



# Einstein in the 21st Century

## Introduzione alla fisica delle particelle



- **Un po' di storia**
- **Il Modello Standard: particelle e forze**
- **Uno sguardo in avanti**



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

- Come funziona l'Universo?
- Da dove viene?
- Dove va?

- Quali sono i componenti ultimi della materia?
- Come “si muovono”?
- Che cosa “li muove”?



# Einstein in the 21st Century

## 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** anziche’ la **religione**
  - 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





- L'uomo è giunto a capire che la materia è in realtà un agglomerato di pochi elementi fondamentali, che costituiscono tutto il mondo della natura.
- La parola "**fondamentale**" è una parola chiave:
  - Per elementi fondamentali noi intendiamo oggetti che sono semplici e privi di struttura interna (cioè non composti da qualcosa di più piccolo)

- Domande:

- Esistono mattoni fondamentali?
- Quali sono i mattoni fondamentali?
- Come interagiscono?
- Come determinano le proprietà dell'Universo?



# Einstein in the 21st Century

## L'atomo è fondamentale?



- 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**

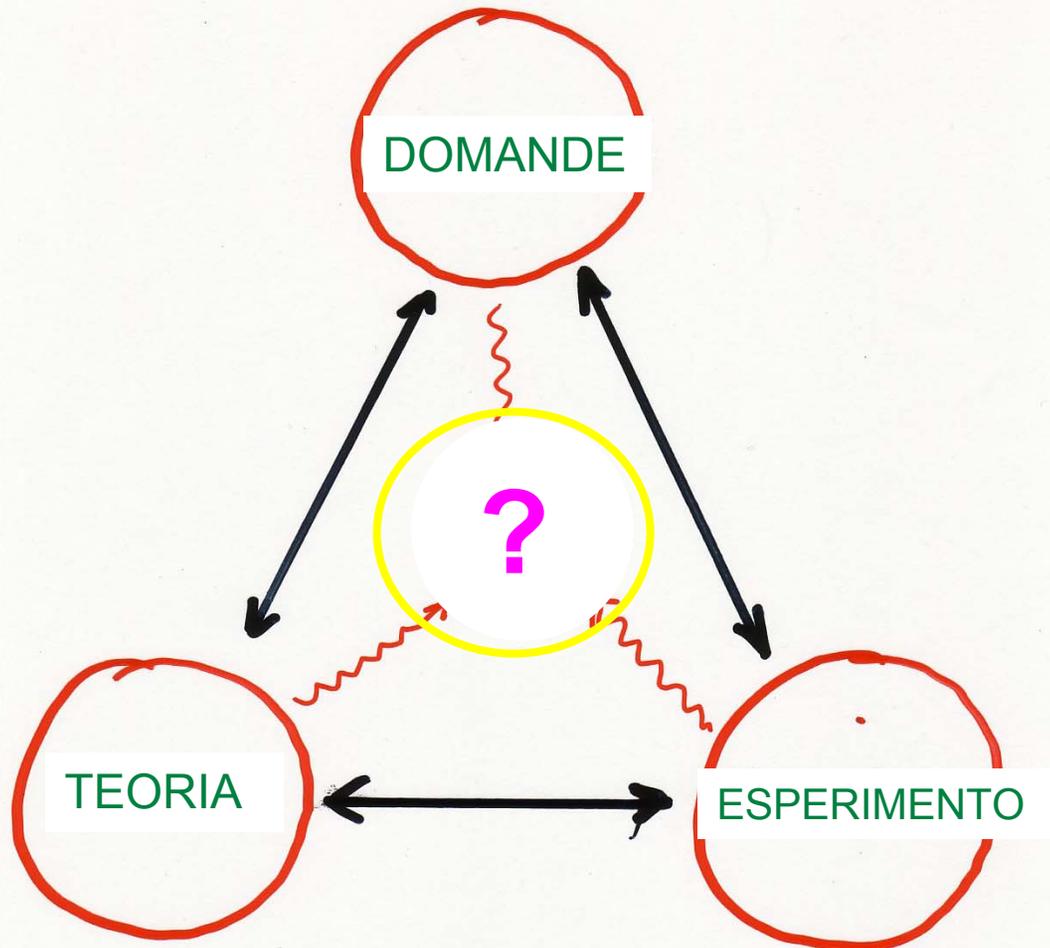
1	2																	10
1	2																	10
3	4																	10
11	12																	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113						

\* Lanthanide Series

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

+ Actinide Series

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

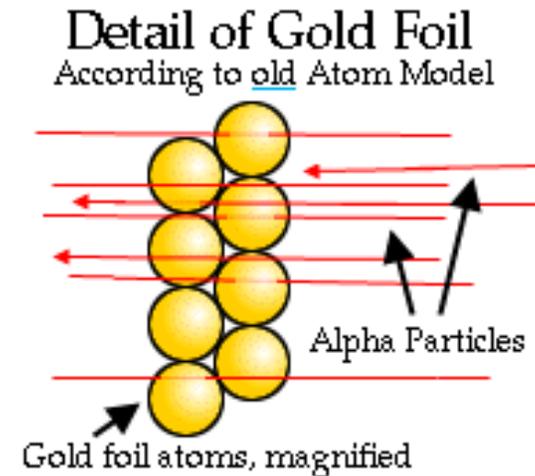
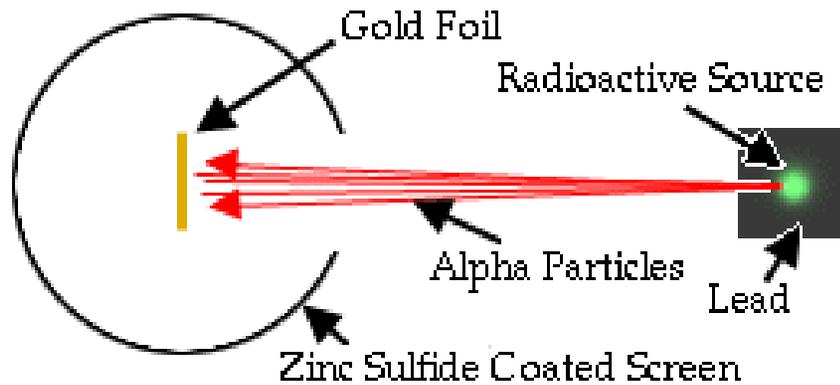


- Ricorriamo all'**esperimento**:
  - si guarda dentro l'atomo, usando particelle come sonde
  - L'atomo ha una struttura interna, e non e' una semplice "pallina" permeabile

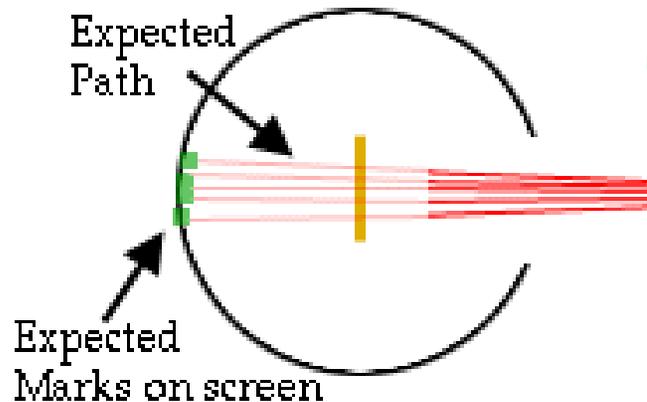


# Come si guarda dentro la materia?

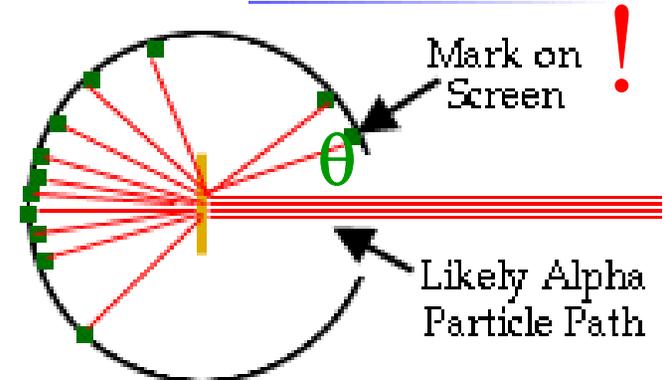
Rutherford (~1910) – classico esperimento bombardamento di particelle su bersaglio (foglio d'oro)  
**Esperimento di Geiger & Marsden**



The Predicted Result:



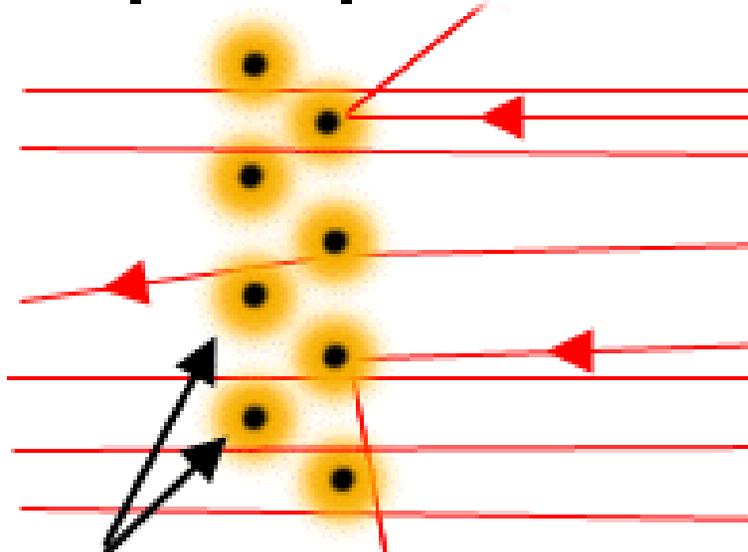
Result:



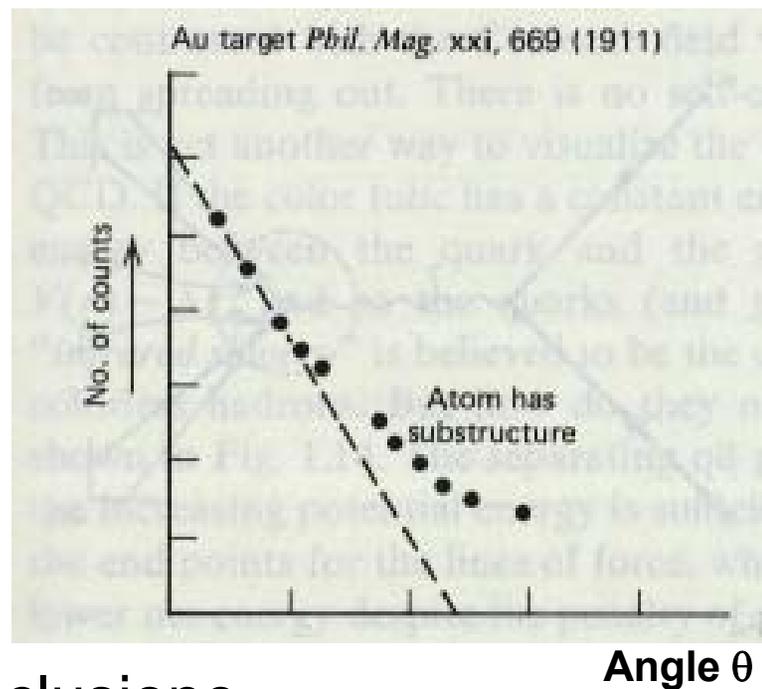


# Modello atomico di Rutherford

The Positive Nucleus Theory Explains Alpha Deflection



Gold Foil Atoms, magnified



## Conclusione

L'atomo contiene un nucleo di carica positiva di dimensione (con "nuvola" di elettroni attorno)

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

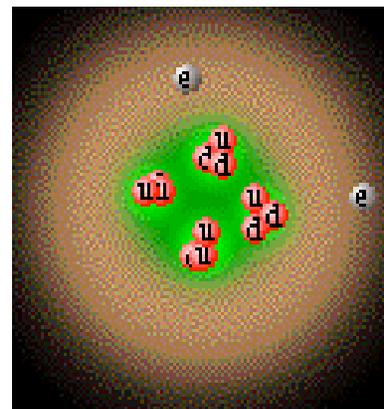
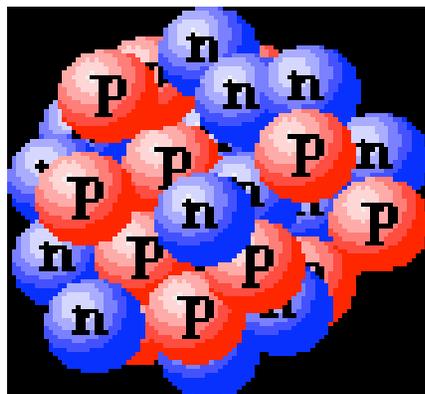
0.000,000,000,000,1 cm



# Il nucleo e' fondamentale?

- Il **nucleo** e' composto di protoni(carica elettrica positiva) e di neutroni (privi di carica elettrica)
- Anche i **protoni** e i **neutroni** hanno una struttura: sono composti da particelle fondamentali chiamate quark.

*Ma per vedere questo ci vuole ancora un po' di tempo...*

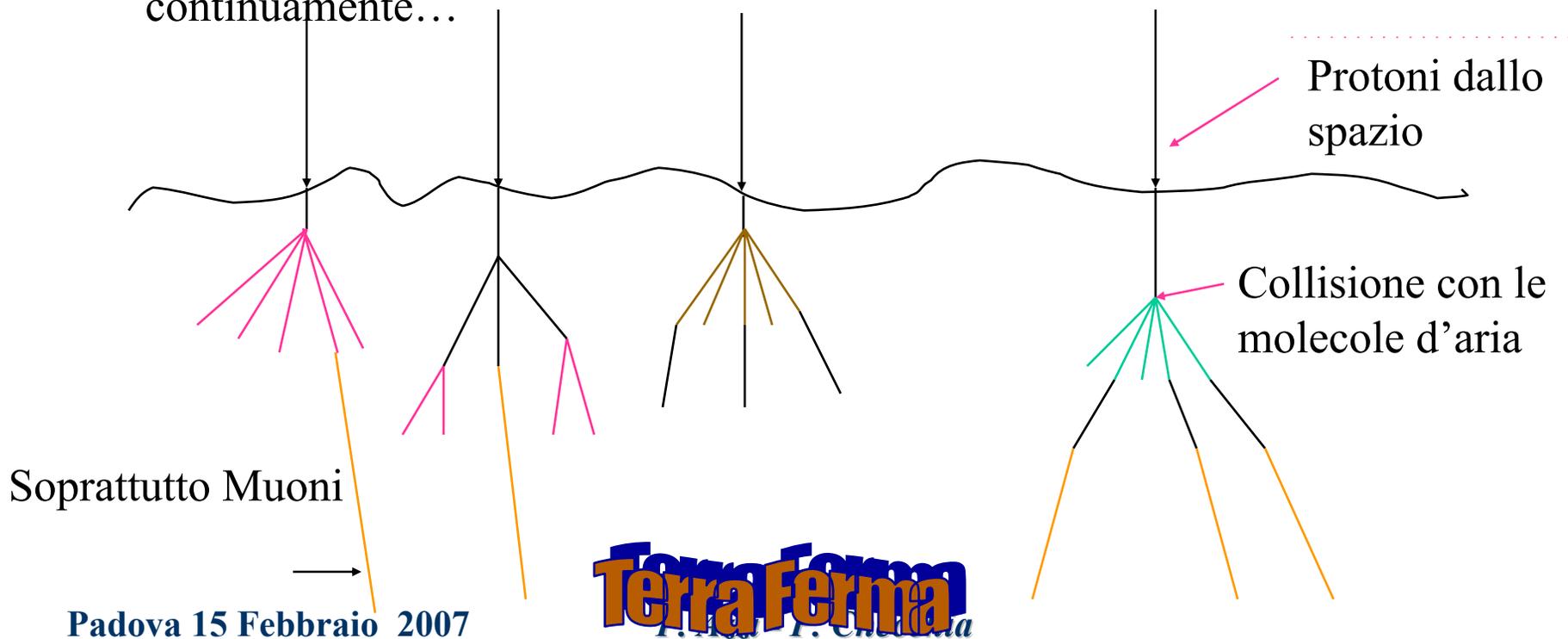




# Una sorgente naturale di particelle

- 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...





# Einstein in the 21st Century

## Acceleratori naturali



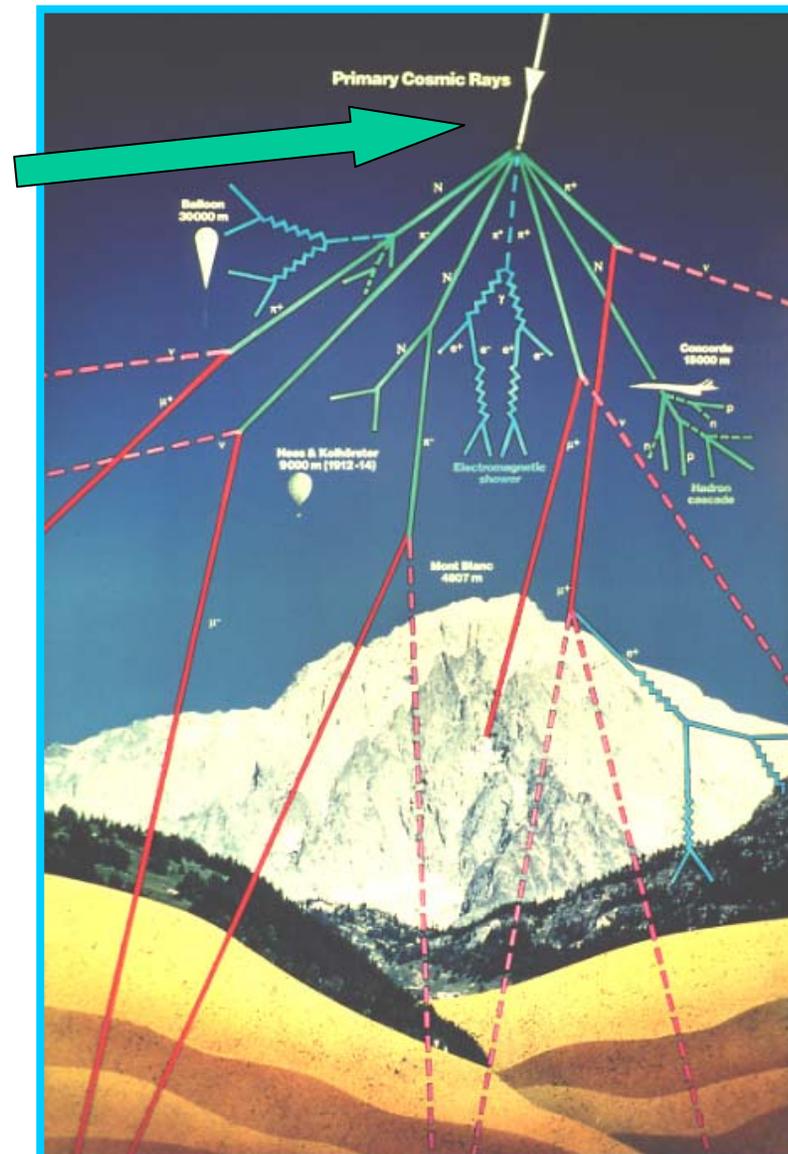
I primi fasci di particelle per gli studi di fisica nucleare e subnucleare erano sorgenti naturali: particelle alfa, **raggi cosmici**

La capacità di rompere le barriere elettrostatiche intorno ai nuclei aumenta con l'energia: l'energia massima delle particelle alfa è solo 10 MeV.

I raggi cosmici, anche quando molto energetici, non sono prevedibili: servono fasci di particelle ad alta energia e ripetibilità per studi sistematici.

I primi studi sugli acceleratori sono degli anni '20

I primi acceleratori sono degli anni '30





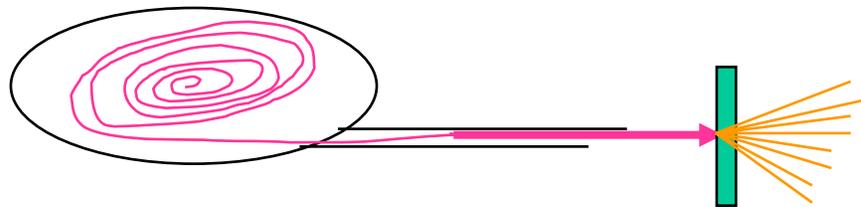
# Einstein in the 21st Century

## L'”esplosione” delle particelle



- 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

Nello stesso tempo Ernest Lawrence imparava a costruire acceleratori di particelle in laboratorio...



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



I primi acceleratori di particelle furono realizzati per studiare i **costituenti più piccoli della materia.**

Un fascio di particelle (elettroni, positroni, protoni, ioni,...) che colpisce un bersaglio o collide con un altro fascio produce reazioni nucleari, annichilazioni e **crea nuove particelle.**

Lo studio di questi fenomeni ci dà informazioni sui costituenti ultimi del nostro mondo.

Per comodità l'energia si può misurare in **electron Volt :**

**1 eV = energia acquistata da un elettrone (carica  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb) nel passaggio attraverso una d.d.p.  $\Delta V = 1$  Volt.**

1 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  Joule, 1 KeV =  $10^3$  eV, 1 MeV =  $10^6$  eV, 1 GeV =  $10^9$  eV,  
1 TeV =  $10^{12}$  eV...

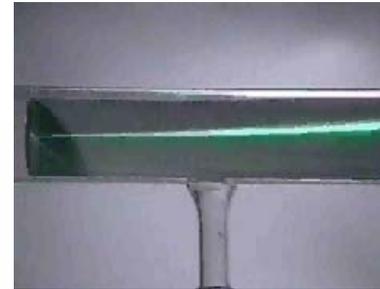
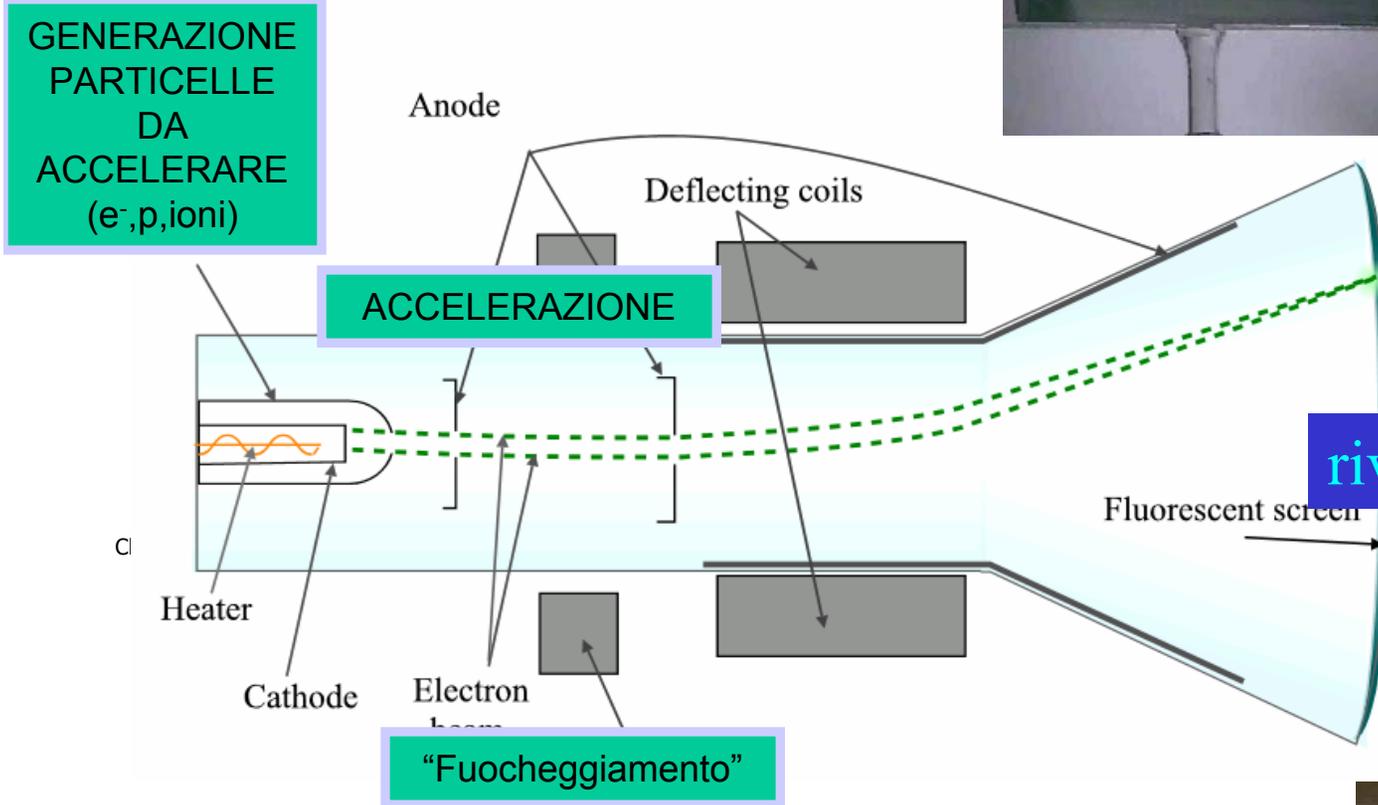


# Due passi indietro

■ Qual è l'acceleratore più comune?

**il tubo catodico**

From Wikipedia, the free encyclopedia.



**rivelatore**





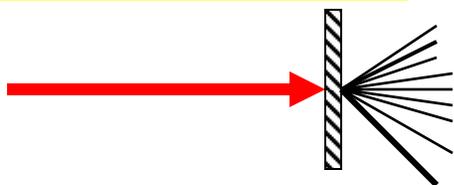
# Einstein in the 21st Century

## Servono energie sempre maggiori...



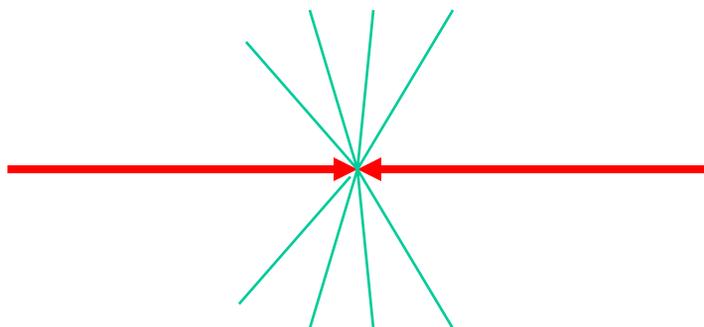
Per testare le nuove teorie i fisici delle particelle hanno bisogno di alte energie  $\Rightarrow$   
*COLLISIONI FRA FASCI DI PARTICELLE!*

### TARGHETTA FISSA



Energia a disposizione per produrre nuove particelle:  $\sim \sqrt{E_{\text{beam}}}$

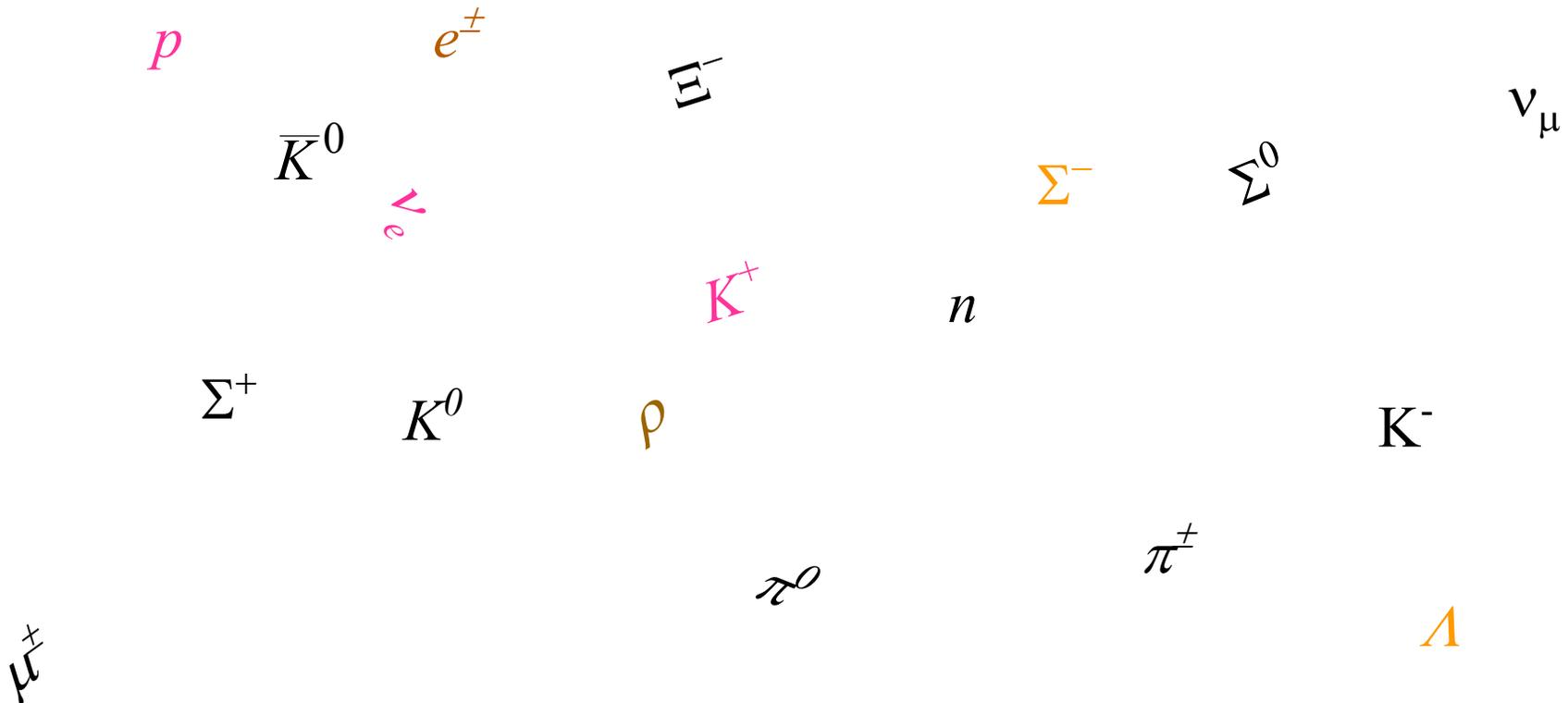
### COLLISIONI FASCIO-FASCIO



Energia a disposizione per produrre nuove particelle  $\sim E_{\text{beam}}$

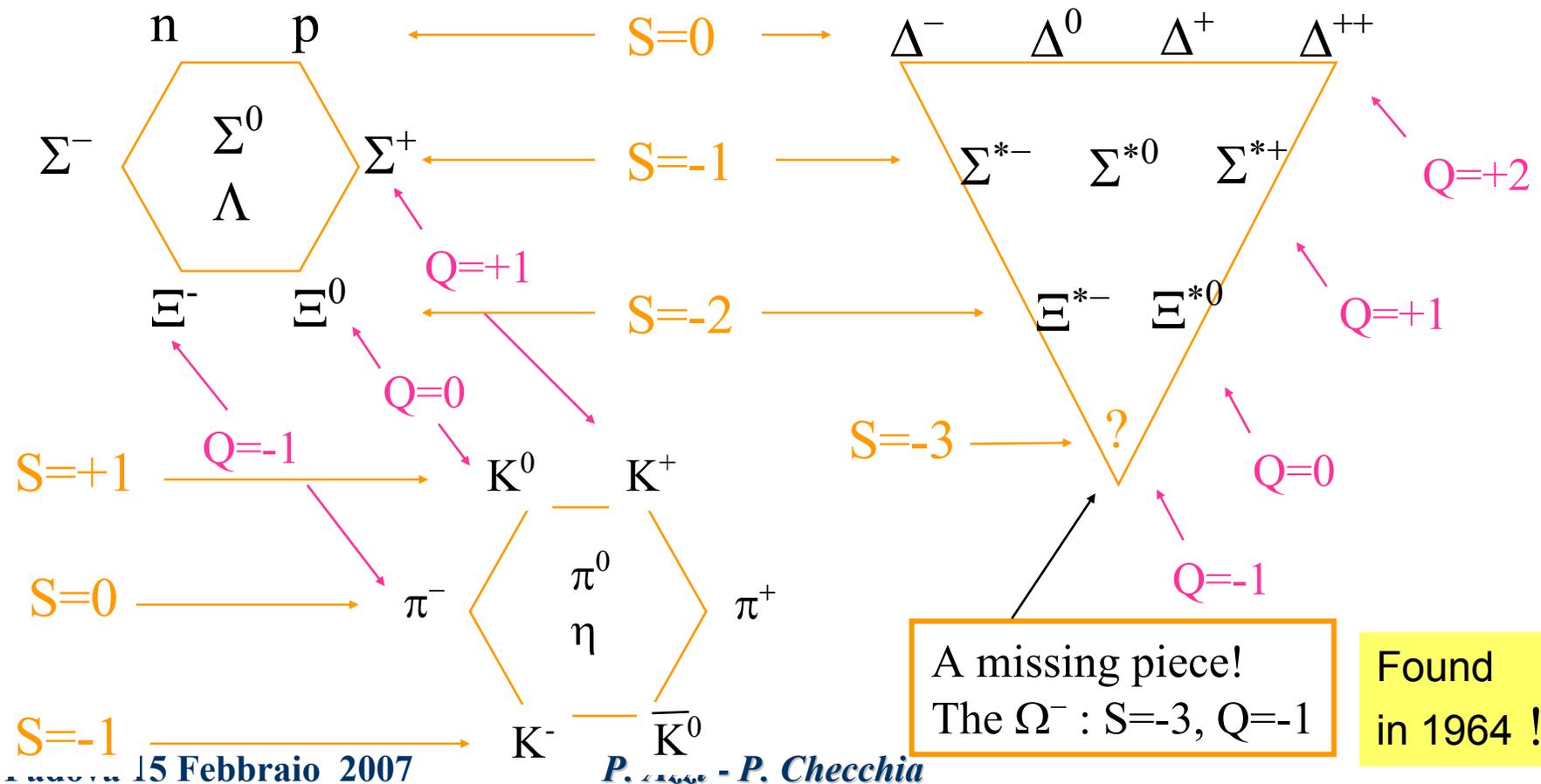


Con i nuovi acceleratori di particelle e nuovi rivelatori (camera a bolle) a disposizione i fisici delle particelle negli anni 50 si divertirono un mondo...





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

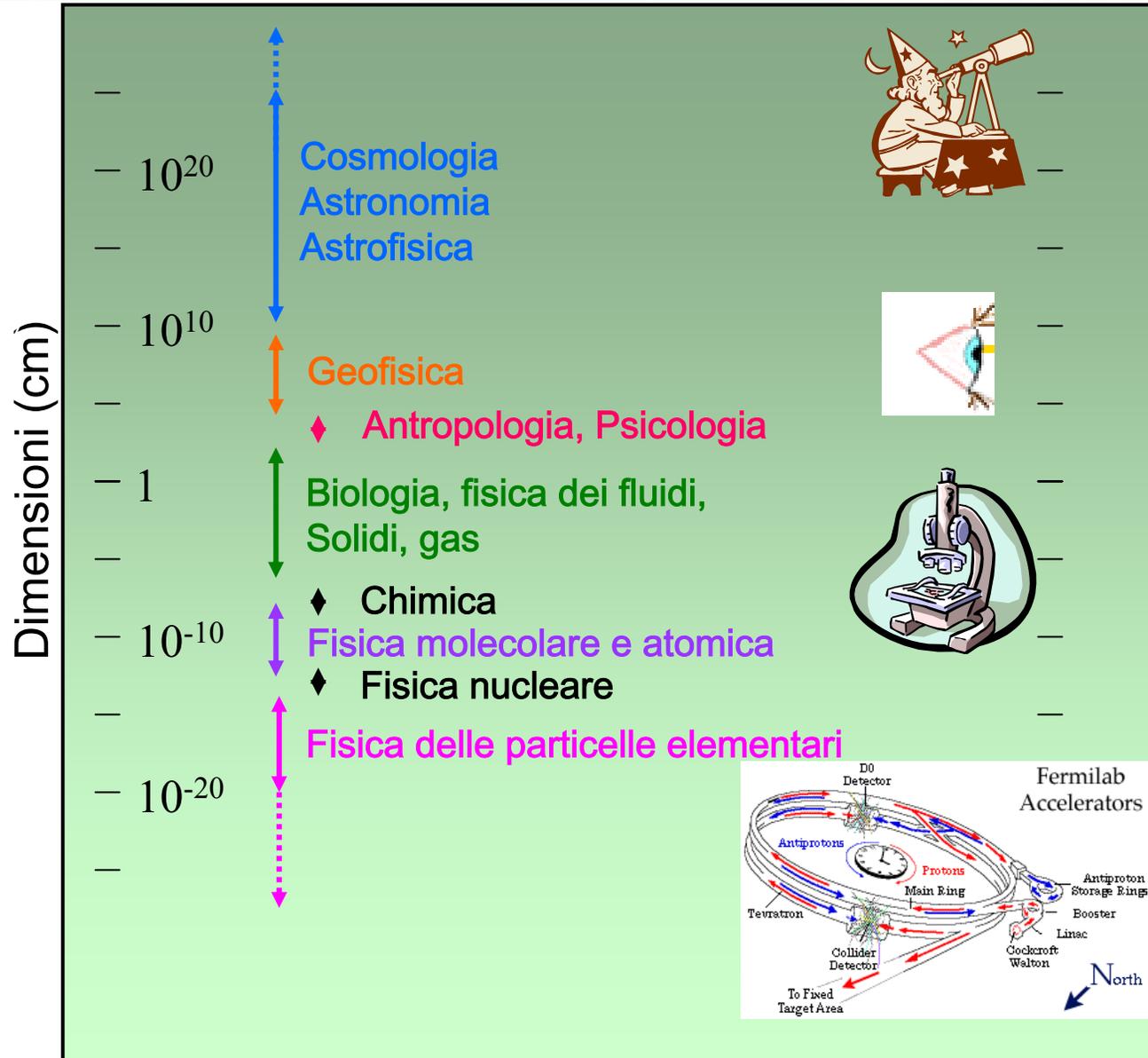
Strange

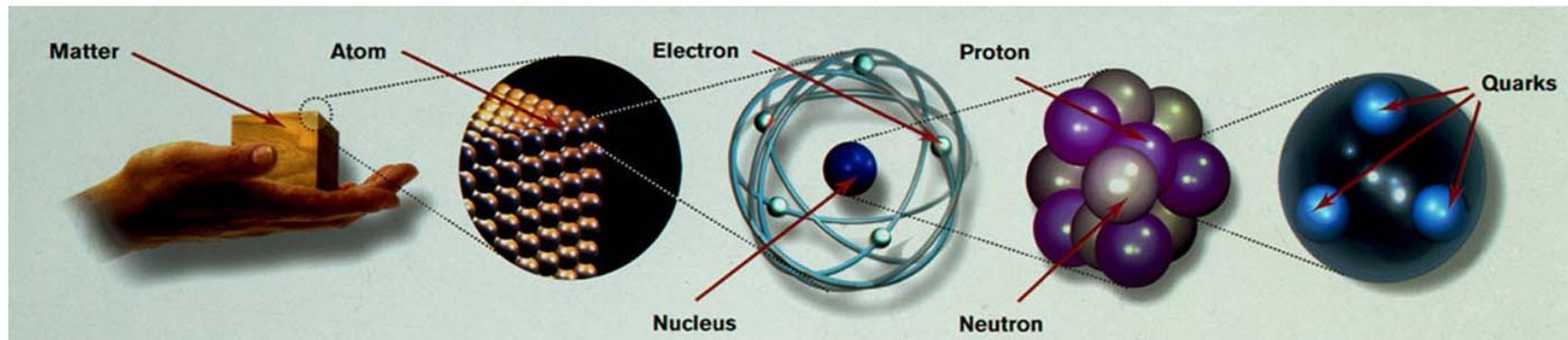
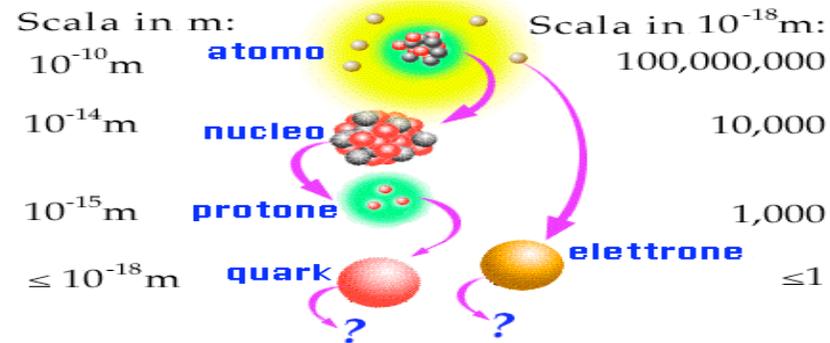
I quark hanno cariche elettriche pari a  $2/3$ ,  $-1/3$ .  $-1/3$  della carica dell'elettrone

p	uud	$\Delta^{++}$	uuu	$K^+$	$u\bar{s}$
n	udd	$\Delta^+$	uud	$K^0$	$d\bar{s}$
$\pi^+$	$u\bar{d}$	$\Delta^0$	udd	$K^-$	$s\bar{u}$
$\pi^0$	$u\bar{u}$	$\Delta^-$	ddd	$K^0$	$s\bar{d}$
$\pi^-$	$d\bar{u}$	$\Omega^-$	sss		



# Un confronto dimensionale





- I quark e gli elettroni sono più piccoli di  $10^{-18}$  metri:
  - è possibile addirittura che non abbiano dimensione
  - *E' possibile che i quark e gli elettroni non siano elementari, ma composti di particelle più elementari ancora?...*

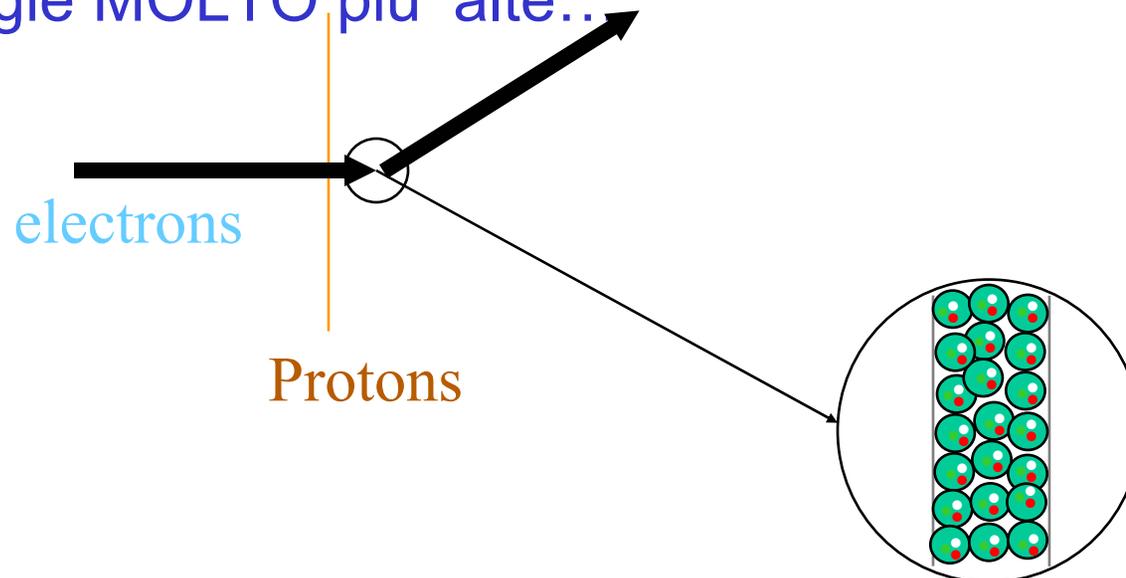


# Einstein in the 21st Century

## Dove sono i quarks?



- Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark per ora sono entita' matematiche...
  - **L'esperimento confermera' la loro esistenza!!!**
- Proviamo a ripetere l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte..



Si dimostra che il protone e' costituito da altri oggetti piu' fondamentali!



- I fisici hanno elaborato una teoria, chiamata **Modello Standard** che vuole descrivere:
  - tutta la materia
  - tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)
- La sua bellezza sta nella capacità di spiegare centinaia di particelle e interazioni complesse con poche particelle e interazioni fondamentali

**Semplicità!**

# 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, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1×10 <sup>-8</sup>	0	<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0	<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1	<b>s</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	<b>t</b> top	175	2/3
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

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

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

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

## BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.4	-1			
<b>W<sup>+</sup></b>	80.4	+1			
<b>Z<sup>0</sup></b>	91.187	0			

### Color Charge

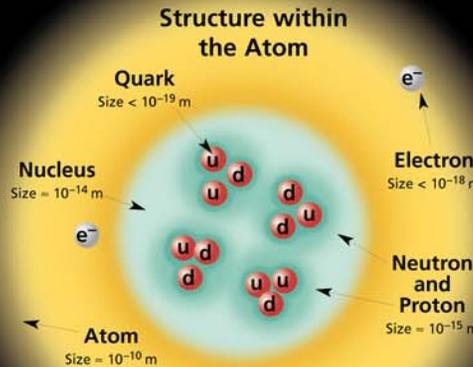
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions 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.



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.

## 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 <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Property	Interaction		Strong	
	Gravitational	Weak (Electroweak)	Fundamental	Residual
<b>Acts on:</b>	Mass - Energy	Flavor	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
<b>Particles experiencing:</b>	All	Quarks, Leptons	Quarks, Gluons	Hadrons
<b>Particles mediating:</b>	Graviton (not yet observed)	<b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b>	Gluons	Mesons
<b>Strength relative to electromag for two u quarks at:</b>	10 <sup>-41</sup> m 3×10 <sup>-17</sup> m	0.8 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-7</sup>	25 60 Not applicable to hadrons	Not applicable to quarks 20

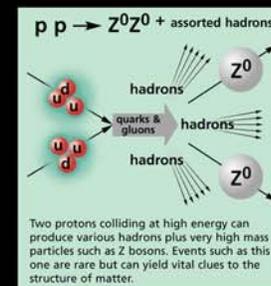
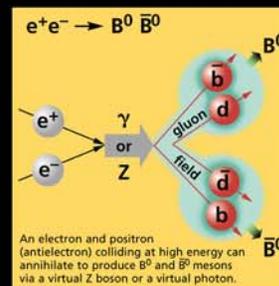
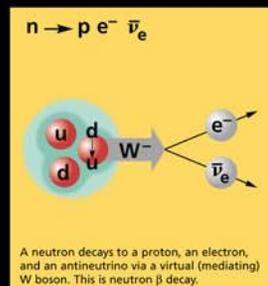
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	<b>s<math>\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
<b>B<sup>0</sup></b>	B-zero	<b>d<math>\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	<b>c<math>\bar{c}</math></b>	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.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

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



### The Particle Adventure

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

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

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

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

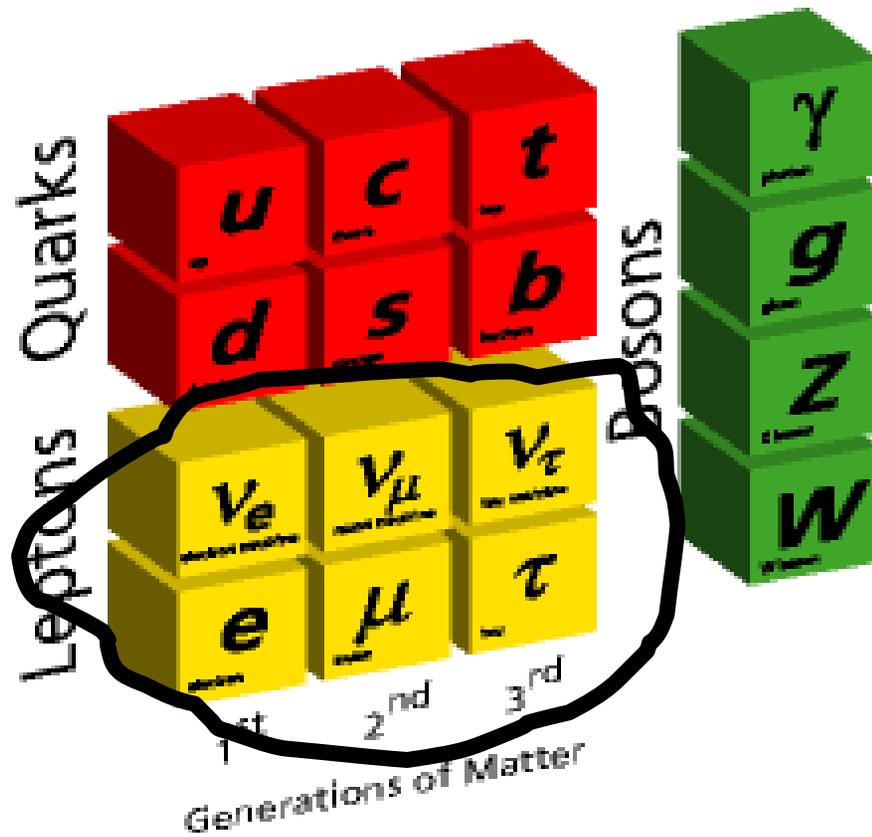
<http://CPEPweb.org>



- Nel Modello Standard esistono due generi di particelle:
  - Particelle materiali: il Modello Standard sostiene che la maggior parte delle particelle materiali finora conosciute è composta di particelle più fondamentali (**quark**). C'è anche un'altra classe di particelle materiali fondamentali, i **leptoni** (un esempio è l'elettrone).
  - Particelle mediatrici di forza: Ogni tipo di interazione fondamentale agisce "mediante" una particella mediatrice di forza (un esempio è il fotone).



## Elementary Particles

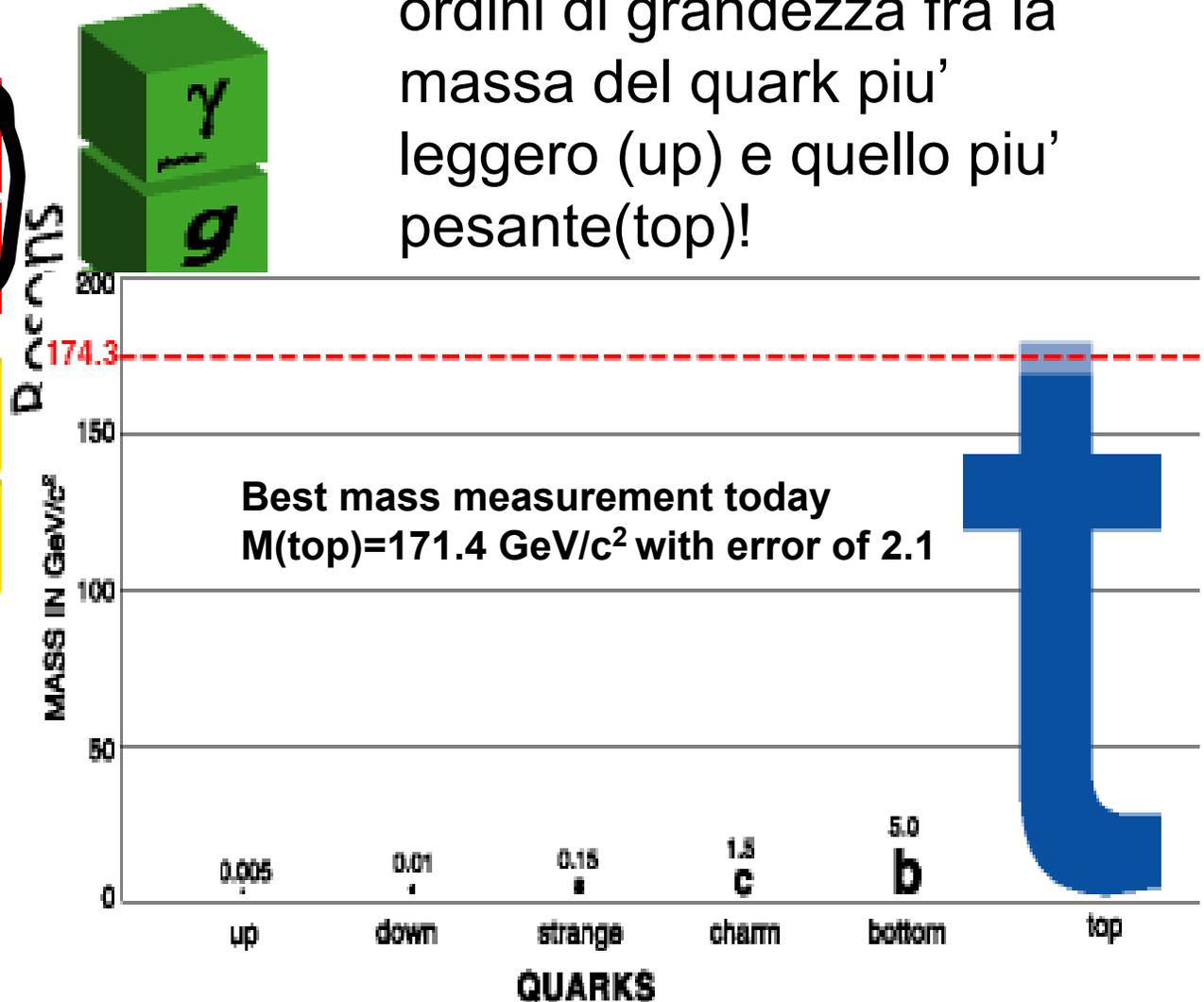
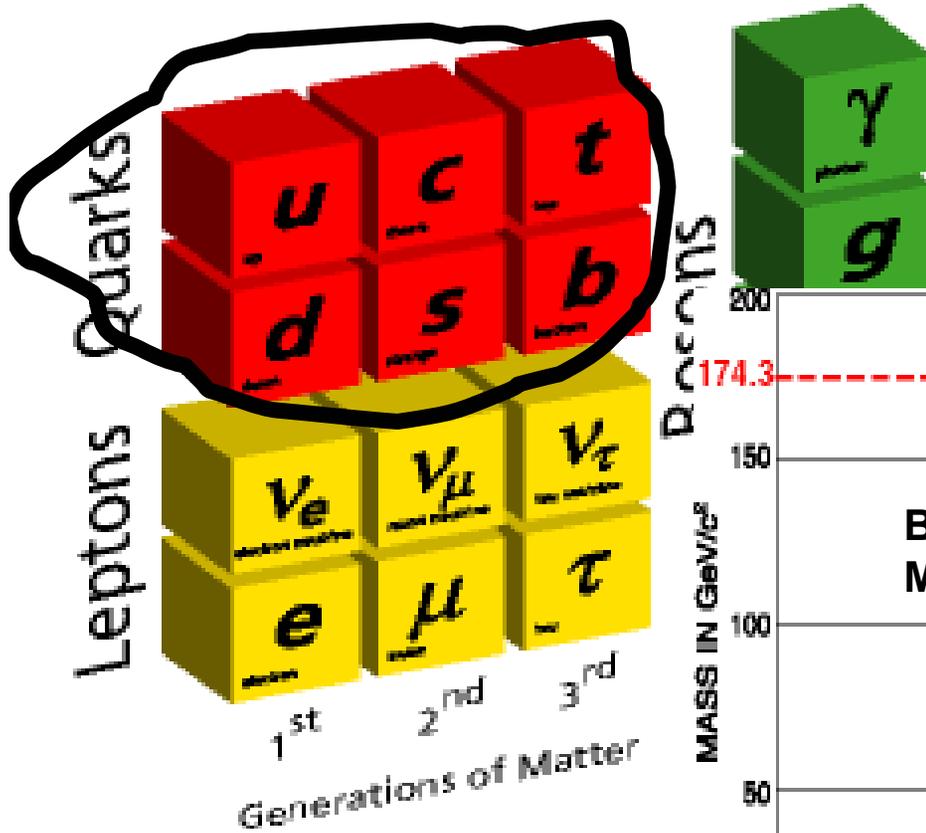


- I leptoni sono sei:
  - tre hanno carica elettrica (negativa)
  - tre non hanno carica elettrica
- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone ( $\mu$ ) e il tau ( $\tau$ )
  - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni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



## Elementary Particles

- Non 3 ma 6! Ci sono 5 ordini di grandezza fra la massa del quark piu' leggero (up) e quello piu' pesante(top)!

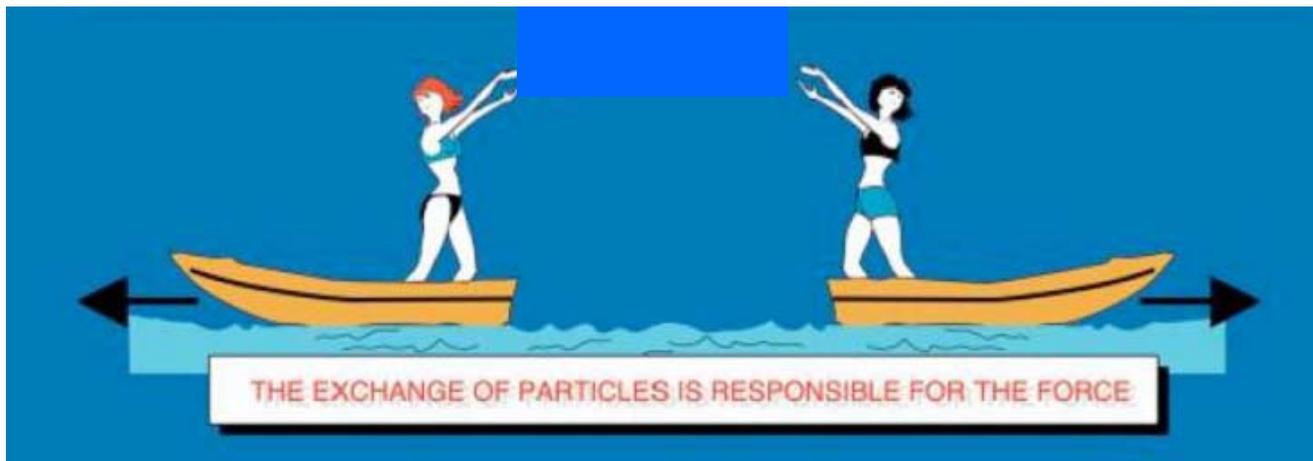


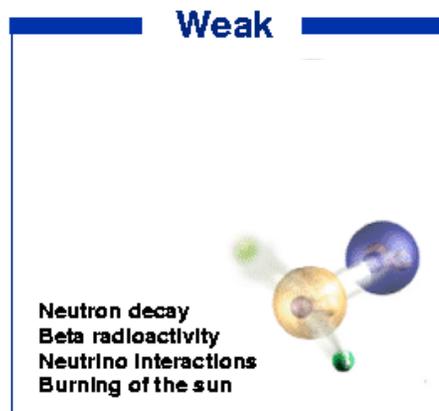
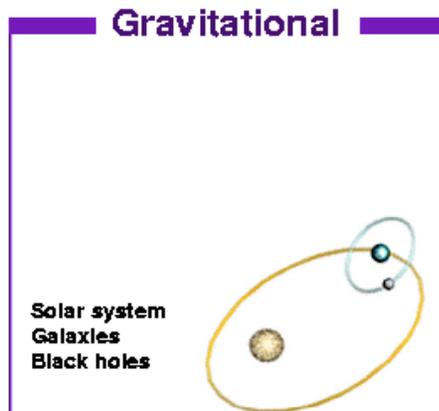
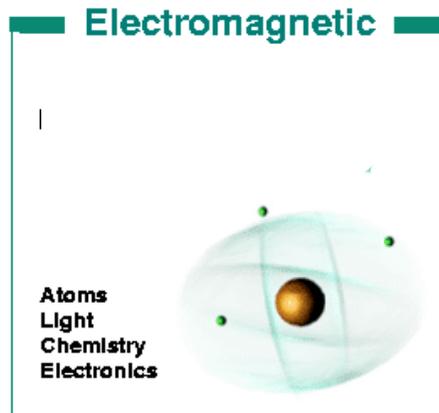
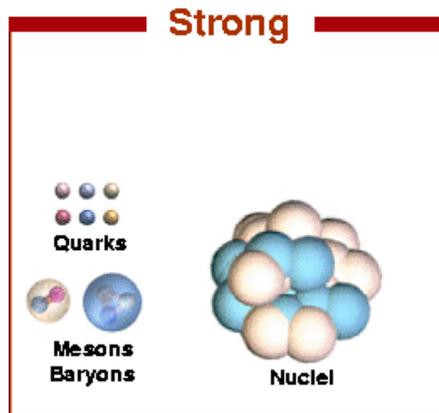


- I singoli quarks:
  - hanno cariche elettriche frazionarie
  - non sono mai stati osservati direttamente
- Si riuniscono in gruppi in particelle dette “**adroni**”:
  - Le combinazioni dei quark possibili sono tali che la somma totale delle cariche elettriche sia un numero intero: due (qq=**mesoni**) o tre (qqq=**barioni**)
- *Ma c'e' molto di piu'...per capirlo bisogna introdurre le interazioni fra i quark*



- Per risalire alla natura delle forze bisogna studiare le interazioni fra particelle materiali
- Consideriamo la vignetta seguente:
  - le ragazze afferrano un pallone invisibile e vengono spinte indietro dall'impatto.
  - il pallone non e' visibile, ma e' visibile l'**effetto** della sua presenza





*The particle drawings are simple artistic representations*

- 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.
- Ci sono quattro interazioni(forze) tra le particelle:
  - **Gravita'**
  - **Elettromagnetica**
  - **Forte**
  - **Debole**



- 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

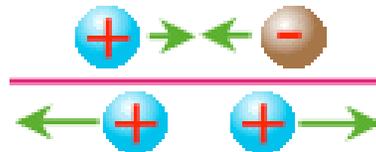


• Anche se la gravità agisce su ogni cosa, è **una forza molto debole qualora le masse in gioco siano piccole**

• La particella mediatrice di forza per la gravità si chiama **gravitone**: la sua esistenza e' prevista ma non e' ancora stata osservata



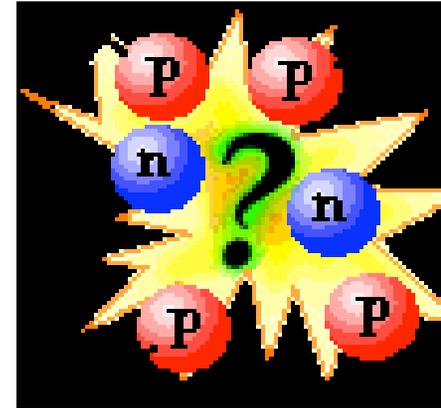
- Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute alle interazioni elettromagnetiche nella materia: tengono assieme gli atomi e i materiali solidi
  - la carica elettrica (positiva/negativa) e il magnetismo (nord/sud) sono diverse facce di una stessa interazione, l'elettromagnetismo.
  -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



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



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



- Alcune particelle (i quark e i gluoni) hanno una carica di un nuovo tipo: è stata chiamata **carica di colore**.
  - Ogni quark puo' avere uno dei tre colori: rosso, blu o verde
- Tra particelle dotate di carica di colore l'interazione è molto forte, tanto da meritarsi il nome di **interazione forte**.
  - La sua particella mediatrice è stata chiamata **gluone**: perche' "incolla" i quark fra di loro



# Il “confinamento” dei quark

- Le particelle con carica di colore (come i quark) non si possono trovare isolate ma solo in gruppi di colore “neutro” (adroni)
  - Questo spiega perché sono possibili solo combinazioni di due (“mesoni”) o tre (“barioni”) quark: sono le uniche neutre di colore.
- **La carica di colore si conserva sempre.**
  - quando un quark emette o assorbe un gluone, il colore del quark deve cambiare, per conservare la carica di colore
  - *Per esempio, consideriamo un quark rosso che diventa un quark blu ed emette un gluone rosso/anti-blu (qui in giallo): il colore “netto” è sempre rosso.*



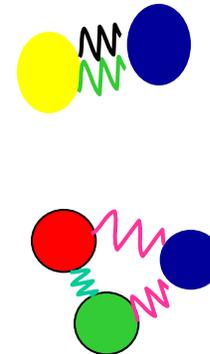
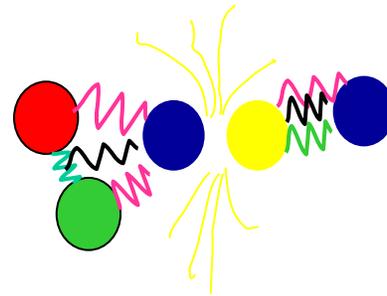
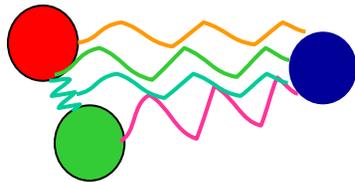
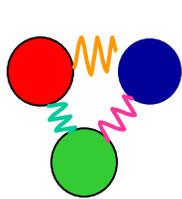


# Einstein in the 21st Century

## Mai quark liberi!!!



- La forza di colore diminuisce a piccole distanze e 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.

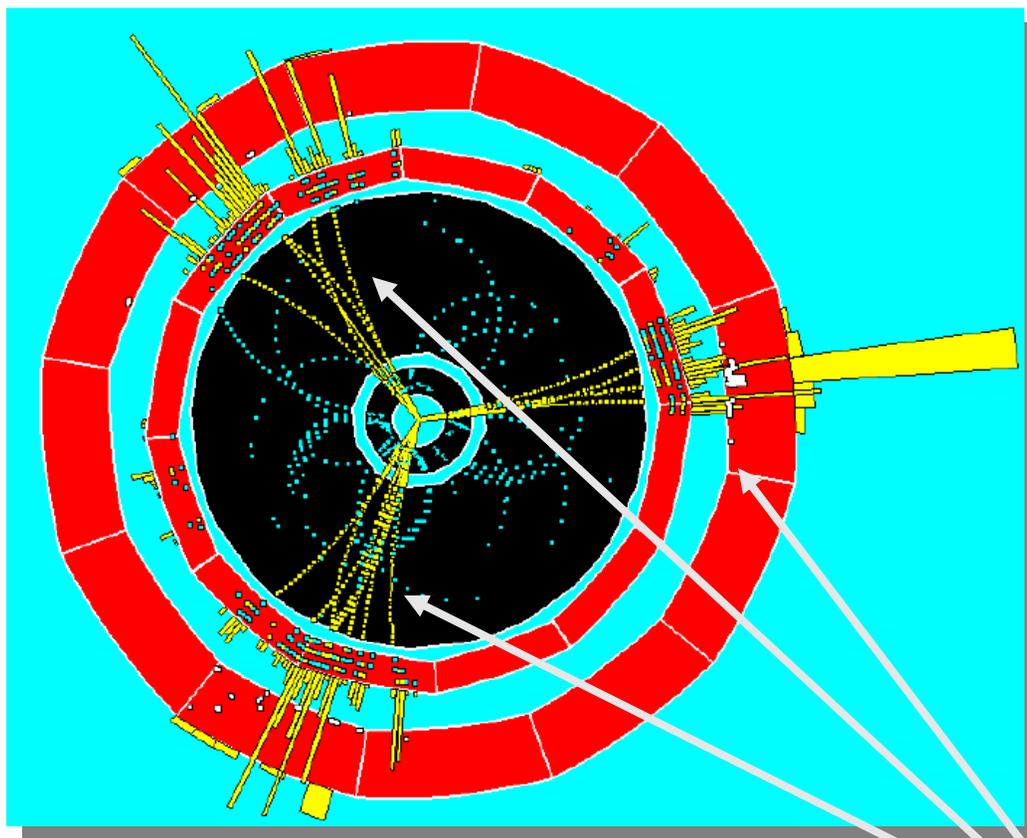


*Energia del campo di colore cresce...*

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



# Come si “vedono” i quark



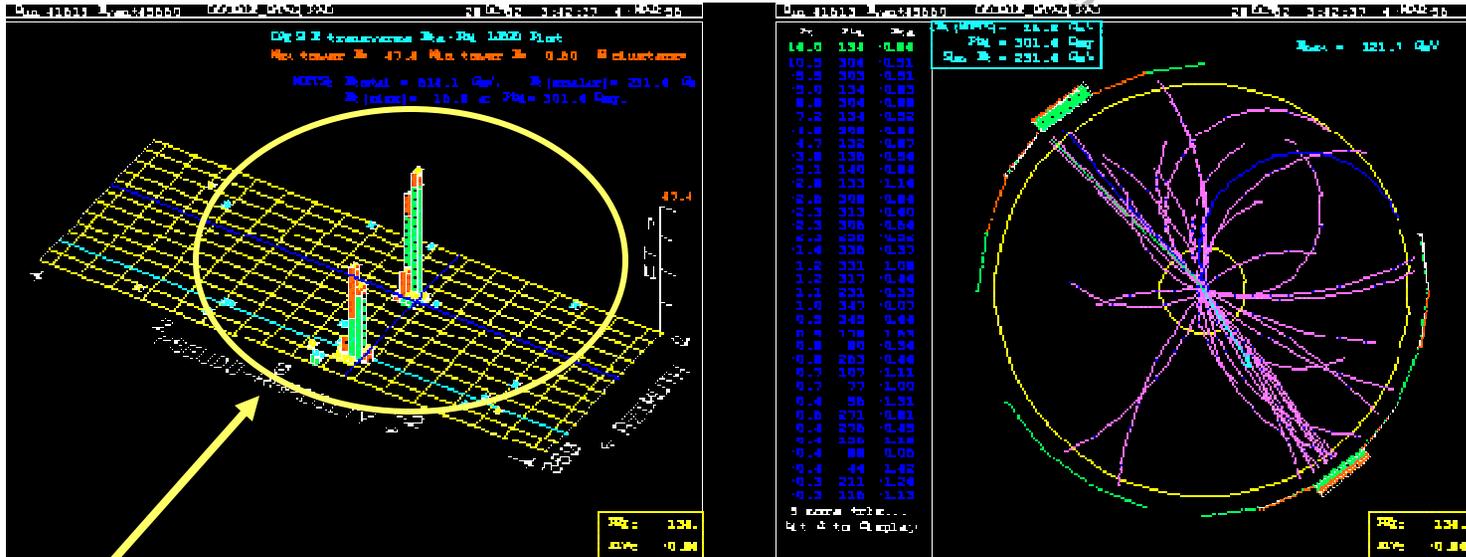
Negli anni '70, nelle collisioni elettrone-positrone ad alta energia, **si osservano dei “getti” di energia, associabili alla presenza di quark e gluoni** dovuti dalla forza nucleare forte che si origina dalle interazioni tra quark. E' la manifestazione piu' spettacolare del “confinamento”

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

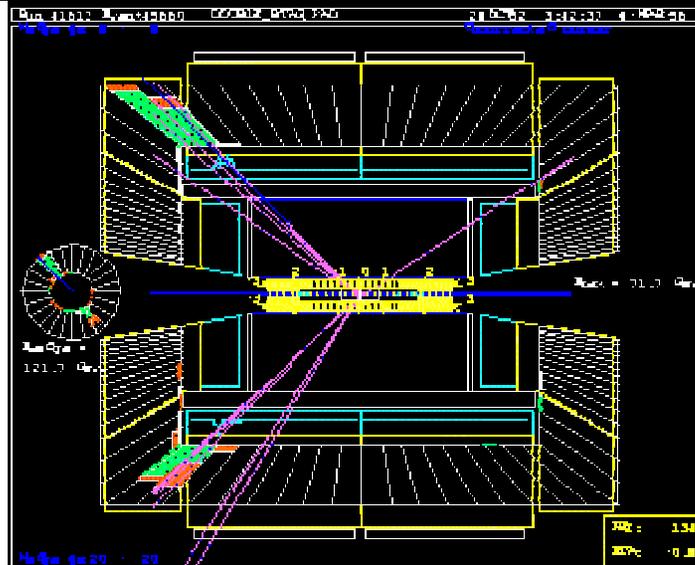


# Einstein in the 21st Century

## Un altro evento con jets

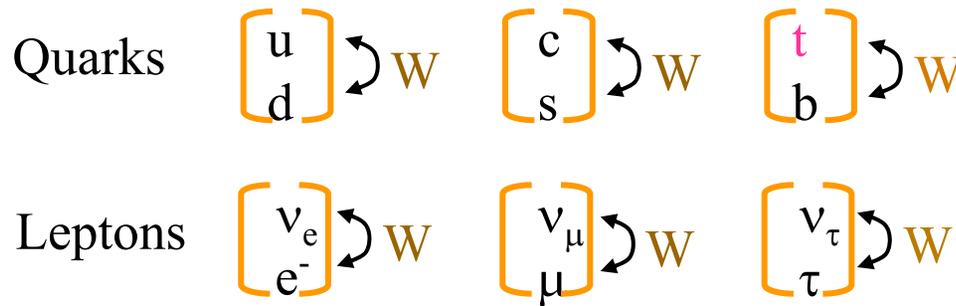
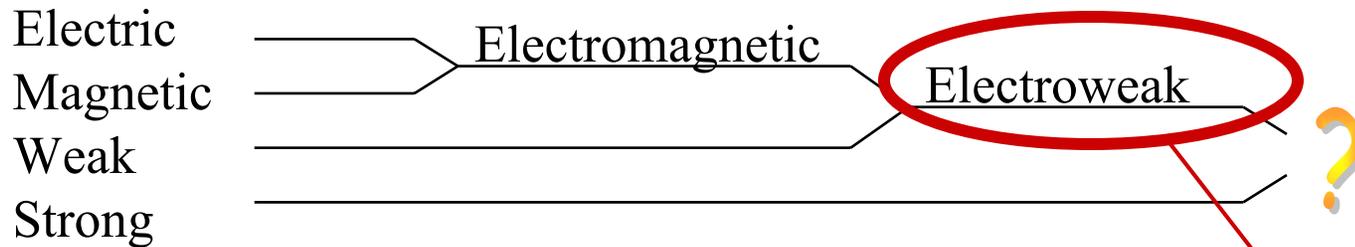


Gli stessi getti si osservano in eventi provenienti da collisioni protone-antiprotone





- L'interazione debole e' responsabile del fatto che tutti i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore
- I mediatori dell'interazione debole sono le particelle:  **$W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$**



Nel Modello Standard l'interazione Debole e' unificata con quella Elettromagnetica: a piccole distanze stessa intensita'

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



# Einstein in the 21st Century

## Test della Teoria ElettroDebole



- Con l'introduzione della teoria elettrodebole **furono necessarie tre nuove particelle**: i mediatori dell'interazione  $W^+$ ,  $W^-$  and  $Z^0$ .
- Le loro masse erano previste dalla teoria stessa:
  - $M_W c^2 \approx 80 \text{ GeV}$
  - $M_Z c^2 \approx 90 \text{ GeV}$

**Circa la massa del bromo(z=35) o dello Zirconio(z=40)!!!  
...Pesantucce per essere "elementari"...**

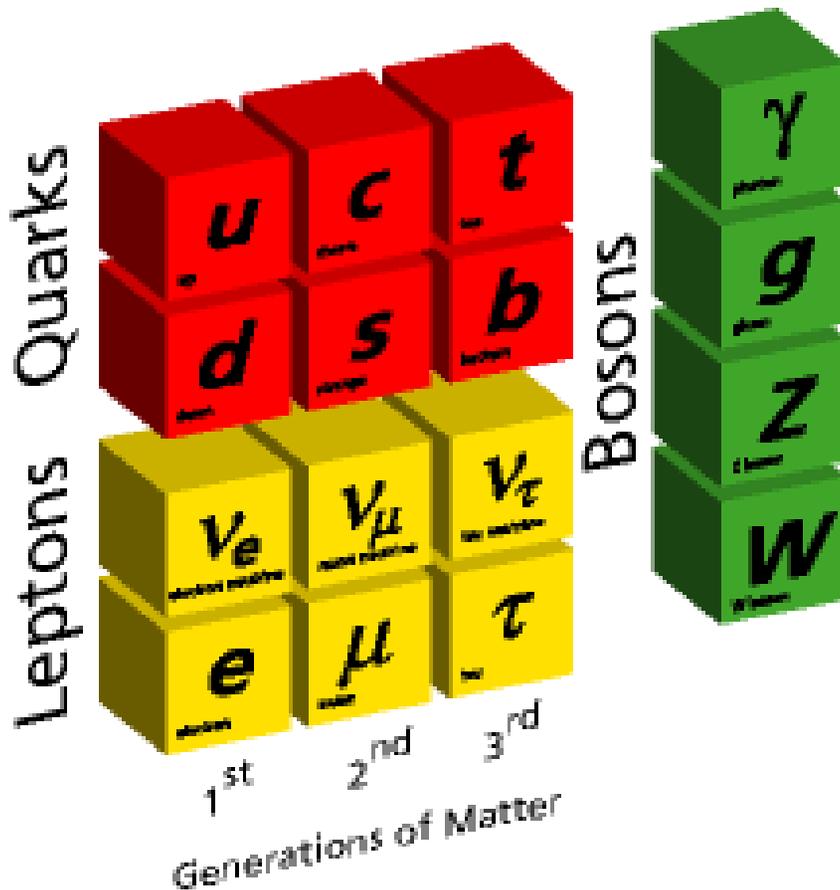
La W e la Z hanno una vita media brevissima, ma possono essere identificate tramite i loro prodotti di decadimento, anche essi predetti dalla teoria elettrodebole:

Scoperte nel 1983 (Nobel a Rubbia)!  
..e con la corretta massa





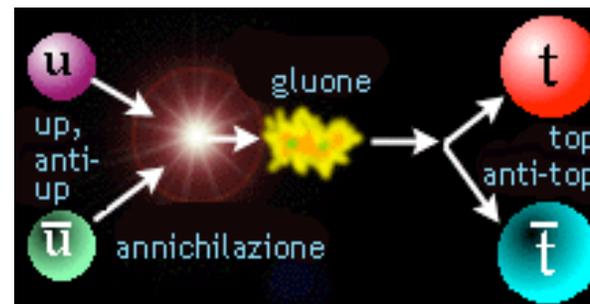
## Elementary Particles



- 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 di questo tipo...
  - Risultato sperimentale ottenuto al CERN.....

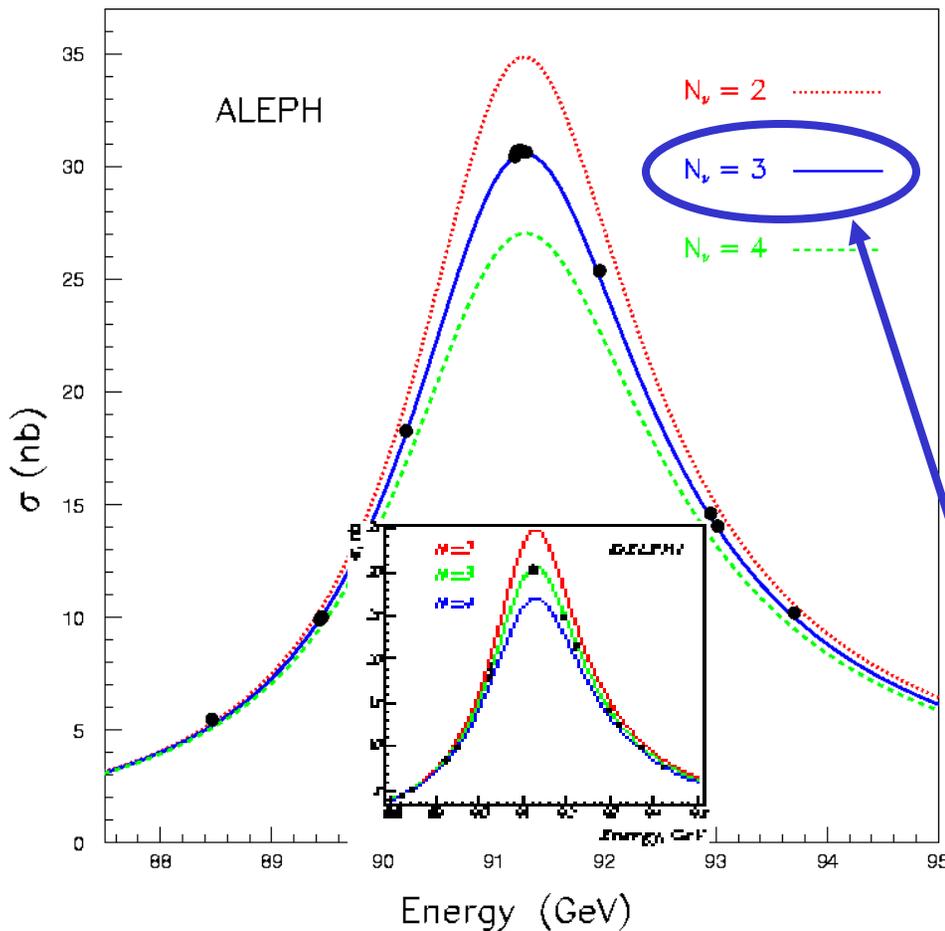


- Per ogni particella (**materia**) c'è la corrispondente antiparticella (**antimateria**).
  - Un'antiparticella è identica alla sua particella sotto ogni aspetto, tranne che per la carica, che è opposta es.: elettrone e positrone o..
  - Il protone ha carica elettrica positiva, e l'antiprotone ha carica 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 e generano energia. Questa energia può dar vita a particelle, mediatrici di forza, come fotoni, bosoni Z, o gluoni.





# 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

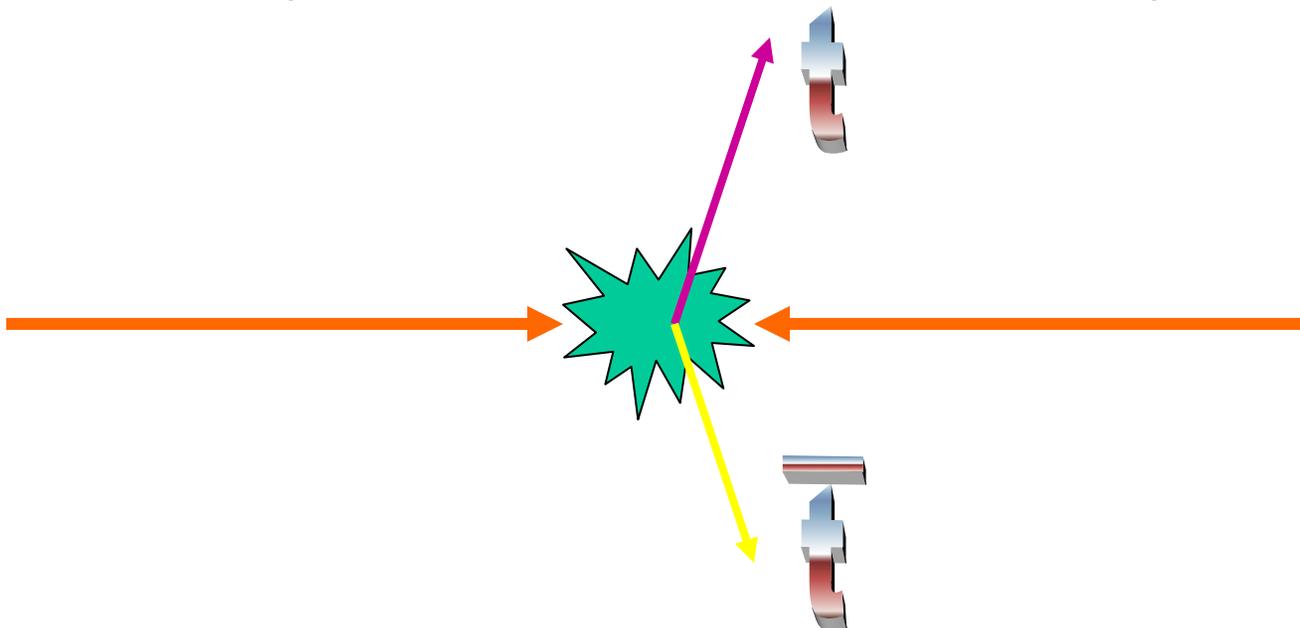
La curva corrispondente ad un numero di generazioni pari a tre descrive meglio la curva!

**Il precedente limite era basato su considerazioni cosmologiche**



# Esempio: Produzione del Top

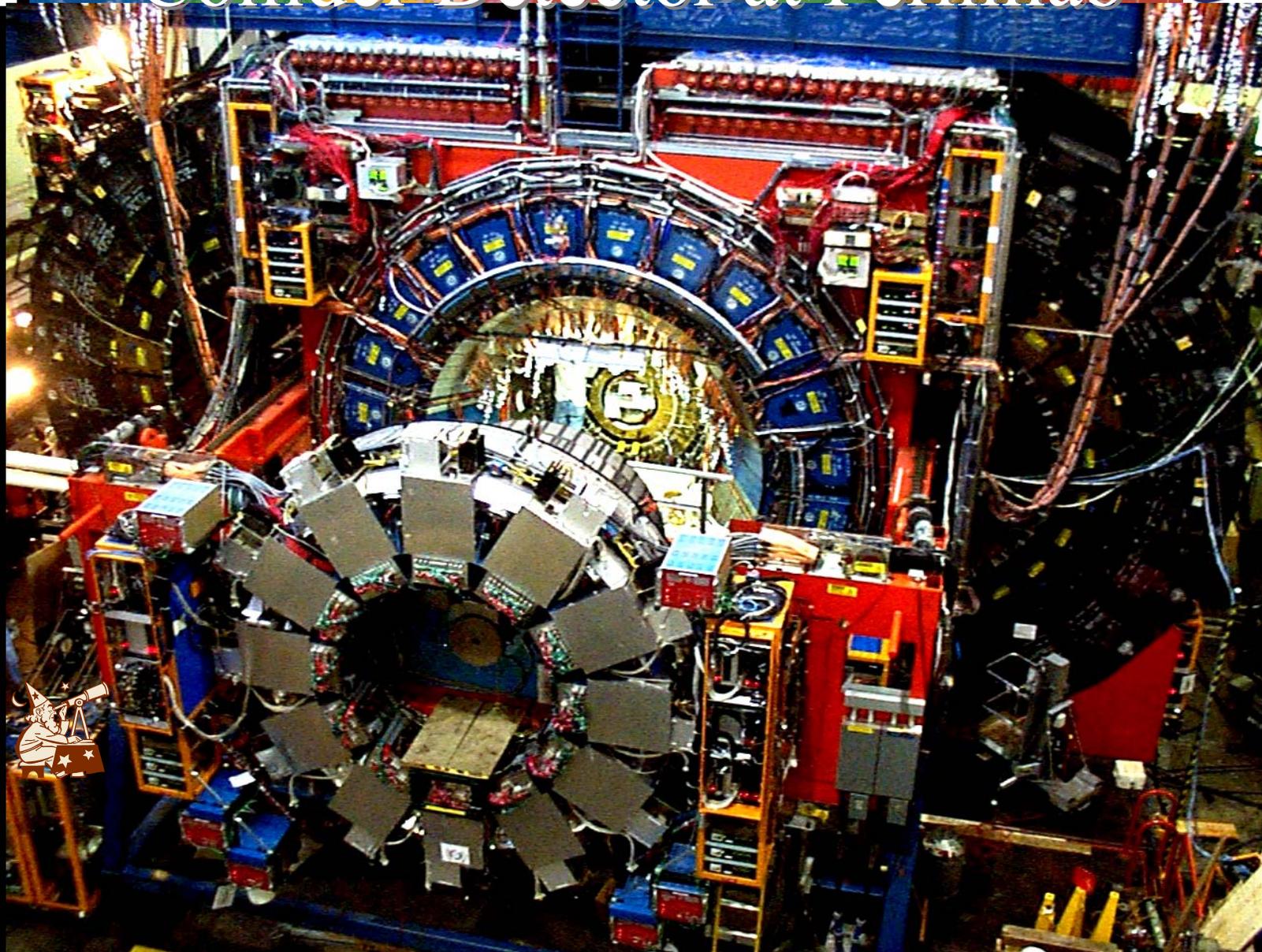
- Il Tevatron di Fermilab e' l'acceleratore di piu' alta energia oggi esistente.
- Protoni e antiprotoni si scontrano con una energia di 1.8 TeV (1800000000000 electron volts)





Einstein in the 21st Century

# Collider Detector at Fermilab

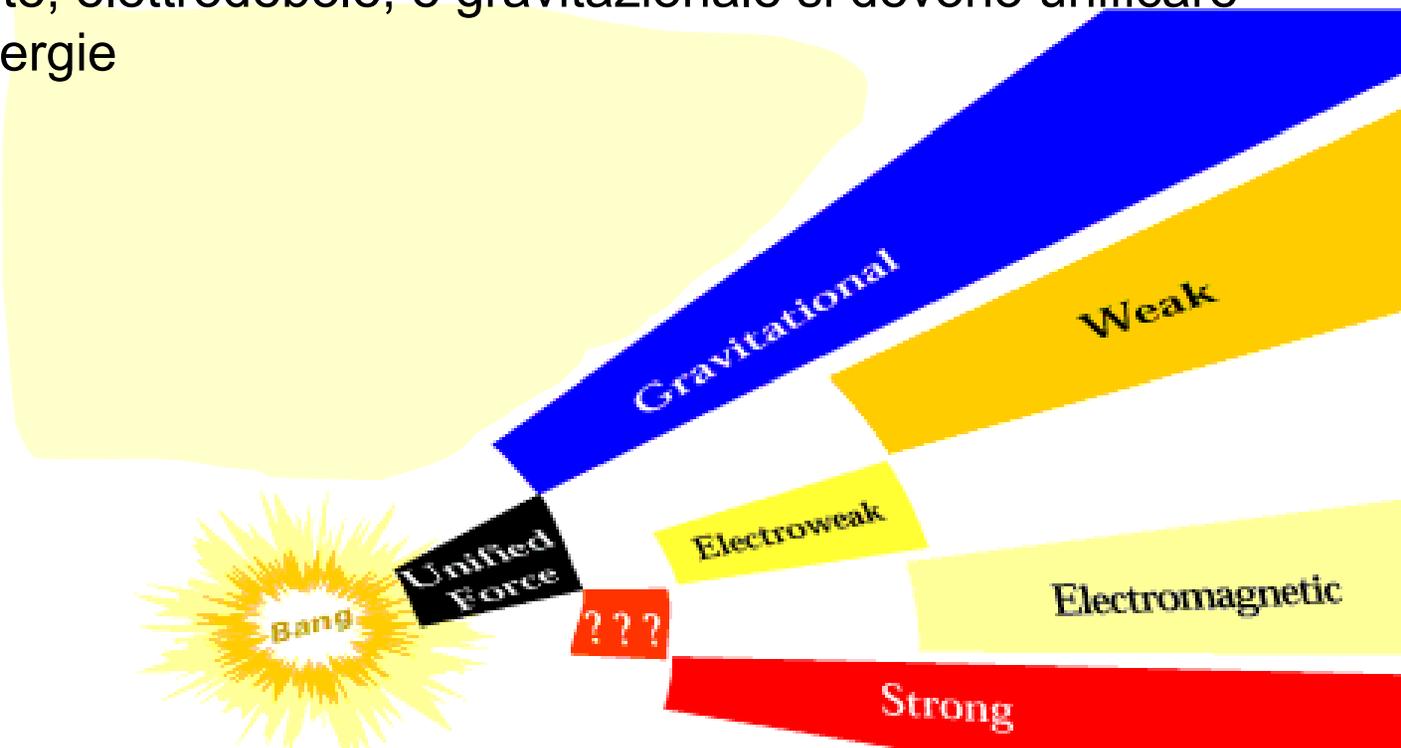


Padova 15 Febbraio 2007

*P. Azzi - P. Checchia*



- Le forze forte, elettrodebole, e gravitazionale si devono unificare a grandi energie



All'inizio dell'Universo tutte le forze erano unificate ed esistevano tutte le tre generazioni della materia

**Bisogna andare a ritroso nel tempo!**

indietro nel tempo ~ energie maggiori

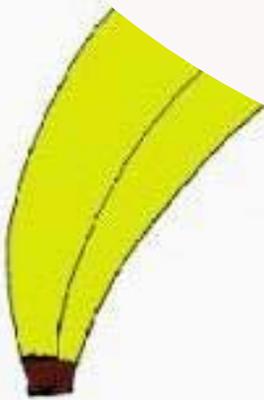


- Alcuni buoni motivi per credere che il Modello Standard sia una (buona) approssimazione di qualcosa di piu' complesso:
  - non spiega la gerarchia delle masse
  - non include la gravitazione
  - non spiega la dominanza di materia nel nostro Universo
  - non suggerisce una soluzione al problema della 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...



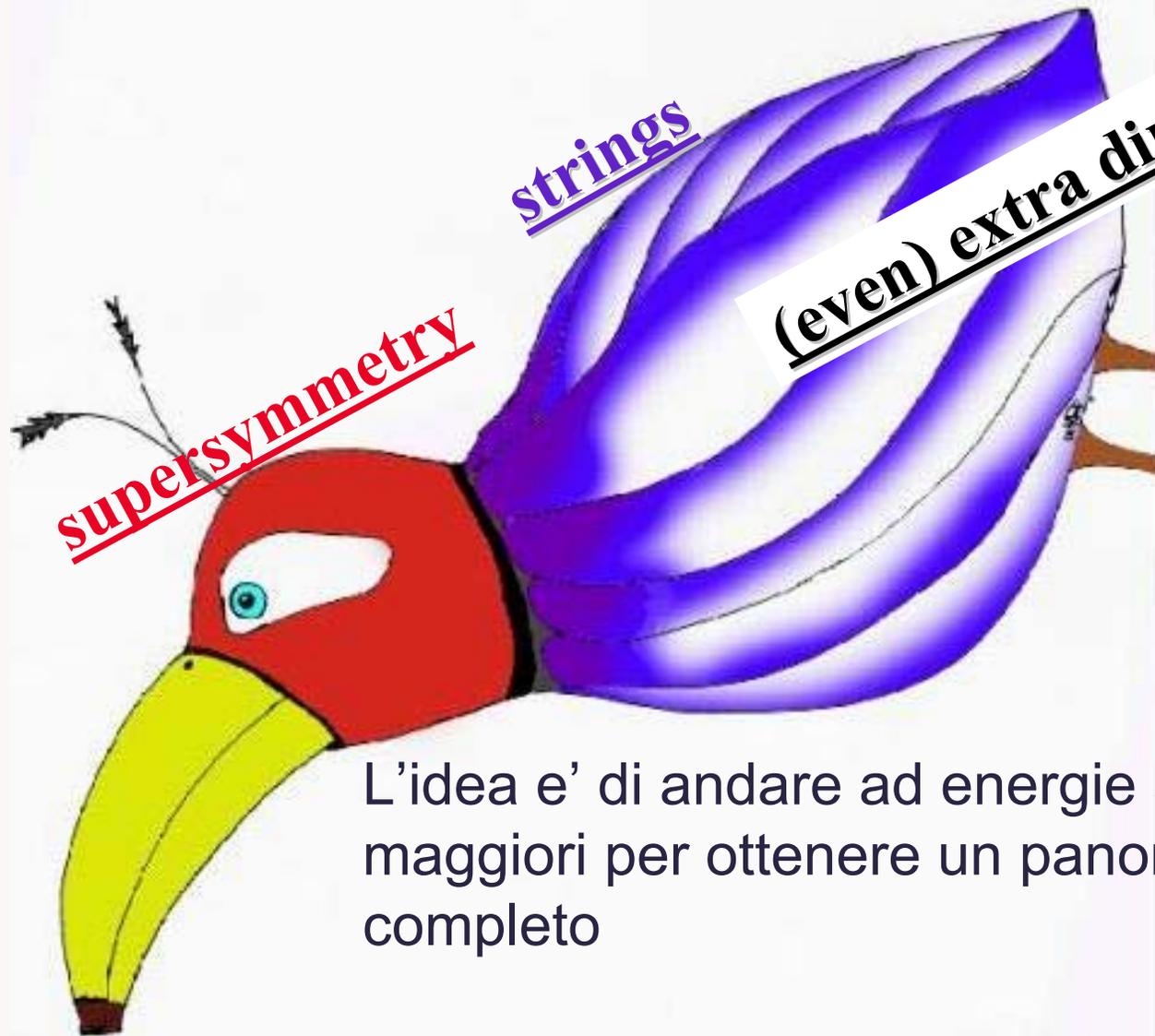
# La “Big Picture”

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

**C'e' bisogno di nuovi esperimenti ed idee!**



Einstein in the 21st Century

# Large Hadron Collider



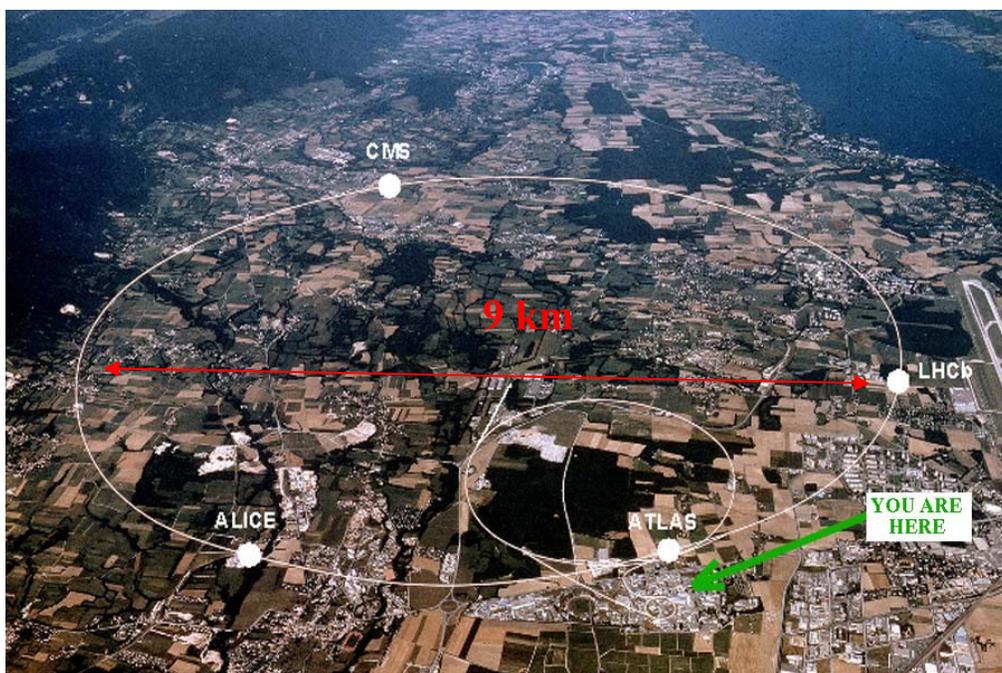


# Einstein in the 21st Century

## Il Large Hadrons Collider



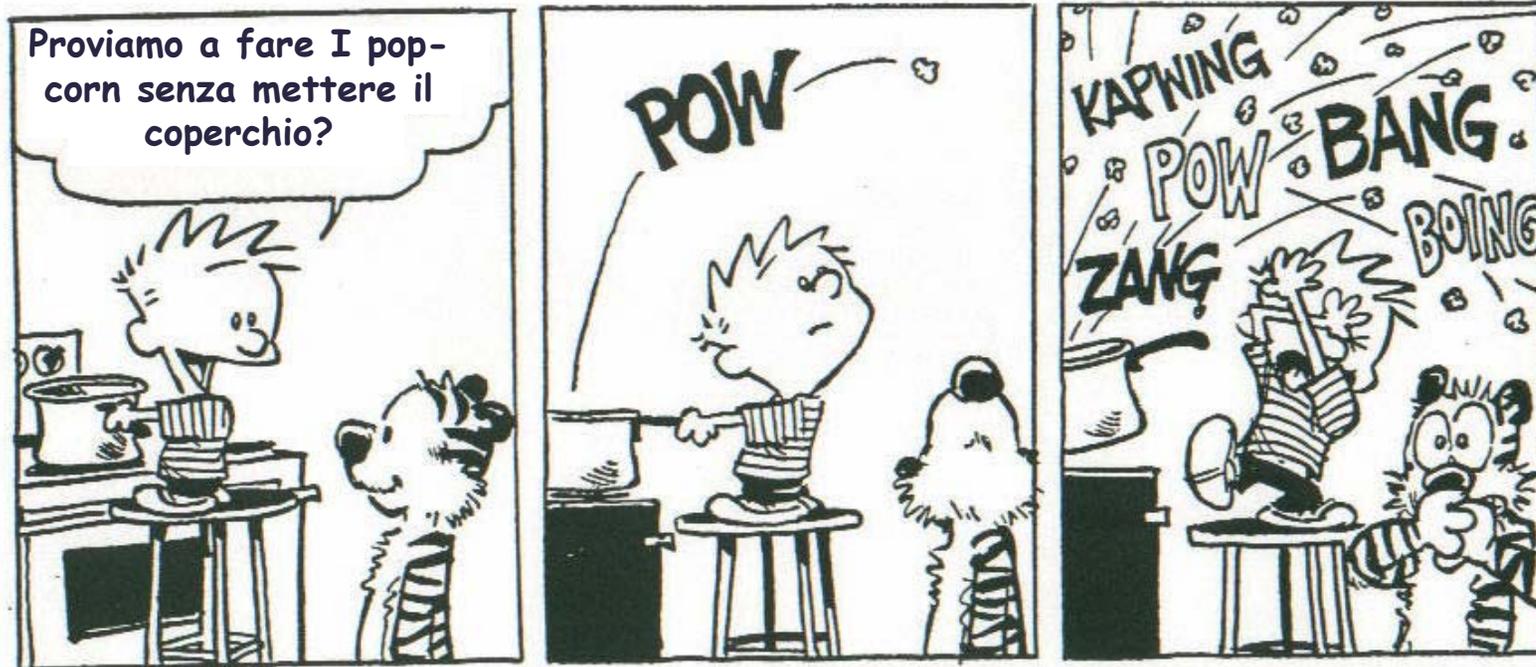
- ✓ Accelera e fa collidere protoni ad un energia di 7+7 TeV (=14\*10<sup>12</sup> eV)
- ✓ Accelera e fa collidere ioni pesanti (e.g. Pb) a 5.5 TeV
- ✓ Lunghezza totale > 27 Km. Profondita' ~ 100 m.
- ✓ Campo magnetico dei dipoli di 8.3 Tesla (piu' di 10<sup>5</sup> volte maggiore campo della Terra)
- ✓ Temperatura in regime superconduttivo di 2.3 K
- ✓ Frequenza di collisione per p-p = 40 MHz





Einstein in the 21st Century

Continuiamo a sperimentare!



Questo e' un invito a tutti gli studenti...

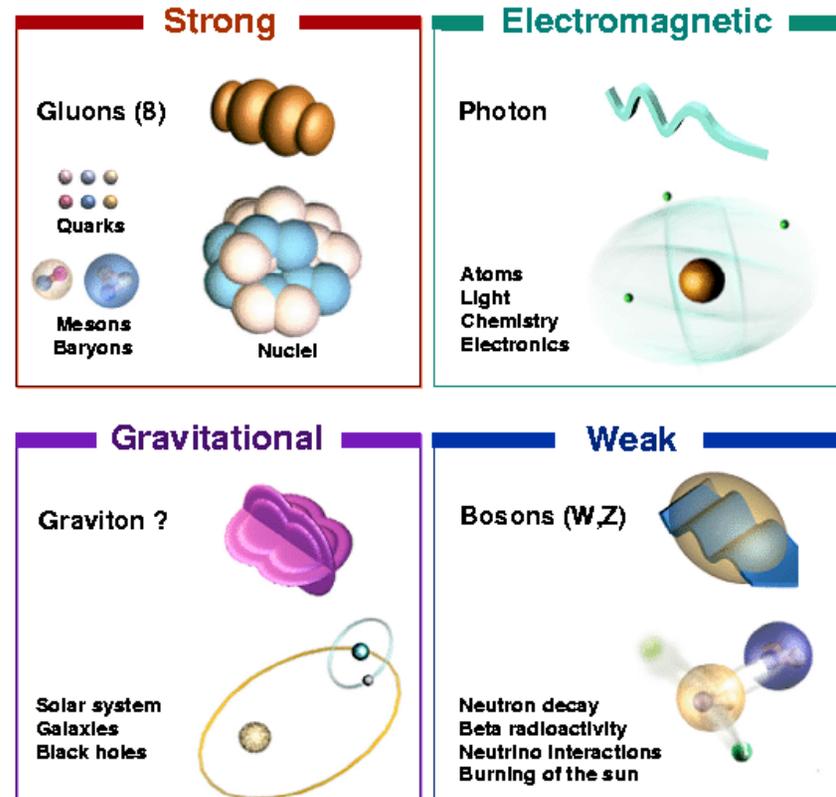
Padova 15 Febbraio 2007

*P. Azzi - P. Checchia*



- 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*