

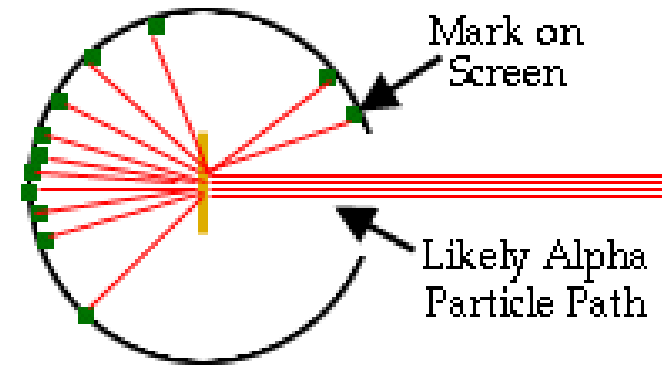
Extrapolation of Result:



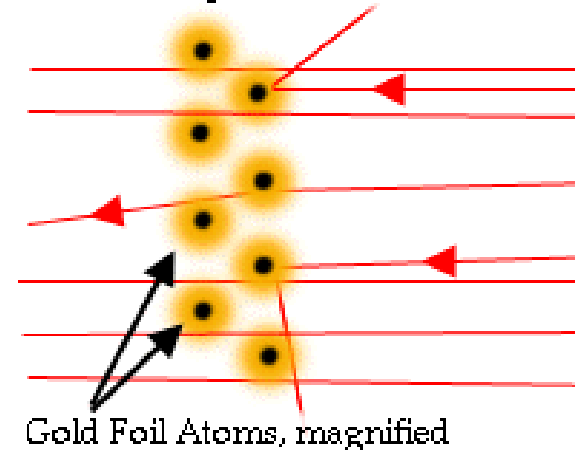
# L'interpretazione: il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)

Extrapolation of Result:



A Positive Nucleus Reflects Alpha Particles



# L'interpretazione: il modello nucleare

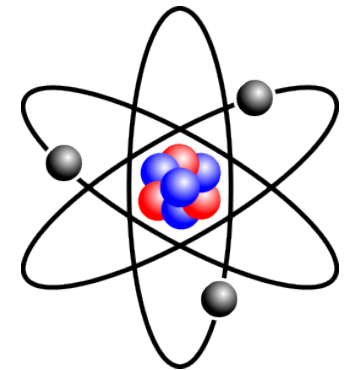
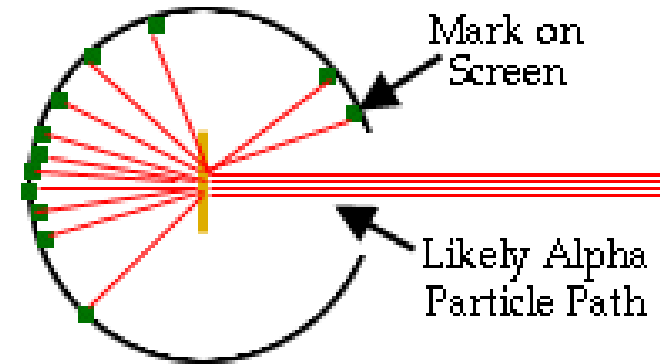
- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)
- Ora sappiamo che :

–  $R_{\text{Atomo}} \sim 10^{-10} \text{ m}$

–  $R_{\text{Nucleo}} \sim 10^{-15} \text{ m} \sim 1/100\ 000$

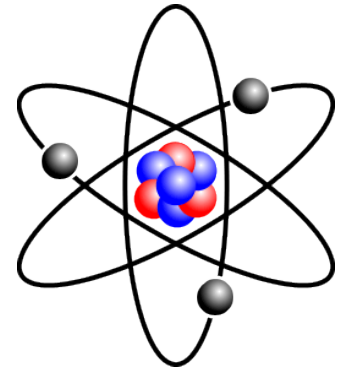
$R_{\text{Atomo}}$

Extrapolation of Result:



# La struttura del nucleo

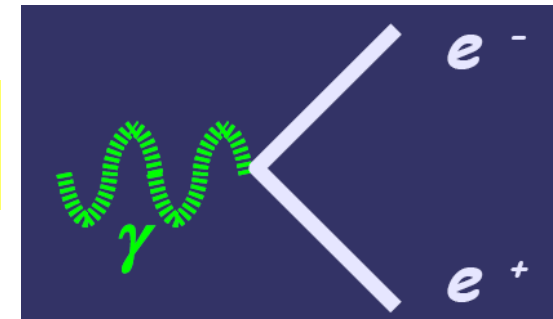
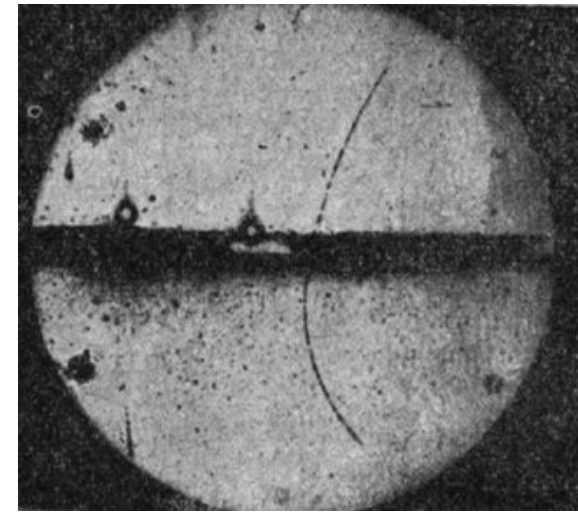
- Le cariche positive (**protoni**,  $q_p = +e$ ,  $m_p \sim 2000 m_e$ ), non possono dar luogo da sole ad un nucleo stabile (repulsione Coulombiana)
- Servono:
  - dei moderatori (**neutroni**,  $q_n = 0$ ,  $m_n \sim m_p \sim 1 \text{ GeV} / c^2$  osservati da Chadwick nel 1932 )
  - un nuovo collante : la **Forza Nucleare Forte**
- Definizione:
  - **ADRONI**: tutte le particelle sensibili alla **FNF** (protoni, neutroni e molti altri )
  - Gli elettroni non sono adroni, ma **leptoni**



# La materia non si conserva !

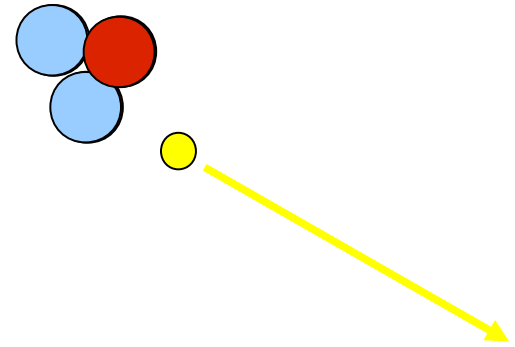
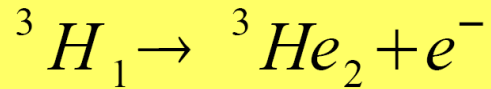
- E' noto che frenando elettroni in un mezzo pesante si producono fotoni (raggi X e  $\gamma$ )
- 1933 : Andersen irradia una sbarra di piombo con raggi  $\gamma$
- Osserva la produzione in coppie di un elettrone e di una particella identica (uguale massa, uguale momento angolare intrinseco) ma di carica opposta , **il positrone**
- **Scoperta l'antimateria !** (Predetta da Dirac nel 1929 )
- Conversione Energia (fotone ) -> Materia + Antimateria, in accordo con la Relativita' Ristretta:

$$E_{\gamma} = E_{e^{-}} + E_{e^{+}} = \sqrt{(M_e c^2)^2 + (cp_{e^{-}})^2} + \sqrt{(M_e c^2)^2 + (cp_{e^{+}})^2}$$



# L'energia si conserva ?

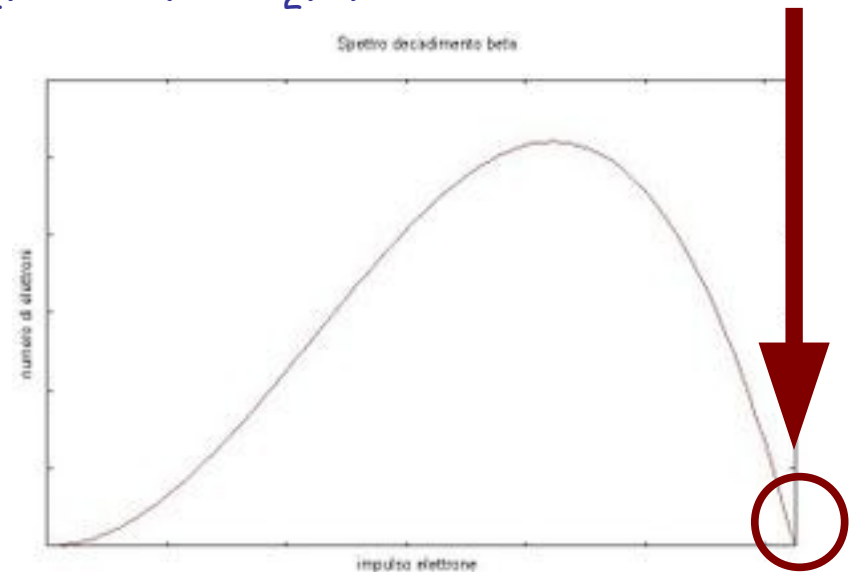
- Decadimento  $\beta^-$  dei nuclei :



- Se il decadimento è in due corpi l'elettrone ha energia fissa :

$$E_e = E({}^3\text{H}_1) - E({}^3\text{He}_2) \sim (M({}^3\text{H}_1) - M({}^3\text{He}_2)) c^2 = 17.3 \text{ KeV}$$

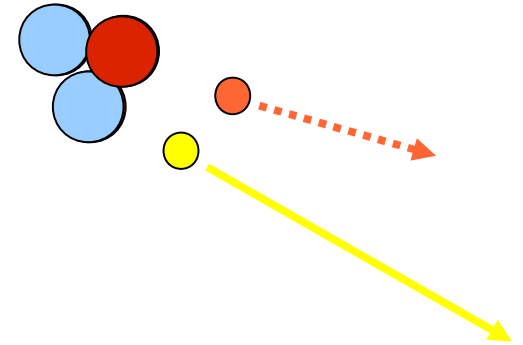
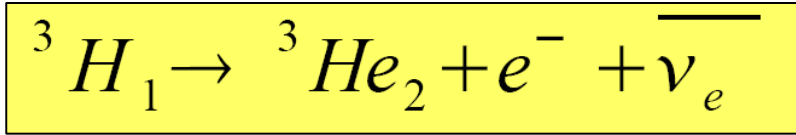
- L'esperimento mostra invece un insieme continuo (*spettro*) di valori di  $E_{e'}$  da 0 a 17.3 KeV





# ... si conserva a tutti i costi!

- Pauli: è un decadimento a tre corpi



- La nuova particella (**neutrino  $\nu$** ) trasporta l'energia non osservata :

$$E_{\bar{\nu}} = E_{Max, e} - E_e \simeq (M_{{}^3H_1} - M_{{}^3He_2})c^2 - E_e$$

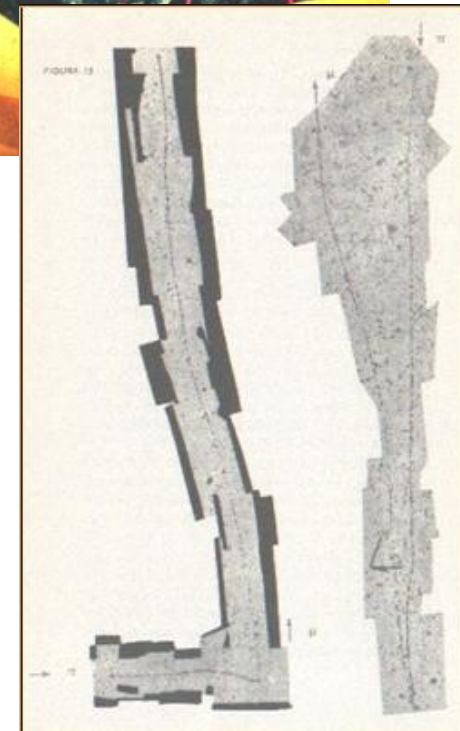
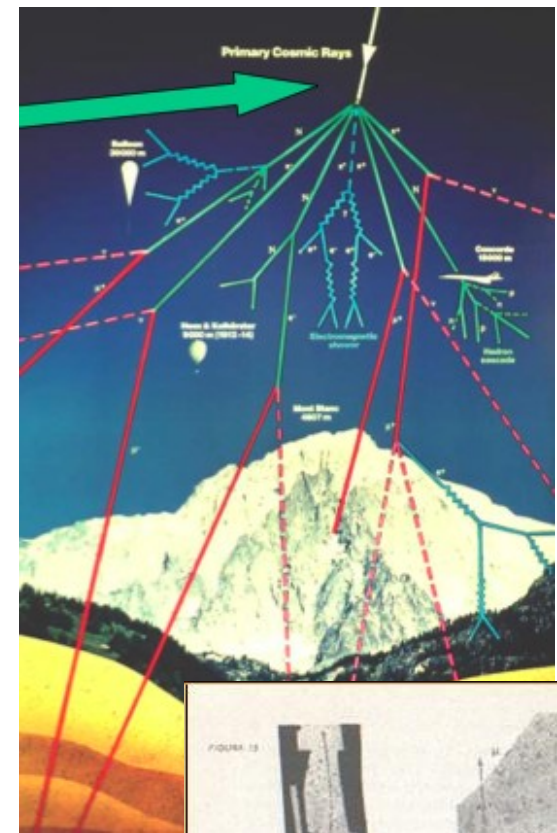
- Il neutrino non viene osservato perché è insensibile alla forza elettromagnetica e alla forza nucleare forte
- Viene scoperto nel 1952 da Reynes e Cowan che osservano interazioni dovute all'unica forza cui il neutrino è sensibile, la

**Forza Nucleare Debole**

# La Manna dal cielo ...

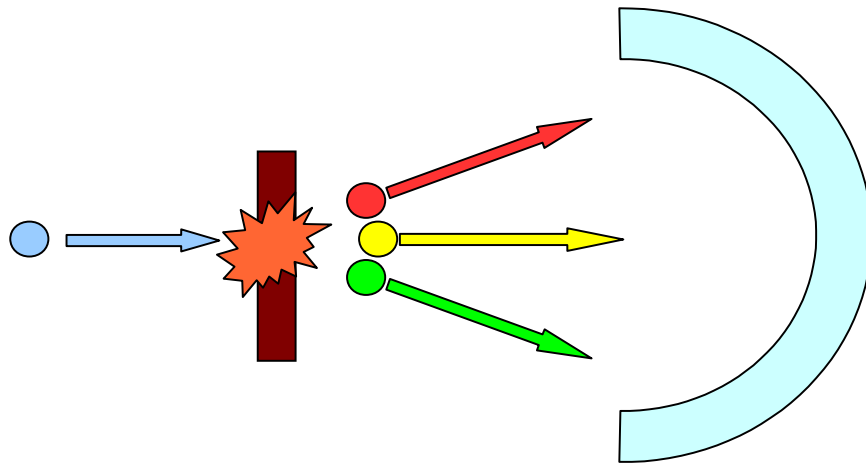
- I Raggi cosmici
  - Radiazione Elettromagnetica
  - neutrini
  - elettroni
  - **protoni:**

Interagendo con l'atmosfera, producono una pletera di nuove particelle ( $\pi, K, \dots$ ), che vennero osservate con emulsioni su pallone, o con esperimenti elettronici a terra ( $\mu$ ). Tipicamente queste particelle hanno una vita media dell'ordine del  $\mu\text{sec}$ , o inferiore.



# ... e la Terra Promessa

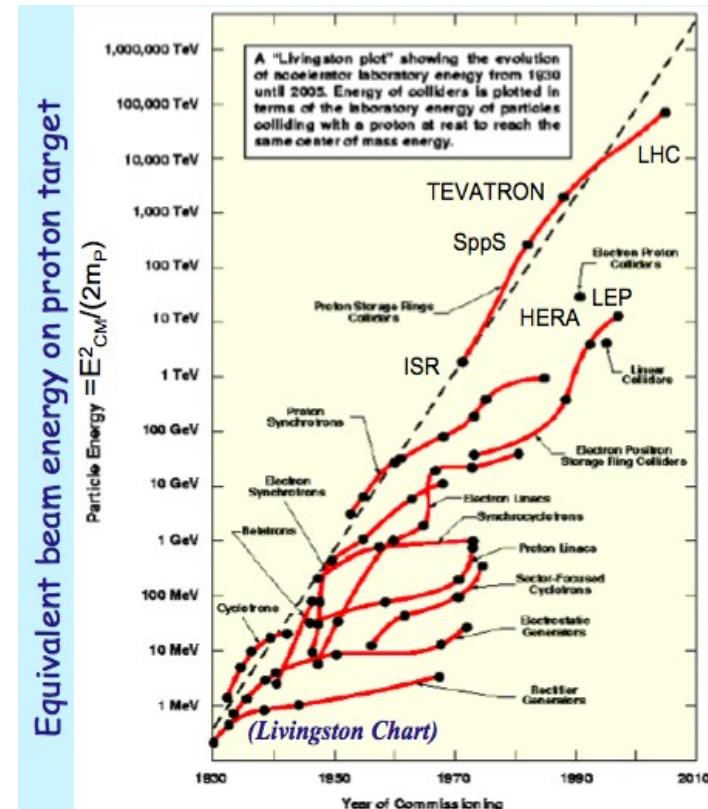
- Lo sviluppo di acceleratori di particelle consente di riprodurre artificialmente queste particelle e osservarne le tracce nei rivelatori



- Condizione necessaria :

$$E_{\text{Urto}} \geq \sum_i M_i c^2$$

- Per creare particelle di massa maggiore servono acceleratori sempre più potenti



# “Madamina, il catalogo è questo...”

- Tra il 1950 e oggi vengono fabbricate e osservate una pletera di particelle:
  - Tre Leptoni carichi ( $e, \mu, \tau$ )
  - Tre Leptoni neutri ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )
  - Tre Bosoni mediatori ( $\gamma, W, Z$ )
  - Una miriade di Adroni carichi e neutri (svariate centinaia di stati osservati e catalogati a tutt'oggi) :

$\pi, \rho, K, \eta, \eta', \phi, f, \rho, n, a, \Delta, \Omega, \Pi, \Psi, Y, D, B...$

Interazione Forte, Elettromagnetica e Debole

# Dal Molteplice all'Uno ?

- Come ci spieghiamo la fauna adronica ?
- Esiste un principio unitario sotto l'apparente molteplicità ?
- Torniamo ai classici !

Particle	Symbol	Anti-particle	Makeup	Rest mass MeV/c <sup>2</sup>	S	C	B	Lifetime	Decay Modes
<u>Pion</u>	$\pi^+$	$\pi^-$	$u\bar{d}$	139.6	0	0	0	$2.60 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$
<u>Pion</u>	$\pi^0$	Self	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135.0	0	0	0	$0.83 \times 10^{-16}$	$2\gamma$
<u>Kaon</u>	$K^+$	$K^-$	$u\bar{s}$	493.7	+1	0	0	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
<u>Kaon</u>	$K_S^0$	$K_S^0$	1*	497.7	+1	0	0	$0.89 \times 10^{-10}$	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
<u>Kaon</u>	$K_L^0$	$K_L^0$	1*	497.7	+1	0	0	$5.2 \times 10^{-8}$	$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e$
<u>Eta</u>	$\eta^0$	Self	2*	548.8	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\mu$
<u>Eta prime</u>	$\eta'$	Self	2*	958	0	0	0	...	...
<u>Rho</u>	$\rho^+$	$\rho^-$	$u\bar{d}$	770	0	0	0	$0.4 \times 10^{-23}$	$\pi, \pi$
<u>Rho</u>	$\rho^0$	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	770	0	0	0	...	...
<u>Omega</u>	$\omega^0$	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	0	0	0	...	...
<u>Phi</u>	$\phi$	Self	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	$20 \times 10^{-23}$	$K^+ K^-, K^0 \bar{K}^0$

# La Tavola Periodica

- ~1860 le regolarità nelle proprietà degli elementi portano Mendeleev (ed altri) a formulare la tavola periodica, indicazione di un principio unitario (l'atomo) che soggiace all'apparente molteplicità degli elementi

Periodic Table of Elements

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar										
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 *La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 +Ac	104 Rf	105 Ha	106 106	107 107	108 108	109 109	110 110								

\* Lanthanide Series

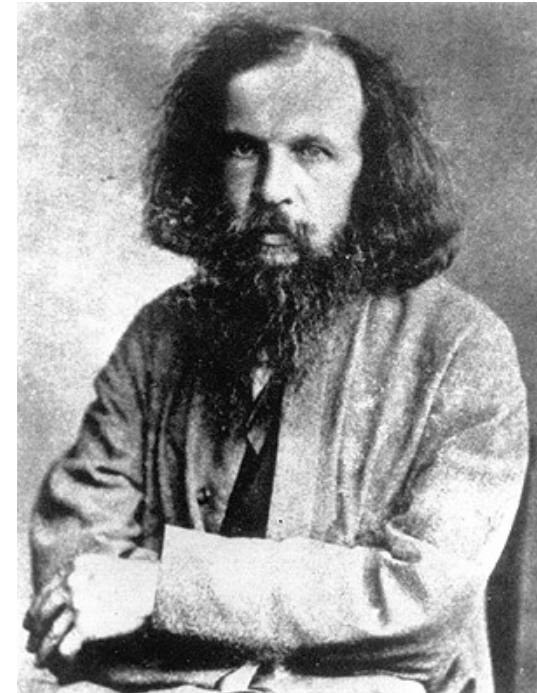
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

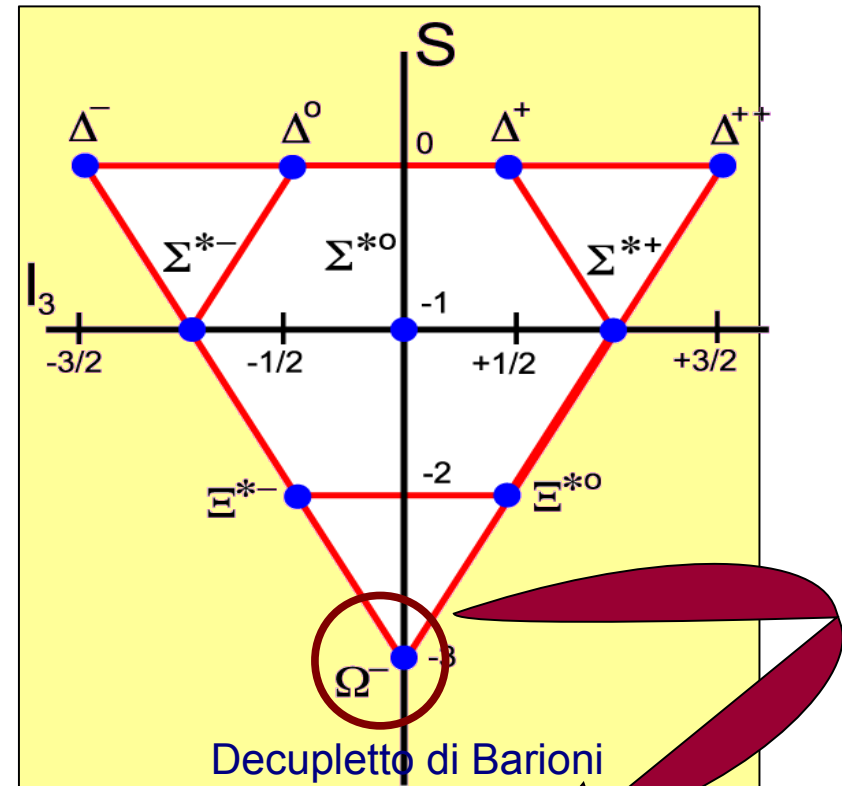
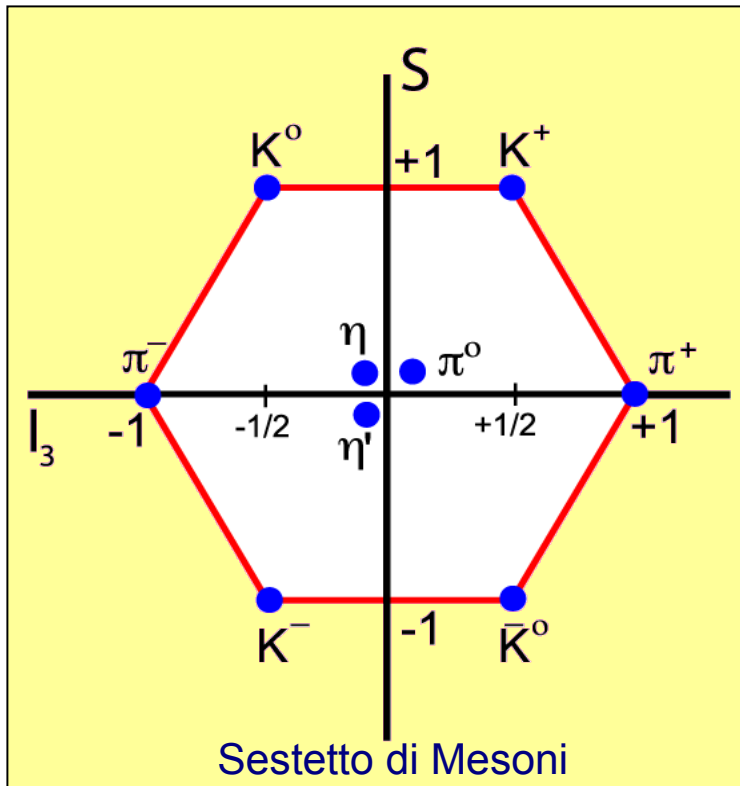
Legend - click to find out more...

H - gas	Li - solid	Br - liquid	Tc - synthetic
Non-Metals	Transition Metals	Rare Earth Metals	Halogens
Alkali Metals	Alkali Earth Metals	Other Metals	Inert Elements



# Le Stesse Cose Ritornano (1)

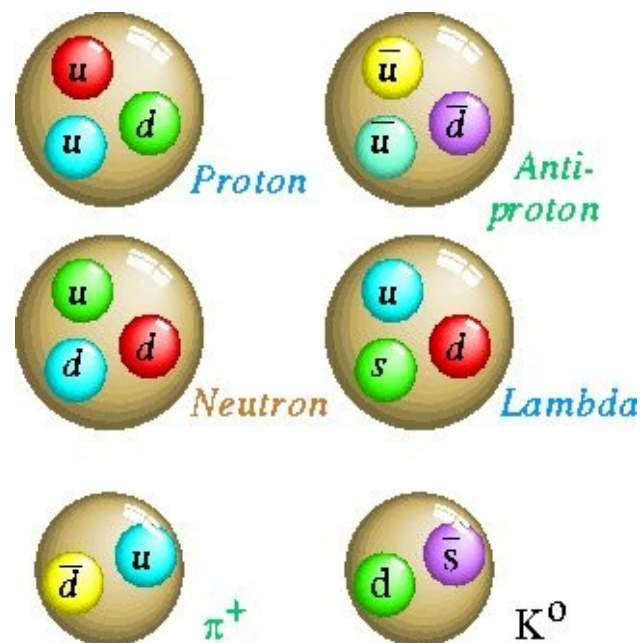
- 1964 Gell-Mann e Zweig scoprono regolarita' nelle proprieta' degli adroni, che possono essere catalogati in "multipletti":



L' $\Omega$  fu predetta dal modello prima di essere scoperta !

# Three Quarks for Muster Mark

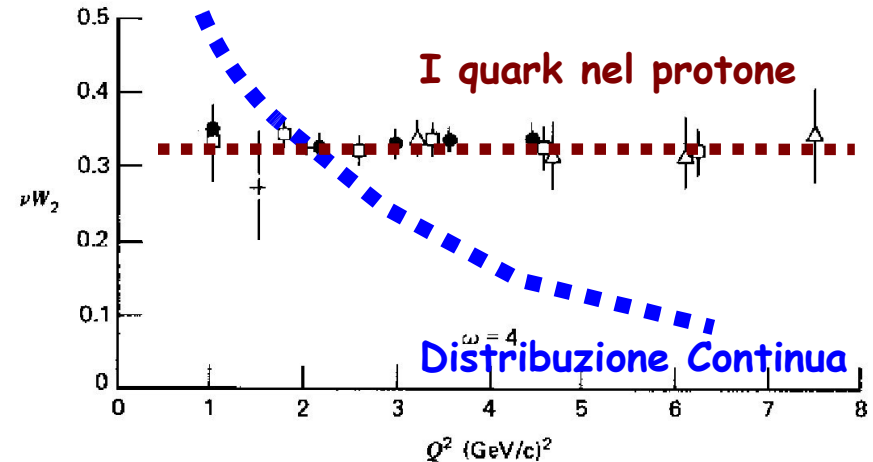
- Ogni adrone e' ottenuto combinando dei costituenti fondamentali (*i quark*), che formano le particelle osservabili, raggruppate in:
    - *Mesoni*, coppie quark-antiquark a spin intero
    - *Barioni*, terne di quark (o anti-quark) a spin semintero
  - Gell-Mann Zweig (1964): 3 quarks (u,d,s)
    - 1974 : scoperto il charm  
(predetto nel 1970 da Glashow, Iliopoulos e Maiani!)
    - 1977 : scoperto il bottom
    - 1994 : scoperto il top
- ... per un totale di sei quark!



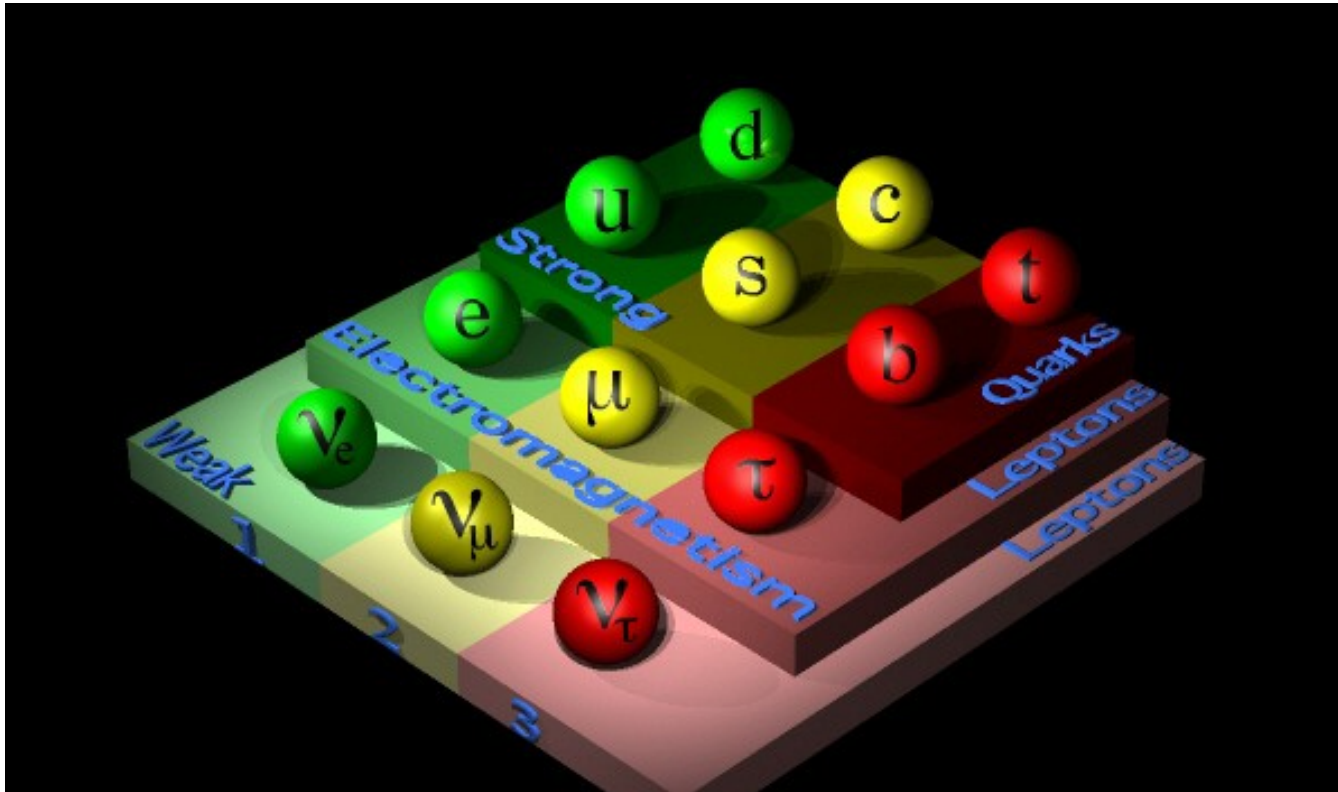


# Le Stesse Cose Ritornano (2)

- Esperimenti Diffusione Inelastica confermano in maniera indipendente l'ipotesi dei quark
- Come Rutherford, 50 anni dopo
- Bombardo nuclei H (protoni) con sonde puntiformi ( $e$ ) e studio la struttura del nucleone
- Le misure dell'angolo di diffusione dell' $e$  mostrano che il protone e' composto da (tre) corpi puntiformi : *i quark* !



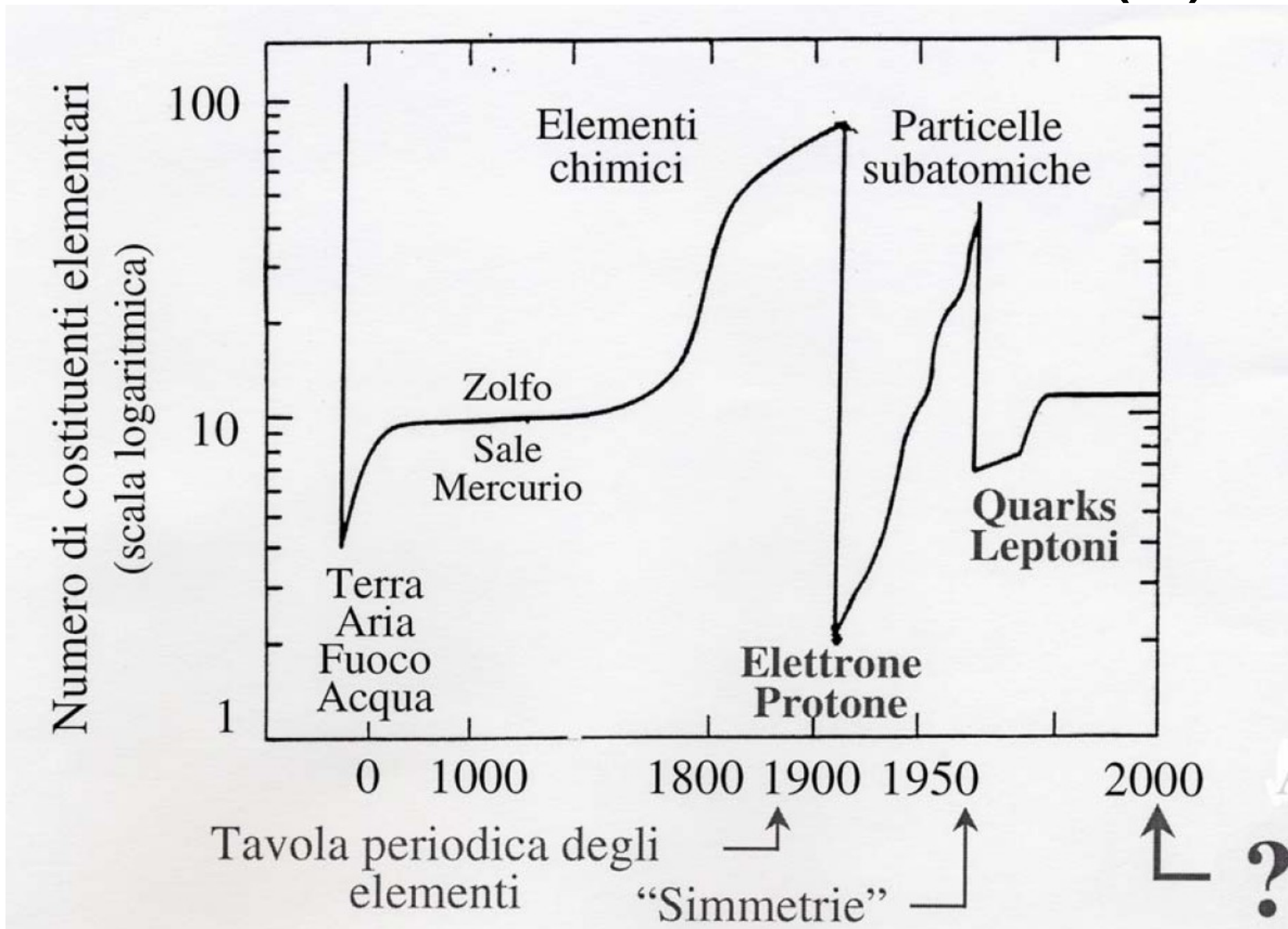
# I Costituenti Fondamentali



La materia consiste di 12 particelle elementari, 6 *leptoni* e 6 *quark*, che raggruppiamo in 3 famiglie (generazioni), di massa vieppiù crescente

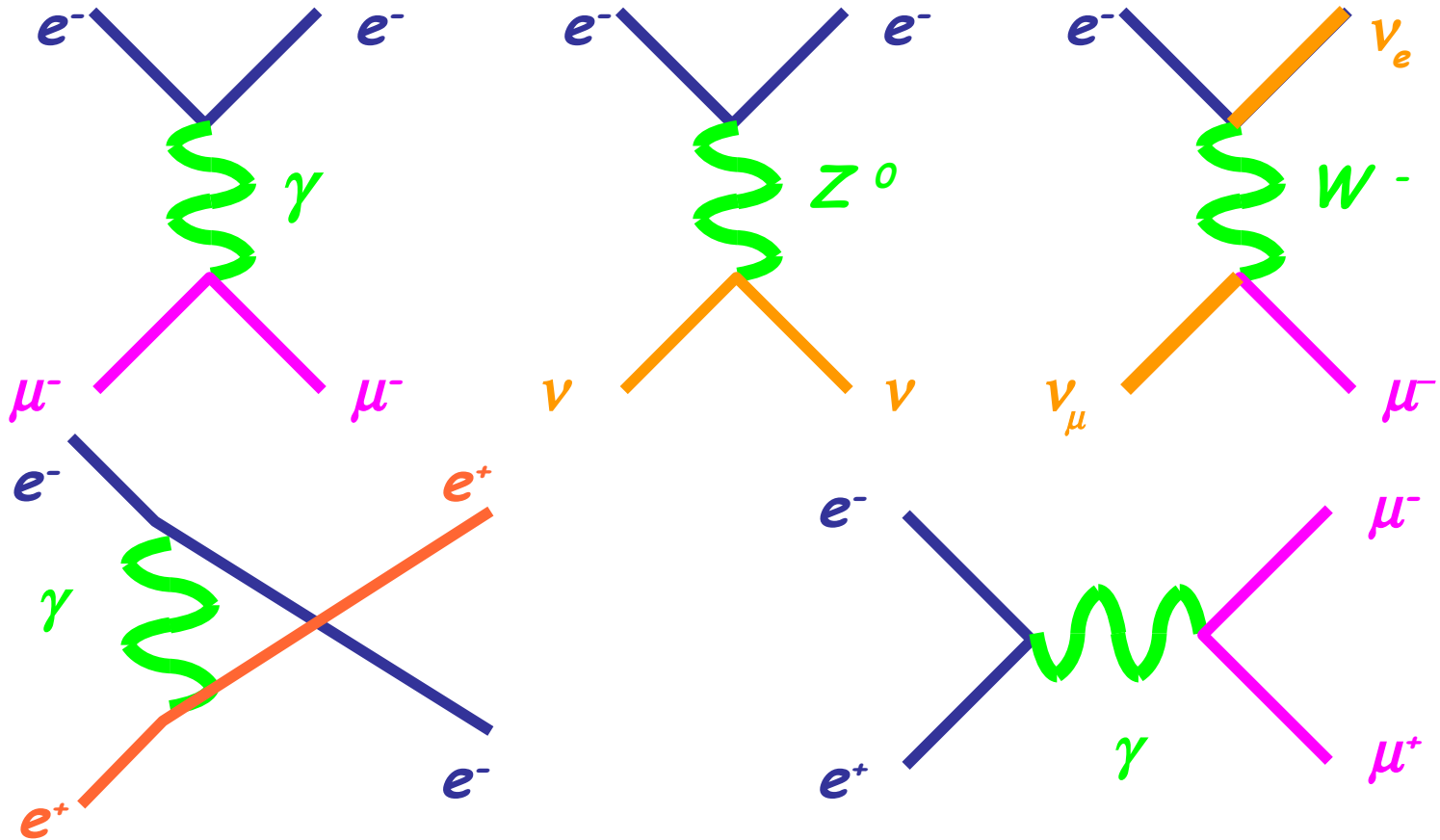
La materia ordinaria è formata solo dalla prima generazione  
La forza tra le particelle di materia è trasmessa (mediata) da altre particelle, i cosiddetti campi di Gauge

# Le stesse cose ritornano (3)



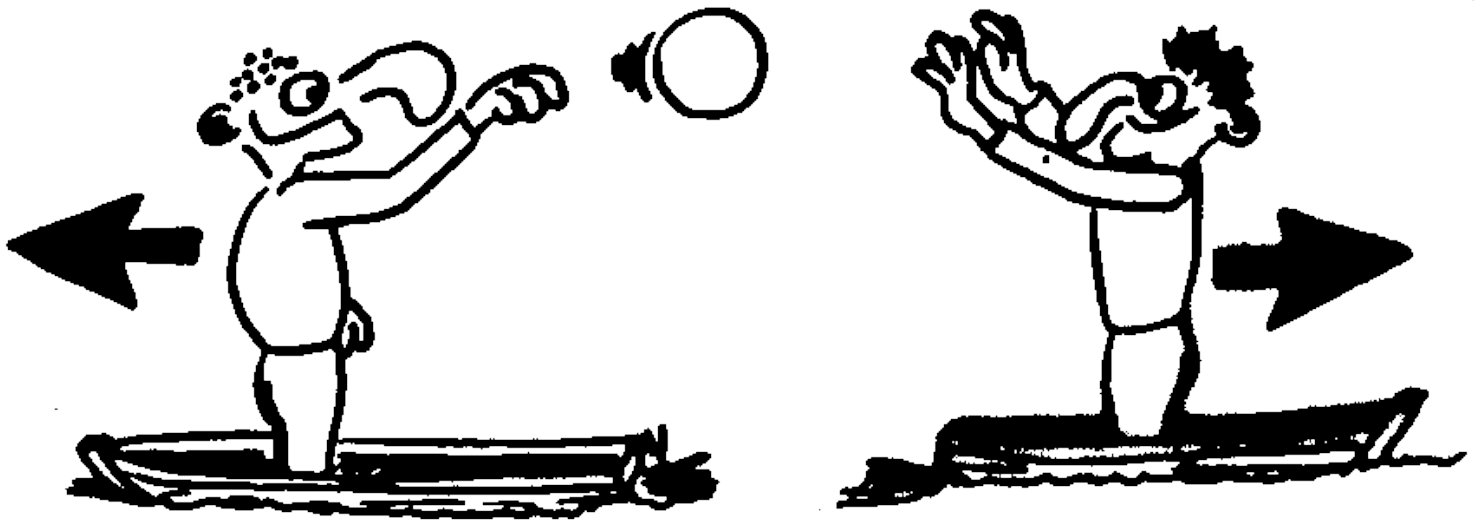
# Le Forze “Elementari”

Interazione tra particelle elementari: scambio di mediatori



# Il principio dello scambio

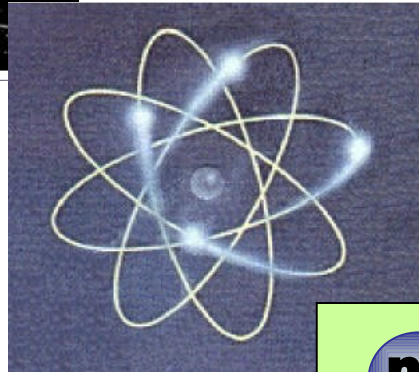
- A ogni **interazione** corrisponde una **carica**
- Solo le particelle con la carica giusta sono soggette all'interazione corrispondente
- L'interazione avviene scambiando **mediatori**



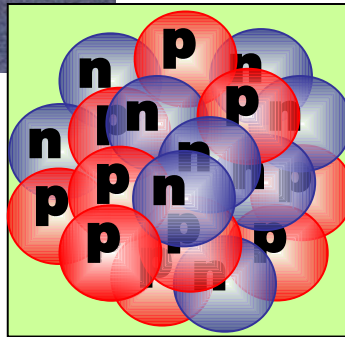
# Le 4 interazioni fondamentali



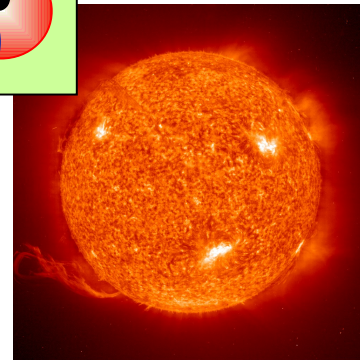
Gravitazionale



Elettromagnetica



Forte



Debole

# L'interazione gravitazionale

- La piu' evidente
- La piu' antica
- La meno nota :
  - Non esiste una teoria di campo gravitazionale quantistica soddisfacente
  - Non si sono osservate ancora le onde gravitazionali
  - Esiste il gravitone ?
  - Non si capisce perche' sia cosi' poco intensa



# La forza elettromagnetica

- Carica elettrica (+1, 0, -1 in unità di carica dell'elettrone)
- *Mediatore*: Fotone
- *Proprietà del fotone*: carica nulla:  $Q=0$   
massa nulla :  $m=0$
- Particelle:      Up              Down              Neutrino      Elettrone  
Carica            +2/3            -1/3            0                -1
- Caratteristiche:
  - A lungo raggio
  - Dà effetti macroscopici

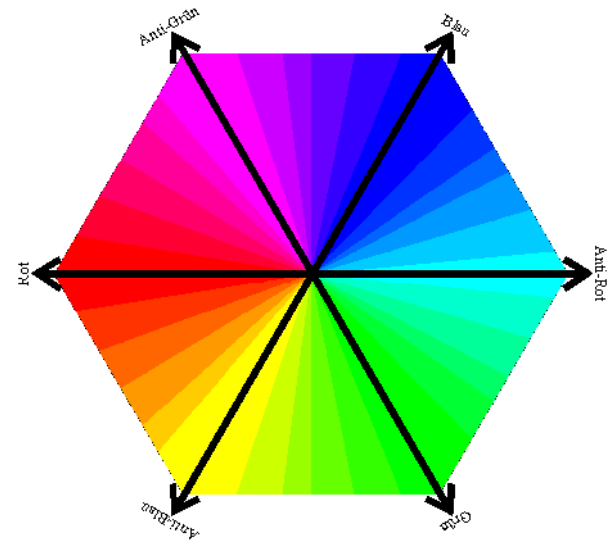
$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$





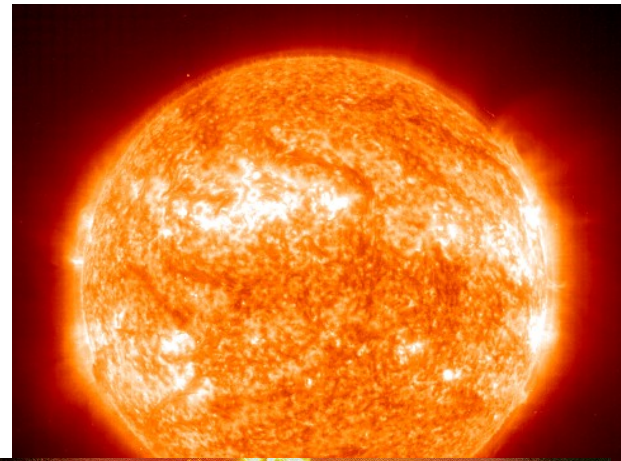
# L'interazione forte

- Carica forte
- 3 tipi di carica: „colori“, e „anticolori“ corrispondenti
- *Mediatori*: 8 Gluoni
- *Proprietà dei gluoni*: possiedono 1 colore e 1 anticoloro  
→ interagiscono tra loro!  
massa nulla :  $m=0$
- Particelle:      Up      Down      Neutrino      Elettrone  
Carica:      r, b, g      r, b, g      -      -
- Caratteristiche:
  - confinamento: i quark non riescono a vivere isolati ma devono aggregarsi a gruppi di 2 o di 3
  - A corto raggio ( $1\text{fm} \sim 10^{-15}\text{m}$ ) → solo effetti microscopici... ma di enorme importanza!

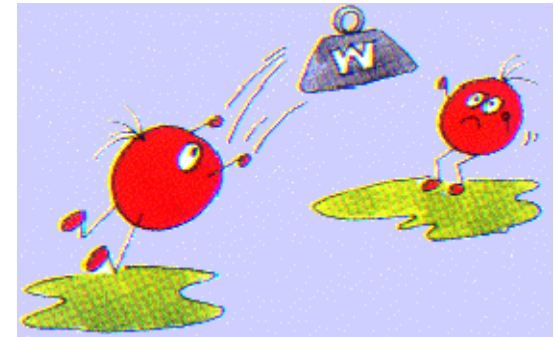


# L'interazione forte (2)

- E' responsabile di:
  - stabilita' dei nuclei (e quindi della materia )
  - processi di fusione (produzione di energia nel sole)
  - processi di fissione (reazioni nucleari controllate e non)



# L'interazione debole



- *Carica*: carica debole
- *Mediatori*:  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$  (Rubbia, CERN, 1983)
- *Proprietà*: possiedono anch'essi carica debole

Masse :  $m = 80 - 90 \text{ GeV}$

• Particelle:	Up	Down	Neutrino	Elettrone
Carica:	+1/2	-1/2	+1/2	-1/2

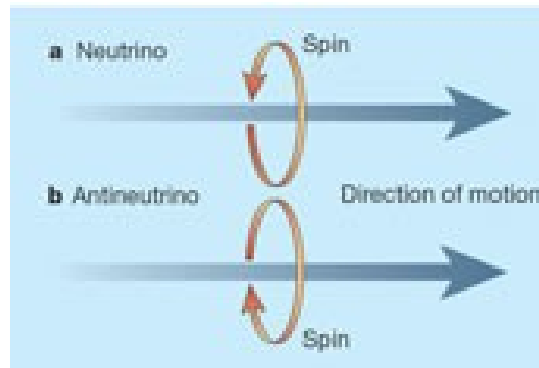
- **Caratteristiche:**

- Potenziale a corto raggio (circa 0.0025 fm)
- Solo effetti “microscopici”:
  - Decadimenti di Nuclei radioattivi, dei leptoni  $\mu$  e  $\tau$ , e di molti adroni, tra cui il quark top
  - i neutrini interagiscono solo debolmente e sono perciò difficili da osservare

$$V(r) \propto \frac{e^{-\kappa \frac{r}{M}}}{r}$$

# Le Interazioni Deboli (2)

- Distinguono tra destra e sinistra ! (Parita'):
  - Particella ( $e^-, \nu, q$ ) procede come **vite levogira**
  - Anti-particella come **vite destrorsa**



- Prevedono una leggera differenza (asimmetria) tra le proprieta' della materia e quella dell'antimateria, confermata dagli esperimenti *BABAR* (SLAC, CA) e *Belle* (Tsukuba, Jp), **ma insufficiente a spiegare perche' il nostro mondo e' fatto solo di materia**

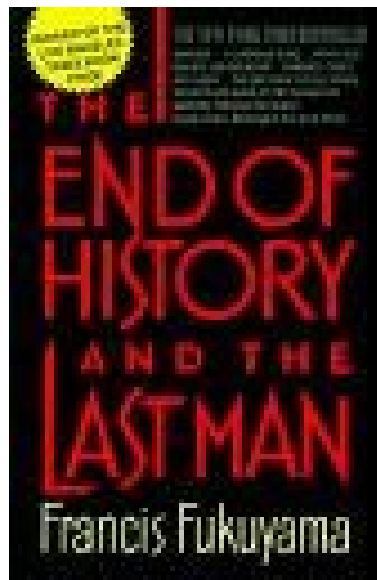
# Il Modello Standard

- Proposto nel 1967 da Glashow, Salaam, Weinberg (piu' contributi di Cabibbo, Kobaiashi, Maskawa, t'Hoft ...)
- Descrive efficacemente tutte le proprietà delle particelle elementari osservate finora, in termini di interazioni Deboli , Elettromagnetiche e Forti
- Riconduce interazioni Deboli ed Elettromagnetiche ad un'unica origine (Teoria ElettroDebole)



# Lo Stato dell'Arte

- Il Modello Standard descrive precisamente le interazioni tra le particelle elementari
- Non esiste un solo esperimento in laboratorio che contrasti con le previsioni del M.S.
- La fine della storia ?



# La Storia Continua (a)

- Il M.S. prevede l'esistenza (“dietro l'angolo”) di una particella non ancora osservata, il bosone di Higgs
- E' peculiare:
  - non è materia (leptone/quark)
  - non è un mediatore
  - genera le masse di tutte le particelle (incluse W e Z) mediante un processo noto come “rottura spontanea della simmetria”

# La Storia Continua (b)

- Il M.S. non puo' essere la teoria ultima.

Non spiega:

- Perché 3 x 2 famiglie ?
- Perché masse cosi' diverse ?

$$( m_{\nu_e} < 1 \text{ eV} ; m_{\text{top}} = 175 \text{ GeV} )$$

- Perché 4 interazioni ?
- Come conglobare la gravità ?

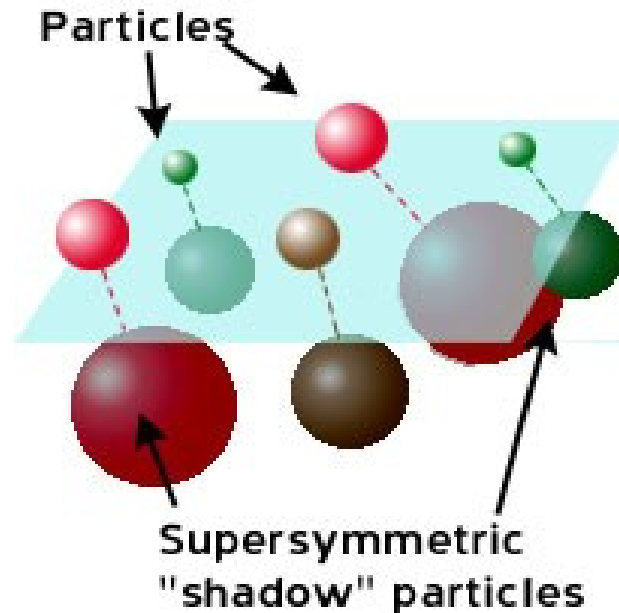


# La Storia Continua (c)

- Da un punto di vista Cosmologico
  - perche' l'universo e' fatto di materia ?
  - il 70% della massa dell'Universo non puo' essere attribuito alle particelle note: **MATERIA OSCURA**
  - il 95% dell'energia dell'universo non puo' essere attribuito alle particelle note: **ENERGIA OSCURA**
  - **INFLAZIONE**: in uno stadio primigenio, l'universo ha accelerato la sua espansione in base a meccanismi non spiegabili nel Modello Standard

# La SuperSimmetria

- Molti di questi problemi sarebbero risolti introducendo una nuova teoria (la supersimmetria, SuSy), che prevede tra l'altro una folla di nuove particelle (una per ogni particella fondamentale nota)



# La Rivoluzione Dietro l'Angolo ?

- Large Hadron Collider : collisioni pp ad energie ( $E_{\text{CM}} \sim 14 \text{ TeV}$ ) ed intensità mai raggiunte prima
- Ogni singolo protone (raggio  $10^{-15} \text{ m}$ ) ha la stessa quantità di moto di una zanzara
- Ogni pacchetto del fascio ha la quantità di moto di una granata da obice
- Finalità:
  - Scoperta del bosone di Higgs
  - Ricerca di Processi oltre il MS
    - SUSY ?
    - SuperGravità ?
    - Nuove dimensioni ?



Delacroix's "Liberty Leading the People"

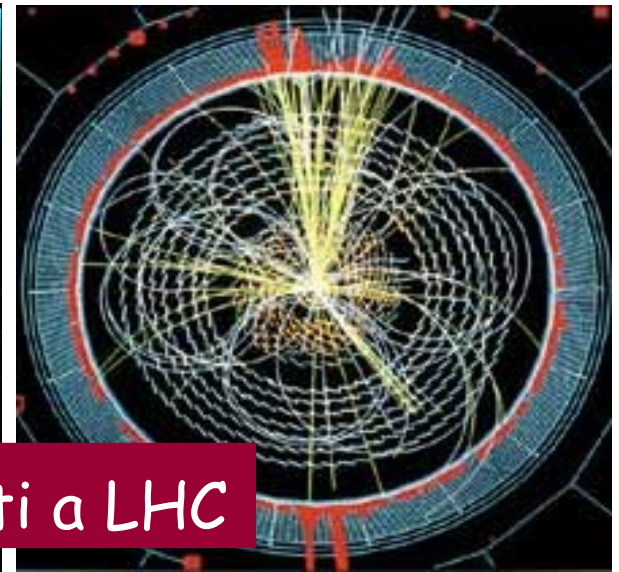
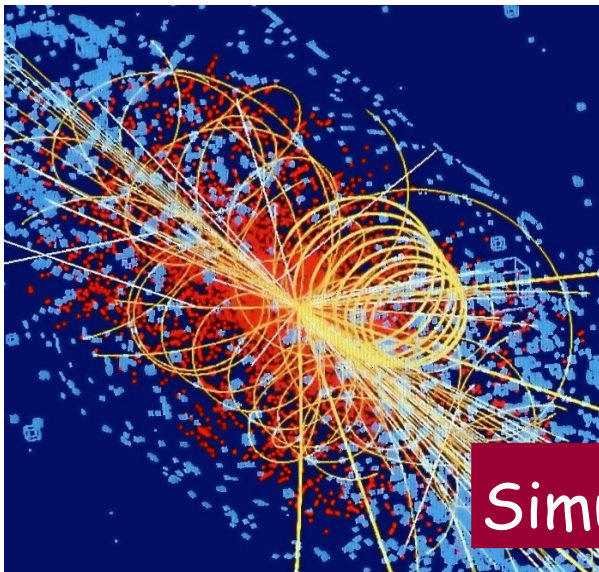
# Large Hadron Collider : l'impresa

- **Una sfida costruttiva che coinvolge CERN, USA, Jp**
  - 5 anni di progettazione
  - 10+ anni di costruzione
  - 144 magneti superconduttori (  $B=9$  Tesla,  $T -271$  °C ) in un tunnel di 27 KM di circonferenza scavato 100 m sottoterra
  - 5 Mld Euro di spesa
- **Impresa paragonabile alla conquista della Luna**



# Large Hadron Collider : la sfida

- Gli eventi interessanti sono rarissimi (meno di uno per miliardo)
- Le topologie sono complicatissime (migliaia di tracce e sciami in ogni evento)
- Servono rivelatori enormi con milioni di canali: *CMS* e *ATLAS*

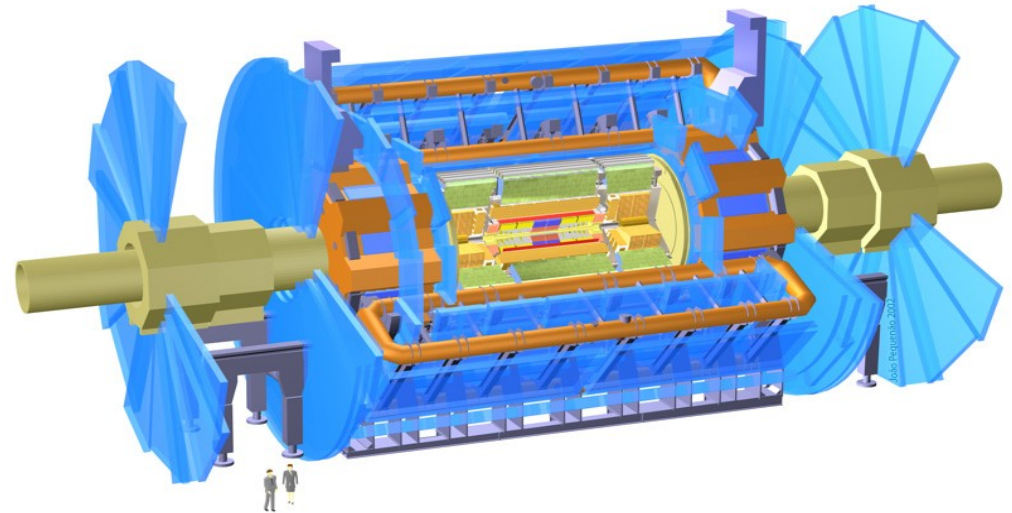
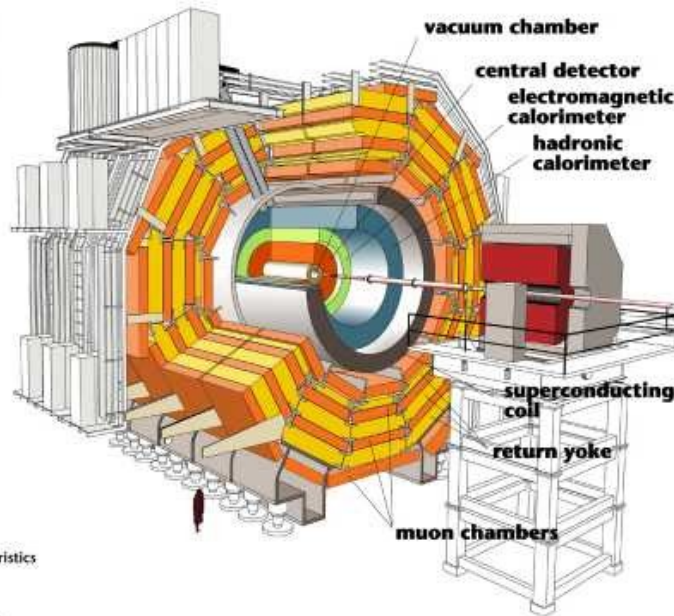


Simulazioni di tipici eventi a LHC

# LHC : i rivelatori

- CMS quello “piccolo”
- ATLAS, quello grande

Centinaia di milioni di segnali elettronici da leggere simultaneamente



Detector characteristics

Width: 22m  
Diameter: 15m  
Weight: 14'500t

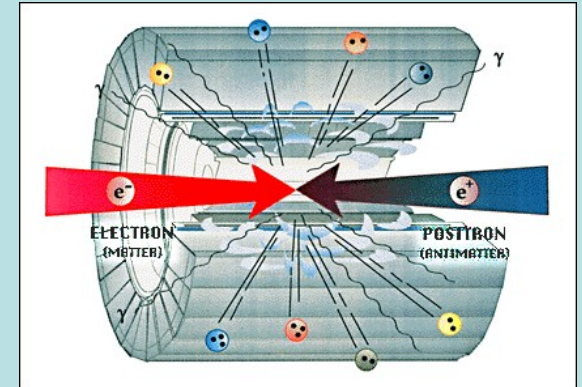
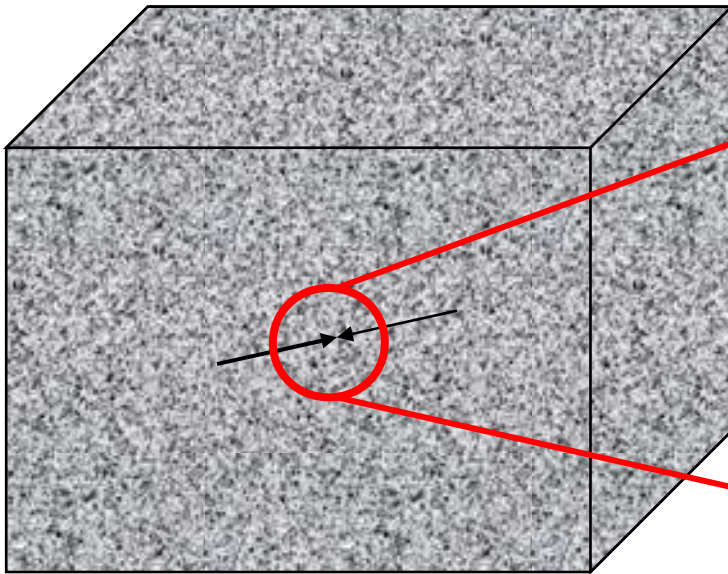
Sono previsti :

- tra i cinque e i dieci anni di operazione
- primi risultati nel 2009 (speriamo)

# Implicazioni cosmologiche

Universo caldo

Acceleratore di particelle ad alta energia



Particelle ad alta energia (temperatura)  
collidono casualmente

Collisioni scelte e controllate

# The Big Bang

15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

1 second

$10^{-10}$  seconds

$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds

$10^{32}$  degrees

$10^{27}$  degrees

$10^{15}$  degrees

$10^{10}$  degrees

$10^9$  degrees

6000 degrees

18 degrees

3 degrees K



- radiation
- particles
- $W^+$  } heavy particles carrying the weak force
- $W^-$  }
- $Z$  }
- quark
- anti-quark
- $e^-$  electron
- $e^+$  positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- $H$  hydrogen
- $D$  deuterium
- $He$  helium
- $Li$  lithium

M. Stonebringer



# Conclusioni

- Dopo più di cento anni di ricerca, non abbiamo ancora capito le fondamenta del Mondo Fisico
- Anche se descrive con esattezza tutti i fenomeni osservati in laboratorio, il Modello Standard non è la teoria finale
- Nei prossimi dieci, grazie in primo luogo al Large Hadron Collider, potremo esplorare la fisica oltre il Modello Standard, spiegare i puzzle cosmologici e fare un passo avanti alla ricerca dei principi primi e delle regole generalissime



# Per saperne di più

- Particle adventure:  
<http://www.infn.it/multimedia/particle/>
- Physics masterclasses:  
<http://www.physicsmasterclasses.org>
- Dal CERN:  
<http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/>  
<http://education.web.cern.ch/education/>  
[http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/hands-on-cern/hoc\\_v21it/index.html](http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/hands-on-cern/hoc_v21it/index.html)  
<http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/it/Welcome.html>
- Interactions.org:  
<http://www.interactions.org/cms/>