

# LA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

## MasterClass 2011

*ERNESTO MIGLIORE  
DIPARTIMENTO DI FISICA SPERIMENTALE  
UNIVERSITÀ DI TORINO*

# COS'E` LA FISICA DELLE PARTICELLE?

- Wikipedia

[http://it.wikipedia.org/wiki/Fisica\\_delle\\_particelle](http://it.wikipedia.org/wiki/Fisica_delle_particelle)



La **fisica delle particelle** è la branca della *fisica* che studia i *costituenti fondamentali* e le *interazioni fondamentali* della *materia*.

Talvolta viene anche usata l'espressione **fisica delle alte energie**, quando si vuole far riferimento allo studio delle interazioni tra particelle elementari che si verificano ad altissima *energia* e che permettono di creare particelle non presenti in *natura* in condizioni ordinarie, come avviene usualmente con gli *acceleratori di particelle*.

Filosofi e scienziati hanno criticato come *riduzionistiche* l'idea che ogni fenomeno noto possa essere spiegato in base alle leggi che regolano le interazioni tra particelle fondamentali.

Questa definizione dice sostanzialmente tutto!

# UN PO' DI EPISTEMOLOGIA: RIDUZIONE

- **Riduzionismo:** le proprietà di un sistema complesso si possono interpretare in termini delle parti più semplici che lo compongono e delle forze che intervengono a comporlo.

In fisica delle particelle il riduzionismo è un principio universalmente accettato:

→ ricerca di costituenti sempre più elementari

→ ricerca di forze che legano i costituenti sempre più universali

# RIDUZIONISMO VS. EMERGENZA

- In alcune scienze (ad es. chimica, biologia) si ha a che fare con insiemi statisticamente molto grandi di “costituenti elementari” (ad es. atomi, molecole).

**Proprietà emergenti:** regole universali che determinano il comportamento macroscopico degli oggetti che sono più universali delle proprietà dei singoli componenti.

*Ad es.: “Lo studio del genoma è sufficiente a risolvere problemi complessi quali cancro, schizofrenia, depressione?”*

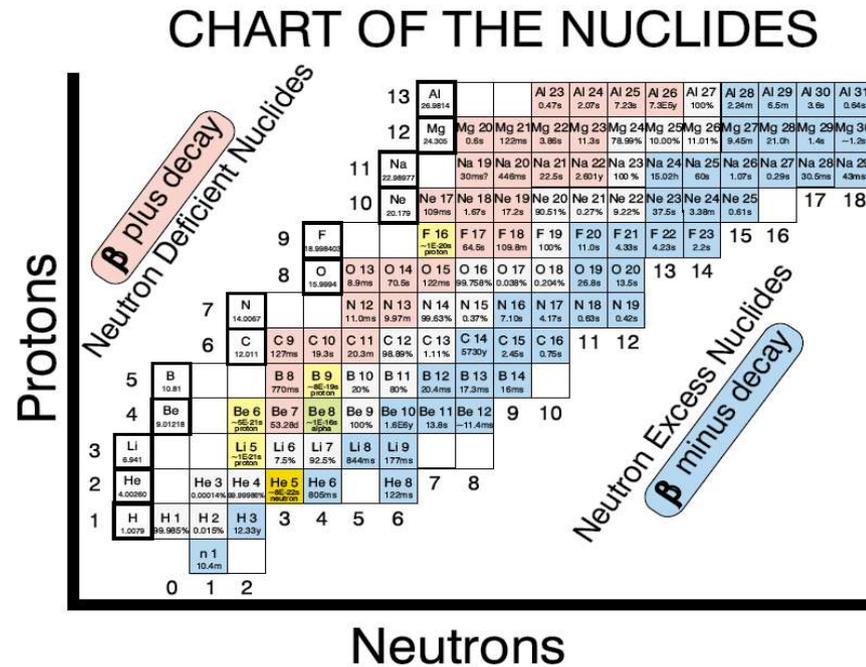
Questione ampiamente dibattuta!

# RIDUZIONISMO E FISICA DELLE PARTICELLE

- Il riduzionismo in fisica delle particelle ha portato ad enormi progressi!
- Ogni ulteriore livello di riduzione porta con sè una grande quantità di informazioni (comprensione più profonda della realtà).
- Il passaggio da un livello a quello successivo avviene in genere attraverso studio di regolarità che indicano la presenza di una struttura più profonda.



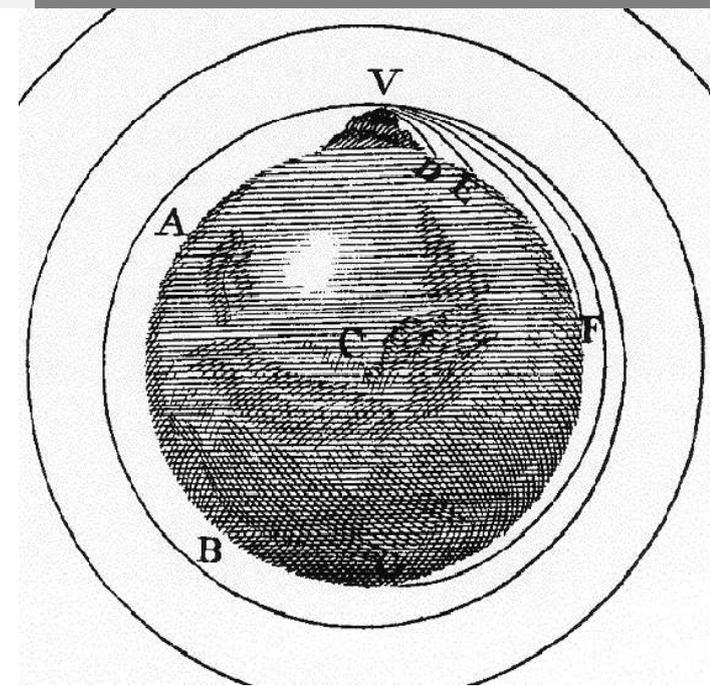
# I COSTITUENTI ELEMENTARI



# LE INTERAZIONI FONDAMENTALI

- Gravità: la stessa forza è all'origine di fenomeni differenti, ad es. la caduta di una mela o la rotazione della Luna intorno alla Terra

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



- $\gamma = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  è la stessa per tutte le masse ( $m_1, m_2$ ) ed in tutto l'Universo
  - potere post-dittivo: accordo tra le misure/osservazioni (ad es. le orbite dei pianeti) ed i calcoli
  - potere pre-dittivo: es. scoperta di Nettuno in seguito alle anomalie dell'orbita di Urano

# GLI “STRUMENTI” DELLA TEORIA

**Problema:** Le leggi fisiche del mondo ordinario valgono anche a livello microscopico?

Le leggi del mondo microscopico sono descritte da

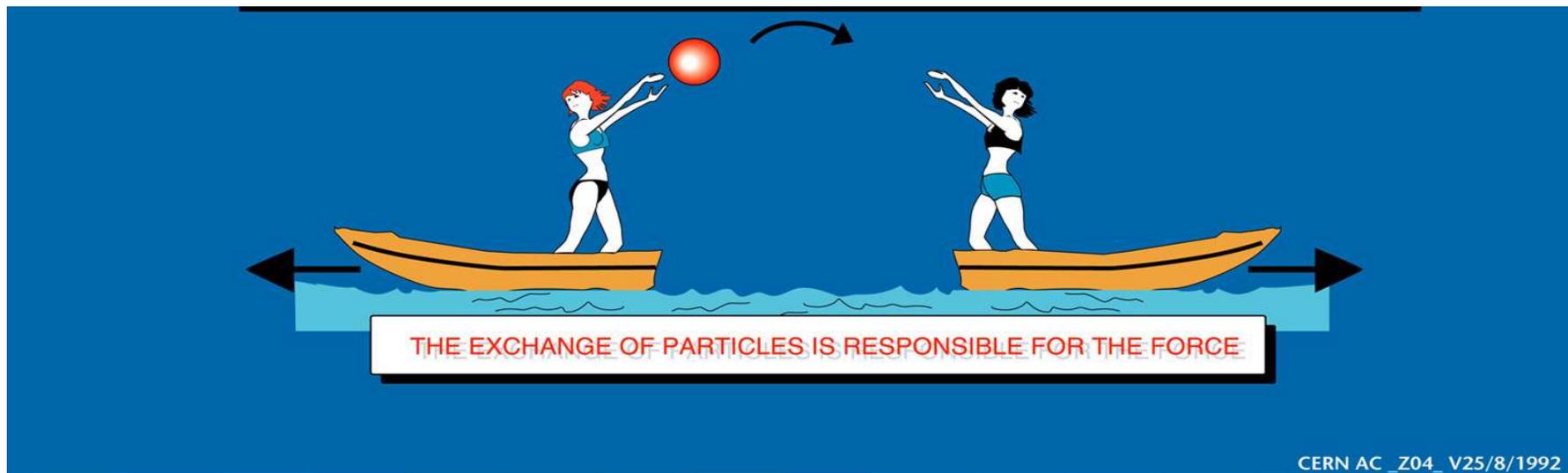
- meccanica quantistica (MQ)
  - i costituenti fondamentali hanno una doppia natura: onda-particella  $\lambda=h/p$
- relatività speciale (RS)
  - equivalenza tra massa ed energia  $E=mc^2$

# GLI “STRUMENTI” DELLA TEORIA

- Messe insieme, MQ e RS hanno conseguenze drammatiche:
  - ad ogni costituente elementare (“particella”) corrisponde un “campo”
  - esistono le antiparticelle
  - esistono processi in cui si coppie particella-antiparticella si creano o si distruggono

# GLI “STRUMENTI” DELLA TEORIA

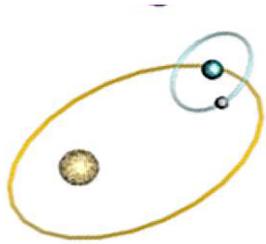
- Messe insieme, MQ e RS hanno conseguenze drammatiche:
  - ad ogni forza fondamentale corrisponde un “campo”
  - le interazioni tra particelle sono descritte come scambi di “quanti” del campo corrispondente (“mediatore”)



NB: le forze possono essere sia repulsive sia attrattive!

# LE INTERAZIONI FONDAMENTALI

- Forza **gravitazionale**



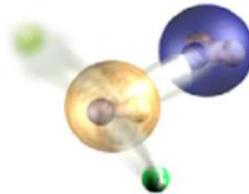
moto dei corpi celesti

- Forza **elettromagnetica**



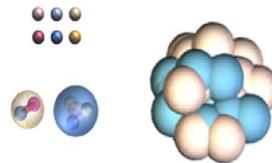
elettromagnetismo, chimica

- Forza **nucleare debole**



decadimenti radioattivi, attività solare

- Forza **nucleare forte**



tiene insieme neutroni e protoni all'interno dei nuclei (ed i quark all'interno degli adroni)

# GLI STRUMENTI SPERIMENTALI

Come si possono cercare nuove particelle (sia “costituenti” sia “mediatori”)?

- Indagando la struttura di un componente ritenuto elementare:
- Producendo una particella più pesante dall'annichilazione di due particelle più leggere:

$$\lambda = h/p$$

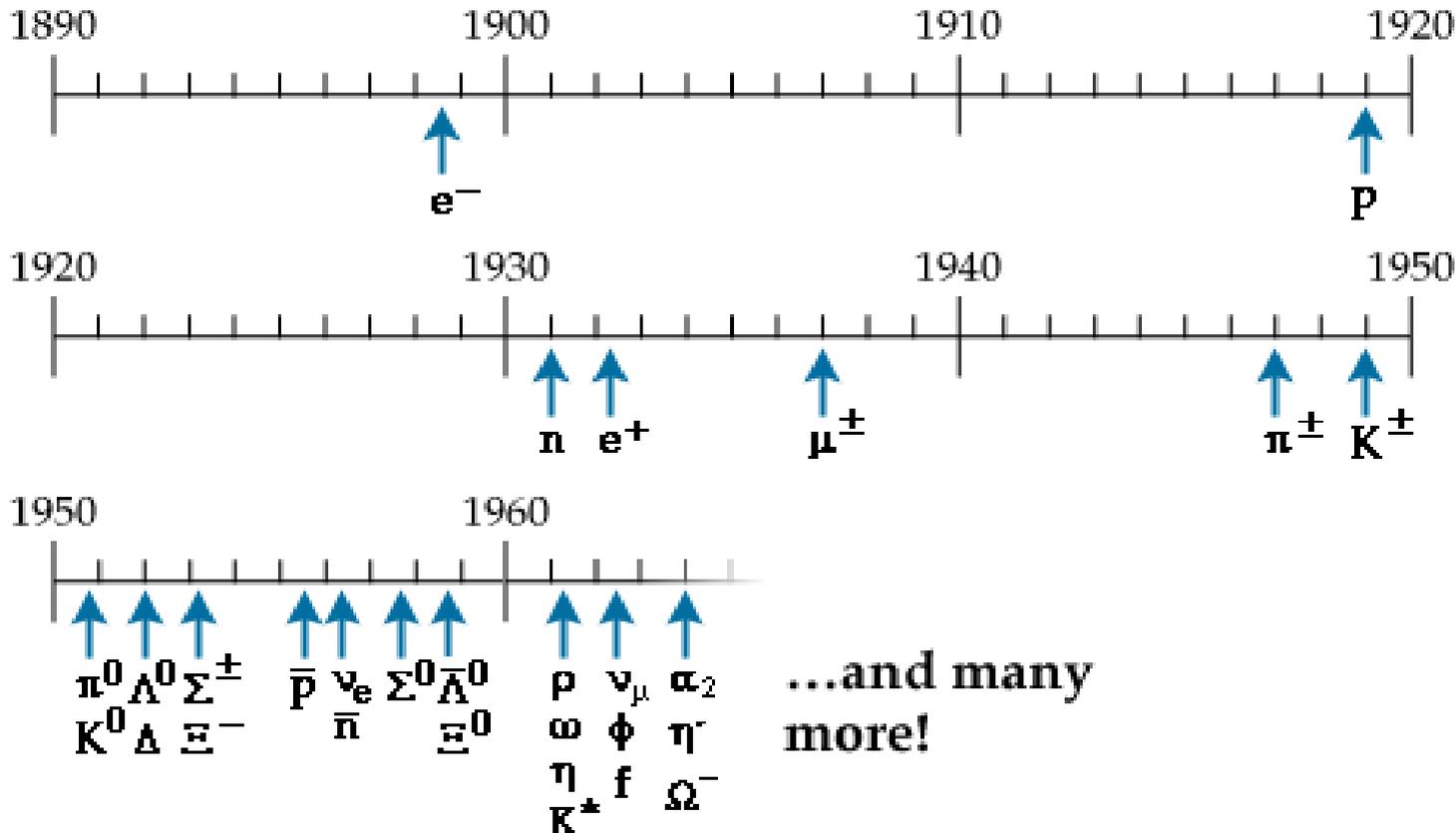
$$E = mc^2$$

Proiettili con grande energia cinetica → ACCELERATORI

Necessità di osservare il processo → RIVELATORI

# “PARTICLE ZOO”

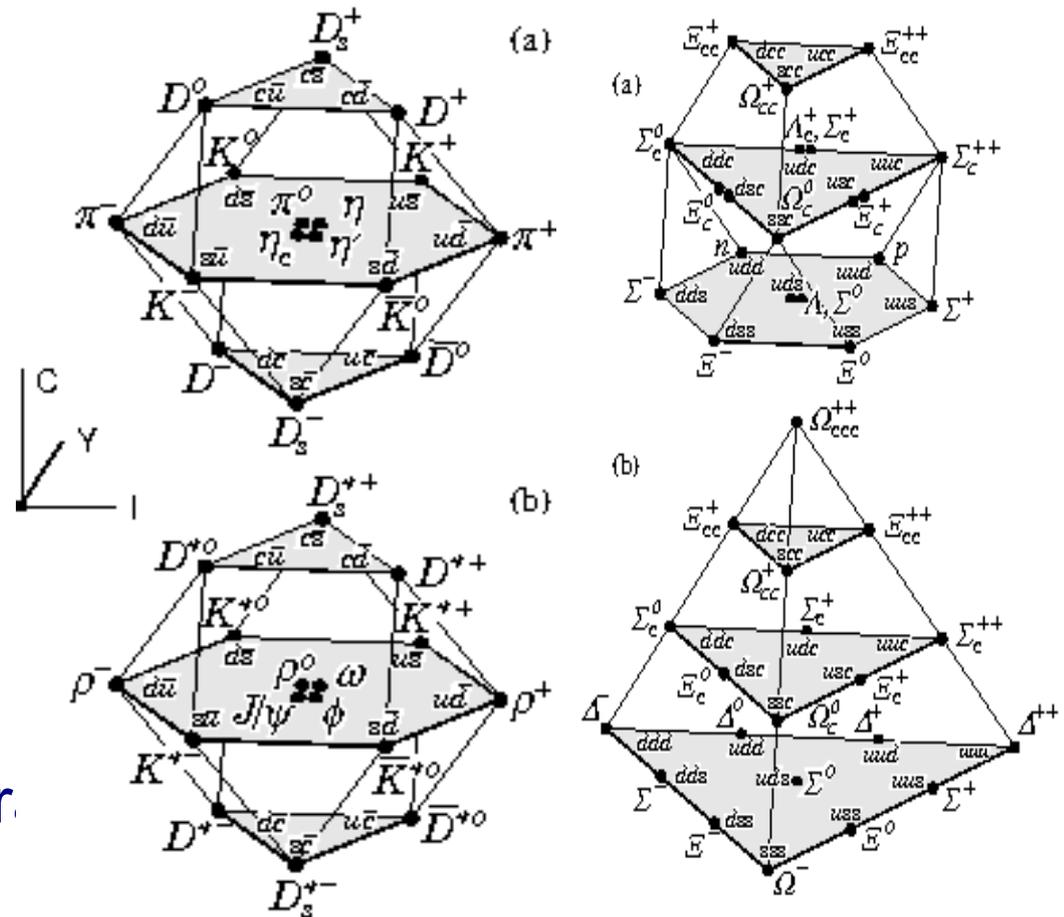
## Moltissime particelle scoperte



- Le particelle possono essere raggruppate in due categorie:
  - **Leptoni:** non sensibili alla forza nucleare forte
  - **Adroni:** sensibili alla forza nucleare forte

# ALTRI COSTITUENTI ELEMENTARI?

- Classificazione degli adroni:

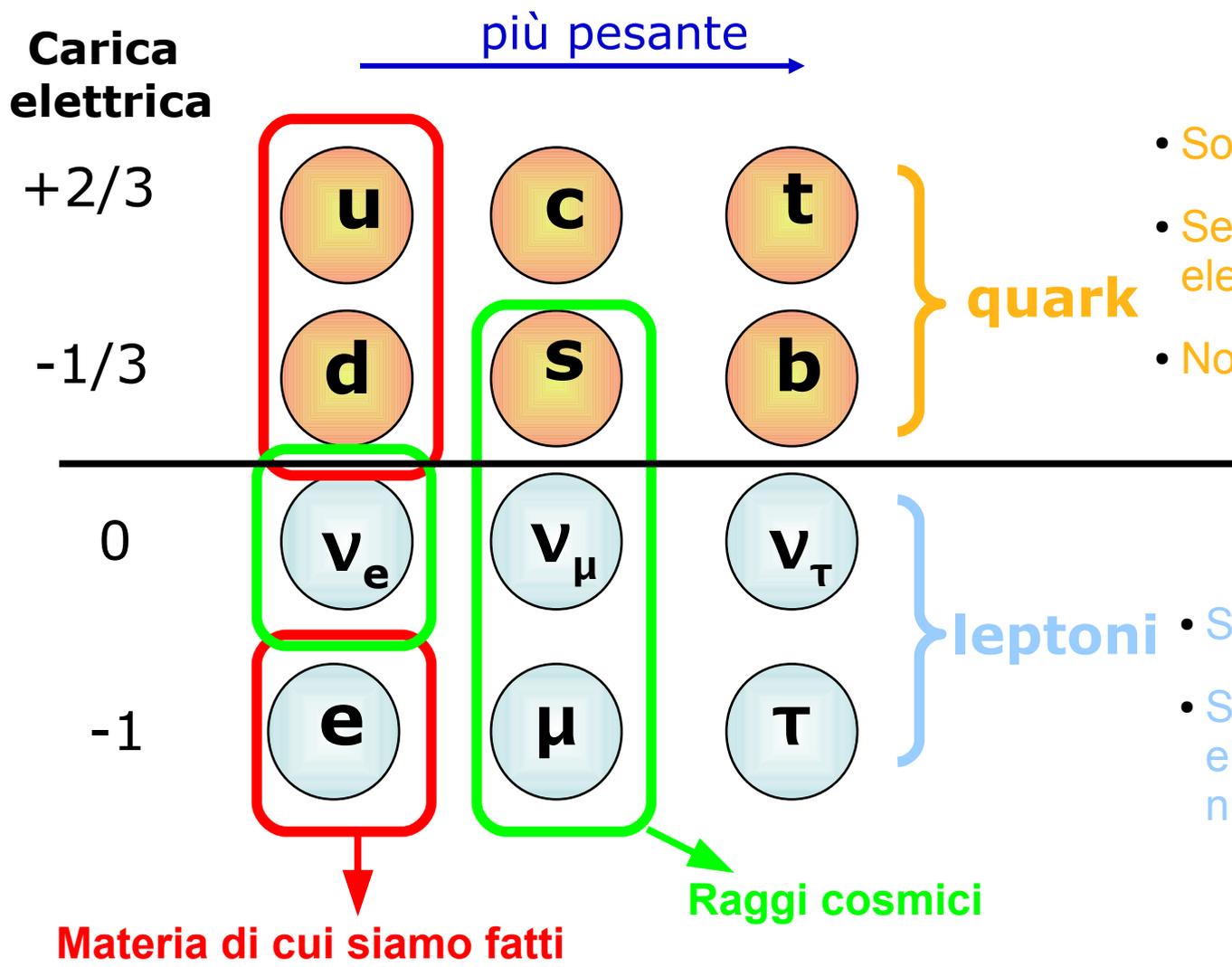


Regolarità

→ indizio di una sottostruttura

- Modello degli adroni:
  - costituenti: quark
  - “colla”: forza nucleare forte

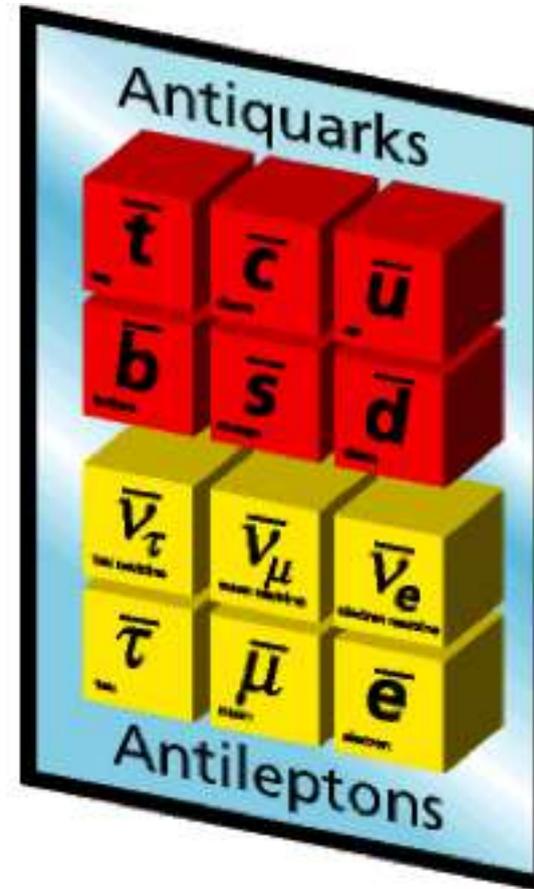
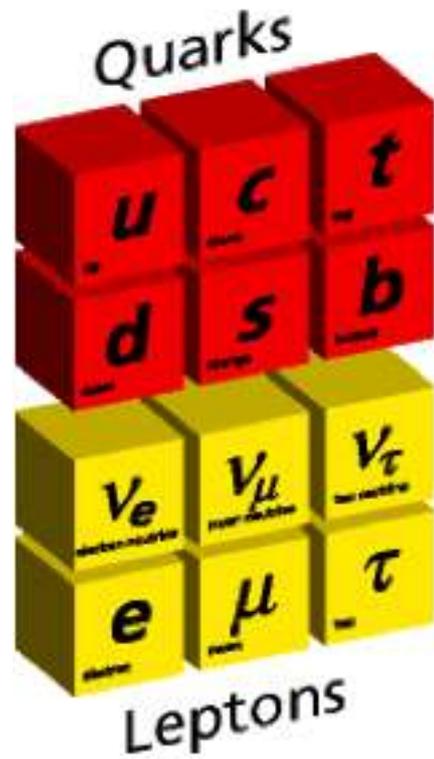
# I COSTITUENTI ELEMENTARI: QUARK E LEPTONI



- Sono puntiformi
- Sentono l'interazione nucleare forte, elettromagnetica e nucleare debole
- Non è possibile osservarli "liberi"

- Sono puntiformi
- Sentono l'interazione elettromagnetica e l'interazione nucleare debole

# ... E LE RISPETTIVE ANTIPARTICELLE



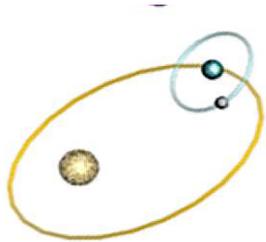
# L'ANTIMATERIA

- Quando si creano particelle in laboratorio si produce tanta materia quanta antimateria.
- In laboratorio sappiamo produrre solo anti-idrogeno ed anti-elio. NB: l'antimateria costa tantissimo: \$62.5 trilioni per un grammo di anti-idrogeno
- **Problema:** durante il big-bang è stata prodotta la stessa quantità di materia e di antimateria. Dove è finita l'antimateria?

Materia ed antimateria non si comportano esattamente allo stesso modo. Questa caratteristica si chiama “CP violation” e spiega perché la materia non è sparita tutta.

# LE INTERAZIONI FONDAMENTALI E MEDIATORI

- Forza **gravitazionale**



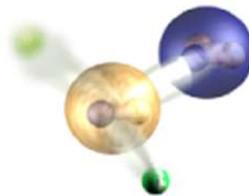
moto dei corpi celesti  
**gravitone** (non ancora osservato)

- Forza **elettromagnetica**



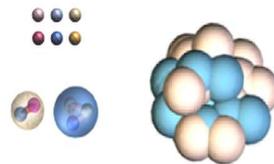
elettromagnetismo, chimica  
**fotone**

- Forza **nucleare debole**



decadimenti radioattivi, attività  
solare  
 **$W^+, W^-, Z$**

- Forza **nucleare forte**



tiene insieme neutroni e protoni  
all'interno dei nuclei (ed i quark  
all'interno degli adroni)  
**gluone**

# L'UNIFICAZIONE DELLE FORZE

- Equazioni di Maxwell (1873)

$$\oint \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dA = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dA = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

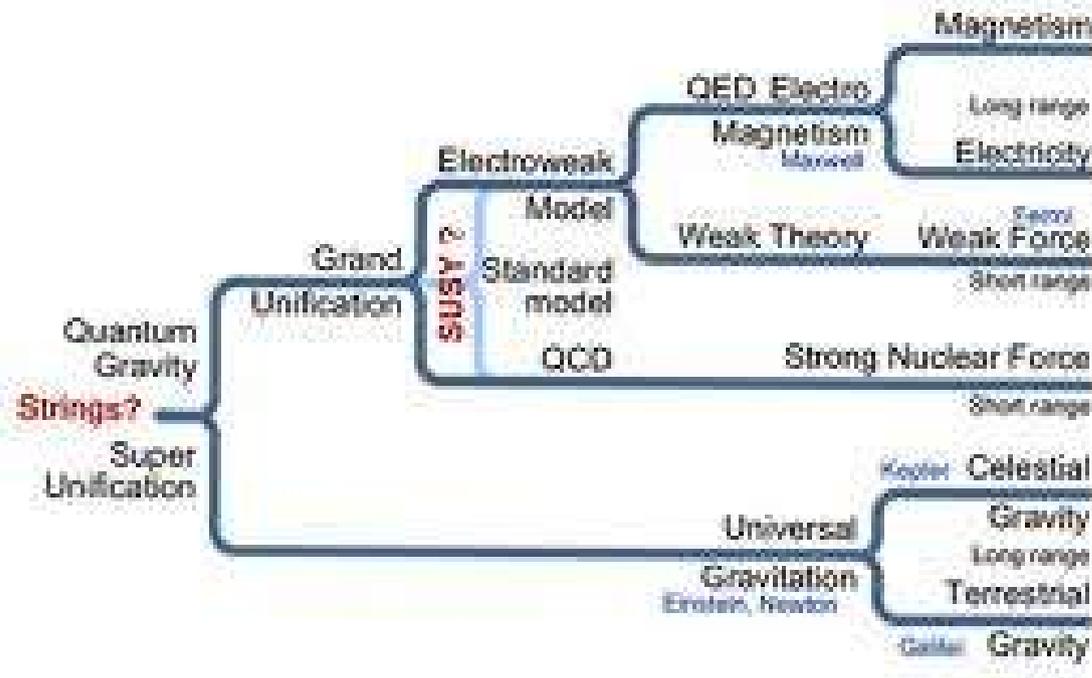
Faraday: **B** variabile genera **E**

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I_{in}$$

Maxwell: **E** variabile genera **B**

- Un unico sistema di equazioni descrive fenomeni molto differenti: funzionamento di una batteria (elettricità), il campo magnetico generato da una bobina percorsa da corrente (magnetismo), la propagazione della luce.
- Regolarità nella struttura matematica delle equazioni  
→ simmetria

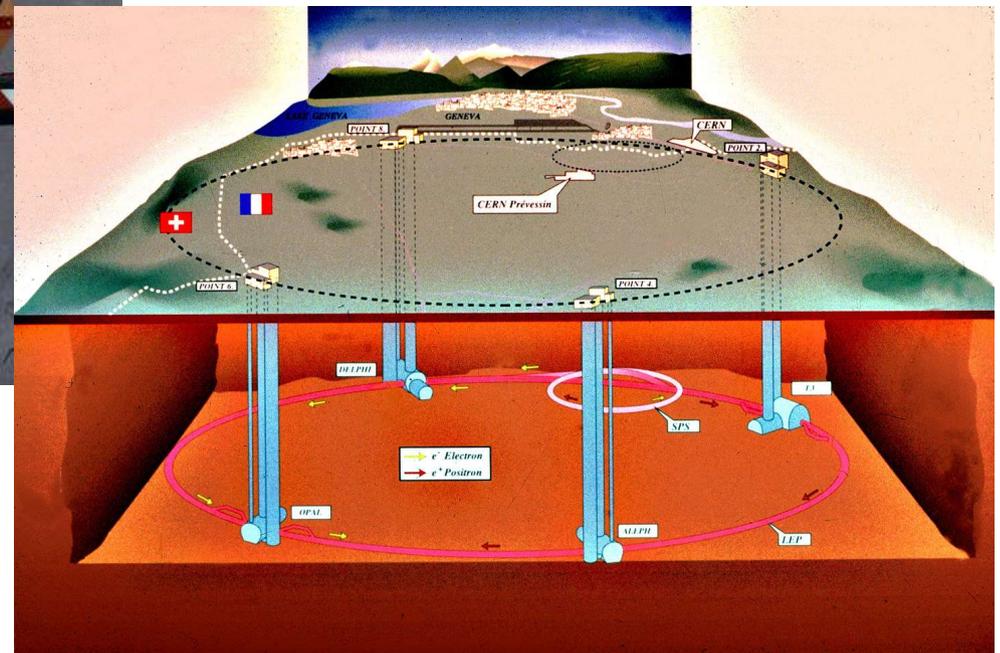
# IL MODELLO STANDARD



- Elettromagnetismo e forza nucleare debole ci appaiono differenti perché consideriamo fenomeni che avvengono ad una scala di energia bassa ( $E \ll m_Z c^2, m_W c^2$ ).  
Se considerassimo processi che avvengono alla scala di energia di  $\sim 100 m_p c^2$ , le due interazioni avrebbero intensità comparabili.

# LE VERIFICHE DEL MODELLO STANDARD

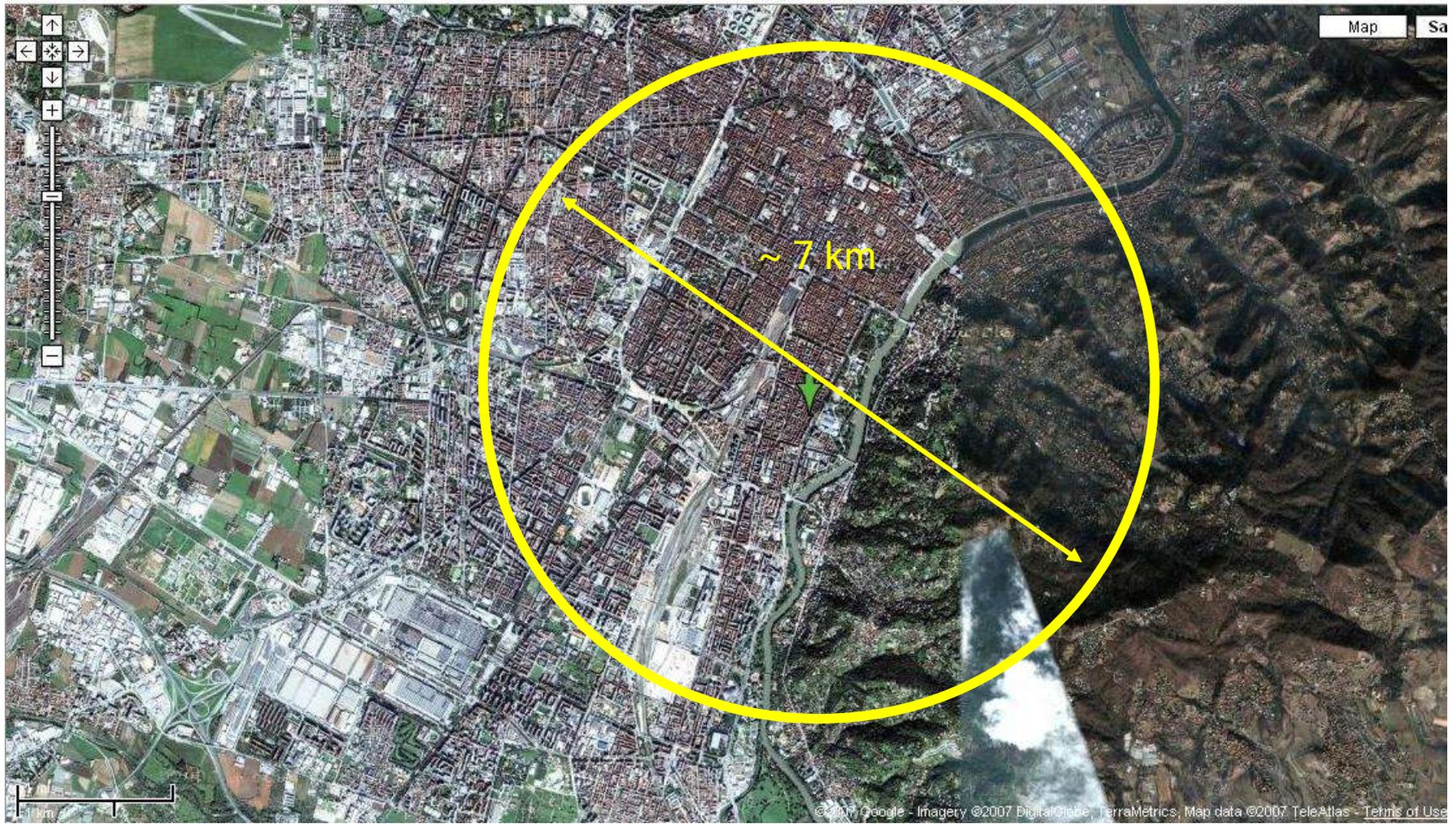
- Le predizioni del Modello Standard sono state verificate con grandissima precisione ( $<10^{-3}$ ) negli ultimi 30 anni negli esperimenti ai grandi collisori (SPS e LEP al CERN, Tevatron al Fermilab)



# LEP/LHC AL CERN...



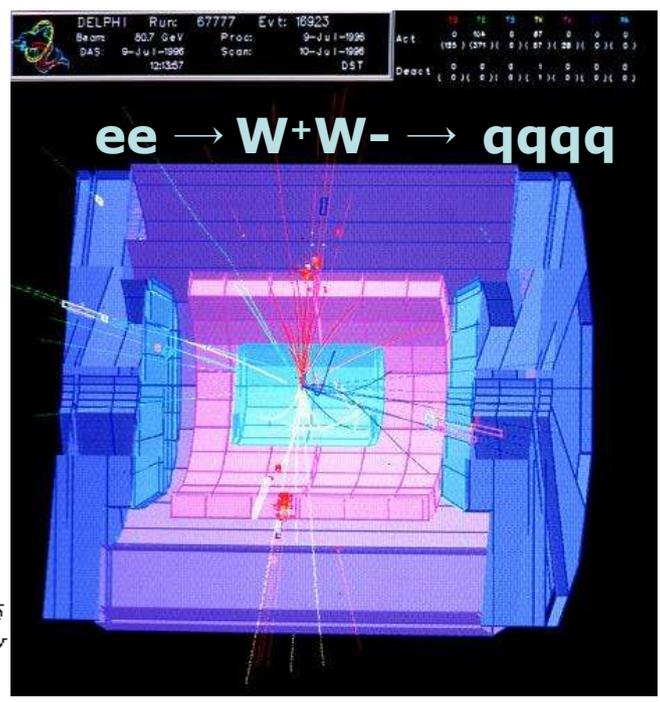
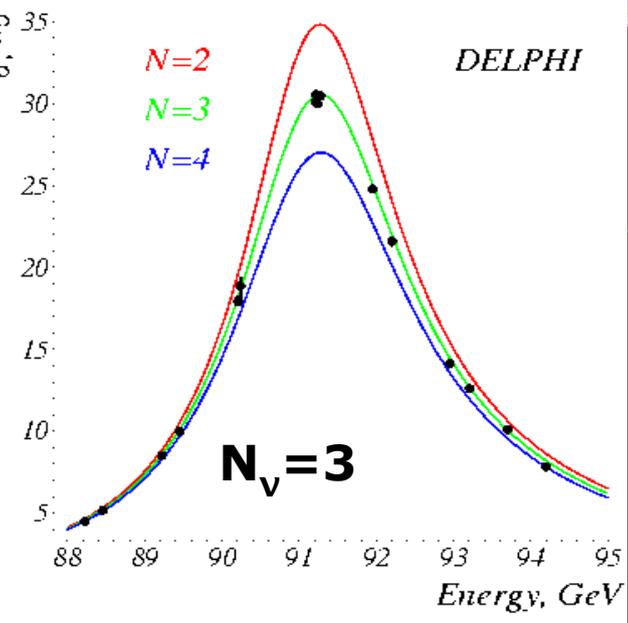
# SE LEP/LHC FOSSE A TORINO...



# LE VERIFICHE DEL MODELLO STANDARD

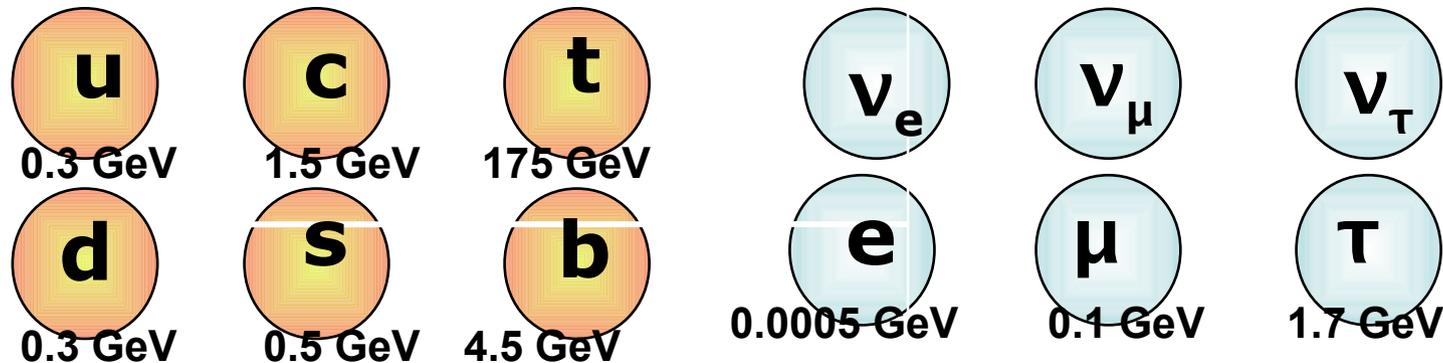
Alcuni risultati:

- scoperta e misura della massa di Z e W ( $\Delta m/m$   $10^{-5}$ - $10^{-4}$ )
- determinazione del numero delle famiglie leptoniche: **3**  
NB: 3 è il numero minimo per spiegare la "CP violation"
- predizione e scoperta del quark top



# QUESTIONI APERTE

- Le misure effettuate a LEP hanno confermato che la proprietà di simmetria alla base del Modello Standard è corretta
- La simmetria è valida solo se le particelle hanno massa nulla → le interazioni tra le particelle ed i mediatori ( $\gamma, W, Z$ ) sarebbero scritte tutte nello stesso modo



$$m_Z c^2 = 91 \text{ GeV} \quad m_W c^2 = 80 \text{ GeV}$$

$$m_p c^2 = 0.94 \text{ GeV}$$

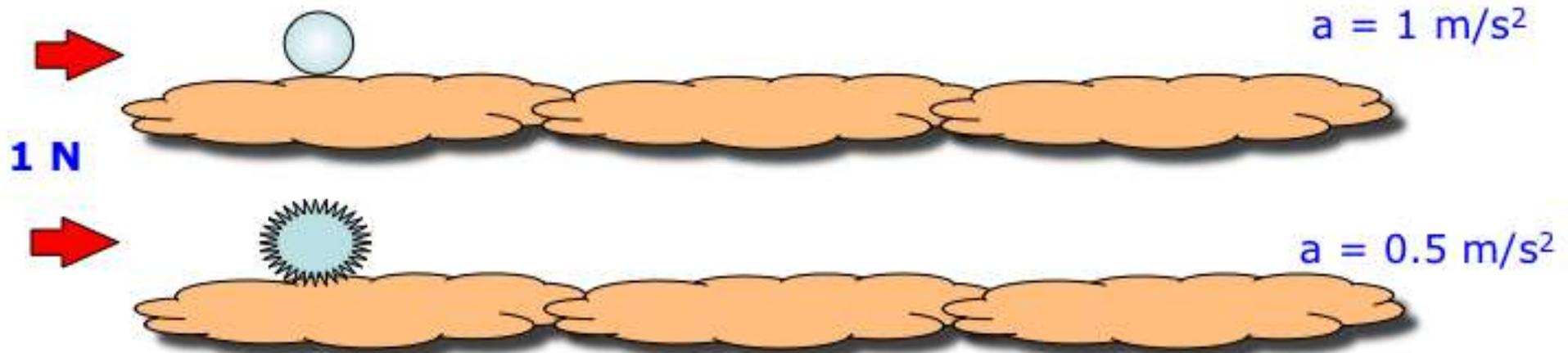
$$m_Z \sim \text{atomo di Ag}$$

$$m_t \sim \text{atomo di W}$$

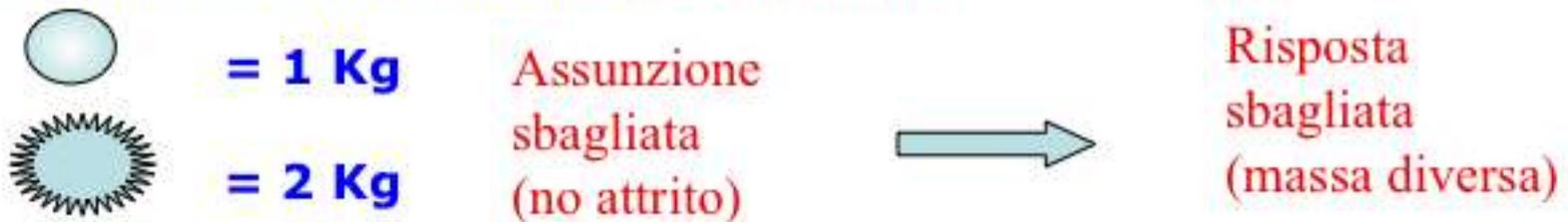
- **Problema:** le particelle hanno massa diversa da zero e diverse tra loro

# MASSA DELLE PARTICELLE E BOSONE DI HIGGS

- La massa è una proprietà apparente.
- Ad es. colpiamo con la stessa forza due corpi che hanno massa identica ma che sono uno liscio e l'altro ruvido.

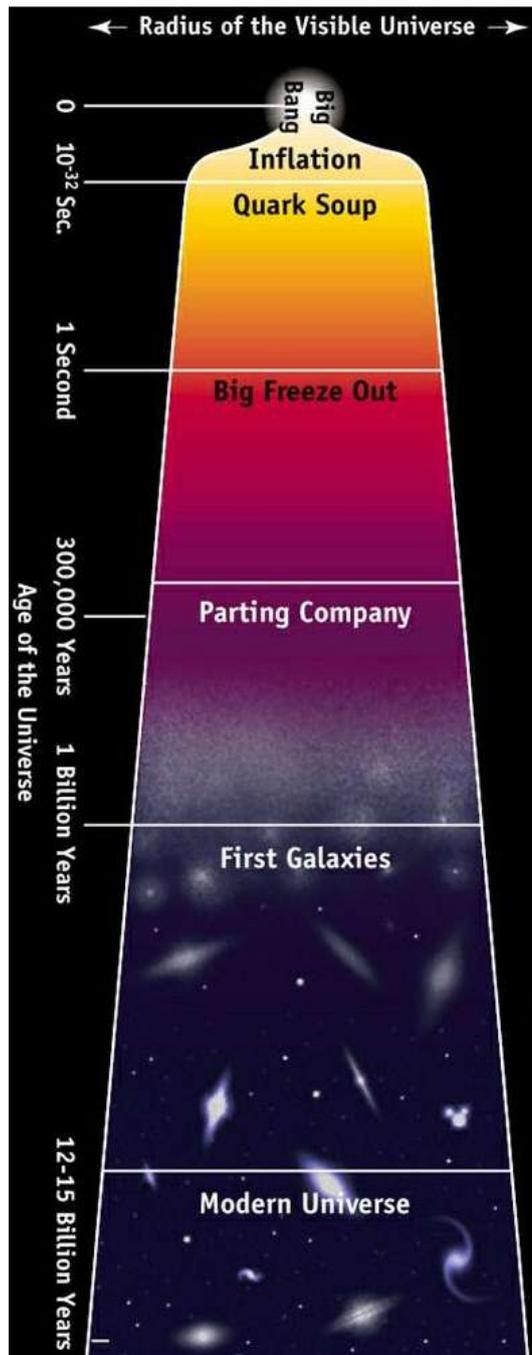


Calcoliamone la massa assumendo che **non ci sia attrito**:



# MASSA DELLE PARTICELLE E BOSONE DI HIGGS

- Le particelle hanno massa nulla.
- Ci sembra che abbiamo massa perché si muovono più o meno faticosamente nel campo di Higgs.
- **Problema:** la particella che corrisponde al campo di Higgs (“bosone di Higgs”) non è ancora stata osservata  
→ LHC è stato costruito principalmente per la ricerca del bosone di Higgs
  
- Abbiamo una teoria che ci permette di ricostruire la storia dell'Universo (forse)

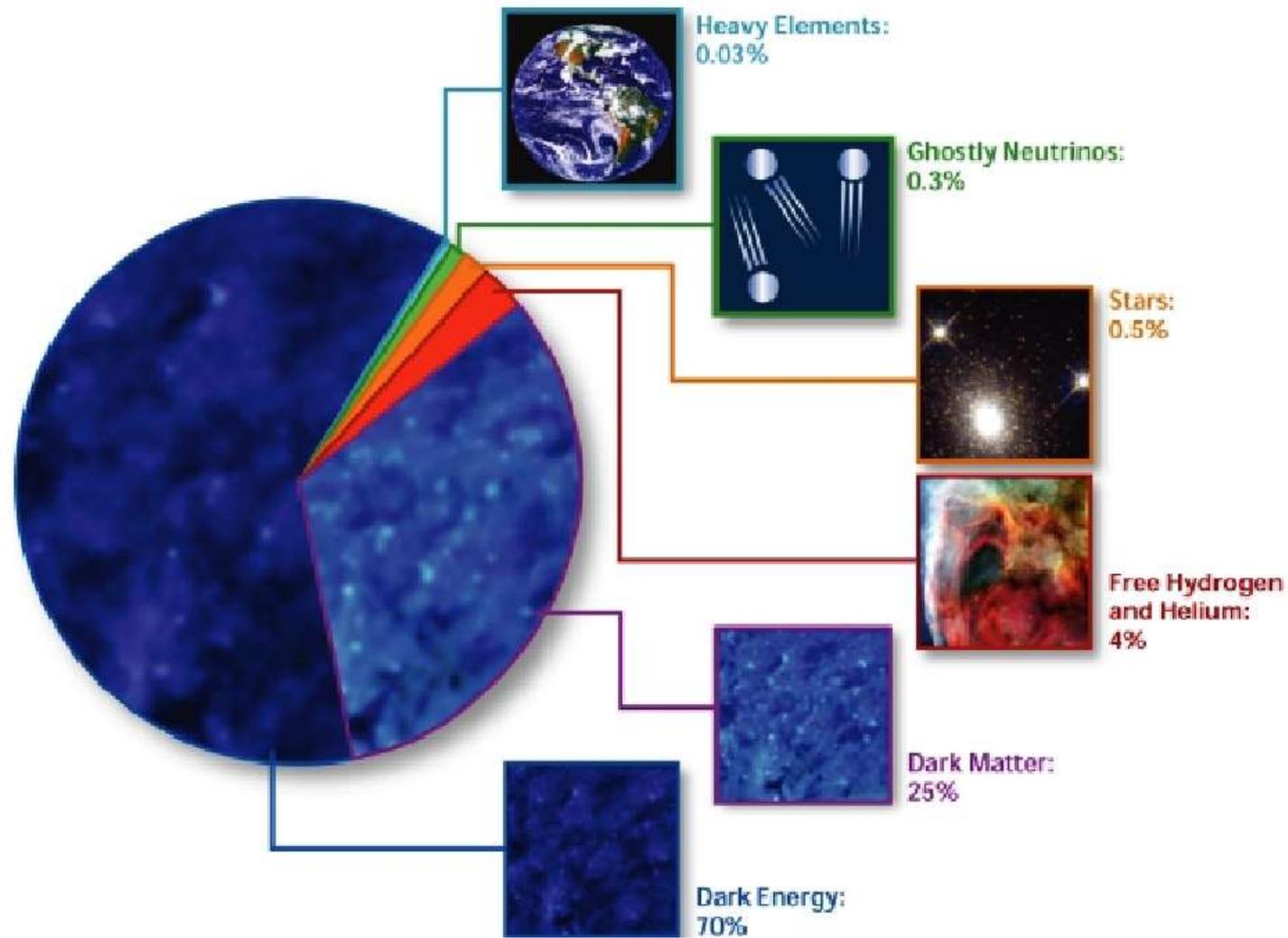


- $t=0$  (14 miliardi di anni fa): Big Bang
- $t=10^{-6}$  s protoni e neutroni
- $t=3$  min nuclei  
raffreddamento
- $t=380\ 000$  anni atomi leggeri (H, He)
- $t=1\ 600\ 000$  anni stelle e galassie (gravità)  
atomi pesanti formati nel nucleo delle stelle  
pianeti
- $t=9\ 000\ 000\ 000$  anni l'Universo comincia ad espandersi velocemente

**Problema:** questo modello spiega solo il 5% di quello che vediamo

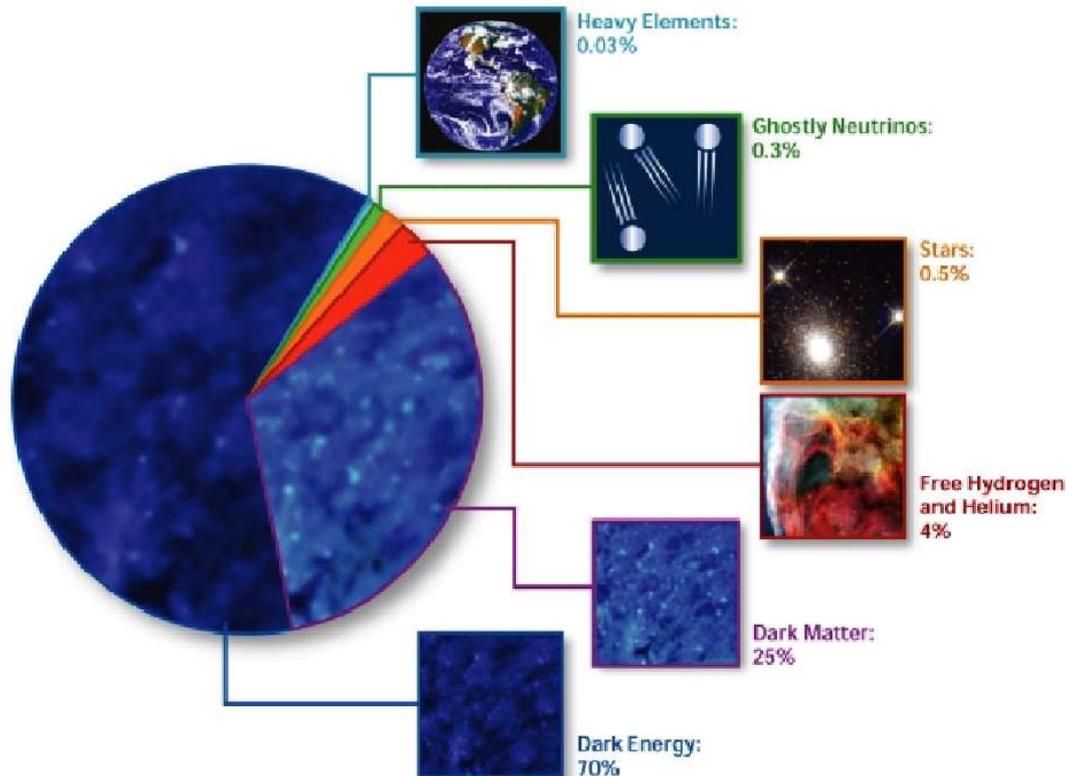
# ALTRE QUESTIONI APERTE

- Misure astronomiche mostrano che l'Universo è fatto da:



# ALTRE QUESTIONI APERTE

- **Problema:** da cosa è costituito il 95% che non osserviamo?

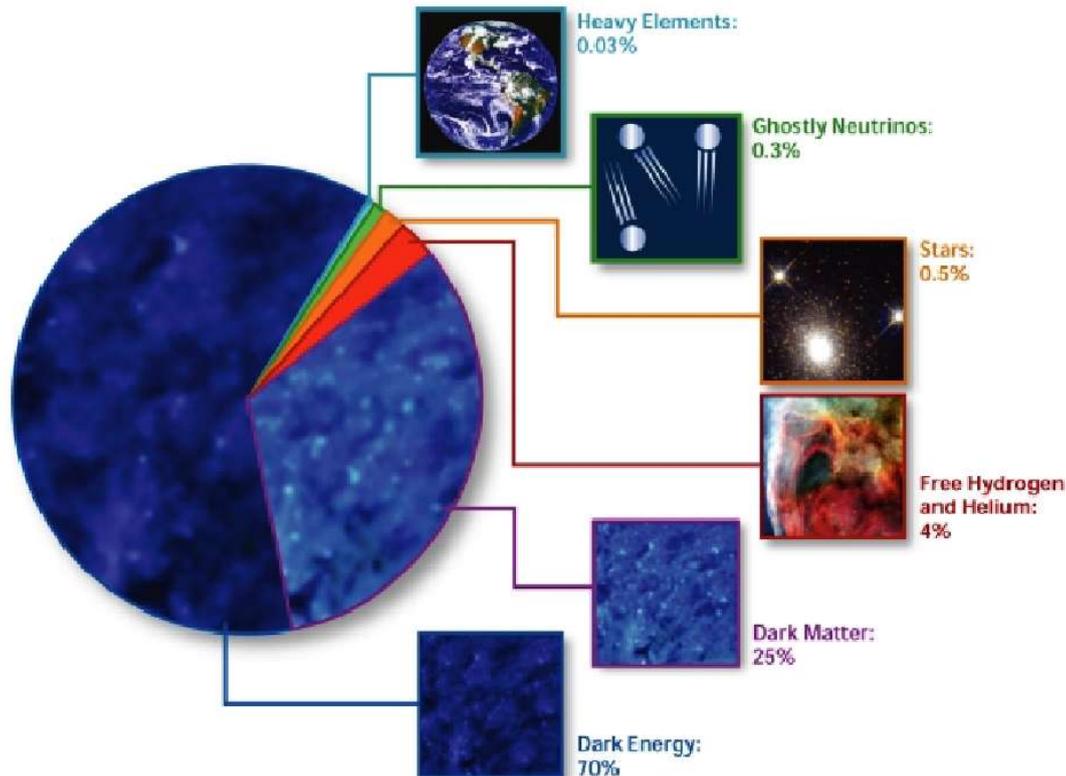


- **Materia oscura (~25%):**
  - non emette radiazione elettromagnetica
  - fa ruotare più velocemente le galassie

Ipotesi: particelle supersimmetriche (non ancora osservate)

- **Energia oscura (~70%)**
  - responsabile della velocità con cui l'Universo si espande
  - riempie uniformemente tutto l'Universo

# ALTRE QUESTIONI APERTE

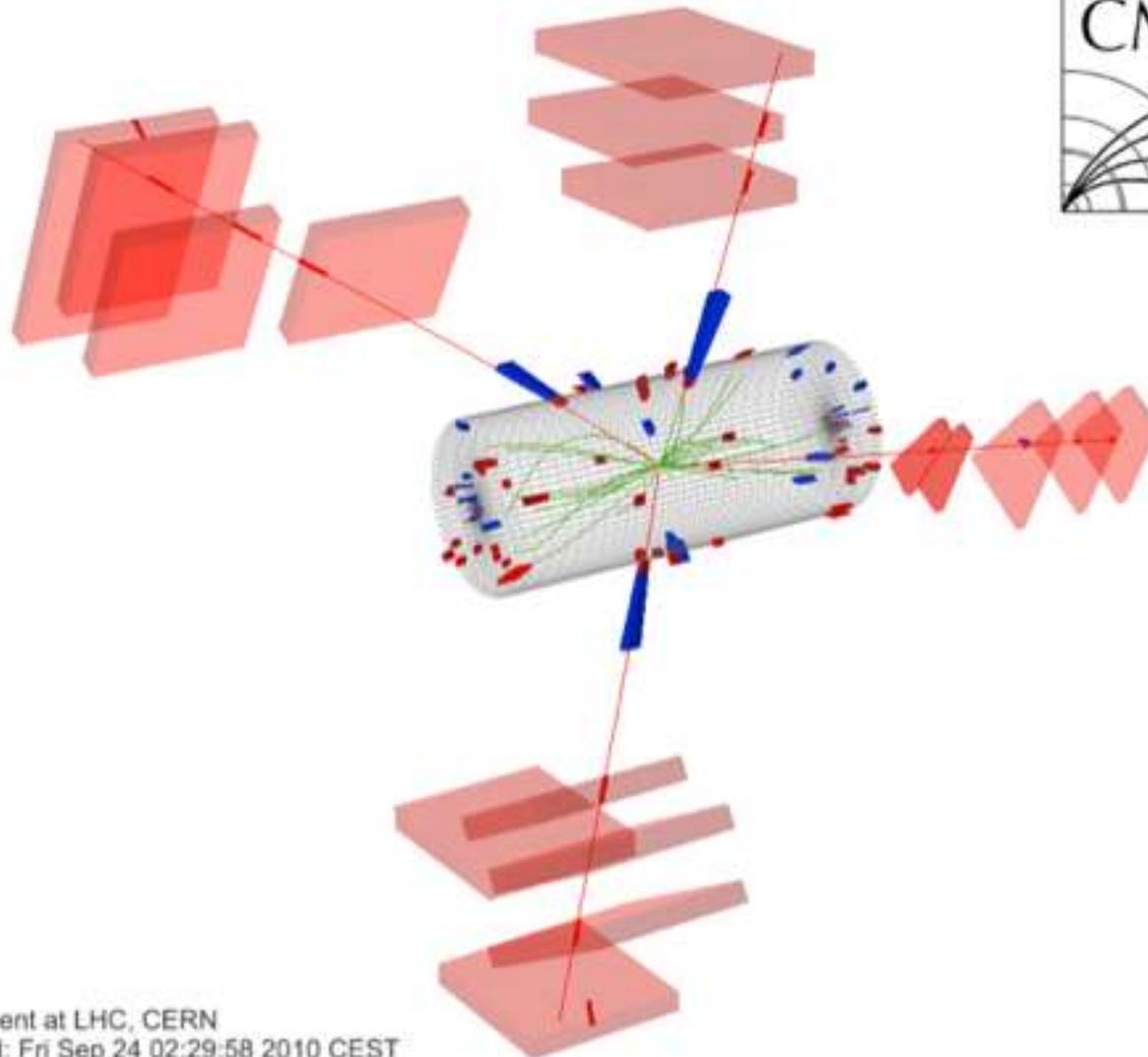


**Problema:** Non solo non abbiamo idea da cosa sia il composto il 95% dell'Universo ma non sappiamo come il 4% di adroni si sia formato, ovvero come si è passati da particelle “colorate” (quark, gluoni) ad adroni non colorati

- La teoria delle interazioni forti prevede che la transizione plasma di quark e gluoni a materia ordinaria avvenga in condizioni in cui la densità di energia è circa 10 volte quella della materia nucleare ordinaria

# CONCLUSIONI

- Alcune domande chiave sulla Natura:
  - Quali sono i costituenti elementari di cui è fatto l'Universo?
  - Quali sono le forze fondamentali con cui interagiscono?
  - Perché c'è più materia che antimateria?
- La fisica delle particelle (esperimenti+teoria) hanno dato risposte ma anche sollevato nuove domande
  - Come le particelle acquisiscono massa?
  - Quali sono i candidati per materia oscura ed energia oscura?
  - Come si sono formati gli adroni?
- Gli esperimenti chiave si stanno facendo in questo momento (e per i prossimi 10 anni...)



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Fri Sep 24 02:29:58 2010 CEST  
Run/Event: 146511 / 504867308

# EXTRA-SLIDES

## Credits:

*N.CARTIGLIA, .E.CHIAVASSA, P.GAMBINO, C.MARIOTTI, M.MASERA,  
E.MENICHETTI, E.VERCELLIN*