

# Introduzione al Modello Standard

Gino Isidori [ *INFN-Frascati* ]

- ▶ Introduzione
- ▶ Modelli matematici e costanti fisiche
- ▶ La teoria della relatività
- ▶ Pillole di meccanica quantistica
- ▶ La teoria quantistica dei campi
- ▶ Il Modello Standard
- ▶ Il bosone di Higgs
- ▶ Problemi aperti e nuove idee

# Introduzione al Modello Standard

Gino Isidori [ *INFN-Frascati* ]

- ▶ Introduzione
- ▶ Modelli matematici e costanti fisiche
- ▶ La teoria della relatività
- ▶ Pillole di meccanica quantistica
- ▶ La teoria quantistica dei campi
- ▶ Il Modello Standard
- ▶ Il bosone di Higgs
- ▶ Problemi aperti e nuove idee

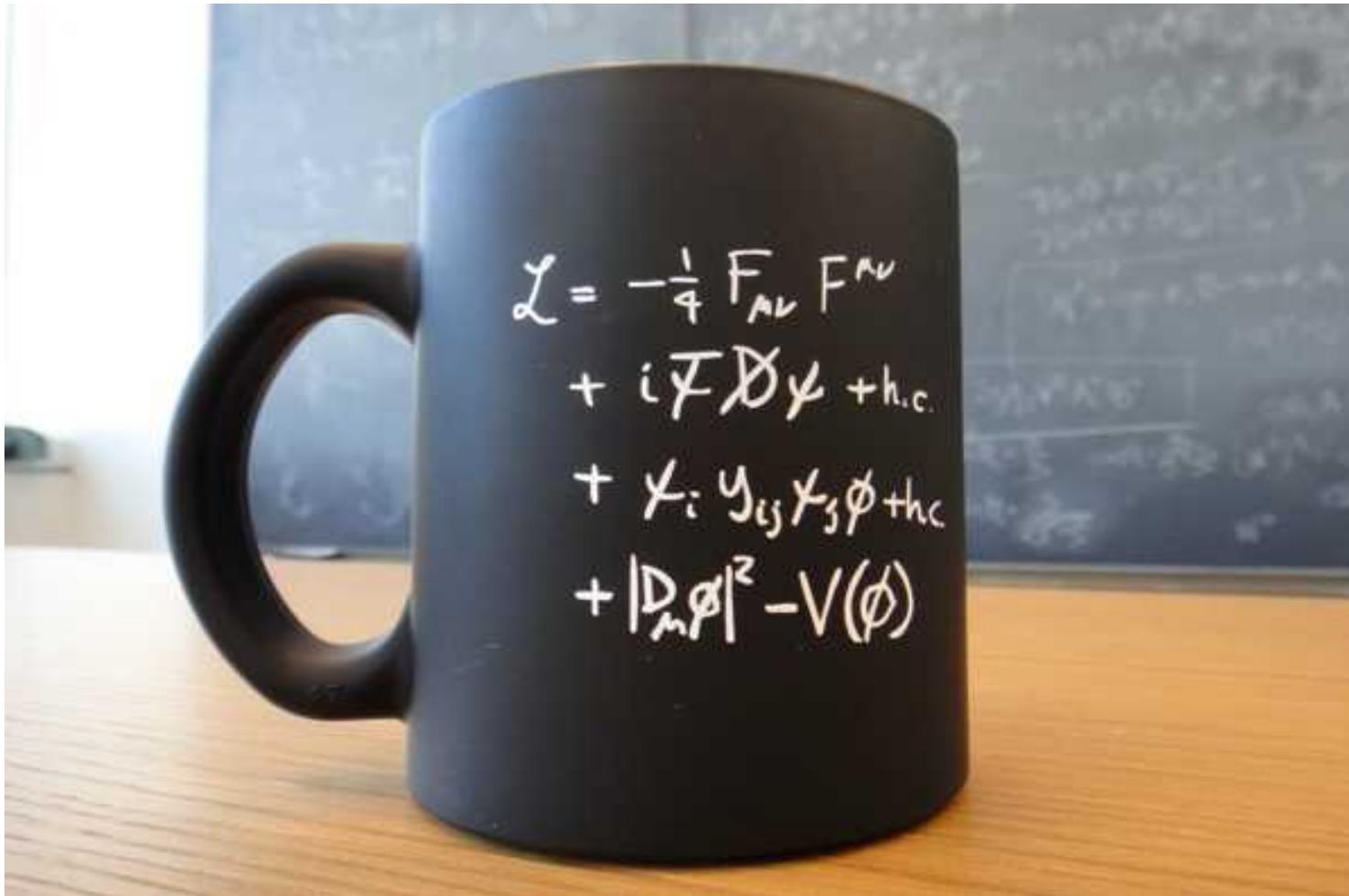
## ► Campi e Particelle

Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi* (*un po' come le onde sono le eccitazioni della superficie del mare*)

<u>fotone</u>	↔	campo elettromagnetico
<u>elettrone</u>	↔	campo dell'elettrone
⋮		⋮

- La teoria quantistica dei campi è lo strumento matematico che ci permette di descrivere come i campi (*ovvero come i costituenti elementari della materia*) interagiscono fra loro: non è altro che un'applicazione dei principi probabilistici della meccanica quantistica ai campi invece che alle particelle.
- In principio esistono molte teorie quantistiche di campo, che differiscono per la forma dell'azione [ovvero per il modo in cui i campi interagiscono fra loro] e per la natura dei campi: il famoso Modello Standard è una di queste.

## VI. Il Modello Standard



## VI. Il Modello Standard

*In gergo tecnico, si tratta di:*

- Una teoria di campo quantistica e relativistica, basata su
  - 2 Simmetrie fondamentali: simmetria di colore (interazioni forti) e simmetria elettrodebole (interazioni deboli ed elettromagnetiche)
  - 3 Costituenti fondamentali: le 3 famiglie di quarks e leptoni

*Un gioco a squadre  
con la palla...*

*...la palla si puo  
toccare solo con i  
piedi...*

*...11 giocatori per  
squadra*

## ► Il Modello Standard

Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- **Campi di materia** (elettrone,...) (spin=1/2)
- **Mediatori delle forze** (fotone,...) (spin=1)



*Proprietà di trasformazione del campo sotto trasformazioni di coordinate nello spazio-tempo*

## ► Il Modello Standard

Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- **Campi di materia** (elettrone,...) (spin=1/2)
- **Mediatori delle forze** (fotone,...) (spin=1)

Cui recentemente se ne è aggiunta una terza:

- **Campi scalari** (bosone di Higgs) (spin=0)



*Proprietà di trasformazione del campo sotto trasformazioni di coordinate nello spazio-tempo*

*Il bosone di Higgs è l'unica eccitazione di un “campo scalare fondamentale” osservata fino ad ora*

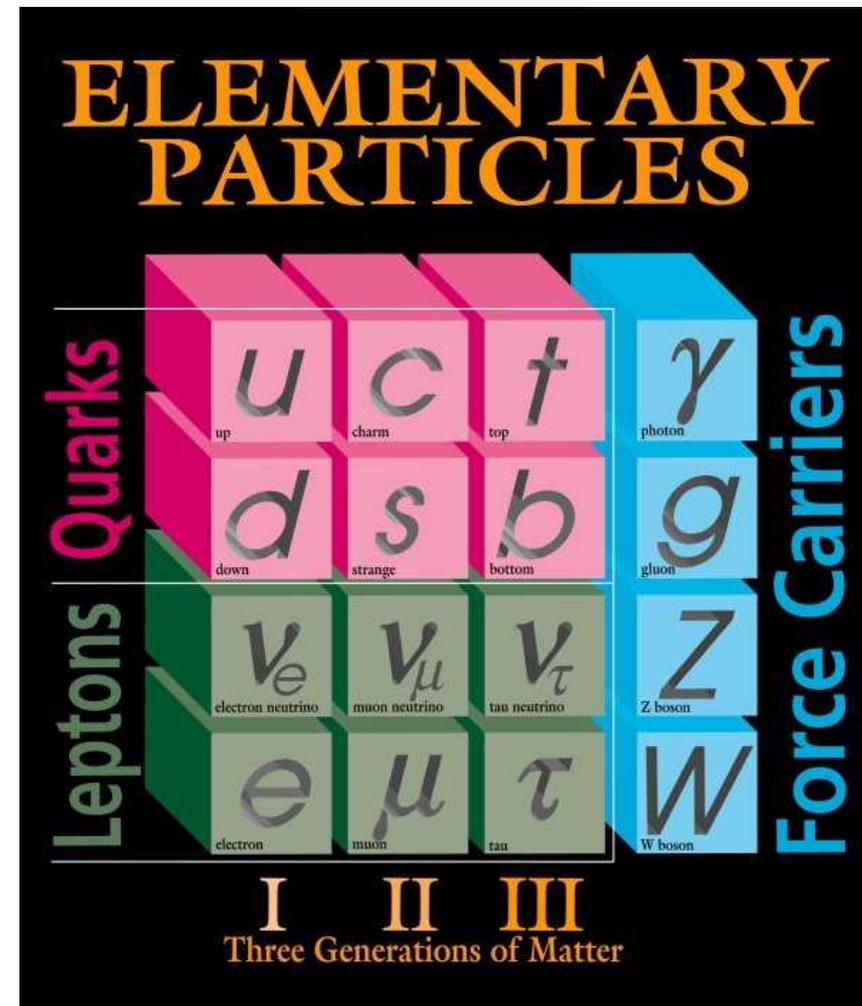
## ► Il Modello Standard

Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- ➔ **Campi di materia** (elettrone,...)
- ➔ **Mediatori delle forze** (fotone,...)

I campi di materia sono organizzati in tre famiglie (la cui struttura interna è determinata da principi di simmetria)



## ► Il Modello Standard

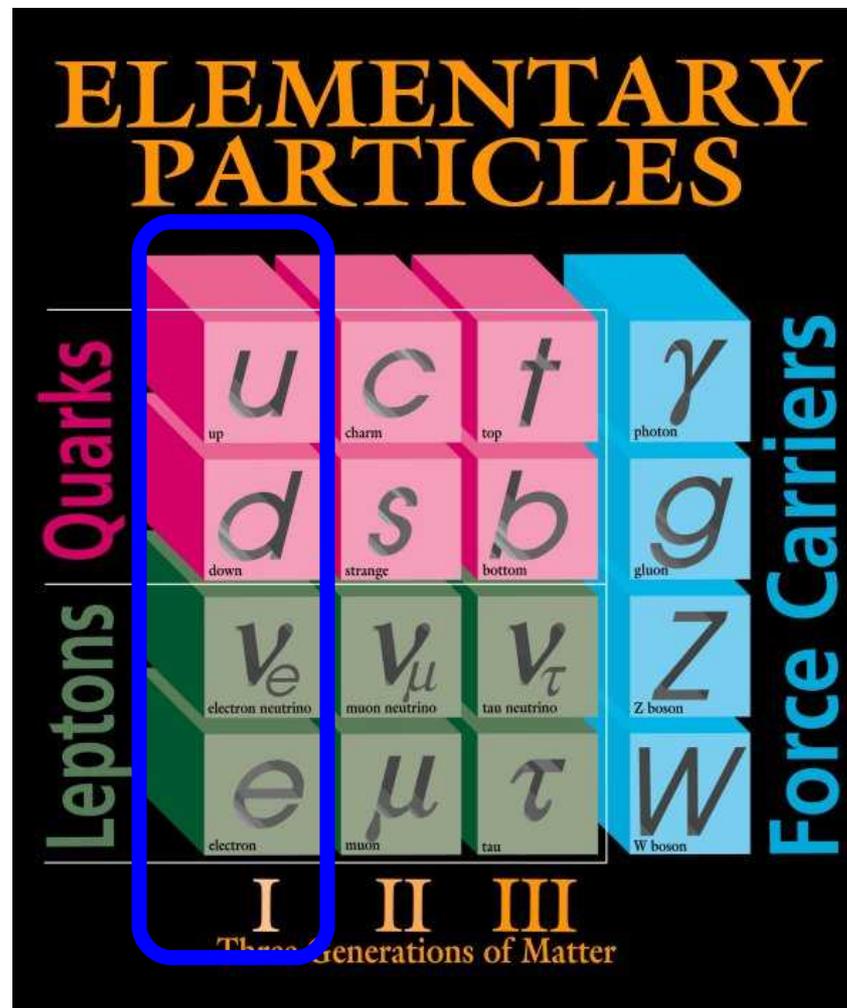
Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- ➔ **Campi di materia** (elettrone,...)
- ➔ **Mediatori delle forze** (fotone,...)

I campi di materia sono organizzati in tre famiglie (la cui struttura interna è determinata da principi di simmetria)

- ➔ La **I famiglia** è composta dai **quarks up** e **down** (i costituenti di protoni e neutroni), **l'elettrone** ed il **neutrino elettronico**:  
tutta la materia che ci circonda è costituita da particelle (campi) di questo tipo



## ► Il Modello Standard

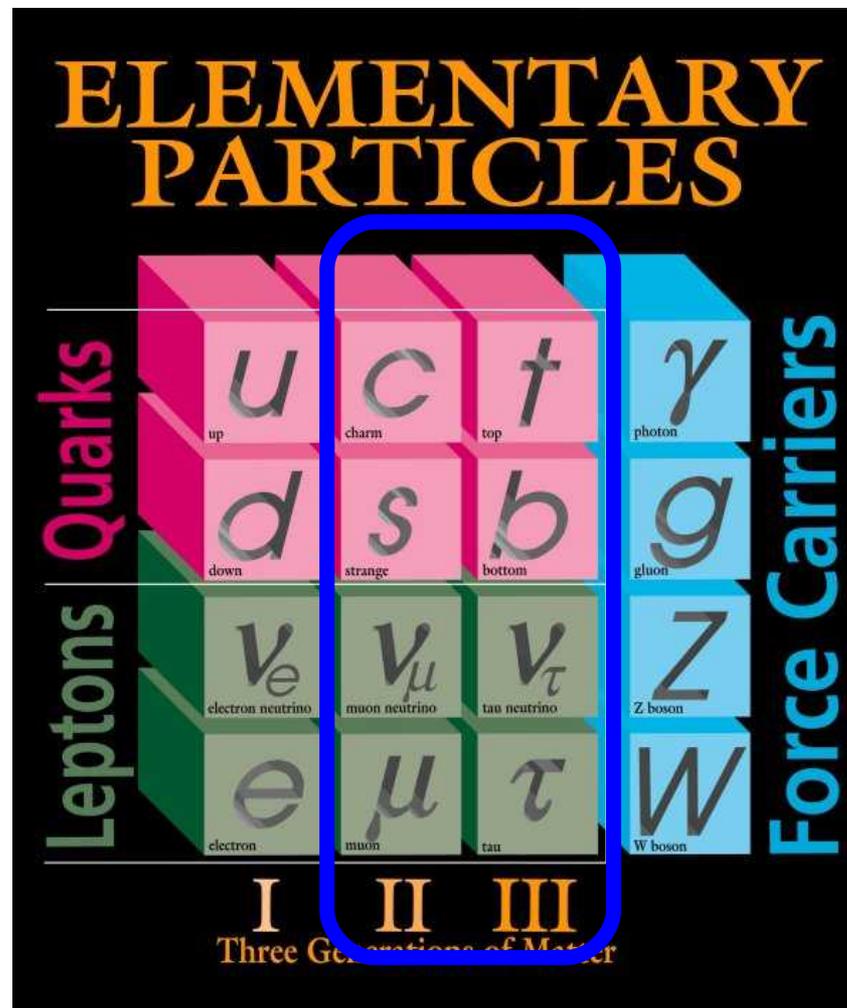
Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- ➔ **Campi di materia** (elettrone,...)
- ➔ **Mediatori delle forze** (fotone,...)

I campi di materia sono organizzati in tre famiglie (la cui struttura interna è determinata da principi di simmetria)

- ➔ La **I famiglia** è composta dai **quarks up e down**, **l'elettrone** ed il **neutrino elettronico**.
- ➔ La **II e III famiglia** sono copie identiche della prima, eccetto che per masse differenti per le varie particelle (eccitazioni)



## ► Il Modello Standard

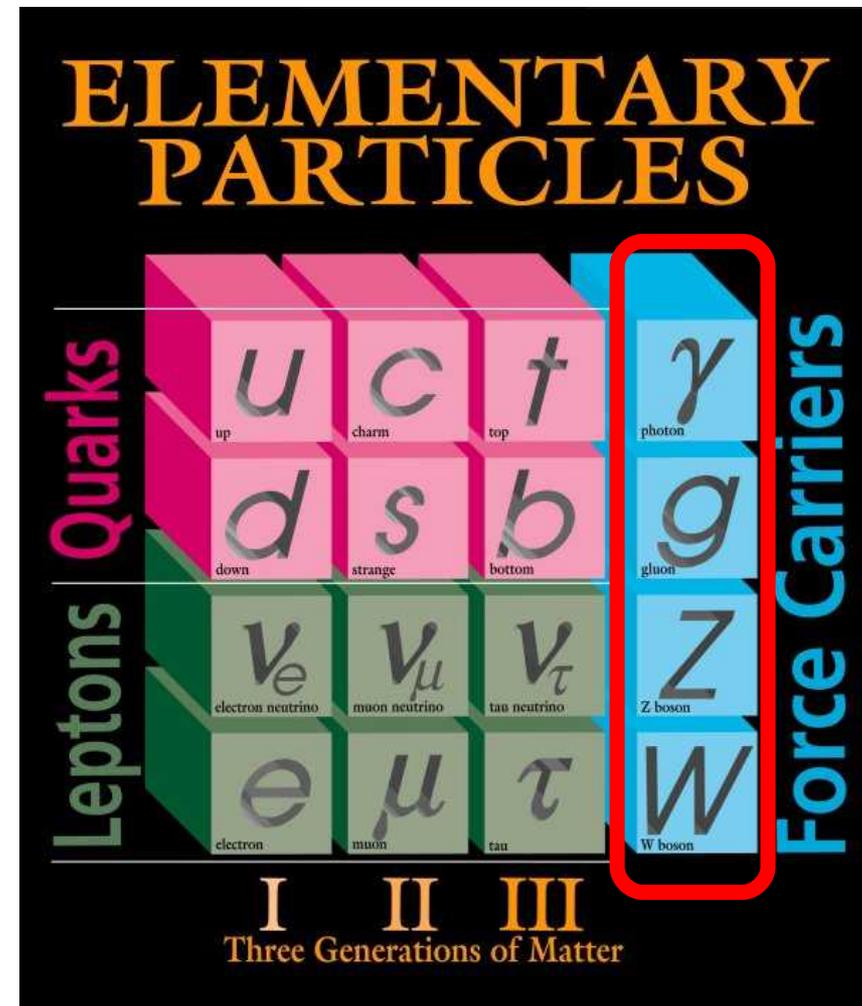
Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali e il modo in cui questi interagiscono fra loro.

Due grandi categorie:

- **Campi di materia** (elettrone,...)
- **Mediatori delle forze** (fotone,...)

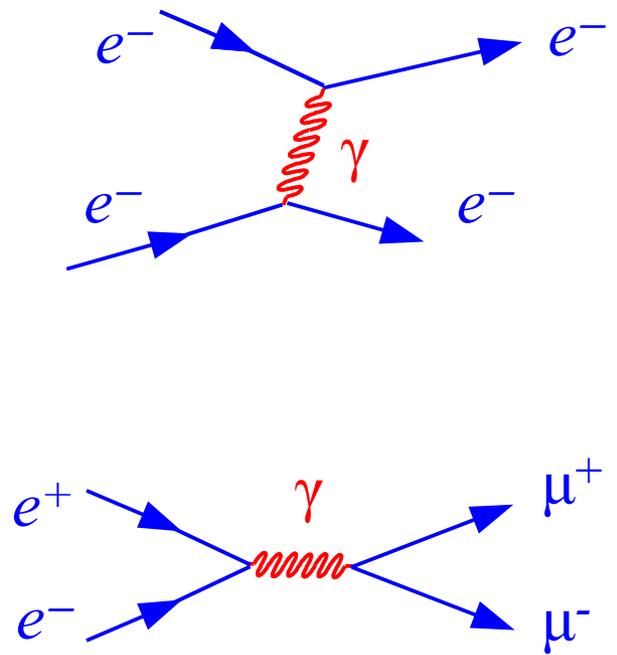
Il numero e le proprietà dei mediatori sono completamente specificate da due principi di simmetria

- **la simmetria di colore**  
(interazioni nucleari forti)
- **la simmetria elettro-debole**  
(interazioni nucleari deboli ed elettromagnetiche)

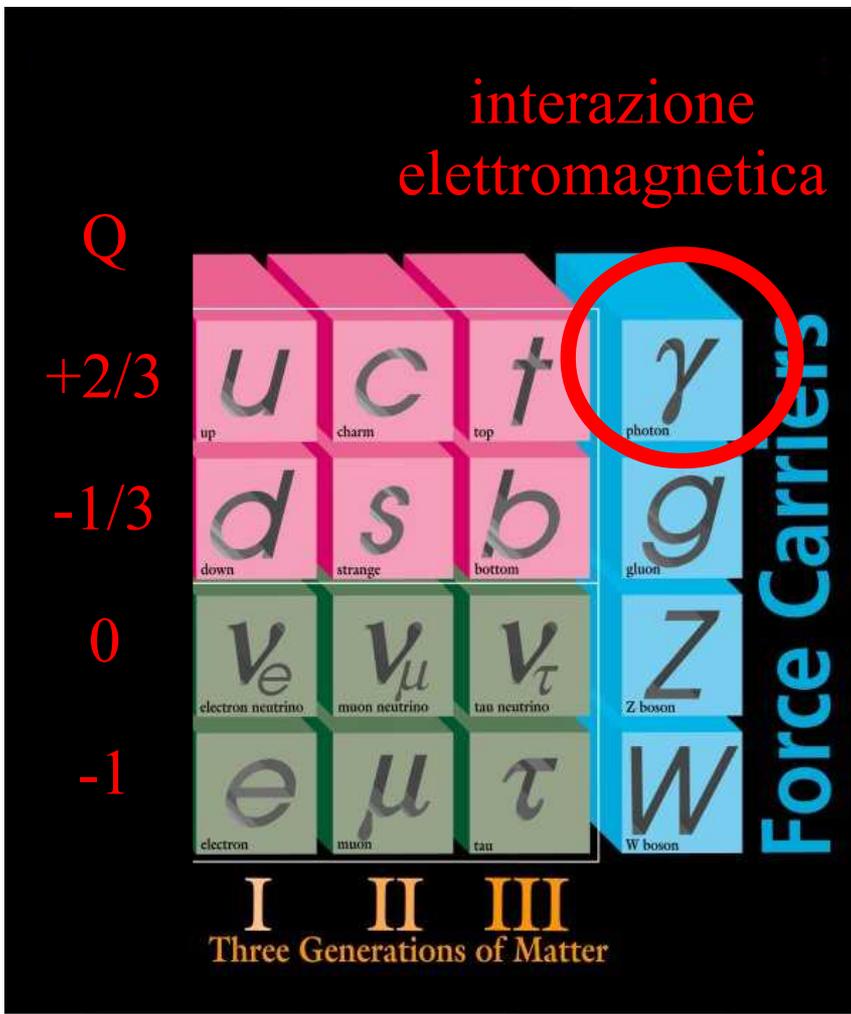


# ► Il Modello Standard

Una delle conseguenze principali della simmetria elettrodebole è la conservazione della carica elettrica nelle interazioni elettromagnetiche:



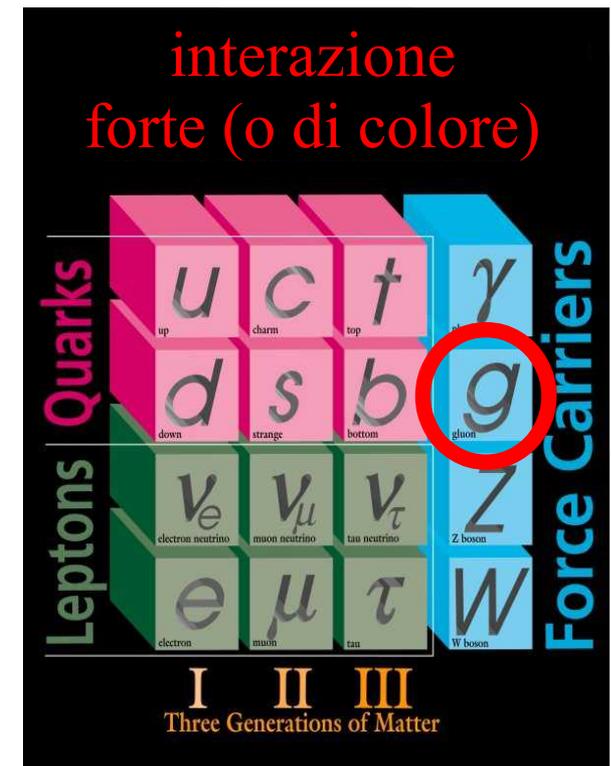
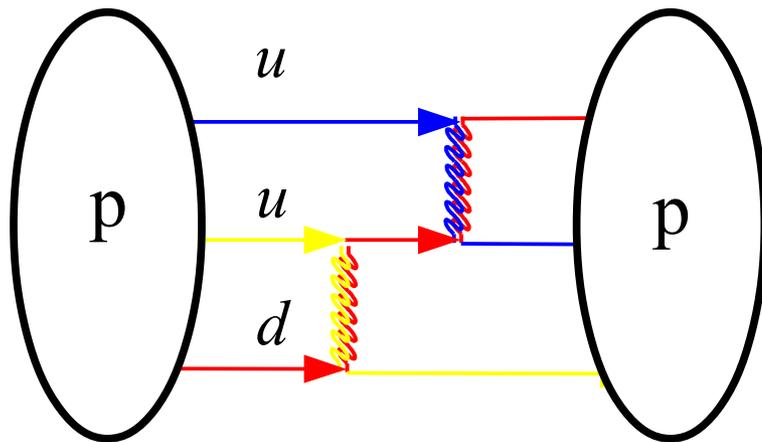
**N.B.:** l'interazione fra i campi è sempre *locale* ( $\Leftrightarrow$  principio di causalità)



## ► Il Modello Standard

La simmetria di colore è responsabile del forte legame (confinamento) dei quark all'interno di protoni e neutroni (i costituenti del nucleo atomico):

Ciascun quark ha una carica di colore, che può assumere 3 valori (R,G,B), e che scambia continuamente con gli altri quark tramite gli 8 mediatori (gluoni): gli unici stati “macroscopicamente stabili” sono quelli neutri (“bianchi”) dal punto di vista di questa interazione.

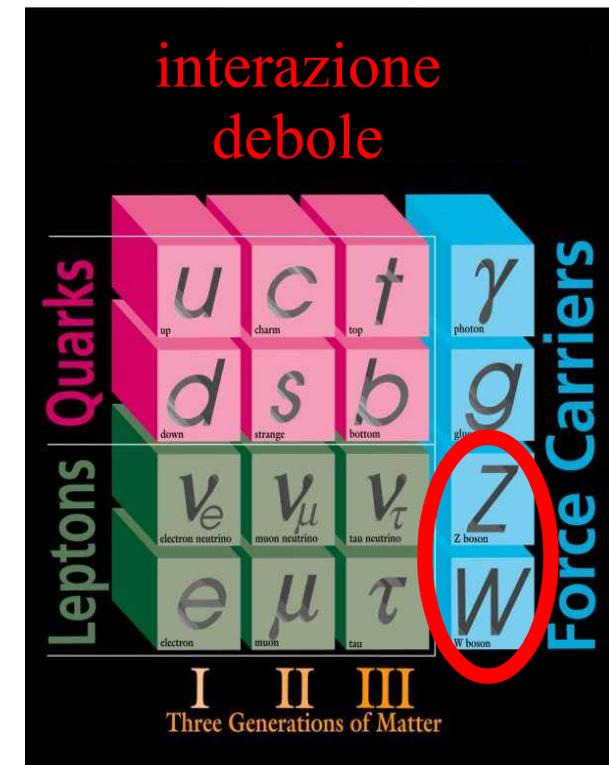


## ► Il Modello Standard

L'interazione debole è responsabile dei decadimenti nucleari, ma anche dei processi di fusione che avvengono all'interno delle stelle.

E' l'unica interazione che

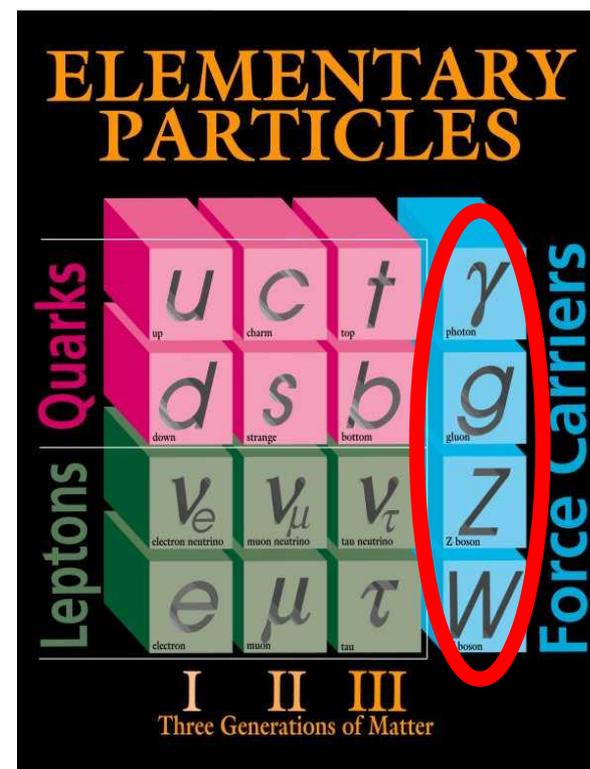
- sentono anche i neutrini
- connette fra loro le diverse “famiglie” di quarks e leptoni
- i cui mediatori (i bosoni W e Z) hanno una massa non-nulla (*motivo della debolezza dell'interazione a basse energie*)



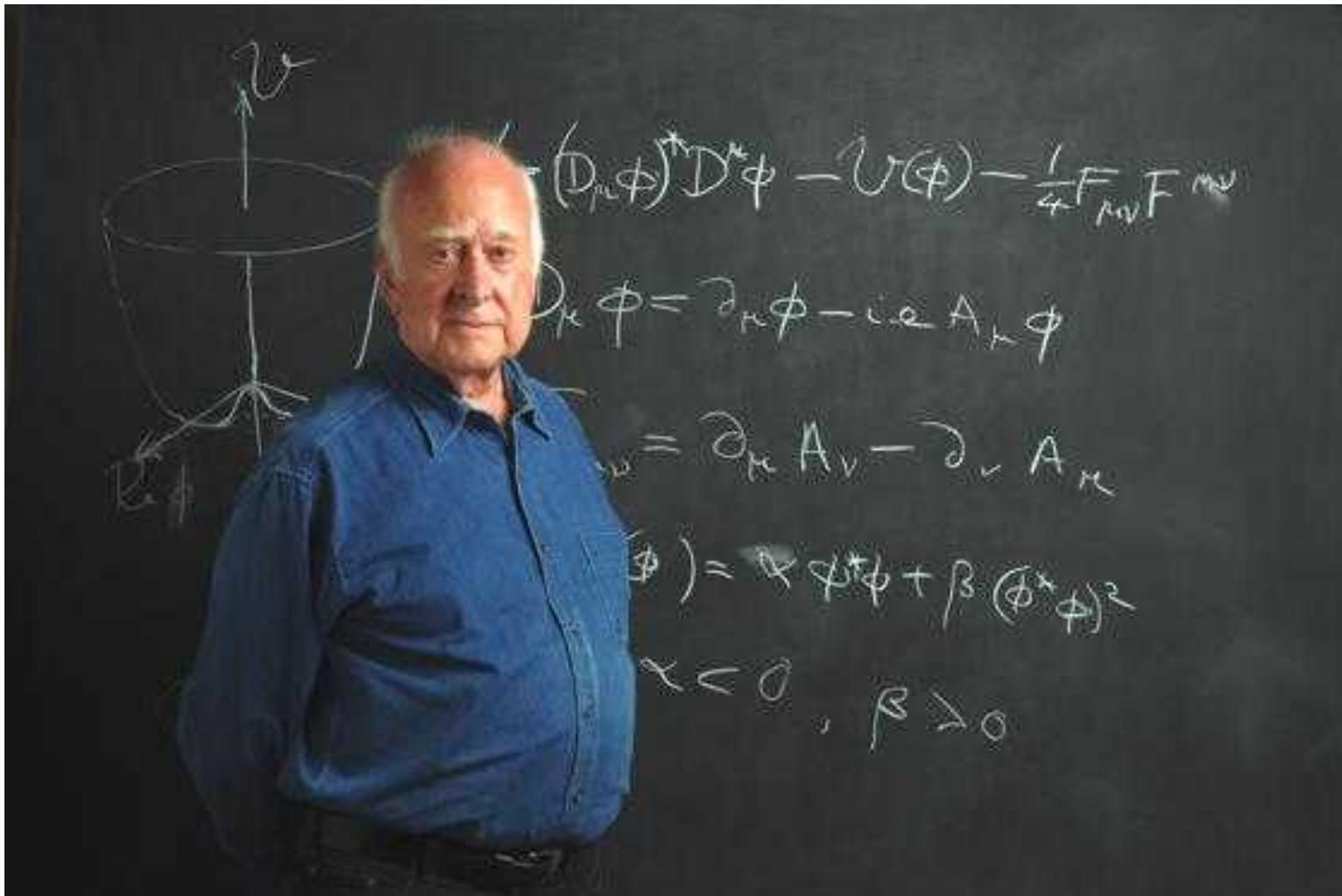
## ► Il Modello Standard

**N.B.:** le intensità effettive delle tre interazioni sono molto differenti fra loro a basse energie, ma diventano molto simili ad energie in cui possiamo trascurare tutte le masse:

	$E \sim 1 \text{ GeV}$	$E \sim 100 \text{ GeV}$
$\sigma_{\text{strong}}$	$\sim 3$	$\sim 1.2$
$\sigma_{\text{weak}}$	$\sim 0.01$	$\sim 0.4$
$\sigma_{\text{e.m.}}$	$\sim 0.2$	$\sim 0.3$



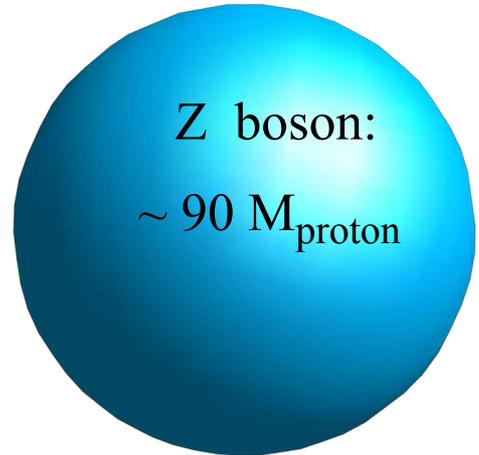
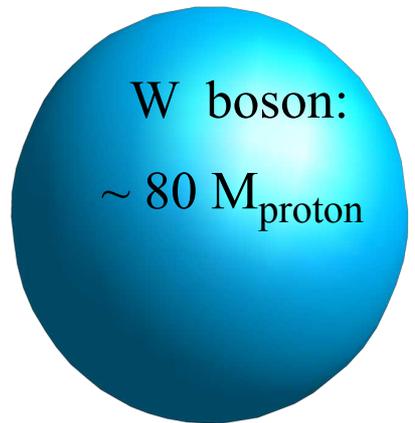
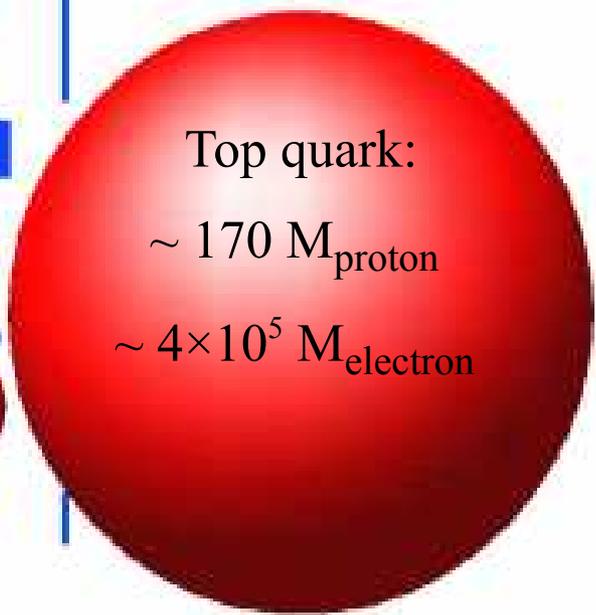
## VII. Il bosone di Higgs



# ► Il bosone di Higgs

La simmetria elettrodebole implica che nessuno dei costituenti elementari del modello può avere massa, a differenza di ciò che ci dicono gli esperimenti:

LEPTONS		
Electron Neutrino Mass = 0	Muon Neutrino = 0	Tau Neutrino = 0
Electron .511	Muon 105.7	Tau 1 777
QUARKS		
Up Mass: 5	Charm 1 500	Top ~180 000
Down 5	Strange 160	Bottom 4 250

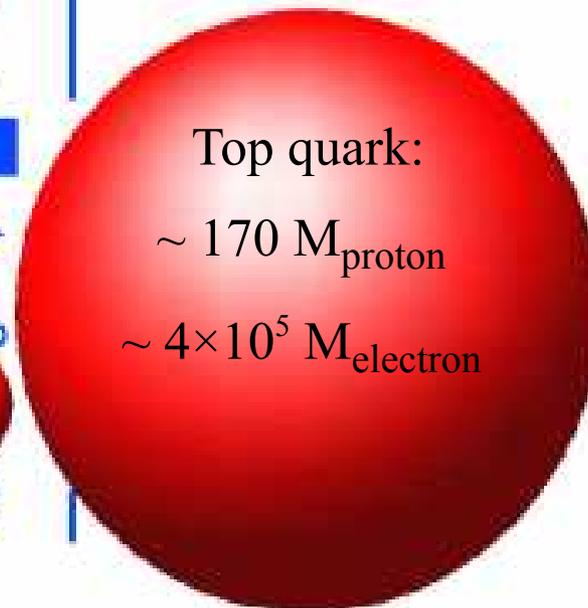


## ► Il bosone di Higgs

La simmetria elettrodebole implica che nessuno dei costituenti elementari del modello può avere massa, a differenza di ciò che ci dicono gli esperimenti:

I. Dobbiamo capire come generare delle masse per le particelle senza rompere le simmetrie del sistema

LEPTONS		
Electron Neutrino Mass = 0	Muon Neutrino = 0	Tau Neutrino = 0
Electron .511	Muon 105.7	Tau 1 777
QUARKS		
Up Mass: 5	Charm 1 500	Top ~180 000
Down 5	Strange 160	Bottom 4 250



II. Sarebbe anche interessante capire perché le 3 famiglie di quarks e leptoni hanno masse così differenti fra loro

*La differente massa è l'unica caratteristica che distingue le particelle delle 3 famiglie*

## ► Il bosone di Higgs

Nella versione “Standard” del modello, il problema delle masse è risolto introducendo un nuovo campo, il **campo di Higgs**, che si assume abbia un valore costante in tutto lo spazio.

In questo modo le (apparenti) masse delle particelle possono essere descritte come il risultato dell'interazione dei vari campi con il campo di Higgs.

Massa nulla = particella (eccitazione) che si muove sempre a velocità **c**

Massa non nulla = particella (eccitazione) che può essere **accelerata**  
e **decelerata** (e che non può mai raggiungere la velocità c)

## ► Il bosone di Higgs

Nella versione “Standard” del modello, il problema delle masse è risolto introducendo un nuovo campo, il **campo di Higgs**, che si assume abbia un valore costante in tutto lo spazio.

In questo modo le (apparenti) masse delle particelle possono essere descritte come il risultato dell'interazione dei vari campi con il campo di Higgs.

Massa nulla = particella (eccitazione) che si muove sempre a velocità **c**

Massa non nulla = particella (eccitazione) che può essere **accelerata**  
e **decelerata**

*Il meccanismo con cui sono descritte le masse nel Modello Standard è simile all'effetto “frenante” nell'attraversamento di un fluido non ideale*



## ► Il bosone di Higgs

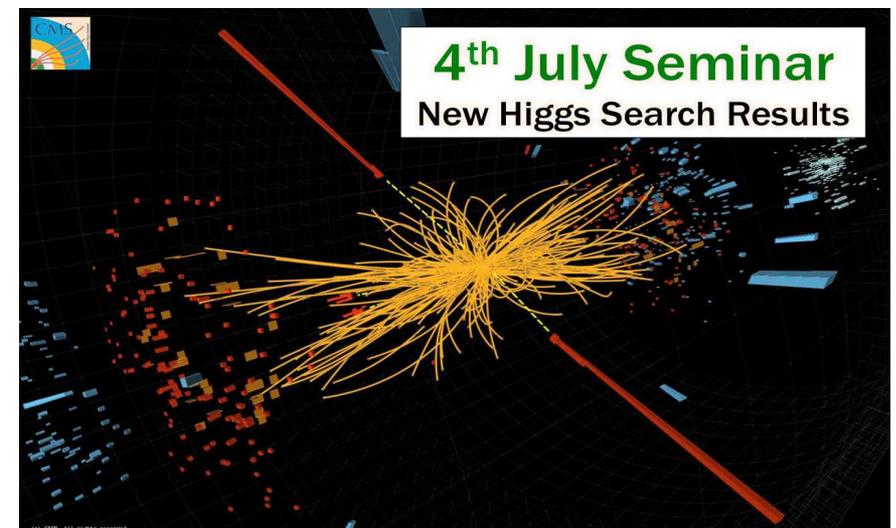
La massa delle varie particelle del Modello Standard è un effetto dell'interazione con il campo di Higgs (*un po' come la diversa velocità delle barche dipende da quanto “pescano” nel mare*)

Il campo di Higgs è sostanzialmente una nuova interazione, ma a differenza delle quattro forze “standard”, non è basato su un principio di simmetria: per questo motivo non siamo in grado di predire alcuna delle masse di quarks e leptoni (*ciascuna e' determinata da una diversa costante di accoppiamento con il campo di Higgs*) e per questo sospettiamo anche che questa interazione non sia un'interazione fondamentale.

## ► Il bosone di Higgs

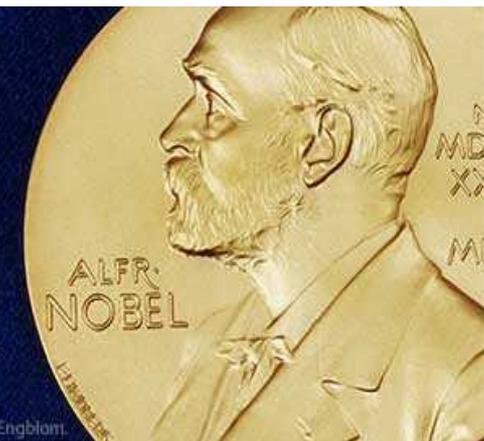
La massa delle varie particelle del Modello Standard è un effetto dell'interazione con il campo di Higgs (un po' come la diversa velocità delle barche dipende da quanto “pescano” nel mare)

Per molti anni sono state proposte varie teorie alternative, ma il 4 Luglio 2012 gli esperimenti del CERN hanno finalmente dimostrato l'esistenza di una particella compatibile con le proprietà del **bosone di Higgs**, ovvero con l'eccitazione di questo campo.

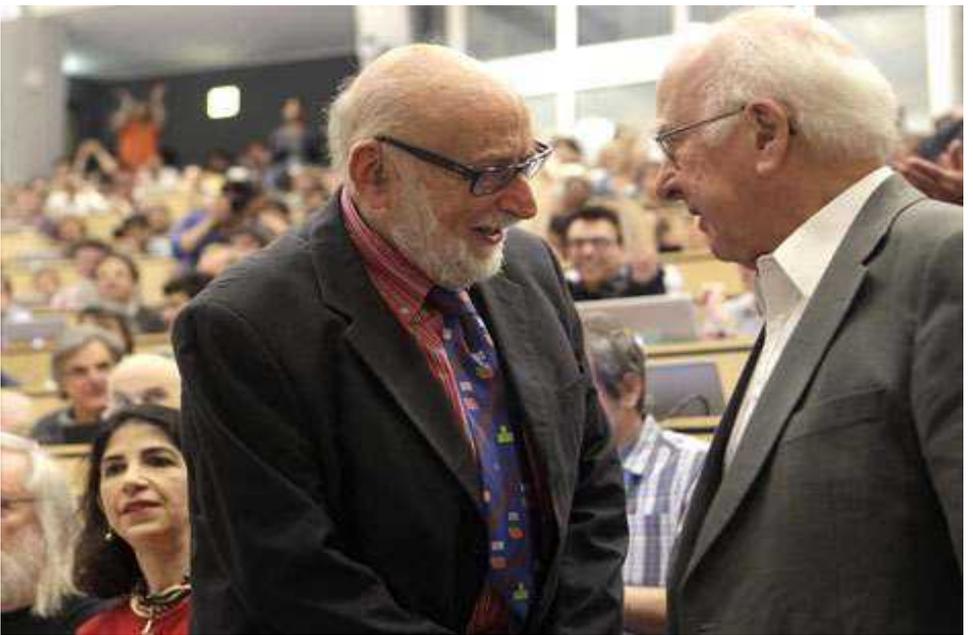


2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



► Il 4 Luglio 2012 al CERN...



## VIII. Problemi aperti e nuove idee



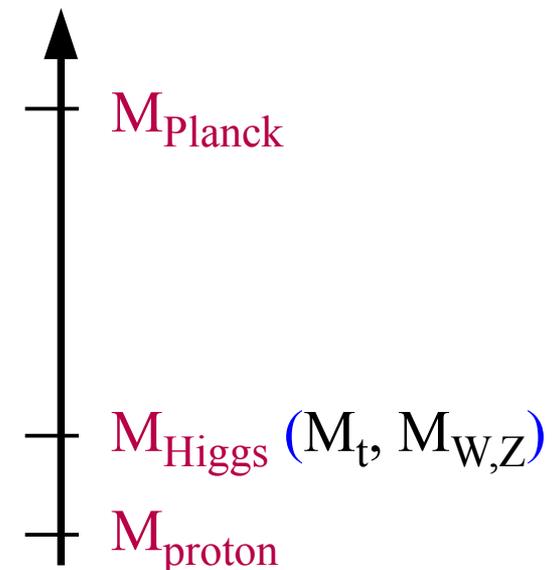
## ► Il problema delle masse

La scoperta del bosone di Higgs è senz'altro un trionfo del Modello Standard. Tuttavia, varie questioni risultano ancora aperte:

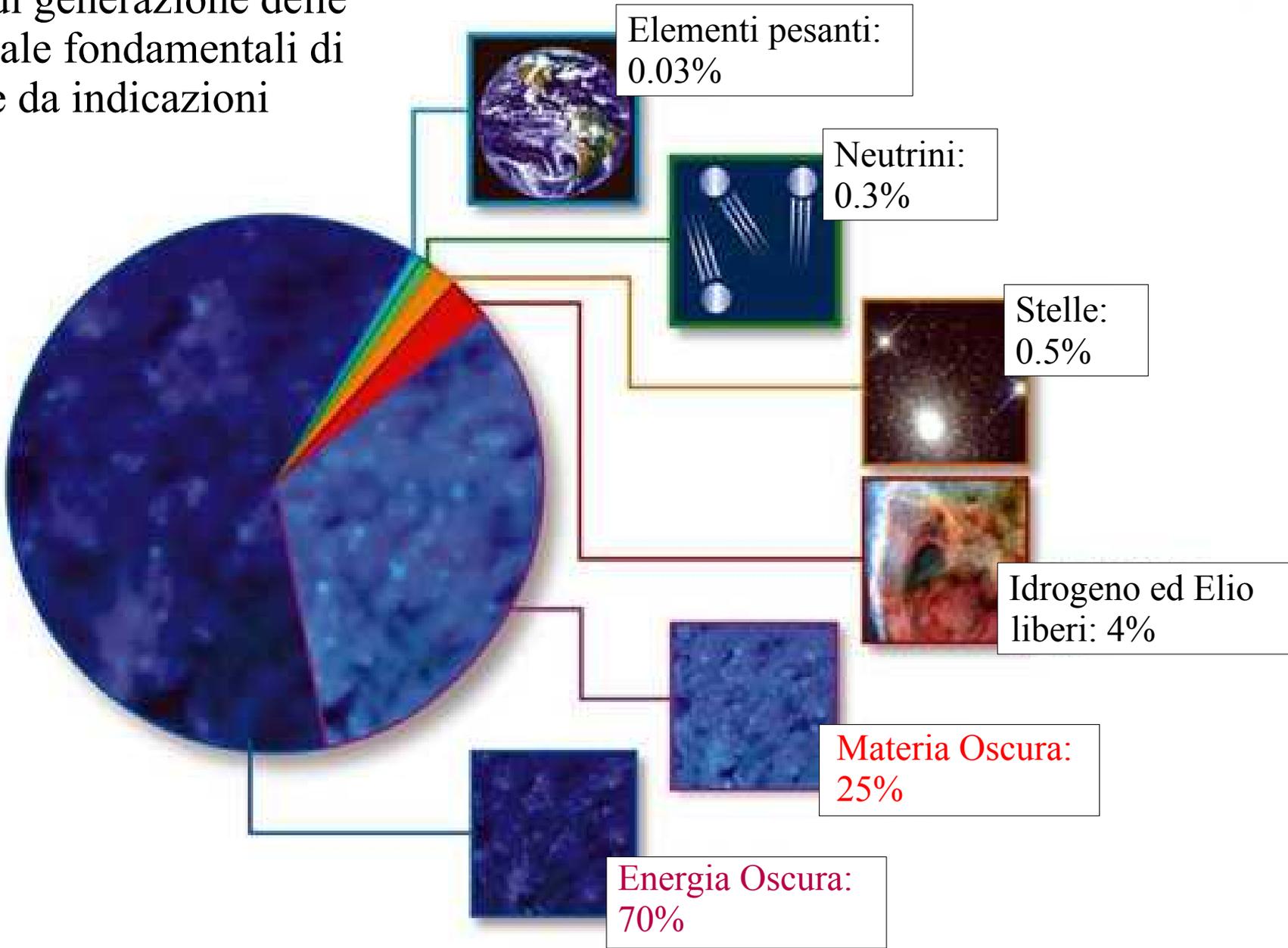
La massa del bosone di Higgs (non predetta nel MS), che risulta essere  $M_{\text{Higgs}} \sim 126 \text{ GeV}$ , è l'unica scala fondamentale di energia del modello.

E' una scala di energia molto alta rispetto alla massa del protone (*piu o meno come la massa di un nucleo di tellurio*), ma molto bassa rispetto a  $M_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$  (*la scala di energia universale associata alla forza di gravità*)

- Perché  $M_{\text{Higgs}} \ll M_{\text{Planck}}$ ?
- E' possibile estendere la validita' del modello fino ad energie  $\sim M_{\text{Planck}}$  ?
- Cosa determina i diversi accoppiamenti del bosone di Higgs alle varie particelle?
- ...



Una chiara indicazione che non abbiamo ancora compreso a fondo il meccanismo di generazione delle masse (e le scale fondamentali di energia) viene da indicazioni astrofisiche:



## ► Il problema delle masse

Uno studio più approfondito delle proprietà del bosone di Higgs potrebbe essere la chiave per trovare risposte alle questioni ancora aperte (o almeno alcune di esse).

Una prima risposta molto interessante si è avuta con la misura di precisione della massa del bosone di Higgs:

- E' possibile estendere la validità del modello fino ad energie  $\sim M_{\text{Planck}}$  ?

La risposta è “sì”

## ► Il problema delle masse

Uno studio più approfondito delle proprietà del bosone di Higgs potrebbe essere la chiave per trovare risposte alle questioni ancora aperte (o almeno alcune di esse).

Una prima risposta molto interessante si è avuta con la misura di precisione della massa del bosone di Higgs:

- E' possibile estendere la validità del modello fino ad energie  $\sim M_{\text{Planck}}$  ?

La risposta è “sì”... ma è un “sì” molto particolare:

La massa del bosone di Higgs determina l'ultimo “parametro libero” del Modello Standard e ci permette di capire come questo modello si comporta ad alte energie. Il valore misurato è estremamente particolare perchè *-se non intervengono nuovi fenomeni ad alte energie- il Modello Standard risulta essere INSTABILE:*

- Il campo di Higgs potrebbe passare in un'altra configurazione energeticamente più vantaggiosa (con conseguenze drammatiche per tutto l'Universo....).
- Ma il tempo caratteristico di questa transizione è estremamente lungo (molto più lungo del tempo sin ad ora trascorso dal big bang) a basse energie

## XI. Oltre il Modello Standard



## ► Oltre il Modello Standard

Due scuole di pensiero:

### Principio Antropico

(“Il caso e la necessità” [J. Monod])

### Nuove simmetrie

(Il libro della natura “è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche...” [G. Galilei])

## ► Oltre il Modello Standard

Due scuole di pensiero:

### Principio Antropico

Le idee base di questo approccio sono sostanzialmente due:

- 1) I parametri liberi del Modello Standard sono in realta' variabili (*legate a configurazioni di altri campi*) che cambiano continuamente dando luogo a molti universi differenti
- 2) I valori attualmente osservati di questi parametri sono tali perche' solo per tali valori e' possibile un "Universo antropico"

### Nuove simmetrie

La ricerca di principi di simmetria per semplificare la descrizione dei fenomeni naturali si e' rivelata la strata maestra della fisica moderna (*da Galileo in poi...*)

Procedendo lungo questa strada, e' ipotizzabile che i parametri liberi del Modello Standard, ed in particolare gli accoppiamenti del bosone di Higgs, siano "calcolabili" in termini di nuovi principi di simmetria (non ancora scoperti)

→ *nuove interazioni e nuove particelle*

## ► Oltre il Modello Standard

Due scuole di pensiero:

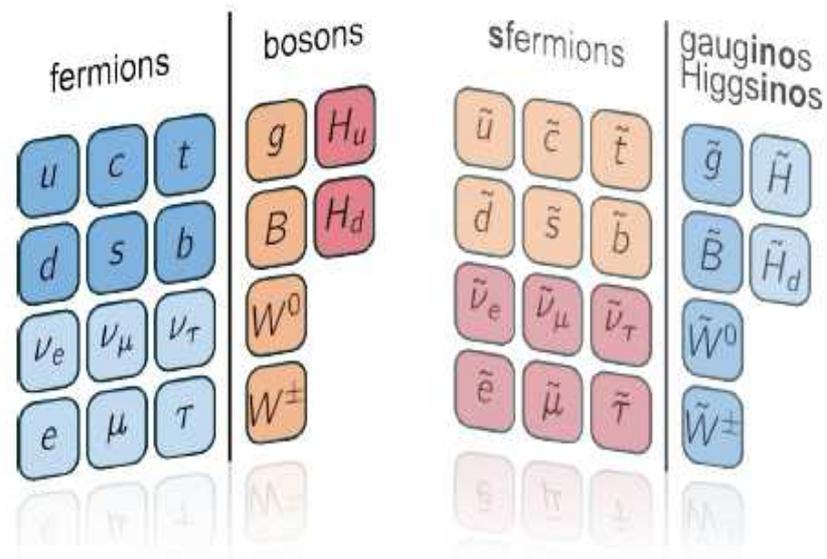
Principio Antropico

Nuove simmetrie

La supersimmetria e' forse la più interessate fra tutte le proposte di modifica del Modello Standard basata su nuove simmetrie

L'estensione “super-simmetrica” del Modello Standard prevede che

- Per ogni particella nota ve ne sia un'altra con stesse proprietà ma spin differente [es: **elettrone** ( $s=1/2$ )  $\leftrightarrow$  **s-elettrone** ( $s=0$ )]
- Queste nuove particelle dovrebbero avere massa dell'ordine del Tera-eV: se il modello fosse corretto, dovremmo poterle osservare al LHC nel prossimo run.



## ► Oltre il Modello Standard

Due scuole di pensiero:

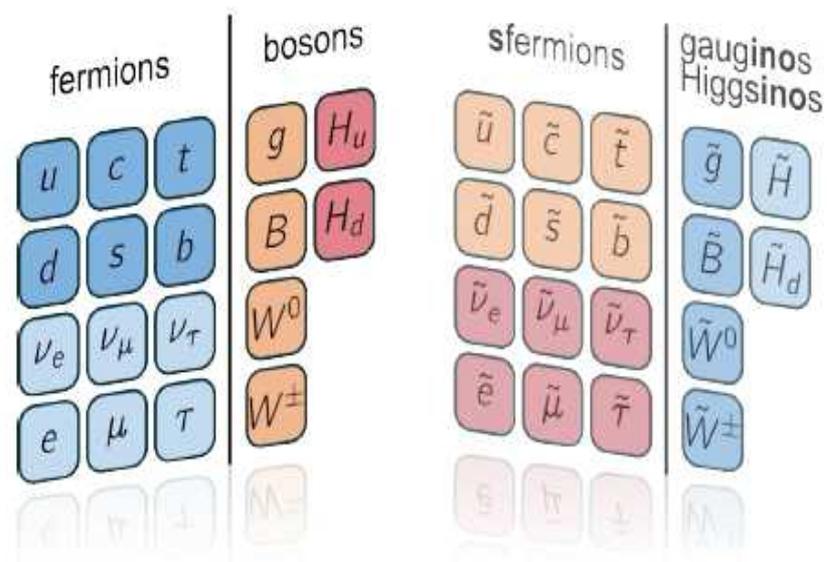
Principio Antropico

Nuove simmetrie

La supersimmetria e' forse la più interessate fra tutte le proposte di modifica del Modello Standard basata su nuove simmetrie

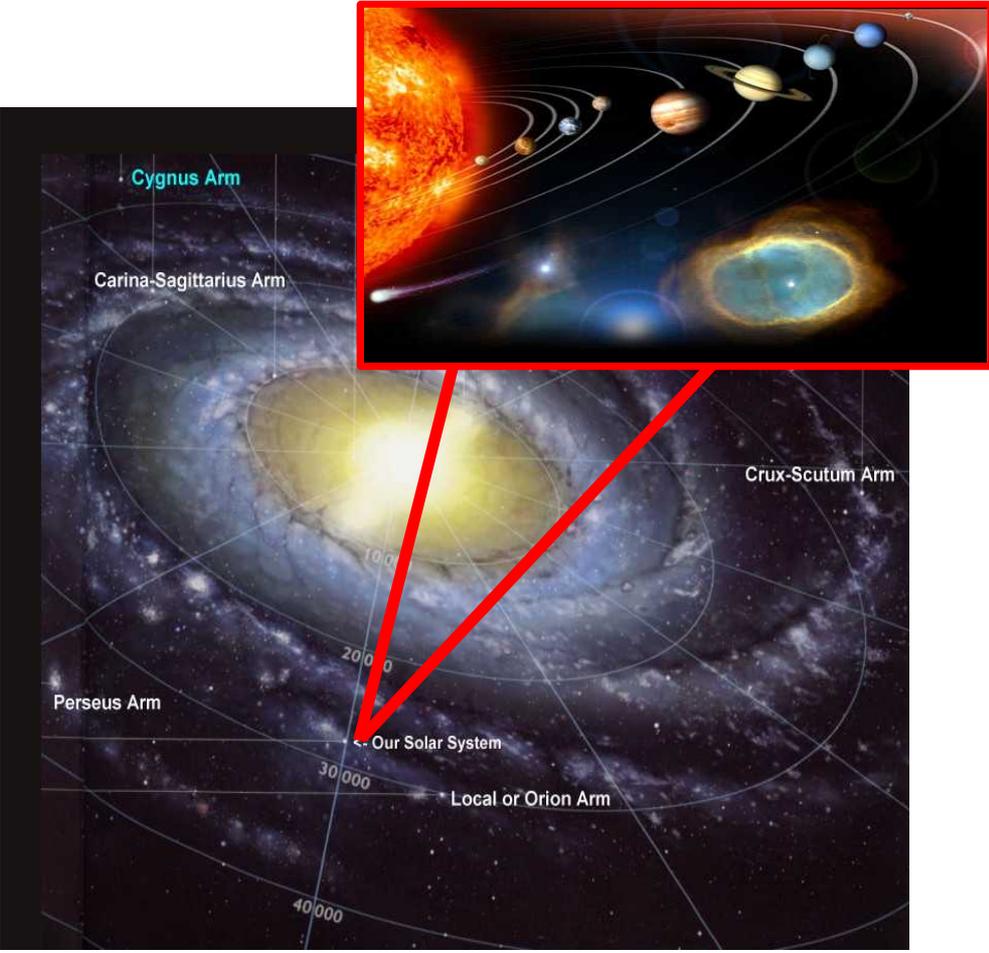
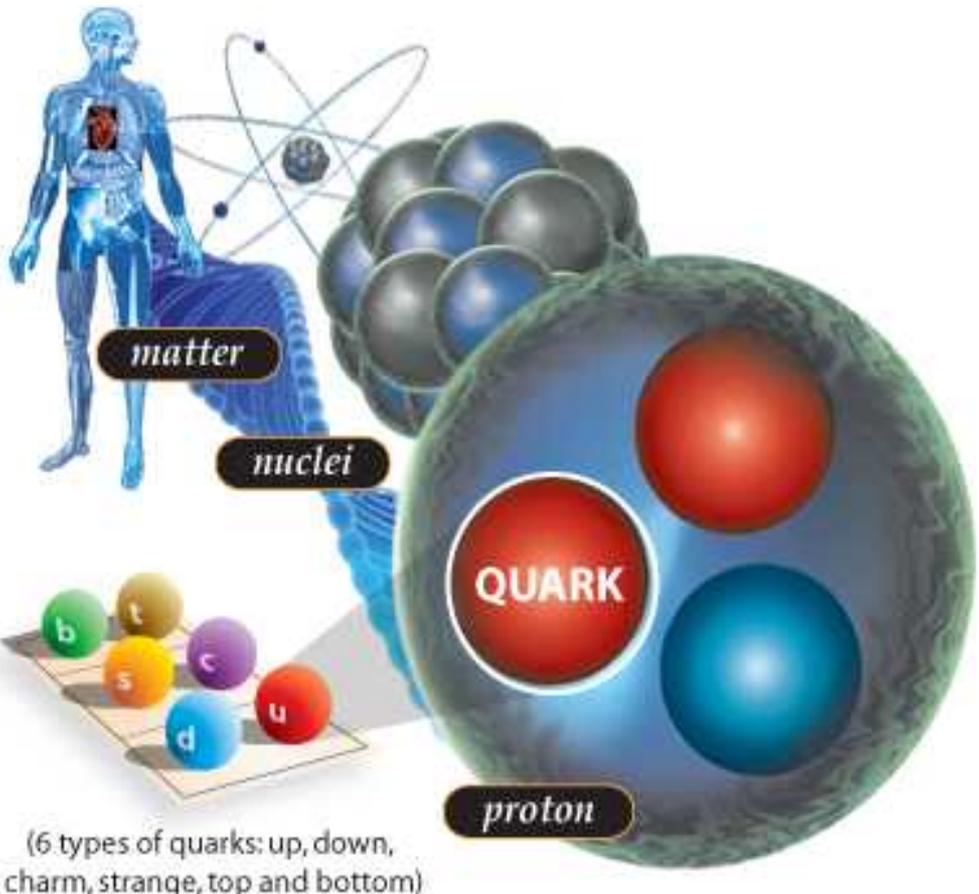
L'estensione “super-simmetrica” del Modello Standard prevede che

- Per ogni particella nota ve ne sia un'altra con stesse proprietà ma spin differente [es: **elettrone** ( $s=1/2$ )  $\leftrightarrow$  **s-elettrone** ( $s=0$ )]
- Queste nuove particelle dovrebbero avere massa dell'ordine del Tera-eV: se il modello fosse corretto, dovremmo poterle osservare al LHC nel prossimo run.

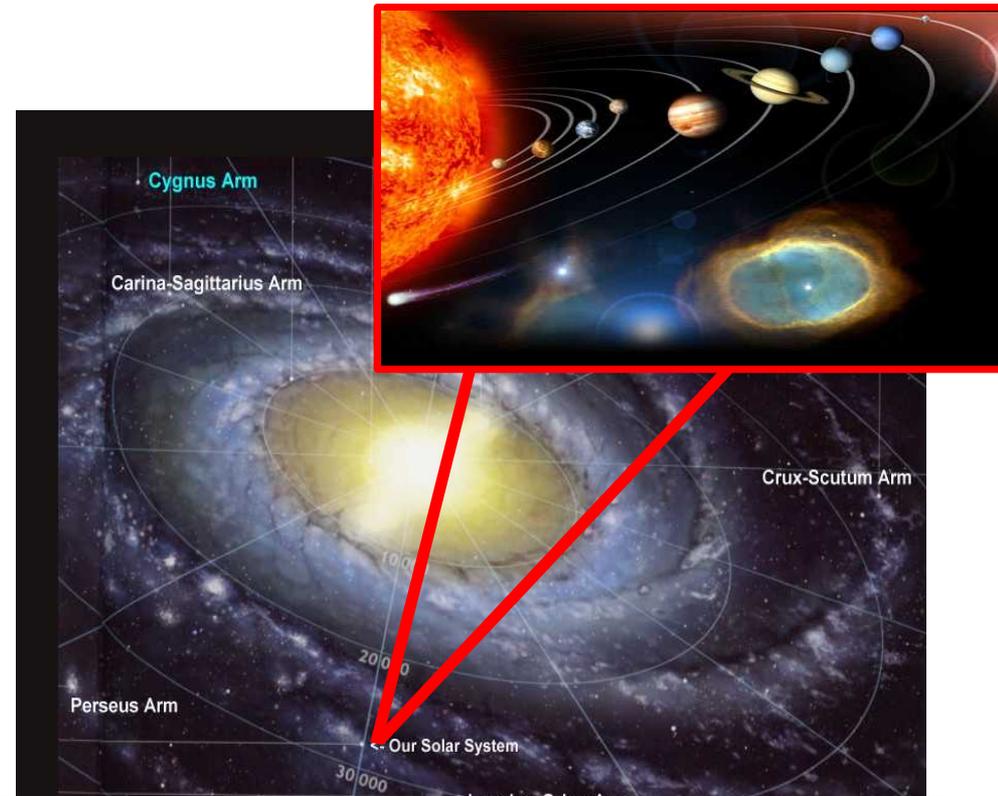
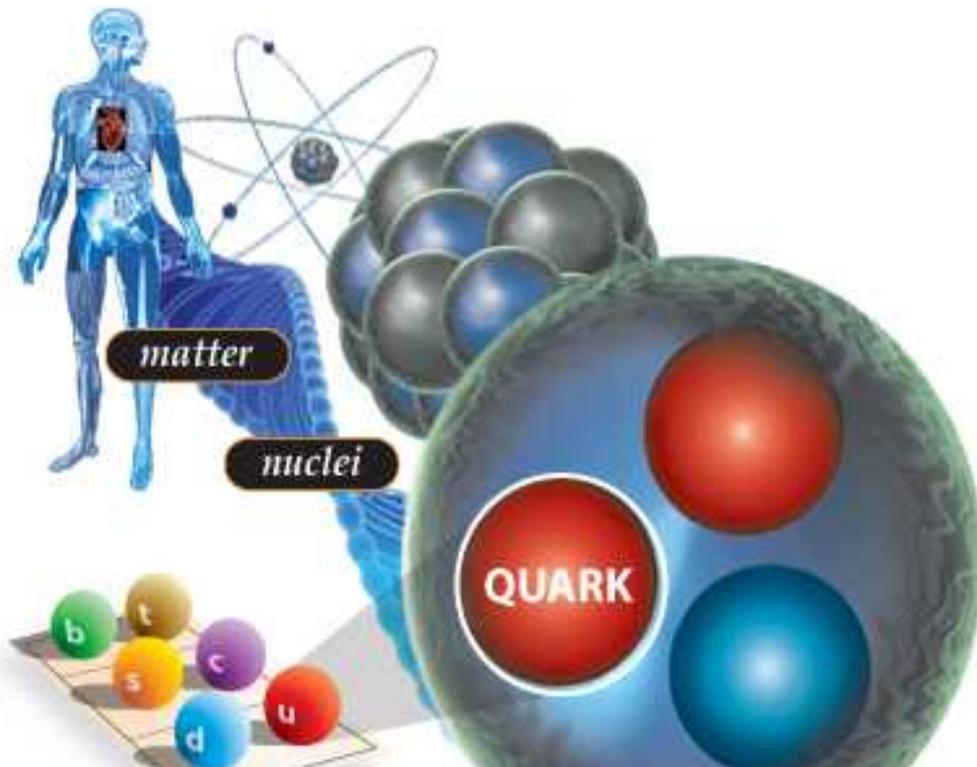


*...ma per ora tutto ciò è solo una speculazione teorica!*

# X. Conclusioni



## X. Conclusioni



Stiamo attraversando una frontiera nello studio delle interazioni fondamentali: non sappiamo cosa ci aspetta al di là della frontiera, ma è certo che c'è ancora molto da scoprire, e i prossimi anni potrebbero essere molto affascinanti...

## ► Bibliografia essenziale

### Le tre costanti fondamentali [inglese]:

- M.J. Duff, L.B. Okun and G. Veneziano, *Triologue on the number of fundamental constants*, <http://arxiv.org/abs/physics/0110060>
- L.B. Okun, *Fundamental units: Physics and metrology*, <http://arxiv.org/abs/physics/0310069>

### Il principio di minima azione:

- R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, *La Fisica di Feynman, Vol. 2* (Zanichelli)

### La meccanica quantistica:

- R. Feynman, R. Leighton, M. Sands, *La Fisica di Feynman, Vol. 3* (Zanichelli)

### Lettura generale sulla fisica teorica moderna [inglese]:

- C.N. Yang, *Thematic Melodies of Twentieth Century Theoretical Physics: Quantization, Symmetry and Phase Factor*, <http://www.worldscibooks.com/contact/cnyang.shtml>