



Il Modello Standard

- **Un po' di storia**
- **Le particelle elementari**
- **Le forze**
- **Il Modello Standard**
- **Bosone di Higgs ed oltre ...**



Introduzione

- La Fisica delle particelle affronta le domande fondamentali della storia del pensiero:

- *Come funziona l'Universo ?*

- *Quali sono i componenti fondamentali della materia ?*

- *Da dove nasce ?*



- *Come “si muovono” ?*

- *Come evolve ?*

- *Che cosa “li muove” ?*



Introduzione

Rispondere a queste domande non e' semplice, occorre individuare:

- i componenti fondamentali della materia ;
- le forze che ne governano il comportamento.

Esempi di riduzione a forze "fondamentali"

Forza delle maree: effetto combinato di forze gravitazionali

Forza del vento: forze elettromagnetiche e gravitazionali. Il sole scalda la terra (attraverso la luce, cioe' radiazione elettromagnetica). Le differenze di temperatura fra mare e terra (dovute alle diverse proprieta' chimiche (cioe' elettriche) di acqua e terreno) porta ad una diversa densita' dell'aria sopra al mare e sopra alla terra. La legge di Archimede fa spostare le masse di aria fredda (piu' densa) verso il basso rispetto a quelle di aria calda (effetto della forza di gravita').



La Rivoluzione Greca

- Circa 2500 anni fa i filosofi greci cominciarono a chiedersi: “di cosa e’ fatto il mondo?” e a cercare risposte usando la logica
 - Talete di Mileto (600 AC): acqua ...
 - Anassimene: aria ...
 - Pitagora: numeri ...
 - Eraclito: fuoco ...
 - Empedocle:
 - Quattro elementi: Acqua, aria, terra, fuoco
 - Uniti o separati da forze “moralì” (amore e odio)...
 - Democrito (~400 AC):
 - Tutto costituito da particelle invisibili e indivisibili: atomi
 - Hanno peso e forma diversa e si combinano a formare nuove sostanze





- **Alchimia → Chimica (1780 → 1870)**
 - Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche
 - Evidenza di una “periodicità” (Mendeleev)
 - **Indicazioni di una struttura comune degli elementi**

ELEMENTS

Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

La Tavola Periodica

1A																	0					
1	H																	2				
3	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
11	Na	Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VII				IB	IIB	13	14	15	16	17	18			
19	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
87	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113									

* Lanthanide Series

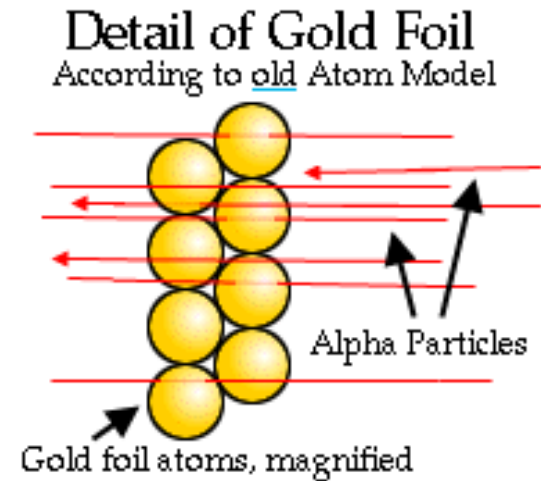
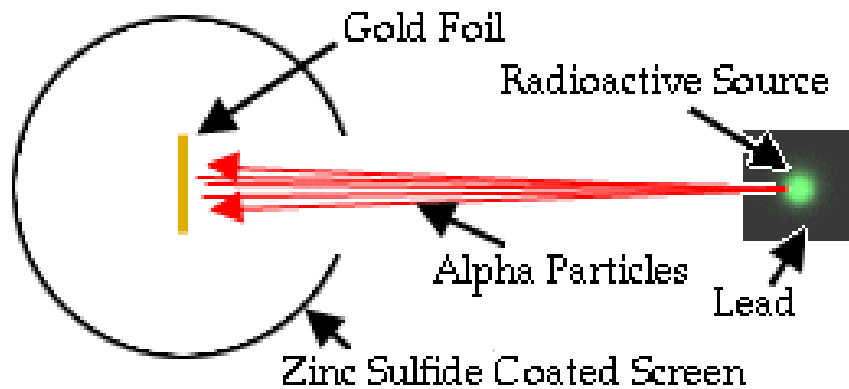
+ Actinide Series

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
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

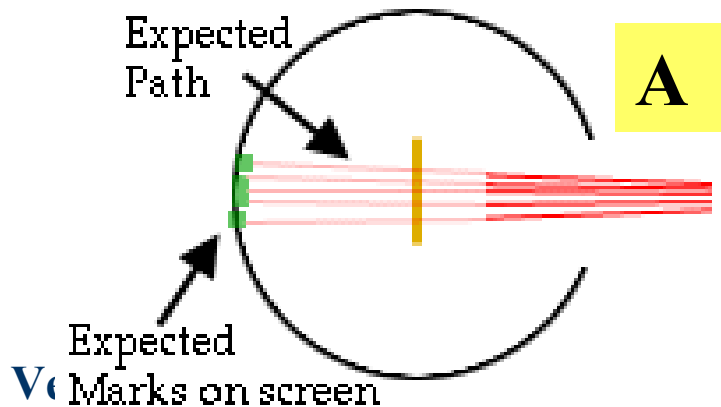


Rutherford (~1910) – classico esperimento bombardamento di particelle su bersaglio (foglio d'oro)

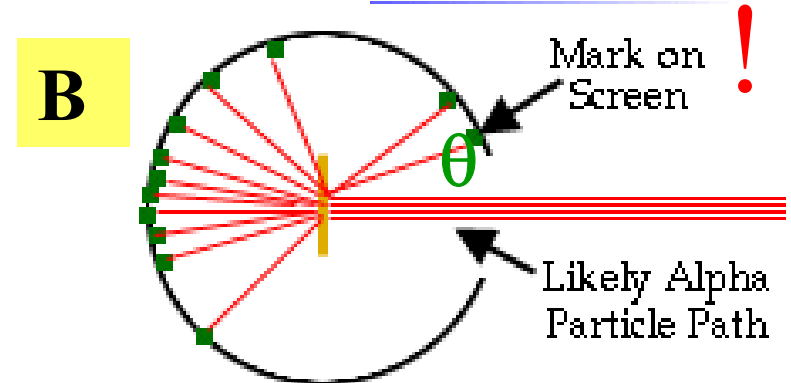
Esperimento di Geiger & Marsden



The Predicted Result:



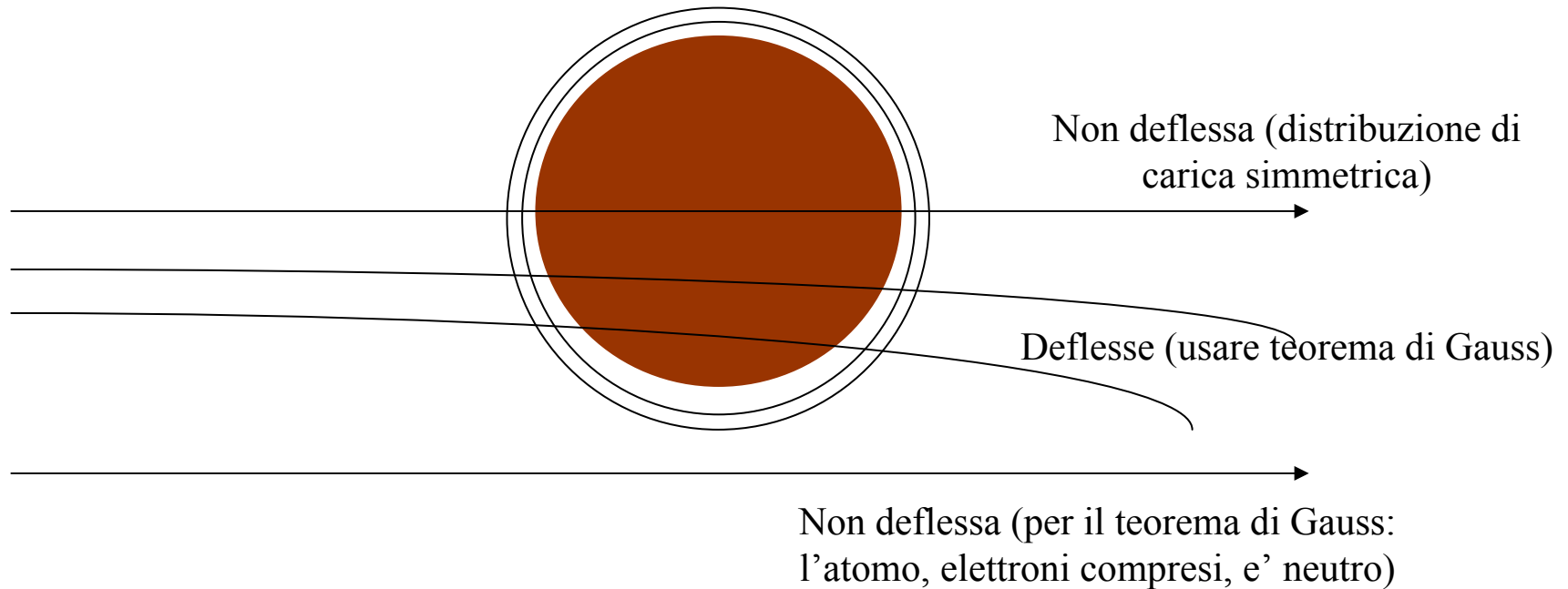
Result:



Ezio Torassa



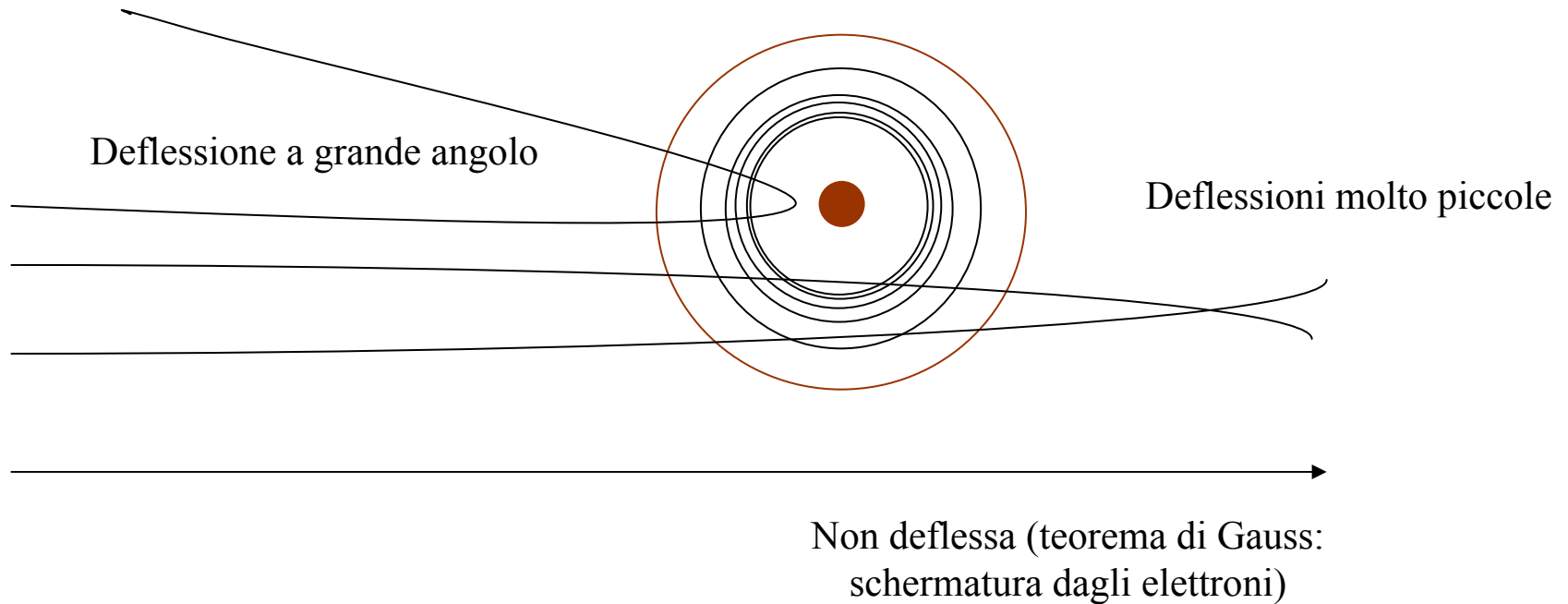
A carica uniformemente distribuita su una sfera dell'ordine delle dimensioni atomiche (all'epoca già note: dell'ordine di 10^{-8} cm)





B

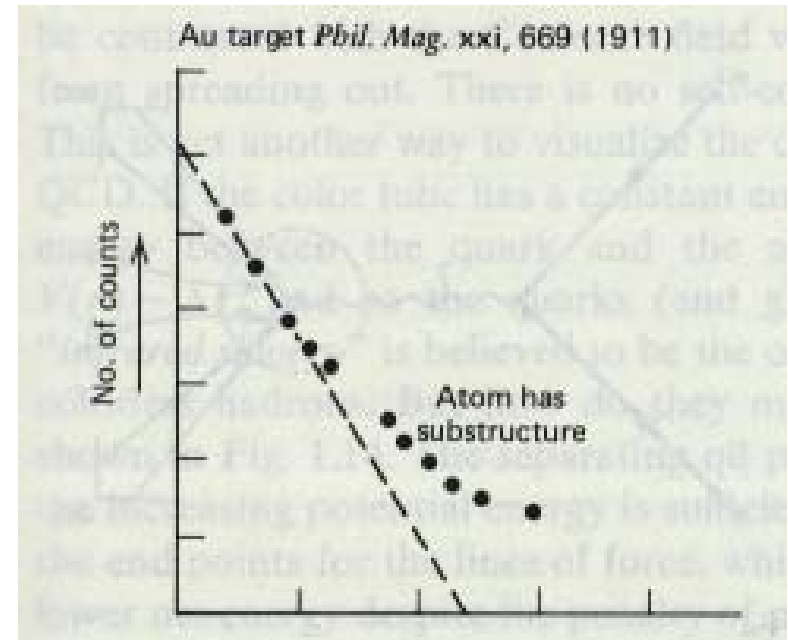
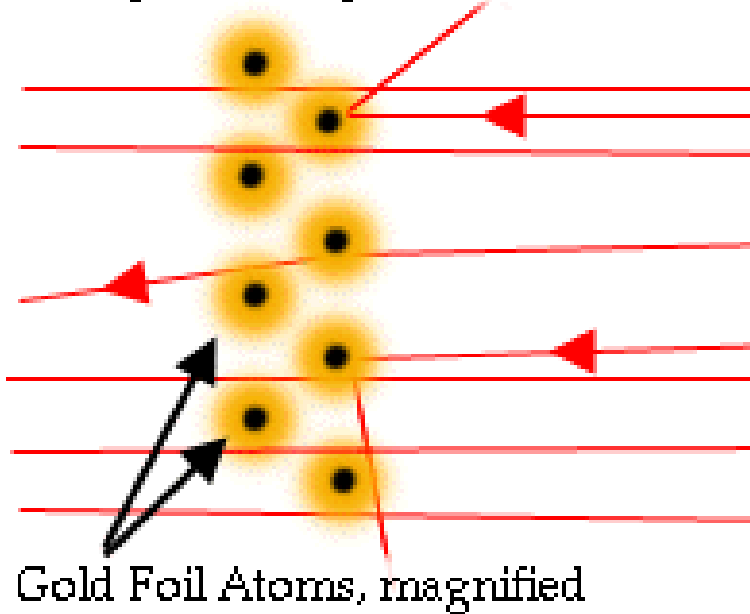
carica concentrata in una porzione di spazio molto piccola
(dell'ordine delle dimensioni del proiettile, o meno)



Rutherford: “E’ come vedere delle palle di cannone rimbalzare su un foglio di carta”



The Positive Nucleus Theory Explains Alpha Deflection



Conclusion

L'atomo contiene un nucleo di
carica positiva di dimensione

$< 10 \text{ fm}$ [$1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$]

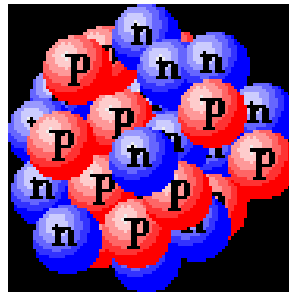
0.000,000,000,000,1 cm



Il nucleo e' fondamentale?

Restò allora da approfondire l'indagine sul nucleo atomico: capire se esso fosse divisibile e, se tale, quali forze ne impediscano la disgregazione.

Intorno al 1926, la presenza nel nucleo di particelle positive, i protoni, in eguale numero rispetto agli elettroni, era accertata. Si osservava tuttavia una certa non linearità fra i pesi ed i numeri atomici (**Z**), colmabile solo postulando la presenza di una seconda particella elettricamente neutra, ma di massa quasi eguale a quella del **protone**. La prima osservazione diretta del **neutrone** avvenne nel 1932.

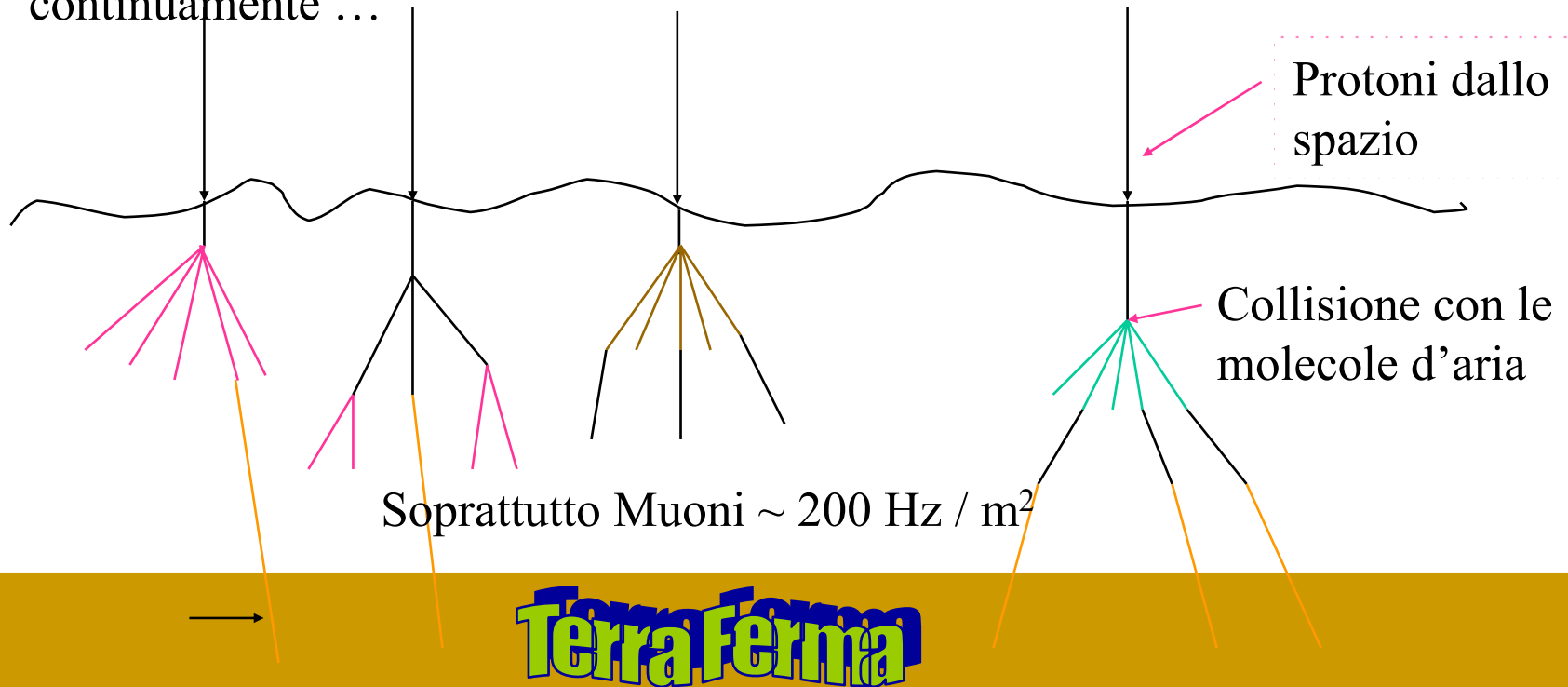




Una sorgente naturale di particelle

- I fisici delle particelle scoprirono ben presto che in natura vi era una copiosa sorgente di particelle di alta energia: *i raggi cosmici*

I raggi cosmici sono particelle cariche di alta energia, soprattutto protoni, che provengono dallo spazio e arrivano fino alla superficie atmosferica della terra. Collisioni fra raggi cosmici e molecole di aria avvengono continuamente ...

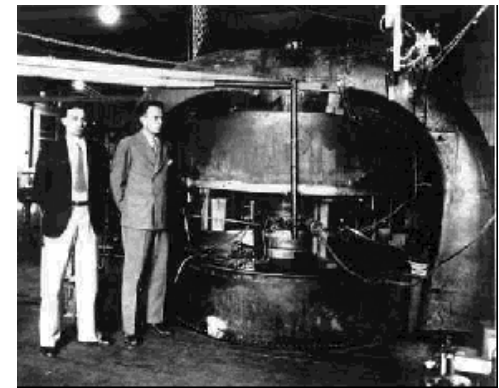
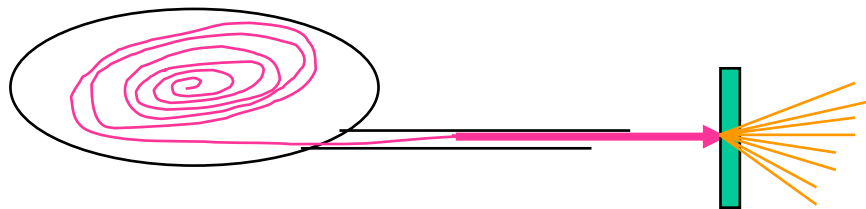




Le particelle elementari

- Lo studio delle interazioni dei raggi cosmici porto' alla scoperta di un grande numero di nuove particelle:
 - 1931 - Il positrone (e^+)
 - 1936 - il muone (m)
 - 1947 - Pioni, kaoni, iperoni

Nel 1931 Ernest Lawrence costruisce la prima macchina acceleratrice che impiega un campo magnetico per spingere le particelle in un'orbita a spirale di raggio crescente con l'energia

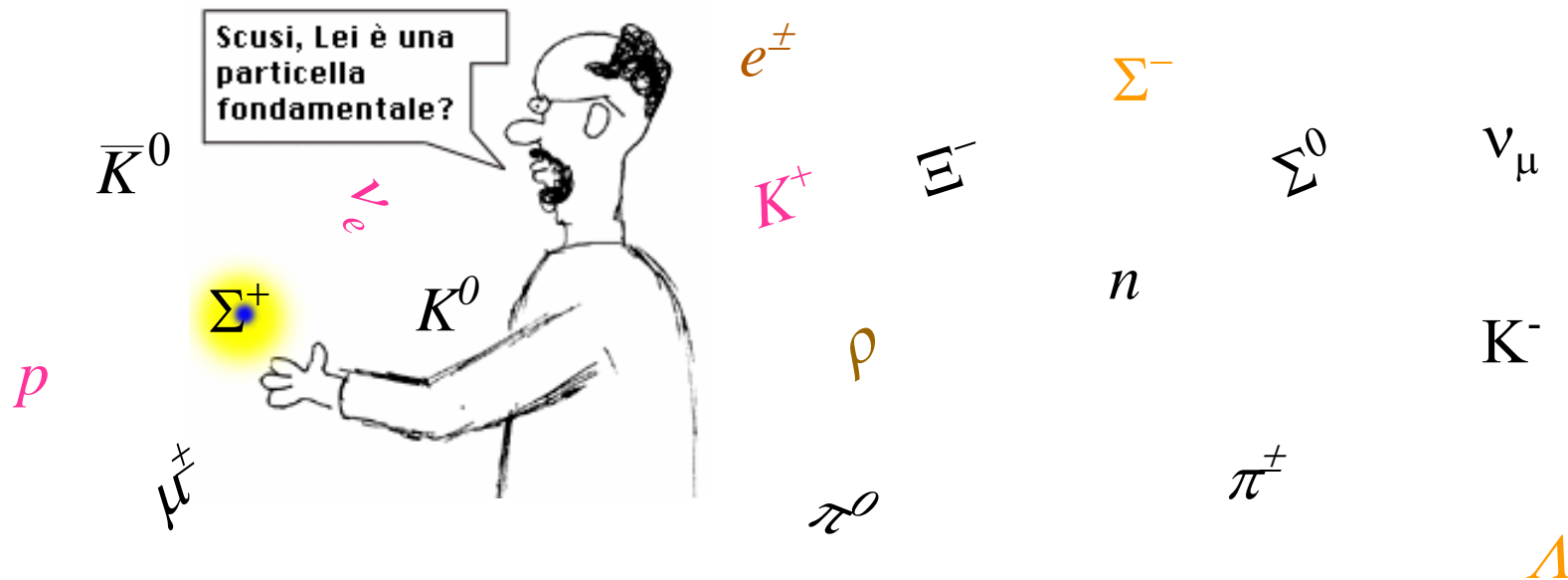


Ottenendo intensita' molto piu' grandi che nei raggi cosmici!



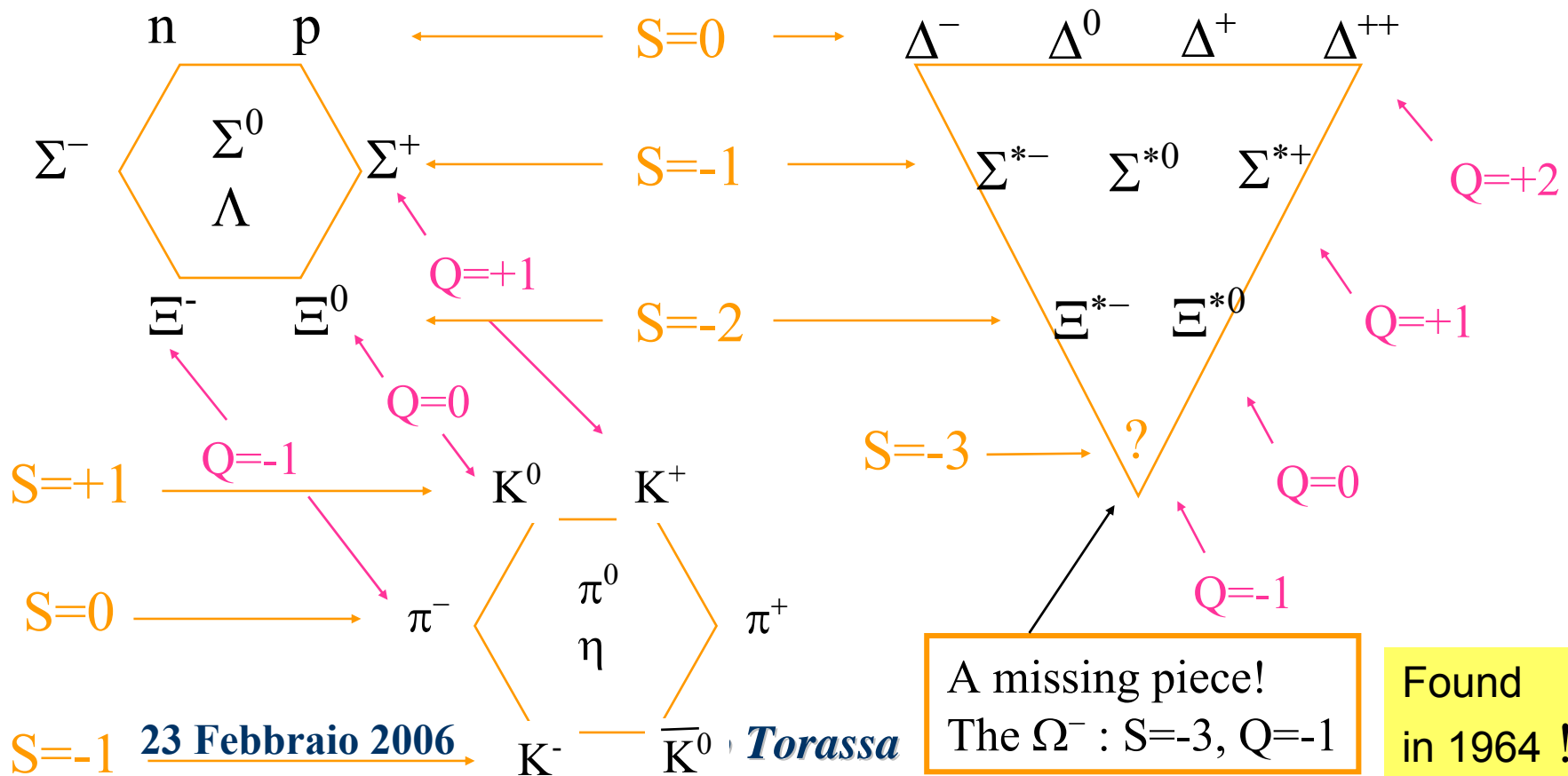
Le particelle elementari

Con i nuovi acceleratori di particelle e nuovi rivelatori (camera a bolle) a disposizione i fisici negli anni 1950 scoprirono circa 200 particelle. Per identificare queste particelle, le hanno chiamate con i nomi delle lettere degli alfabeti greco e romano.





Nel 1961 Gell-Mann & Ne'eman ebbero per la fisica delle particelle lo stesso ruolo di Mendeleev 100 anni prima con gli atomi "fondamentali"





Ordine ⇒ Costituenti fondamentali

- Proprio come l'ordine della tavola periodica era dovuto ai tre componenti fondamentali, così Gell-Mann e Zweig proposero che tutti gli "adroni" fossero costituiti da tre oggetti che vennero chiamati "quarks"

UP

DOWN

Strange

I quark hanno cariche elettriche pari a $2/3$, $-1/3$. $-1/3$ della carica dell'elettrone

p	uud
n	udd
π^+	$u\bar{d}$
π^0	$u\bar{u}$
π^-	$d\bar{u}$

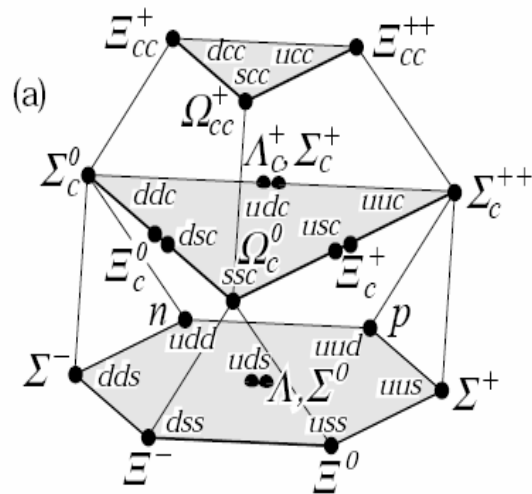
Δ^{++}	uuu
Δ^+	uud
Δ^0	udd
Δ^-	ddd
Ω^-	sss

K^+	$u\bar{s}$
K^0	$d\bar{s}$
K^-	$s\bar{u}$
K^0	$s\bar{d}$

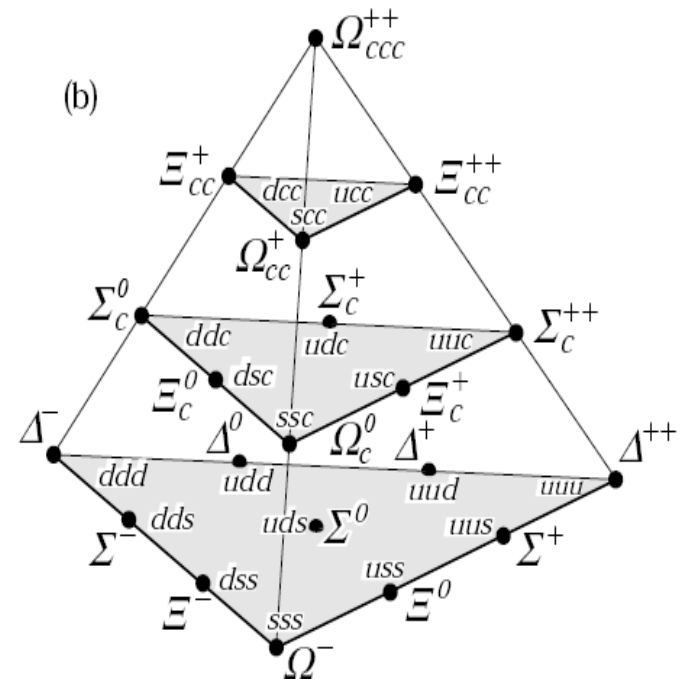


Il quark incanto (charm)

Il quark incanto (c) fu introdotto nel 1974 per spiegare alcune particolarità di una nuova particella allora scoperta, il mesone J (o Ψ). Cercando di costruirla con i quarks allora disponibili, u d s, ci si accorse che era impossibile.



(a) Barioni con spin=1/2

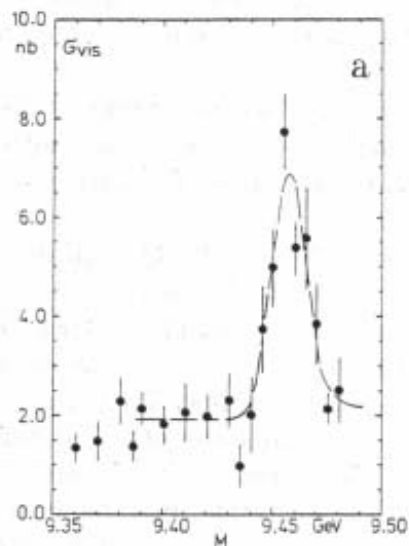


(b) Barioni con spin=3/2

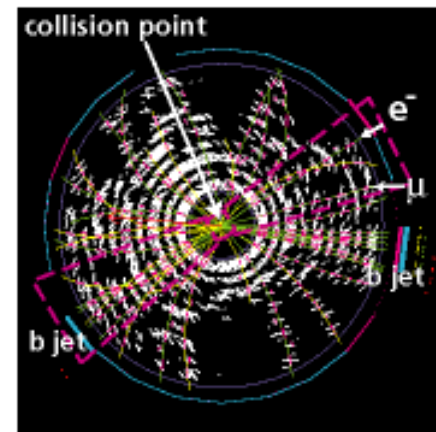


I quarks top e bottom

1977: scoperta del b

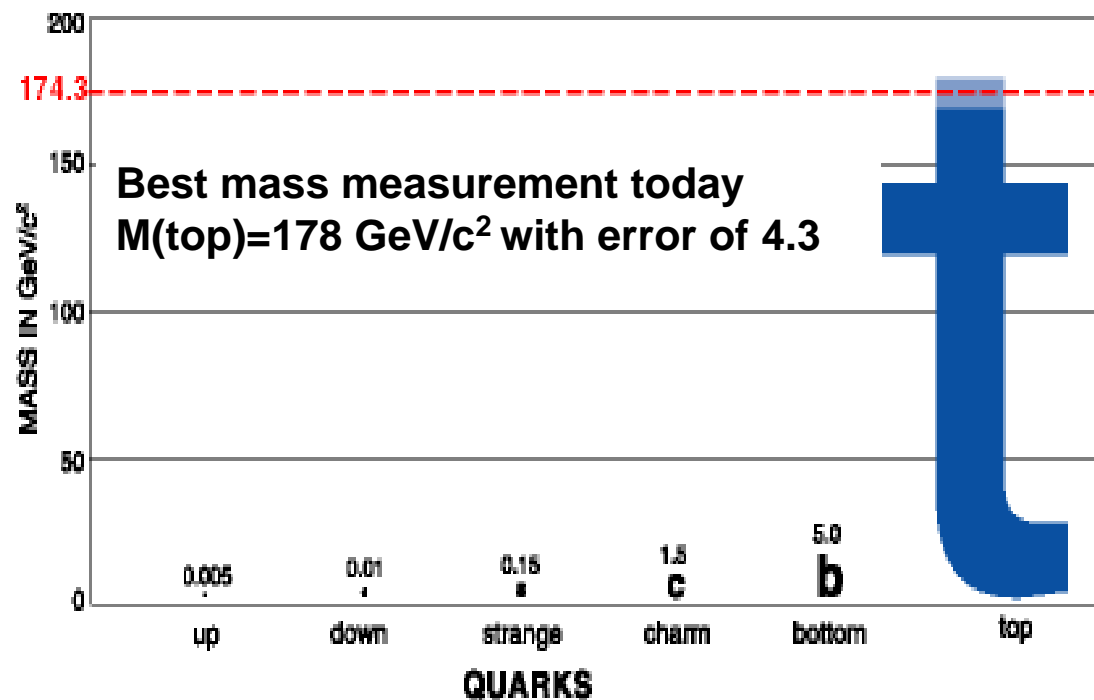


1994: scoperta del t



Ci sono 5 ordini di grandezza
fra la massa del quark piu'
leggero (up) e quello piu
pesante(top)!

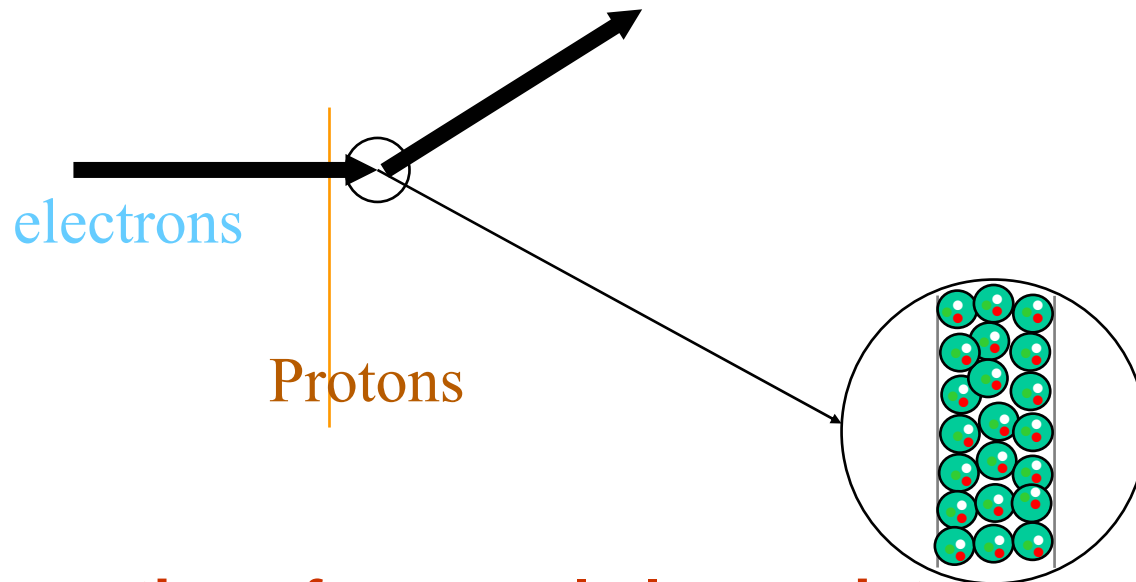
Verona 23 Febbraio 2006





Dove sono i quarks?

- Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark dove sono ?
- Proviamo a ripetere l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte ...



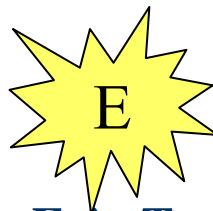
**Gli esperimenti confermano la loro esistenza
(ma i quarks liberi non esistono).**



- Per ogni particella (**materia**) c'è la corrispondente antiparticella (**antimateria**).
 - Un'antiparticella è identica alla sua particella sotto ogni aspetto, tranne che per la carica, che è opposta.
 - Per esempio: il protone ha carica elettrica positiva, e l'antiprotone ha carica elettrica negativa; ma hanno la stessa identica massa, perciò sono soggetti alla gravità nella stessa identica maniera.

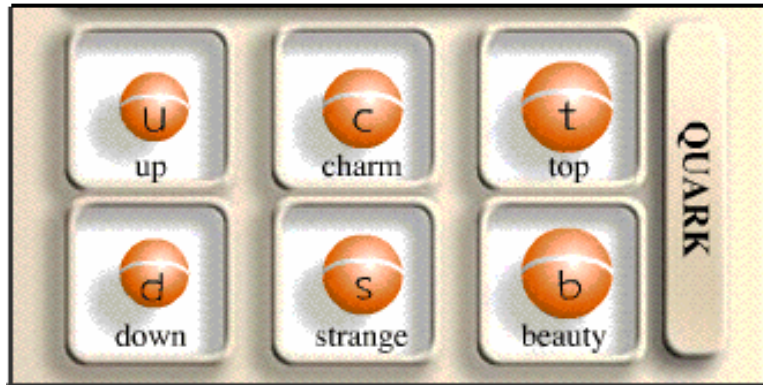


- Quando una particella e la sua antiparticella si incontrano, si annichilano in energia pura.





Gli adroni



I Quark sono 6 (+ 6 antiquark)

possono assumere 3 stati quantici chiamati colore, hanno carica $+2/3$ (u, c, t) e $-1/3$ (d, s, b)

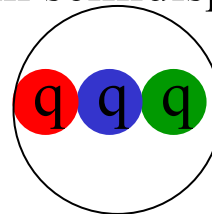
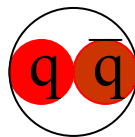
Adroni:

Mesoni

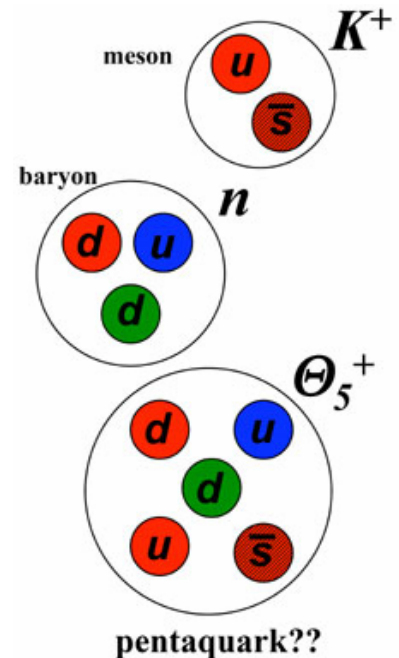
Barioni

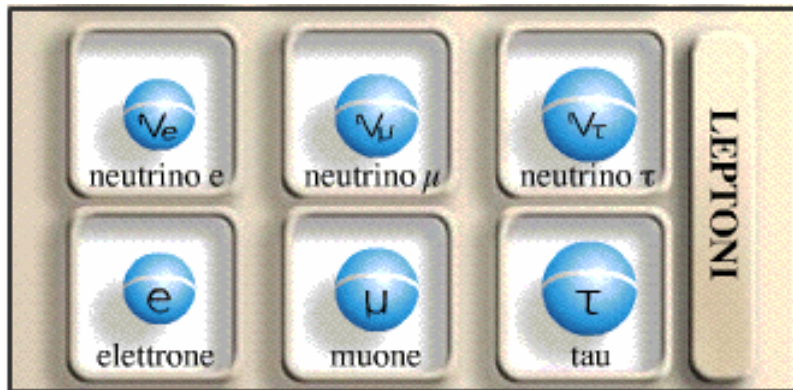
(spin intero)

(spin semidispari)



sono privi di colore





I Leptoni sono 6 (+ 6 antileptoni)

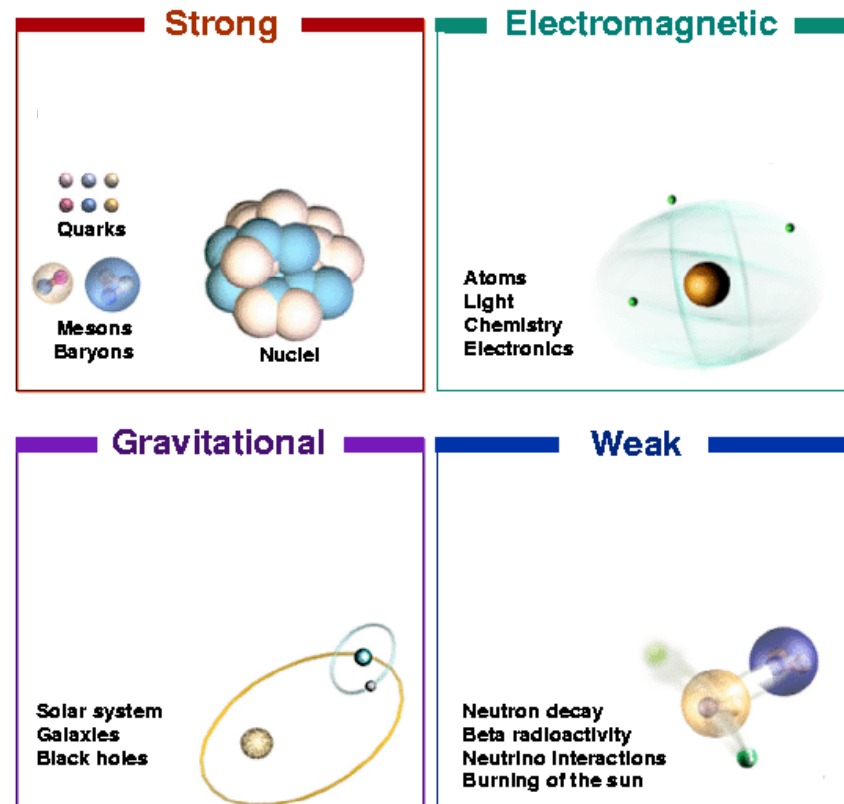
sono privi di colore, hanno carica
 0 (ν_e, ν_μ, ν_τ) e -1 (e, μ, τ)

- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone (μ) e il tau (τ)
 - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni neutri si chiamano neutrini:
 - c'è un neutrino corrispondente a ogni leptone carico
 - hanno massa molto piccola (ma non nulla)



- L'universo che conosciamo esiste perché le particelle fondamentali interagiscono:
 - decadono
 - si annichilano
 - reagiscono a forze legate alla presenza di altre particelle (per esempio nelle collisioni).
- Ci sono quattro interazioni (forze) tra le particelle:
 - Gravita'
 - ElettroMagnetica
 - Forte
 - Debole

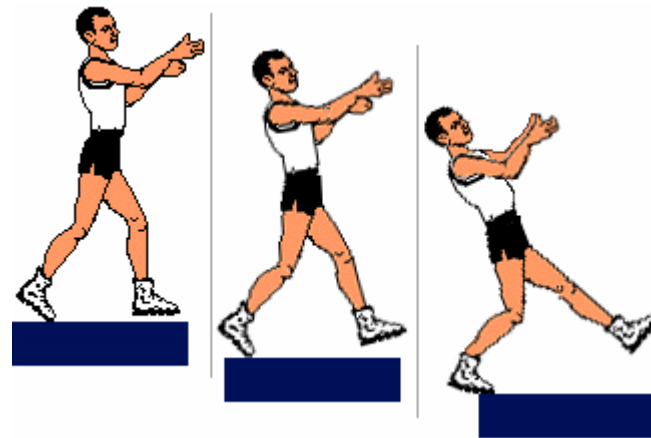
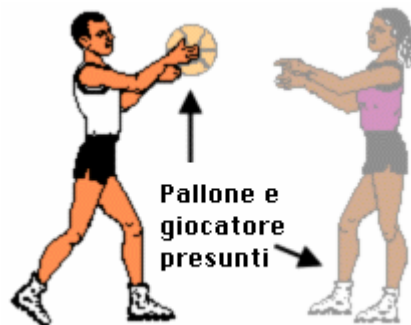
Forces



The particle drawings are simple artistic representations



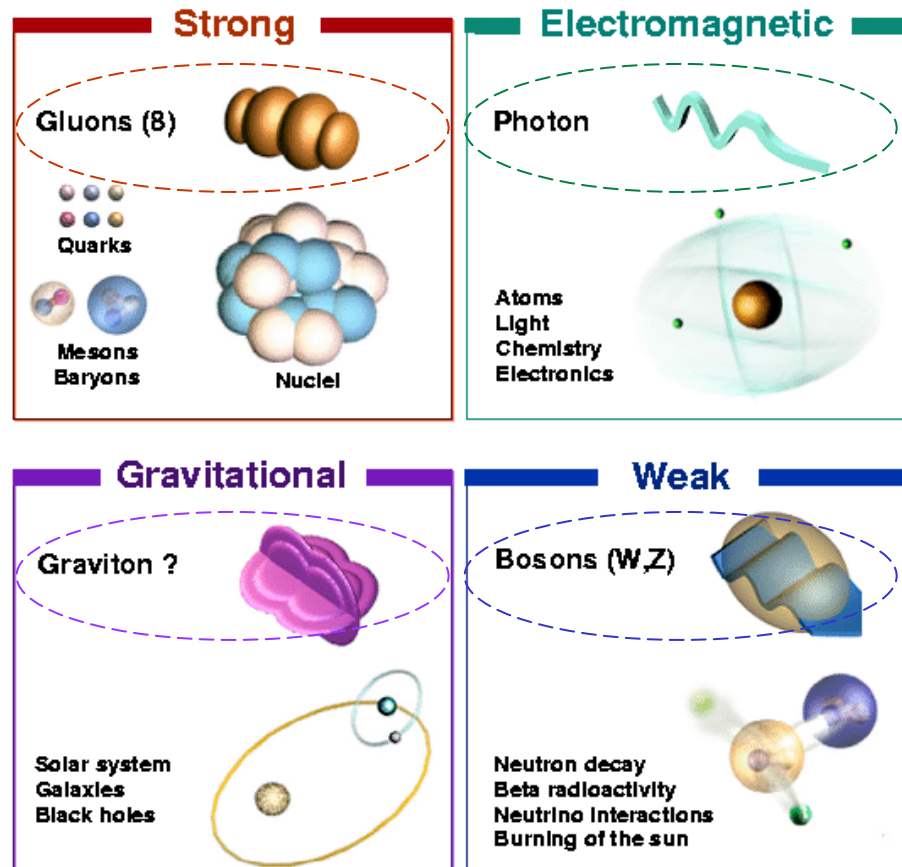
- Per risalire alla natura delle forze bisogna studiare le interazioni fra particelle materiali
- Consideriamo la vignetta seguente:
 - Il giocatore ha afferrato un pallone invisibile e viene spinto indietro dall'impatto.
 - il pallone non e' visibile, ma e' visibile l'**effetto** della sua presenza





I mediatori di forza

- Tutte le interazioni (o forze) che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di **mediatori di forza**.
 - Riprendendo l'immagine di prima:
 - i giocatori == particelle materiali
 - pallone == particella mediatrice di forza.
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli **effetti dei mediatori di forza** sulle particelle materiali.



The particle drawings are simple artistic representations



Gravita'

- La forza gravitazionale è probabilmente la forza che ci è più familiare:
 - non è compresa nel Modello Standard perché i suoi effetti sono piccolissimi nei processi tra le particelle



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

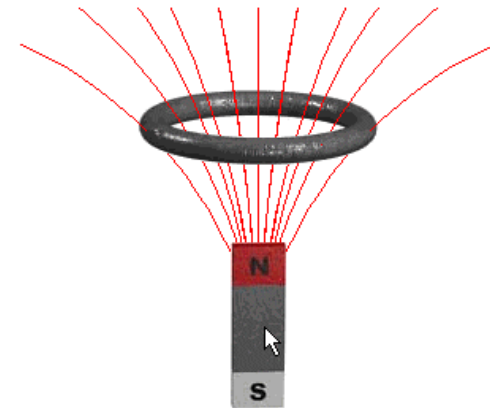


Elettromagnetismo



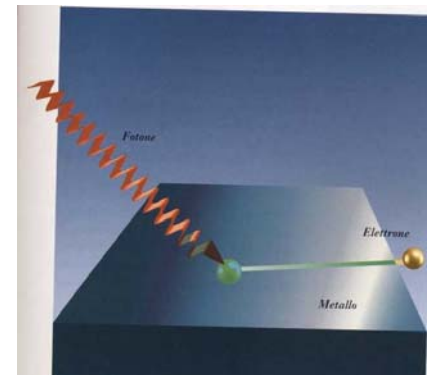
Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute alle interazioni elettromagnetiche nella materia:

La carica elettrica (positiva/negativa) e il magnetismo (nord/sud) sono diverse facce di una stessa interazione, l'elettromagnetismo.



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

L'evidenza che le onde elettromagnetiche sono composte da pacchetti di energia chiamati fotoni si ebbe nel 1905 con l'interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico

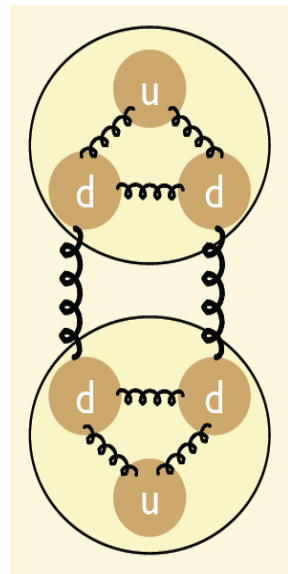




- I quark hanno una carica di un nuovo tipo: è stata chiamata **carica di colore**. L'intensità della carica di colore aumenta all'aumentare della distanza.
- Tra particelle dotate di carica di colore l'interazione è molto forte, tanto da meritarsi il nome di **interazione forte**. La sua particella mediatrice è stata chiamata **gluone**: perché "incolla" i quark fra di loro

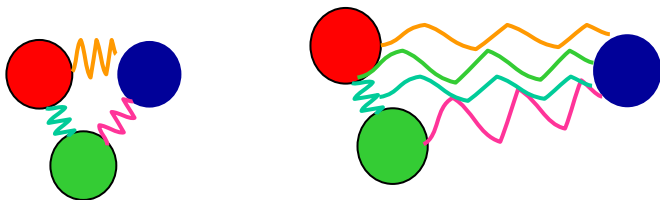
D: Perché la repulsione elettromagnetica fra i protoni del nucleo non fa esplodere il nucleo dell'atomo ?

R: Possono scambiarsi gluoni anche quark appartenenti a diversi protoni. Ne risulta una forza residua come la forza di Van der Waals tra le molecole. L'attrazione tra protoni dovuta alla forza forte è meno intensa rispetto all'attrazione tra quarks nel protone, ciò rende possibile l'esistenza di protoni liberi ed instabili alcuni nuclei pesanti.

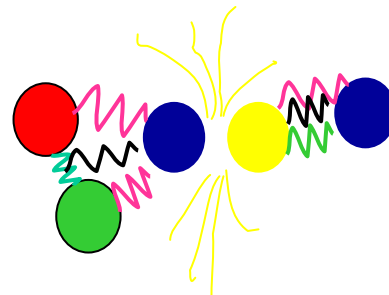




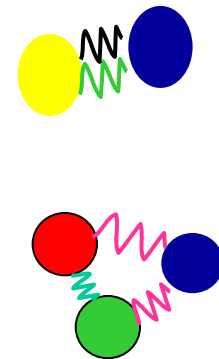
- La forza di colore cresce al crescere delle distanze
- Cosa succede se si cerca di “spezzare” un adrone?
 - Se uno dei quark di un adrone viene allontanato dai suoi compagni, il campo di forza di colore "si allunga" per mantenere il legame.
 - In questa maniera cresce l'energia del campo di forza di colore, e cresce quanto più vengono allontanati i quark tra loro.



Energia del campo di colore cresce...

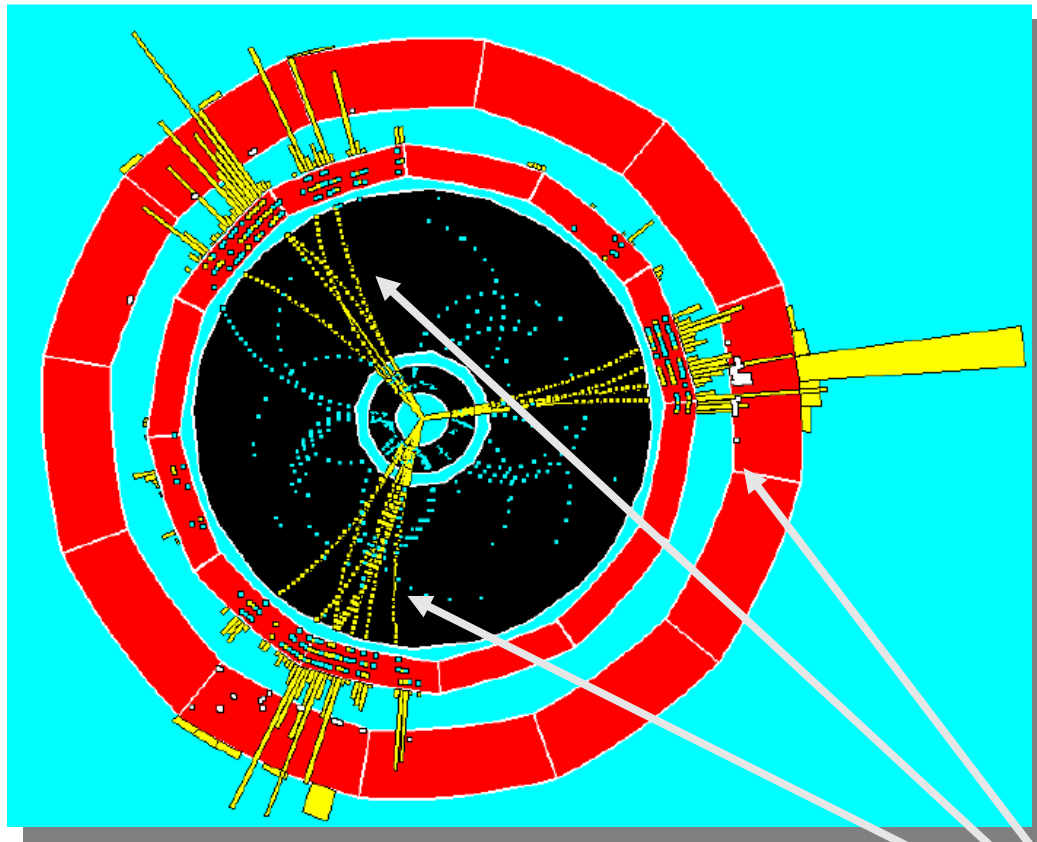


$E=mc^2$ sufficiente per creare un'altra coppia quark-antiquark





Come si “vedono” i quark

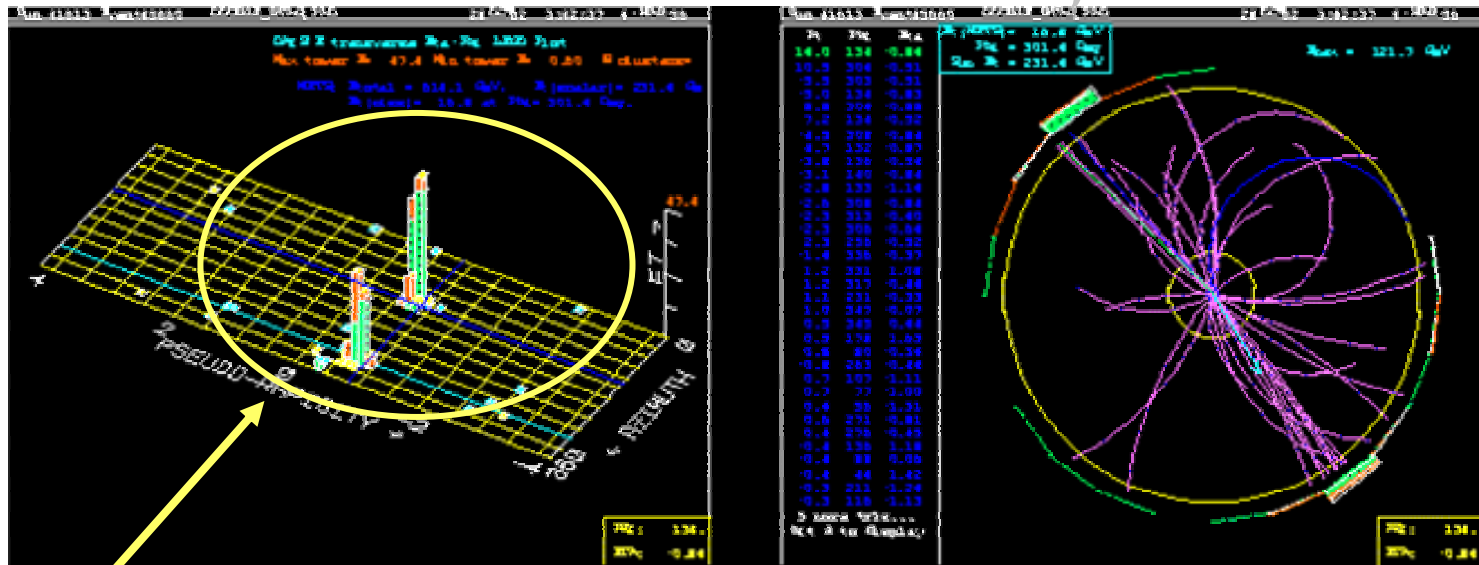


Negli anni '70, nelle collisioni elettrone-positrone ad alta energia, **si osservano dei “getti” di energia, associabili alla presenza di gluoni** dovuti dalla forza nucleare forte che si origina dalle interazioni tra quark. E' la manifestazione piu' spettacolare del “confinamento”

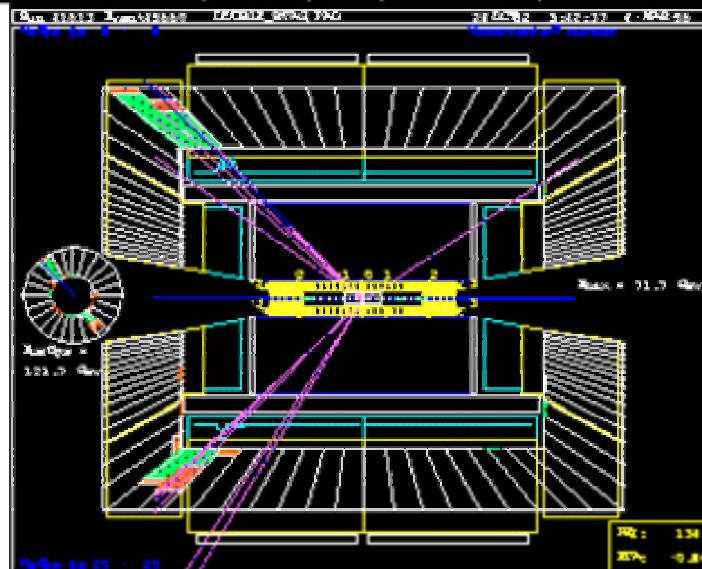
I gluoni e i quark si materializzano in “getti”(ing: jet) di particelle



Un altro evento con jets



Gli stessi getti si osservano in eventi provenienti da collisioni protone-antiprotone

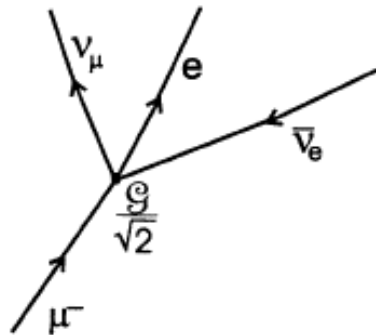


Verona 23 Febbraio 2006

Ezio Torassa



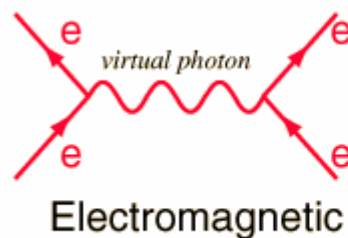
La forza debole



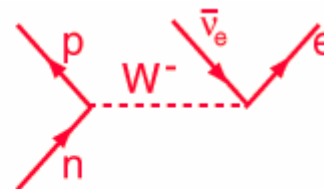
G = costante di Fermi

La prima teoria della forza nucleare debole e' dovuta a Fermi (1934) ed era basata sull'interazione in un unico punto di 4 particelle. Permetteva di spiegare e descrivere i decadimenti del muone e del neutrone.

Analogamente alla forza Elettromagnetica mediata dal fotone, e' stata introdotta una descrizione quantistica-relativistica ove comparivano i mediatori W^+ e W^- , dotati di grande massa.



Electromagnetic



Weak

$$G \sim (e/M_W)^2$$



Teoria ElettroDebole

La teoria che descrive i mediatori della forza debole include anche l'elettromagnetismo ed assume il nome di teoria elettrodebole.

Le equazioni che la descrivono sono ricavate imponendo delle leggi di invarianza:

simmetria di ipercarica $U_Y(1)$
simmetria di isospin sinistro $SU_L(2)$

$SU_L(2)$ e $U_Y(1)$ sono trasformazioni dei campi $\Psi(x,y,z,t)$ (che descrivono lo stato delle particelle). Le leggi del moto devono essere invarianti per tali trasformazioni.

La teoria risultante descrive correttamente il comportamento del mediatore dell'elettromagnetismo γ elettrodebole e dei mediatori carichi della forza debole W^+ , W^- . Prevede anche un mediatore neutro Z^0 non introdotto nella prima descrizione della forza debole perche' i suoi effetti sono poco visibili a basse energie.



Teoria ElettroDebole

L'applicazione delle sole leggi di invarianza descritte in precedenza ha un difetto, prevede solo particelle e mediatori privi di massa (e' corretta ad energie sufficientemente elevate da poter trascurare le masse)

L'introduzione di un campo aggiuntivo (campo di Higgs) e di una trasformazione chiamata "Rottura spontanea di Simmetria" permette di passare ad una descrizione in cui le particelle (quark e leptoni) ed i mediatori della forza debole risultano essere massivi. Il fotone resta privo di massa.

Le masse dei mediatori, previste dalla teoria stessa sono circa 100 volte la massa del protone:

$$M_W \approx 80 \text{ GeV}$$

$$M_Z \approx 90 \text{ GeV}$$

Scoperte nel 1983!
..e con la corretta massa

La W e la Z hanno una vita media brevissima, ma possono essere identificate tramite i loro prodotti di decadimento, anche essi predetti dalla teoria elettrodebole



Il modello standard

E' l'attuale descrizione delle interazioni **elettro-deboli** e **forti** dei costituenti fondamentali della materia **quarks** e **leptoni** , oggetti “puntiformi” di spin $\frac{1}{2}$.

E' basata su due teorie di invarianza:

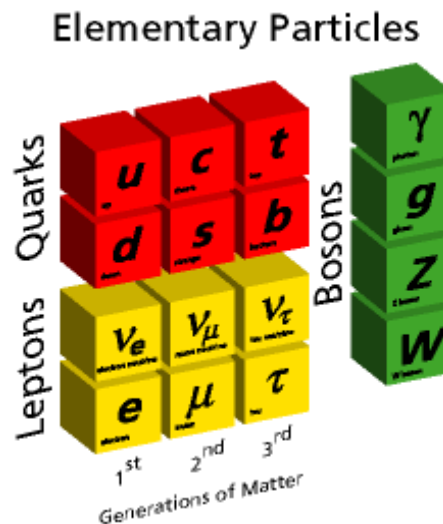
- ▶ QCD (Quantum Chromodynamics) : gruppo di simmetria SU(3) di “colore”
- ▶ QE_WD (Quantum Electroweak Dynamics) : gruppo di simmetria SU(2)xU(1)



Il modello standard

La sua bellezza sta nella capacità di descrivere:

- tutta la materia
- tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)



Semplicità!

Verona 23 Febbraio 2006

Ezio Torassa

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

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

FERMIONS

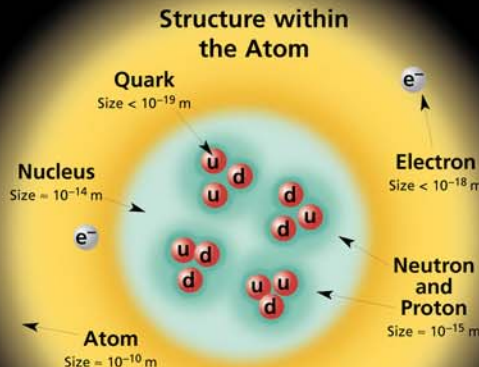
matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

BOSONS

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

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

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



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

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

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

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

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

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

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

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

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

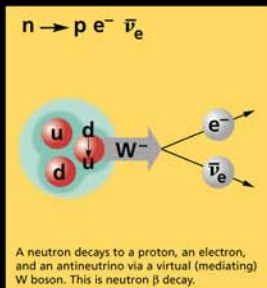
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	u\bar{d}	+1	0.140	0
K^-	kaon	s\bar{u}	-1	0.494	0
ρ^+	rho	u\bar{d}	+1	0.770	1
B^0	B-zero	d\bar{b}	0	5.279	0
η_c	eta-c	c\bar{c}	0	2.980	0

Matter and Antimatter

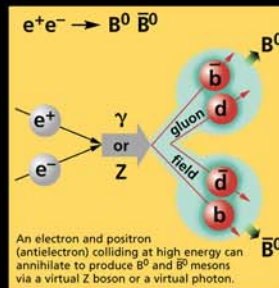
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not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

Figures

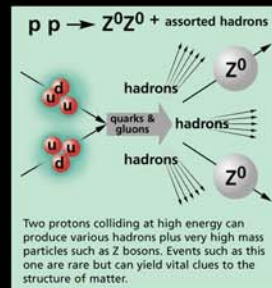
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are **not** exact and have **no** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.



An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and \bar{B}^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure

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

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

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

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

<http://CPEPweb.org>



Linguaggio matematico

Lagrangiana della QE_WD :

$$L_{QE_WD} = L_{gauge} + L_{fermioni} + L_{Higgs} + L_{Yukawa}$$

$$L_{gauge} = -\frac{1}{4} \vec{W}_{\mu\nu} \vec{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

$$L_{fermioni} = L_{lept} + L_{quark} \quad \Rightarrow \text{termini di interazione fermioni - bosoni vettori}$$

$$L_{Higgs} = \frac{1}{2} (D_\mu \phi)^2 - V(\phi)$$

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix}$$

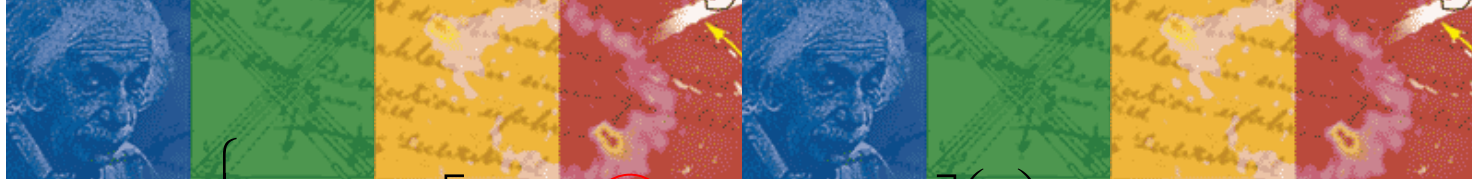
$$D_\mu = \partial_\mu + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_\mu - i g' B_\mu$$

$$V = a \phi^2 + b \phi^4$$

$$L_{Yukawa} = -G_i \left[\bar{L} \phi R + \bar{R} \phi^{T*} L \right]$$

\Rightarrow termini di interazione fermioni-bosoni scalari

L = doppietto left R = singoletto right



$$L_{lept} = \sum_{l=e,\mu,\tau} \left\{ (\bar{\nu}, \bar{\ell})_L \gamma_\mu \left[\partial_\mu + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_\mu - i g' B_\mu \right] \begin{pmatrix} \nu \\ \ell \end{pmatrix}_L + \bar{\ell}_R \gamma_\mu \left[\partial_\mu - i g' B_\mu \right] \ell_R \right\}$$

$$L_{quark} = \sum_{\substack{u=u,c,t \\ d=d,s,b}} \left\{ (\bar{u}, \bar{d})_L \gamma_\mu \left[\partial_\mu + i \frac{g}{2} \vec{\sigma} \vec{W}_\mu - i g' B_\mu \right] \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L + \bar{u}_R \gamma_\mu \left[\partial_\mu - i g' B_\mu \right] u_R \right\}$$

$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$: matrici di Pauli, \vec{W}_μ, B_μ generatori dei gruppi SU(2), U(1)

g g' a b G_i parametri del modello

$m_e = \frac{G_e v}{\sqrt{2}}$ $m_H = 2\sqrt{a}$ considerando a parte le masse dei fermioni e dell'Higgs restano 3 parametri: g g' v

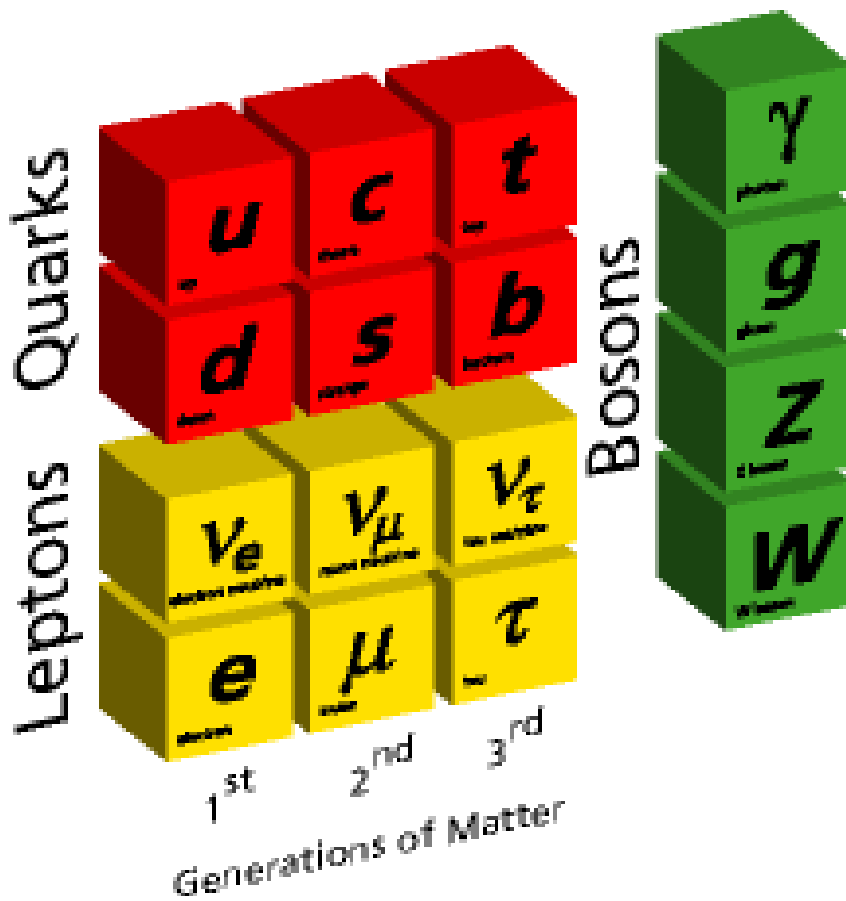
v minimo del potenziale di Higgs $= \sqrt{\frac{-a}{2b}}$

Rottura di
simmetria



Le generazioni della materia

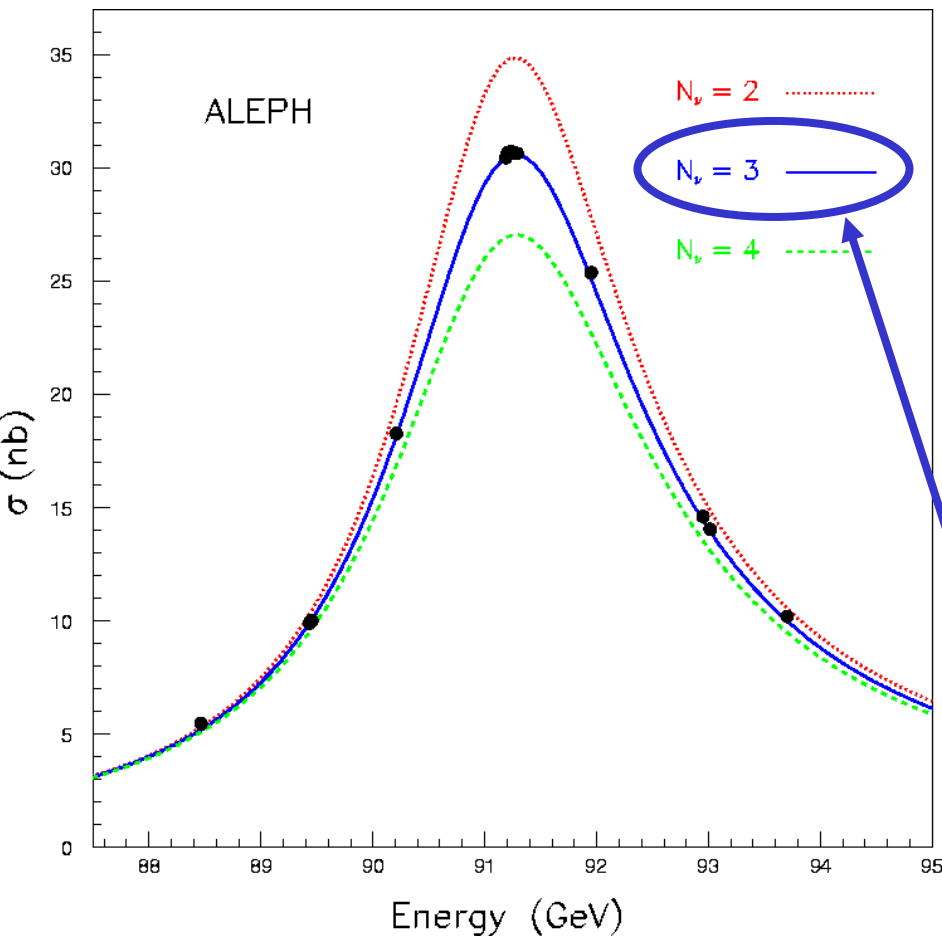
Elementary Particles



- Quarks e leptoni organizzati in tre “famiglie”:
 - tutta la materia visibile nell’universo e’ costituita dalla prima generazione.
 - Le particelle della 2a e 3a generazione sono instabili e decadono in particelle della 1a
- Ci sono altre generazioni?
 - Non si sa il perche’ di queste “repliche”...sorprese sono ancora possibili...
 - Sperimentalmente pare di no



Verifica del Modello Standard



Negli anni '90, i dati raccolti al LEP studiando il decadimento del bosone Z, ci permettono di determinare con grande precisione il numero di neutrini (e quindi il numero di generazioni) e di escludere con certezza la presenza di neutrini "anomali". Una ulteriore conferma del Modello Standard

La curva corrispondente ad un numero di generazioni pari a tre descrive meglio la curva!

Il precedente limite era basato su considerazioni cosmologiche

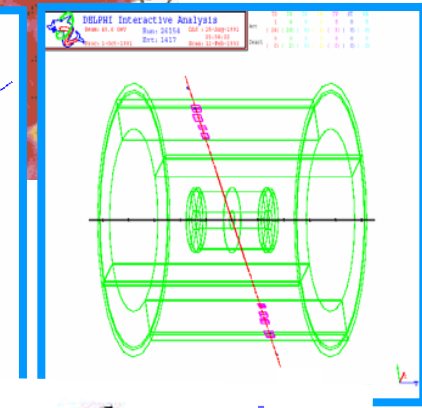
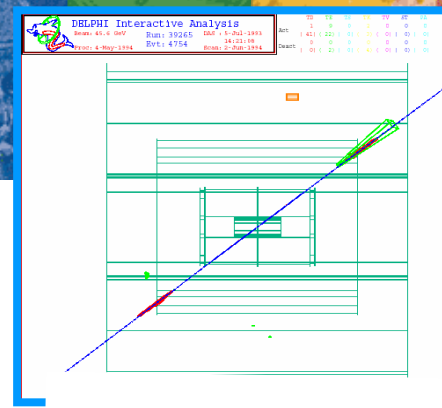


Decadimenti della Z

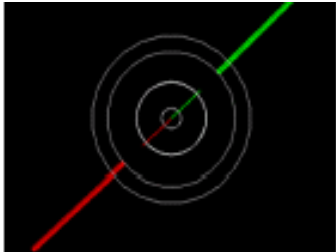
La Z^0 può decadere in 5 *modi* diversi, ciascuno con una sua probabilità:

Z^0	$\nu \bar{\nu}$	$p=0,20$ (invisibile)	
	e^-e^+	$p=0,0337$	$p_\nu= 0,0421$
	$\mu^-\mu^+$	$p=0,0337$	$p_\nu= 0,0421$
	$\tau^-\tau^+$	$p=0,0337$	$p_\nu= 0,0421$
	$q \bar{q}$	$p=0,699$	$p_\nu= 0,8738$

$q \bar{q}$ comprende le seguenti 5 possibilità: $u \bar{u}$ $d \bar{d}$ $s \bar{s}$ $c \bar{c}$ $b \bar{b}$
 ($t \bar{t}$ escluso in quanto $m_t > M_Z$)

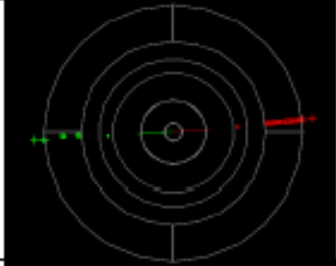


$Z \rightarrow e^+e^-$



- TRK: **SI**
- N(TRK): 2
- EM CAL: **SI** ████
- HAD CAL: **NO**
- MU: **NO**

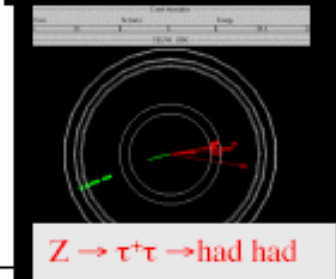
$Z \rightarrow \mu^+\mu^-$



- TRK: **SI**
- N(TRK): 2
- EM CAL: **NO**
- HAD CAL: **NO*** ██
- MU: **SI** +++

$Z \rightarrow \tau^+\tau^-$

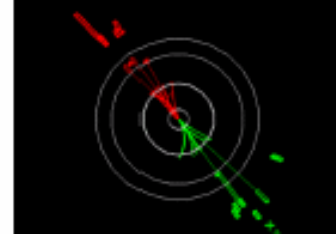
[ossia: $e\bar{e}$, $\mu\bar{\mu}$, $e\mu$ o adroni + energia non visibile]



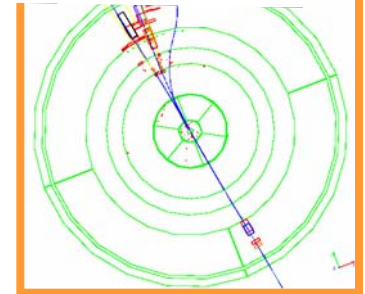
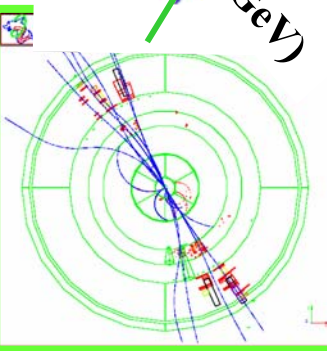
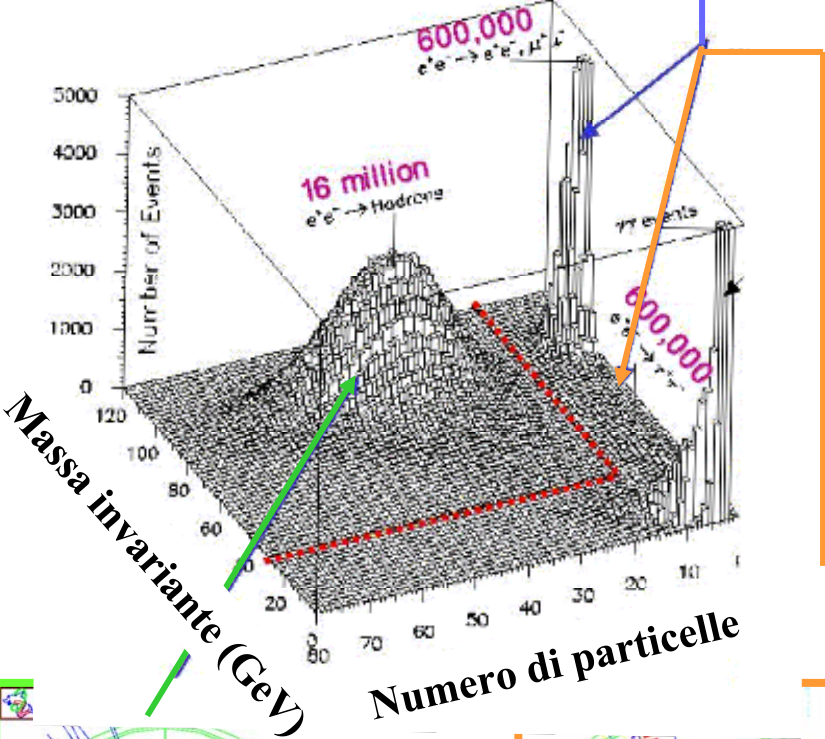
$Z \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \text{had had}$

- Vari decadimenti!
- $\tau \rightarrow \nu \nu e$
 - $\tau \rightarrow \nu \nu \mu$
 - $\tau \rightarrow N \text{ adroni}$
 - Neutrini sempre!

$Z \rightarrow qq$



- TRK: **SI**
- N(TRK): Tante
- EM CAL: **SI** ████
- HAD CAL: **SI** ████
- MU: **SI** +++





Il bosone di Higgs

La teoria di Glashow, Weinberg e Salam (detta anche *Modello Standard*) prevede anche un campo chiamato di Higgs.

Le interazioni di questo campo con le particelle sono all'origine della massa di quest'ultime. La domanda:

- “perche’ la particella X ha massa m_X ?”

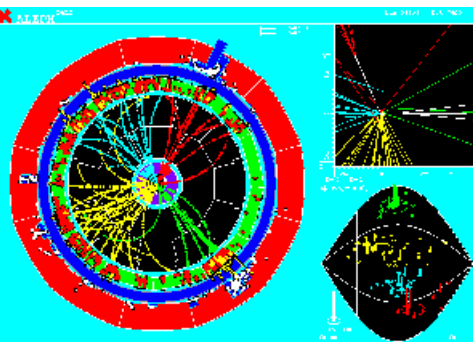
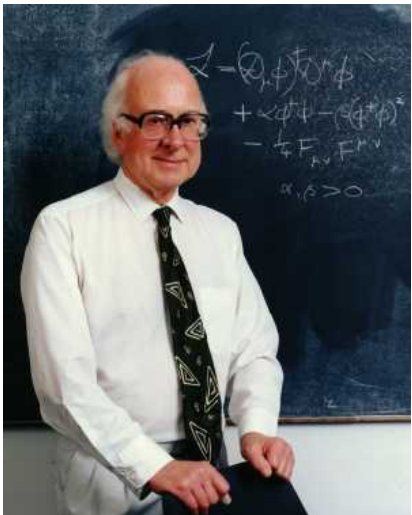
si puo’ tradurre in:

- “perche’ la particella X ha un’interazione di intensita’ g_X con il campo di Higgs?”

Il campo di Higgs puo’ anche interagire con se stesso.

quindi i quanti di questo campo (detti Higgs, o bosoni di Higgs) sono essi stessi dotati di massa.

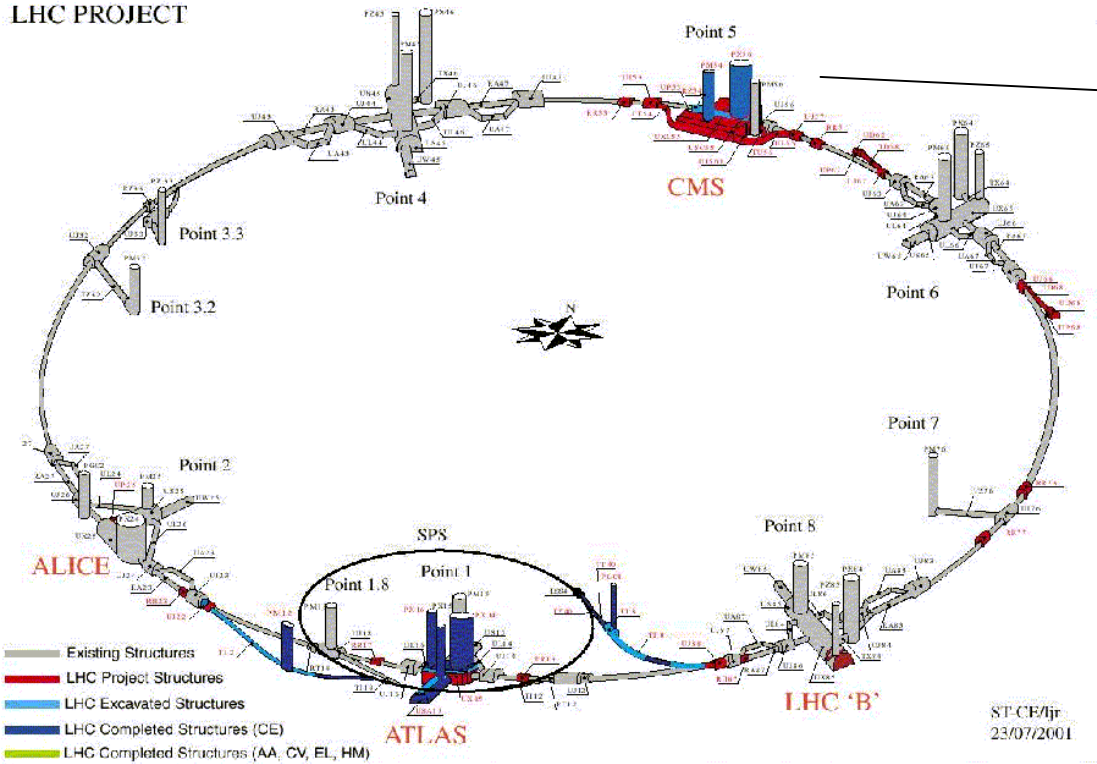
Purtroppo l’intensita’ dell’auto-interazione (e quindi la massa dell’Higgs) e’ un parametro libero della teoria: a priori non abbiamo idea della minima energia necessaria per materializzare un Higgs dal vuoto.



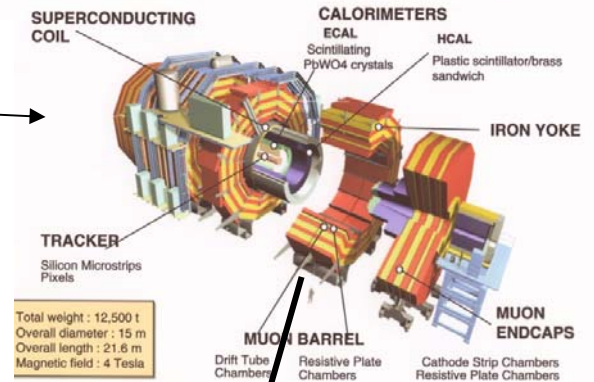


Nello stesso tunnel di LEP:

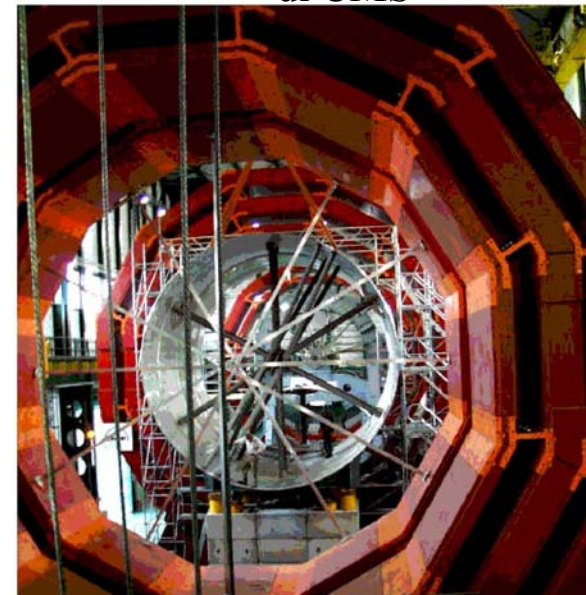
LHC PROJECT



The CMS Detector



i giochi del
magnete (YB0)
di CMS



4 esperimenti:

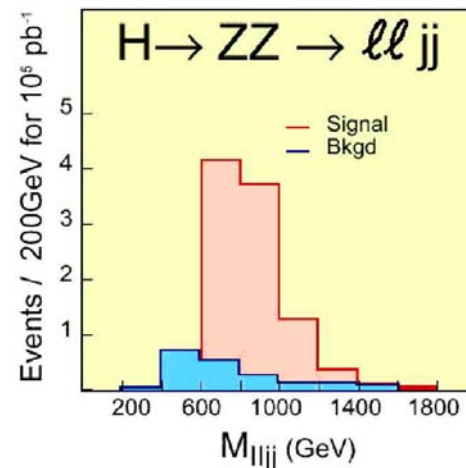
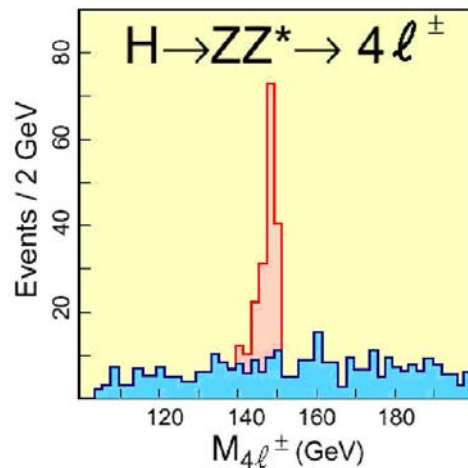
- ATLAS, CMS : “general pourpuse”
- ALICE : ioni pesanti
- LHCb : fisica del b

Verona 23 Febbraio 2006

Ezio Torassa



Il bosone di Higgs

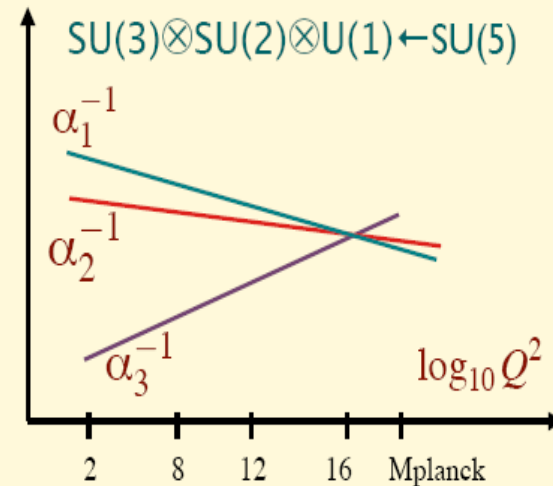
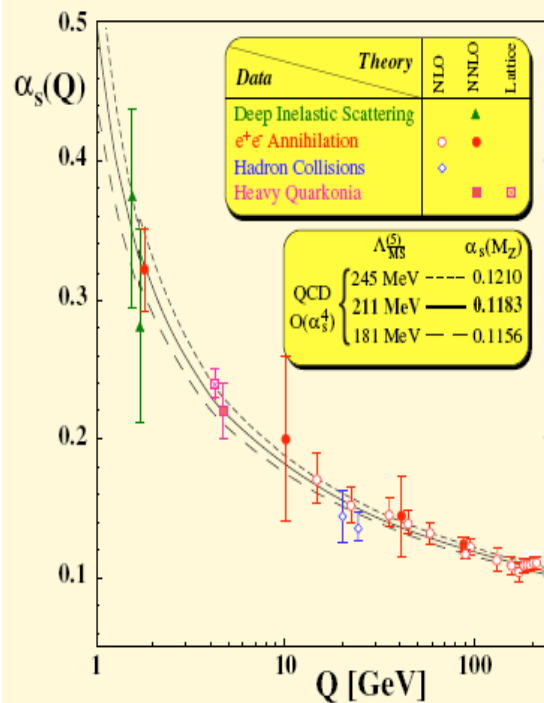


In rosa un segnale di Higgs, in azzurro il fondo, peccato che per il momento siano solo dati simulati





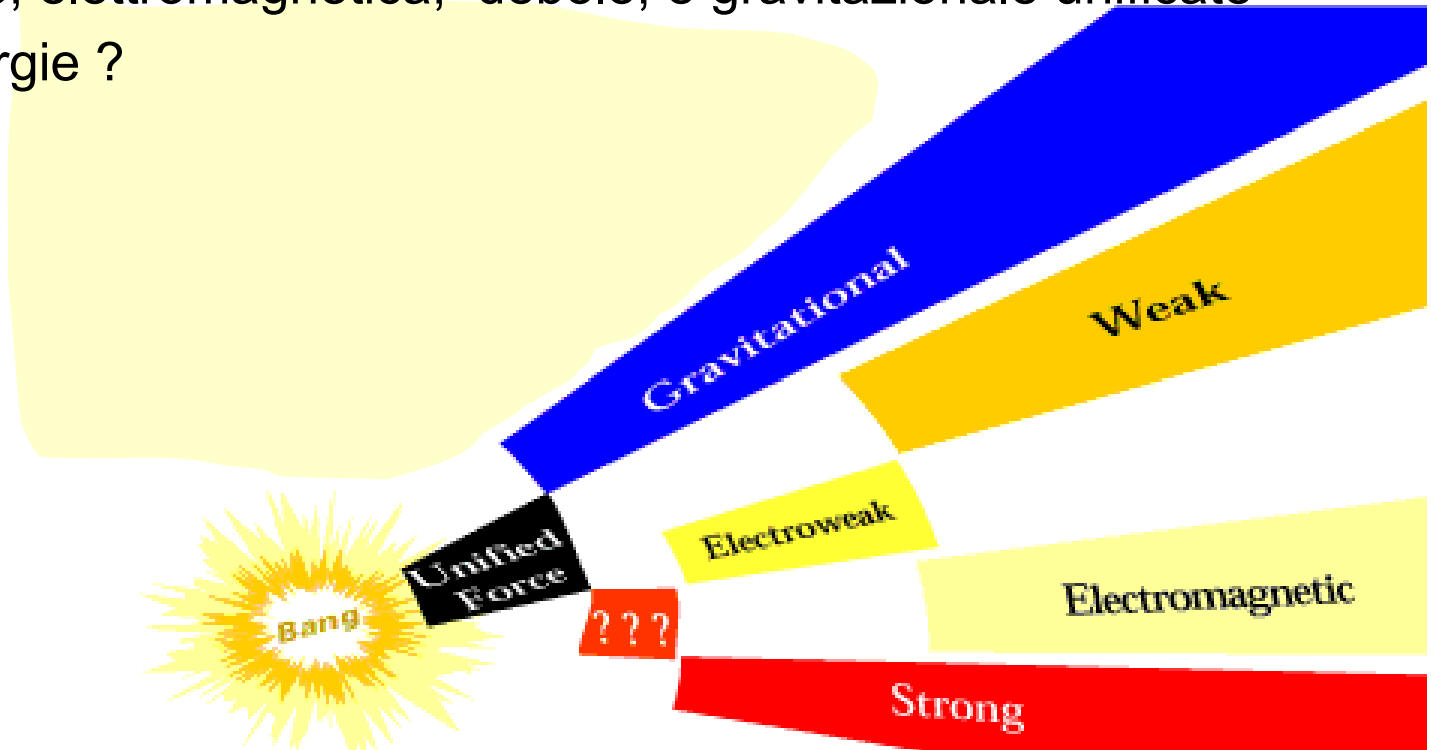
L'unificazione delle forze





Un problema aperto

Le forze forte, elettromagnetica, debole, e gravitazionale unificate a grandi energie ?



indietro nel tempo ~ energie maggiori



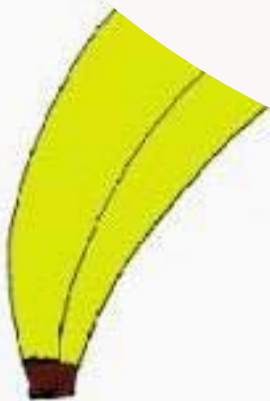
Altri problemi aperti...

- Alcuni buoni motivi per credere che il Modello Standard sia una (buona) approssimazione di qualcosa di piu' complesso:
 - non spiega la gerarchia delle masse
 - non include la gravitazione
 - non spiega la dominanza di materia nel nostro Universo
 - non suggerisce una soluzione al problema della Materia Oscura nell'Universo
 - perche' 3 famiglie ?
 - troppi parametri
 -
- Varie teorie cercano di superare questi problemi:
 - GUT, SUSY, Technicolor, Compositeness, Superstringhe.
 - Purtroppo nessuna di queste ha una qualche conferma sperimentale...



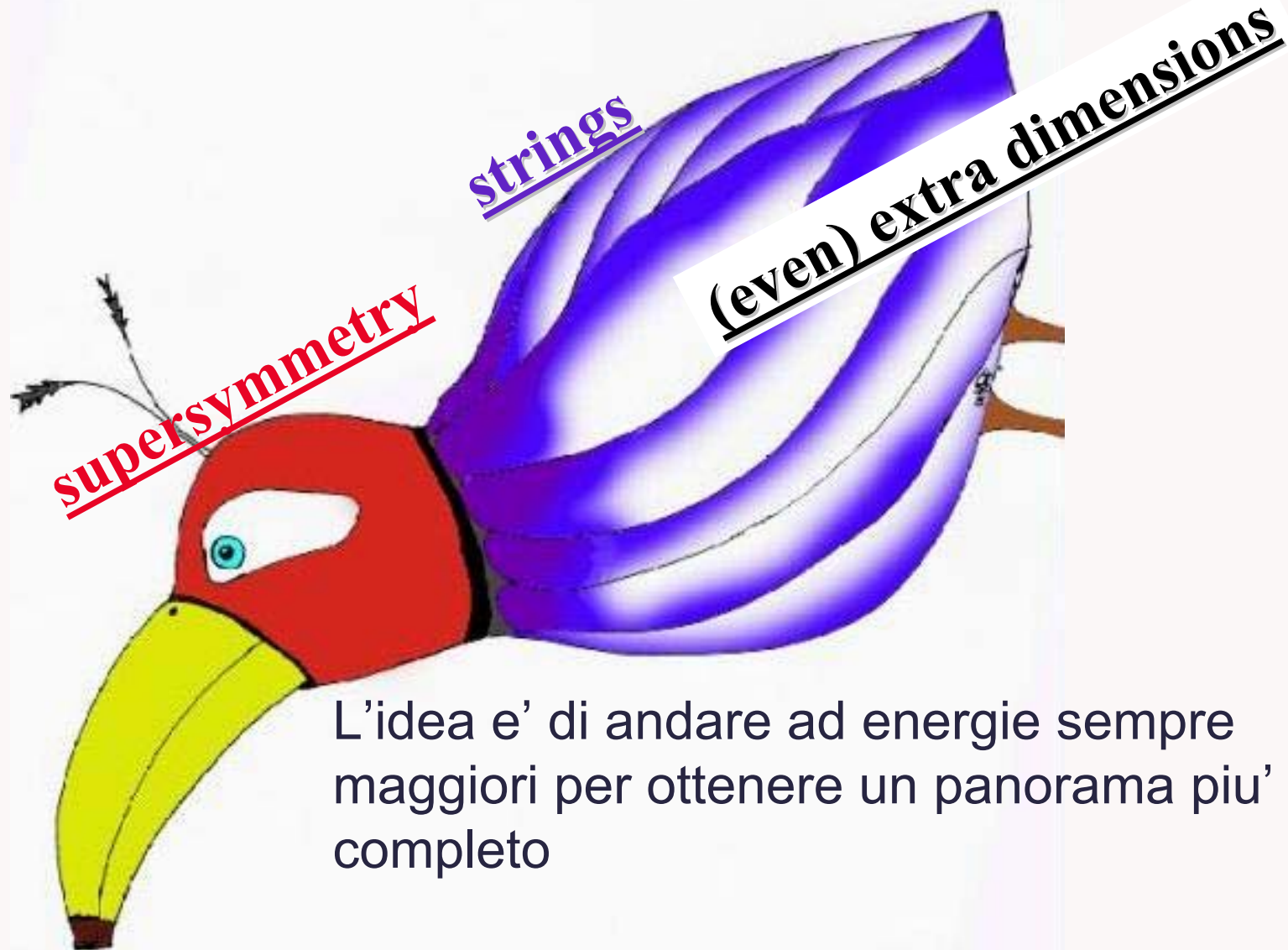
La “Big Picture”

Il Modello Standard descrive tutto ciò che abbiamo finora osservato con grande precisione!





La “Big Picture”



L'idea e' di andare ad energie sempre maggiori per ottenere un panorama piu' completo

Verona

C'e' bisogno di nuovi esperimenti ed idee!



Continuiamo a sperimentare !

Sperimentare ... e' comunque divertente

