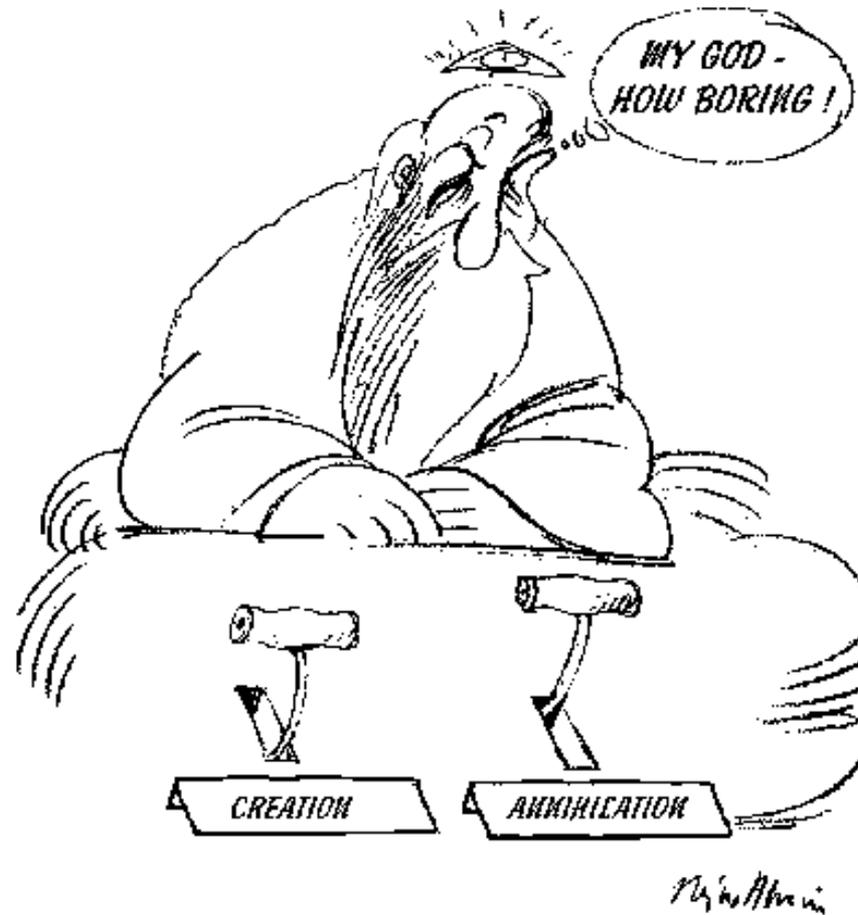


# Introduzione al Modello Standard

Gino Isidori [*INFN-Frascati & IAS-Munich*]

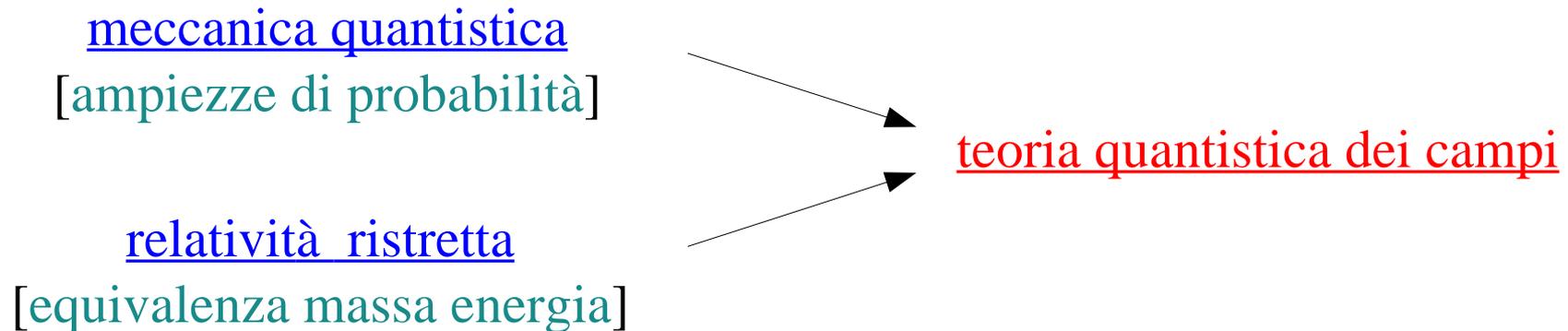
- ▶ Introduzione
- ▶ Modelli matematici e costanti fisiche
- ▶ La teoria della relatività
- ▶ La meccanica quantistica
- ▶ La teoria quantistica dei campi
- ▶ Il Modello Standard
- ▶ Problemi aperti
- ▶ Al di là del Modello Standard

## V. La teoria quantistica dei campi



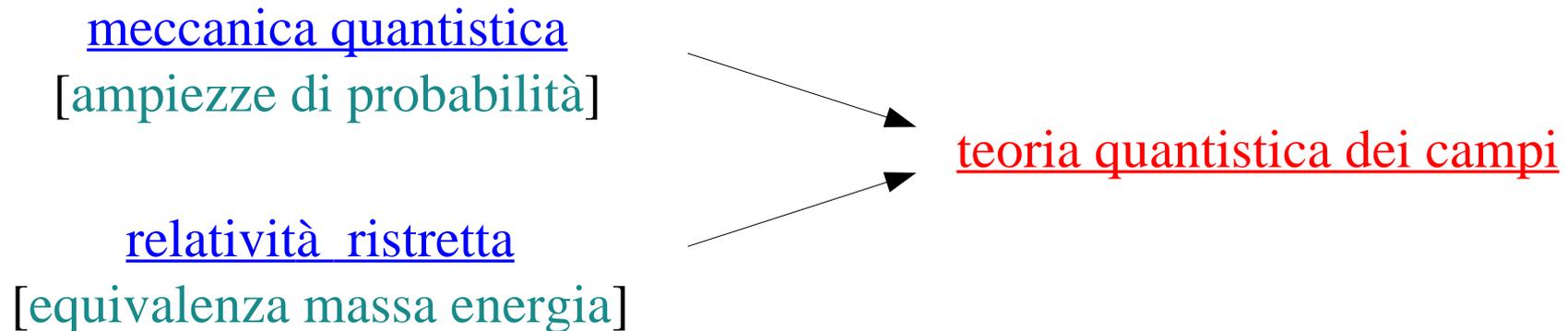
## ► La teoria quantistica dei campi

Oltre a ritrovare in modo elegante tutti i risultati noti della meccanica quantistica e a semplificare la connessione fra meccanica quantistica e meccanica classica, la formulazione della meccanica quantistica tramite l'integrale sui cammini è quella che meglio si presta per introdurre la *teoria quantistica dei campi*



## ► La teoria quantistica dei campi

Oltre a ritrovare in modo elegante tutti i risultati noti della meccanica quantistica e a semplificare la connessione fra meccanica quantistica e meccanica classica, la formulazione della meccanica quantistica tramite l'integrale sui cammini è quella che meglio si presta per introdurre la *teoria quantistica dei campi*



L'ultimo concetto classico che dobbiamo abbandonare è l'idea che esistano delle particelle indistruttibili (ovvero che il numero di costituenti elementari della materia si conservi)

Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi*

## ► La teoria quantistica dei campi

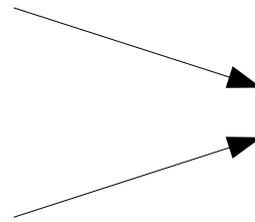
Oltre a ritrovare in modo elegante tutti i risultati noti della meccanica quantistica e a semplificare la connessione fra meccanica quantistica e meccanica classica, la formulazione della meccanica quantistica tramite l'integrale sui cammini è quella che meglio si presta per introdurre la *teoria quantistica dei campi*

meccanica quantistica

$$[ \Delta E \Delta t > \hbar ]$$

relatività ristretta

$$[ E = m c^2 ]$$



teoria quantistica dei campi

Nella teoria quantistica dei campi  $c$  &  $\hbar$  sono perfettamente integrate come unità fondamentali e tutto si può misurare solo in unità di energia:

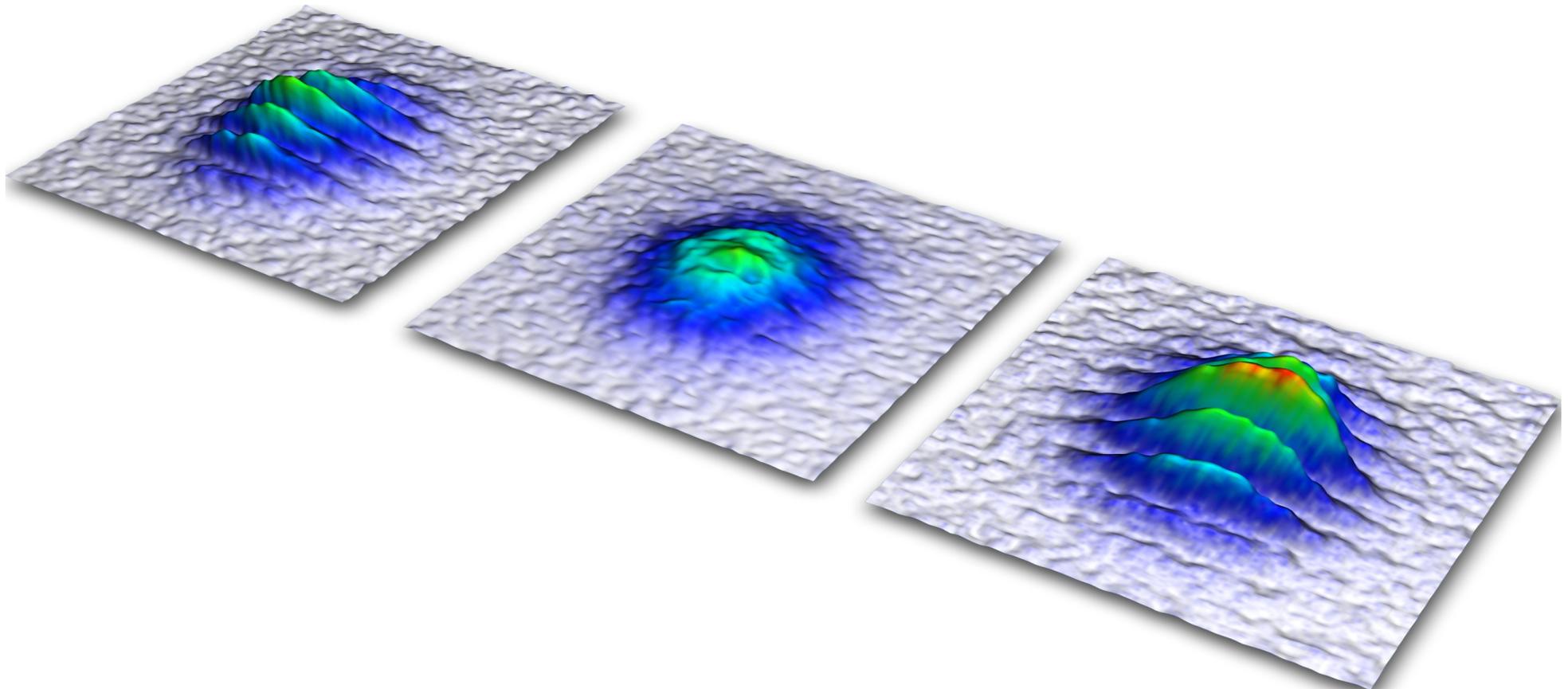
Es.:  $E = 1 \text{ GeV} \Rightarrow E/c^2 \approx 2 \times 10^{-27} \text{ Kg}$      $\hbar/E \approx 7 \times 10^{-25} \text{ s}$      $\hbar c/E \approx 2 \times 10^{-16} \text{ m}$

(energia delle collisioni a Dafne)                      (massa del protone)

## ► La teoria quantistica dei campi

Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi*

Il fotone è l'eccitazione del campo elettromagnetico, ma anche l'elettrone è l'eccitazione di un particolare campo, che possiamo chiamare il campo dell'elettrone



## ► La teoria quantistica dei campi

In generale possiamo affermare che un campo quantistico è lo strumento matematico che ci permette di descrivere la *creazione* o la *distruzione* di un certo tipo di particella, **in qualsiasi punto dello spazio, e con qualsiasi velocità**

campo libero       $\longleftrightarrow$       particelle in moto uniforme

campi interagenti       $\longleftrightarrow$       particelle in moto non-uniforme  
processi di creazione e distruzione di particelle

In stretta analogia a ciò che accade in meccanica quantistica, l'evoluzione di un sistema fisico (ovvero il passaggio da una configurazione dei campi ad un'altra) è determinato da:

$$P[ \Phi_{\text{in}}(\mathbf{x}) \rightarrow \Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x}) ] = |A|^2 \quad A = \int \mathbf{D}[\phi(\mathbf{x})] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} S[\phi] \right\}$$

↑

somma su tutte le configurazioni di campo che connettono la configurazione iniziale  $\Phi_{\text{in}}(\mathbf{x})$  alla configurazione finale  $\Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x})$

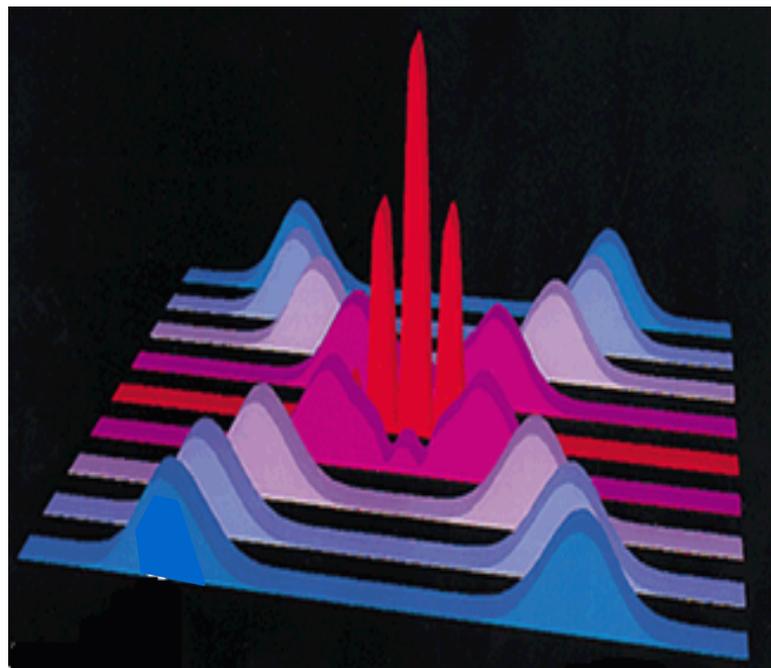
## ► La teoria quantistica dei campi

$$P[ \Phi_{\text{in}}(\mathbf{x}) \rightarrow \Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x}) ] = |A|^2$$

$$A = N \int \mathbf{D}[\phi(\mathbf{x})] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} S[\phi] \right\}$$



somma su tutte le configurazioni  
di campo che connettono la configurazione  
iniziale  $\Phi_{\text{in}}(\mathbf{x})$  alla configurazione finale  $\Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x})$



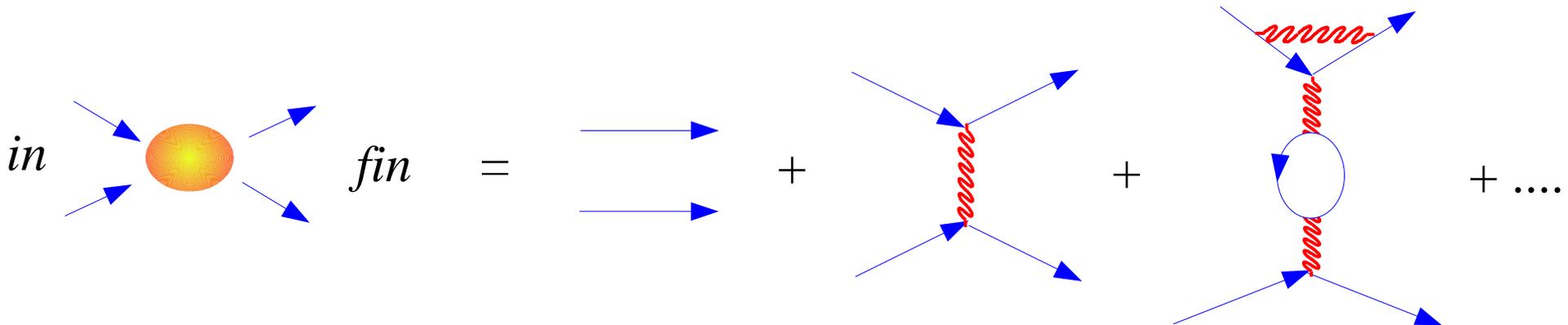
## ► La teoria quantistica dei campi

$$P[ \Phi_{\text{in}}(\mathbf{x}) \rightarrow \Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x}) ] = |A|^2 \quad A = N \int \mathbf{D}[\phi(\mathbf{x})] \exp\left\{ \frac{i}{\hbar} S[\phi] \right\}$$


 somma su tutte le configurazioni  
 di campo che connettono la configurazione  
 iniziale  $\Phi_{\text{in}}(\mathbf{x})$  alla configurazione finale  $\Phi_{\text{fin}}(\mathbf{x})$

Fra le varie configurazioni che dobbiamo considerare vi sono quelle in cui vengono create e distrutte particelle dalla vita brevissima [diagrammi di Feynman]

*Esempio:*



## ► La teoria quantistica dei campi

- In principio esistono molte teorie 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.
- La richiesta di simmetria [invarianza per trasformazioni spazio-temporali, e simmetrie interne] e consistenza della teoria [principio di causalità] restringe molto la forma dell'azione, che in genere ha una struttura molto semplice. Ciononostante, spesso è molto difficile calcolare esattamente gli integrali che definiscono le ampiezze di probabilità della teoria [integrali infinito-dimensionali, non su una variabile ma su insiemi di funzioni]...
- ... ma in tutti i casi in cui riusciamo ad ottenere predizioni precise, la teoria si è rivelata incredibilmente affidabile: attualmente non c'è alcuna evidenza sperimentale diretta che la teoria dei campi abbia una validità limitata.

**VI. Il Modello Standard**



## ► Il Modello Standard

Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali il modo in cui questi interagiscono fra loro (ovvero l'*azione* della teoria).

Due grandi categorie:

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

## ► Il Modello Standard

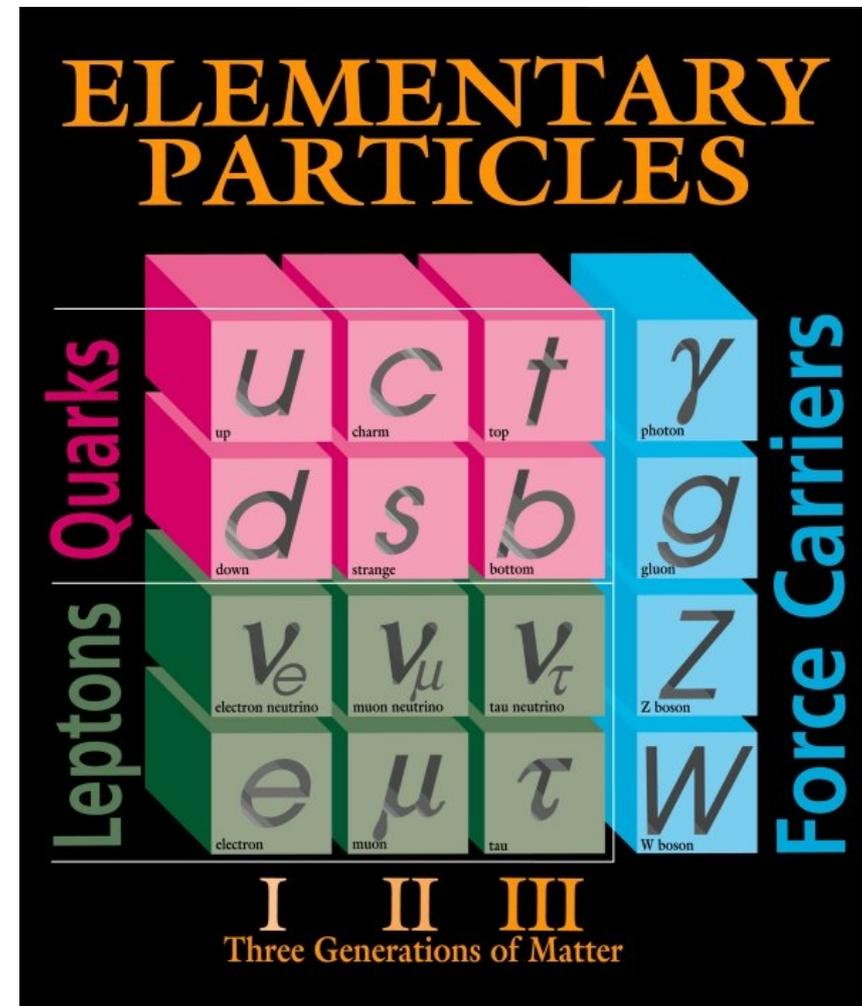
Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali il modo in cui questi interagiscono fra loro (ovvero l'*azione* della teoria).

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

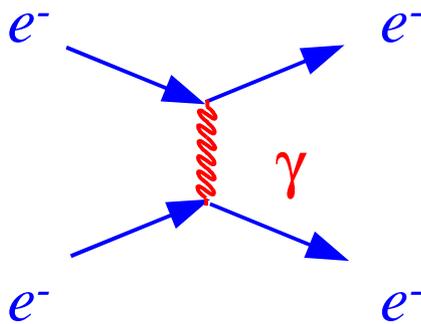


## ► Il Modello Standard

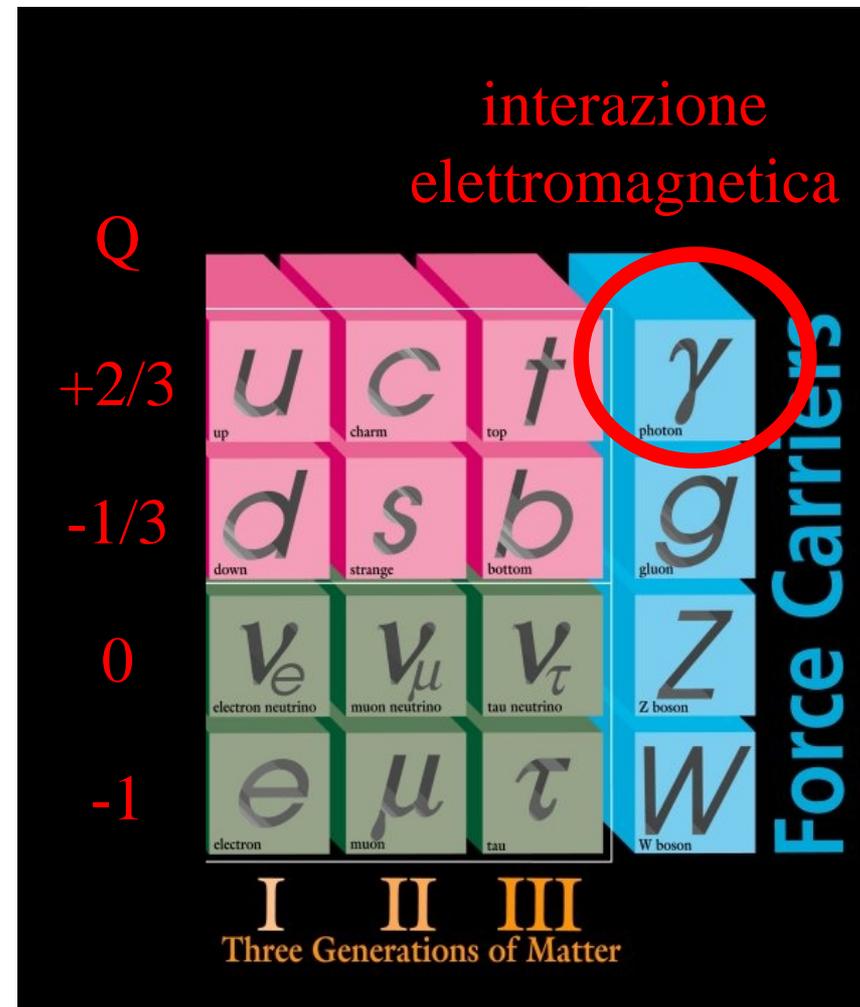
Per definire il Modello Standard dobbiamo identificare i campi fondamentali il modo in cui questi interagiscono fra loro (ovvero l'*azione* della teoria).

Due grandi categorie:

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



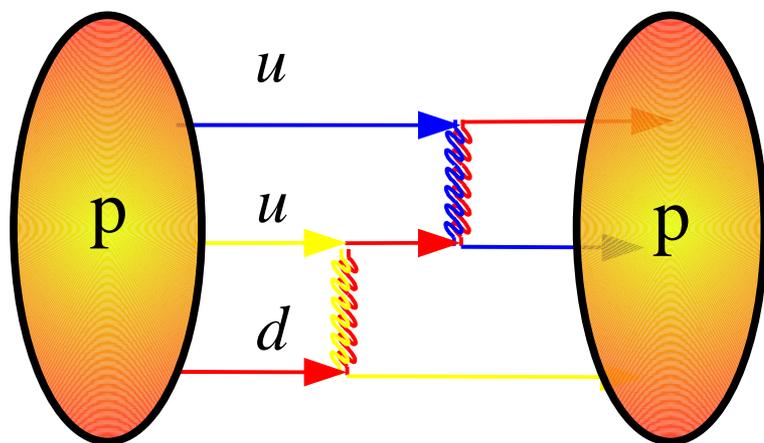
**N.B.:** l'interazione fra i campi è sempre *locale* ( $\Leftrightarrow$  principio di causalità)



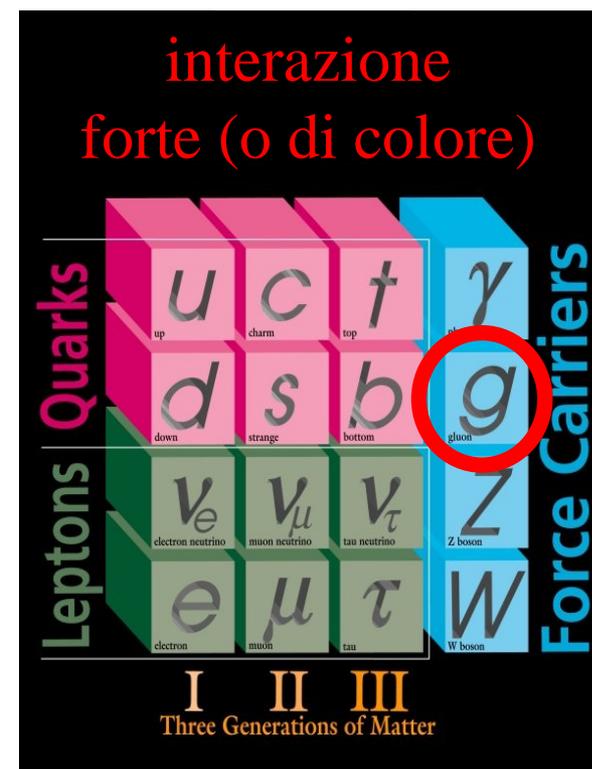
## ► Il Modello Standard

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.



$M_{\text{protone}} = \text{energia di legame dei quarks}$

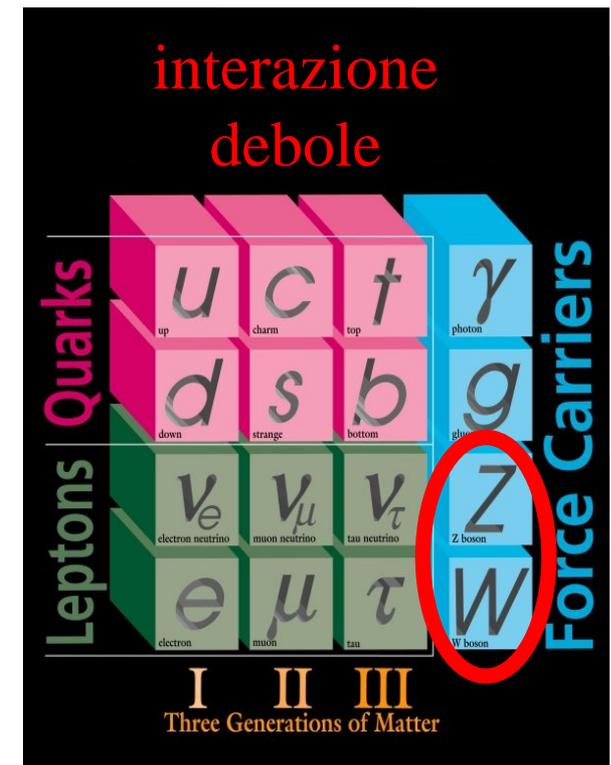


## ► Il Modello Standard

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

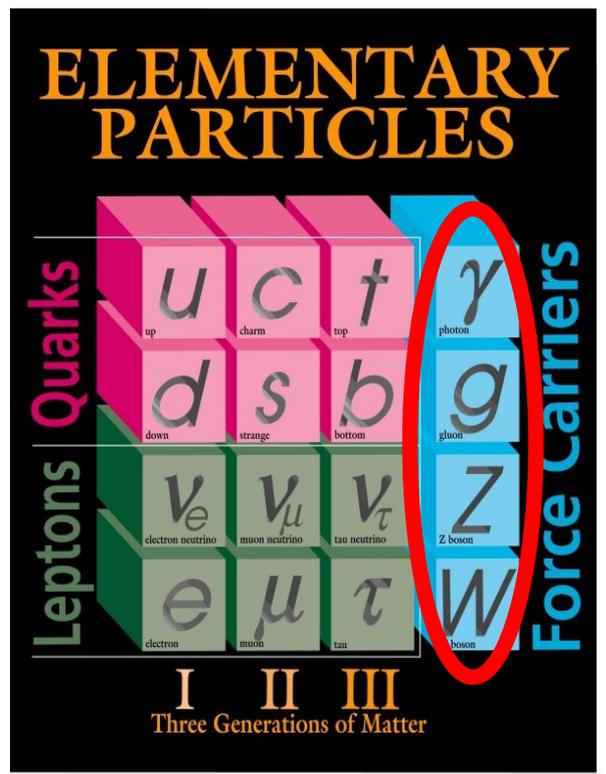
- ➔ sentono anche i neutrini
- ➔ connette fra loro le diverse “famiglie” di quarks e leptoni
- ➔ i cui mediatori (i bosoni W e Z) hanno una massa non-nulla (*motivo della debolezza dell'interazione a basse energie*)



# ► 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 ~ 1 GeV | E ~ 100 GeV |
|--------------------------|-----------|-------------|
| $\sigma_{\text{strong}}$ | ~3        | ~1.2        |
| $\sigma_{\text{weak}}$   | ~0.01     | ~0.4        |
| $\sigma_{\text{e.m.}}$   | ~0.2      | ~0.3        |



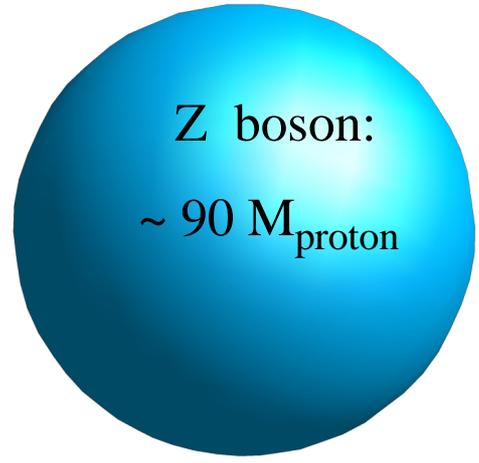
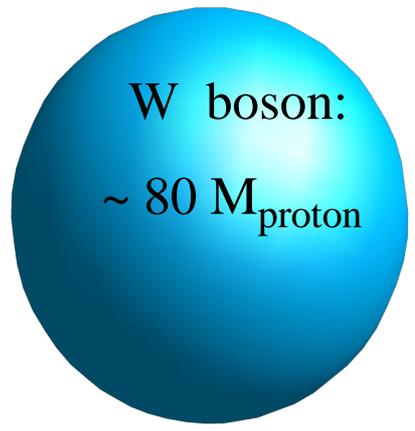
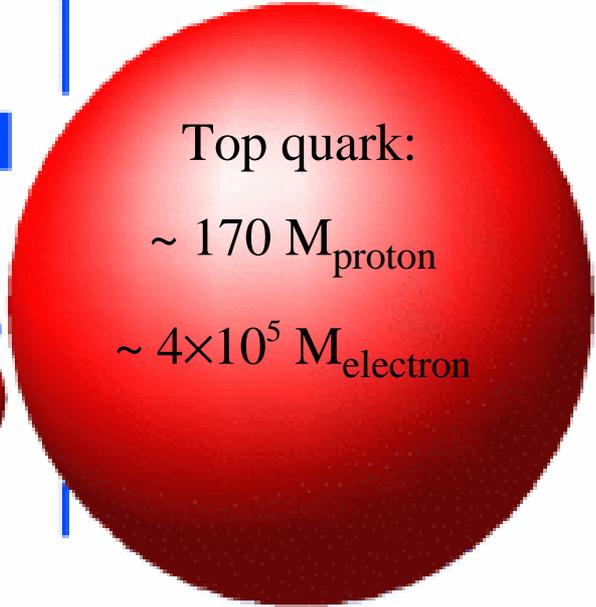
## VII. Problemi aperti



# ► Il problema delle masse

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<br>Mass -0 | Muon Neutrino<br>-0 | Tau Neutrino<br>-0 |
| Electron<br>.511             | Muon<br>105.7       | Tau<br>1 777       |
| QUARKS                       |                     |                    |
| Up<br>Mass: 5                | Charm<br>1 500      | Top<br>~180 000    |
| Down<br>8                    | Strange<br>160      | Bottom<br>4 250    |

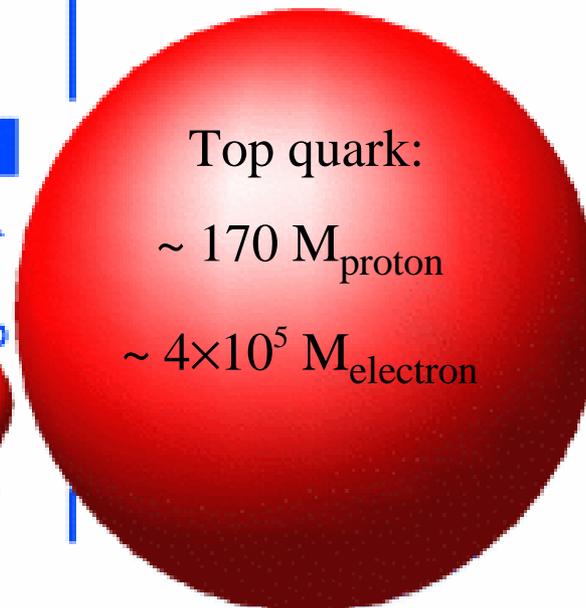


## ► Il problema delle masse

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 [*problema delle masse*]

| LEPTONS                      |                     |                    |
|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Electron Neutrino<br>Mass -0 | Muon Neutrino<br>-0 | Tau Neutrino<br>-0 |
| Electron<br>.511             | Muon<br>105.7       | Tau<br>1 777       |
| QUARKS                       |                     |                    |
| Up<br>Mass: 5                | Charm<br>1 500      | Top<br>~180 000    |
| Down<br>8                    | Strange<br>160      | Bottom<br>4 250    |



II. Sarebbe anche interessante capire perché le 3 famiglie di quarks e leptoni hanno masse così differenti fra loro [*problema del "sapore"*].

*Le differenti masse nelle 3 famiglie è l'unica caratteristica che le distingue.*

## ► Il meccanismo 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 meccanismo 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 meccanismo 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.

Sebbene questo meccanismo funzioni dal punto di vista tecnico, non è molto soddisfacente dal punto di vista teorico:

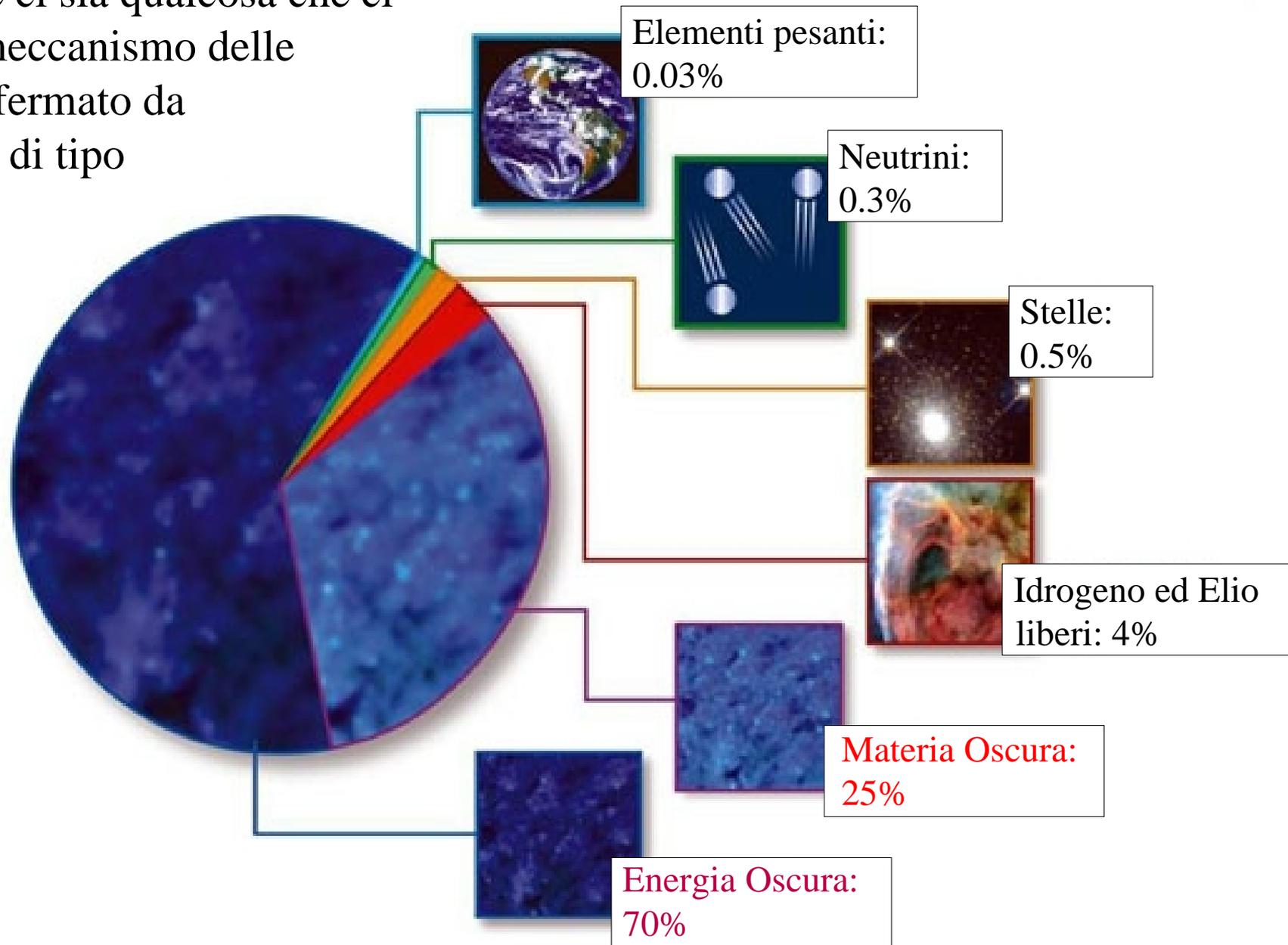
- Nessun esperimento fino ad ora è riuscito a produrre un'eccitazione del campo di Higgs (un “onda” in questo mezzo diffuso...), la cosiddetta **particella di Higgs**.

Se effettivamente questa descrizione fosse corretta, la particella non dovrebbe sfuggire agli esperimenti del Large Hadron Collider, al CERN.

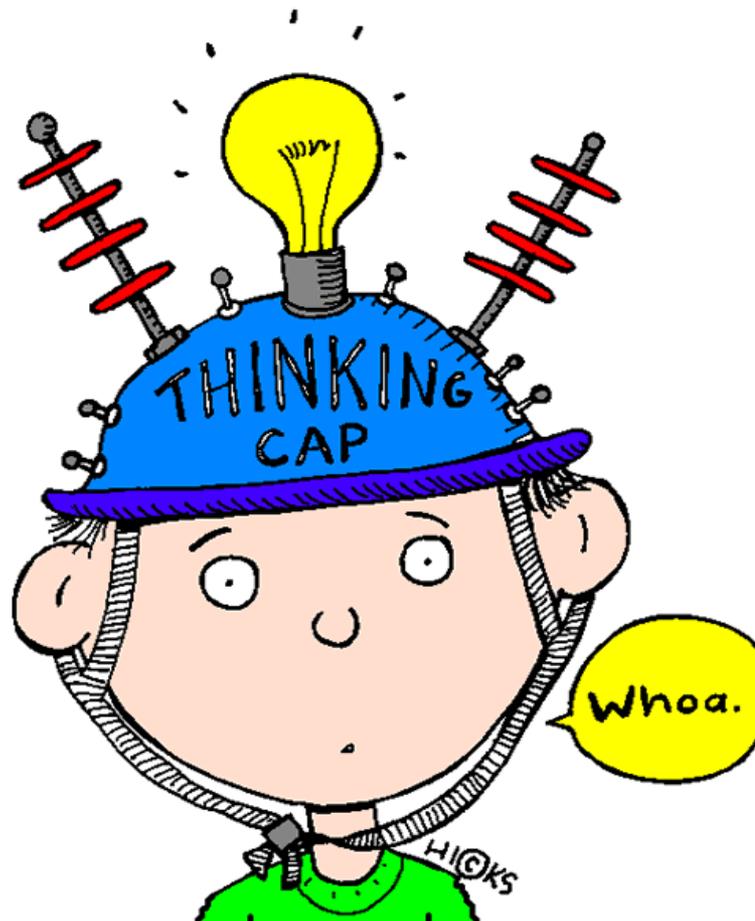
- Il campo di Higgs è sostanzialmente una nuova interazione. Tuttavia, a differenza delle altre forze, non è basato su un principio di simmetria (questo meccanismo lascia infatti insoluto il “problema del sapore”). Per questo motivo sospettiamo fortemente che il campo di Higgs sia solo una *descrizione effettiva* di qualcosa di più fondamentale.

## ► La materia oscura

E il fatto che ci sia qualcosa che ci sfugge nel meccanismo delle masse è confermato da osservazioni di tipo astrofisico:

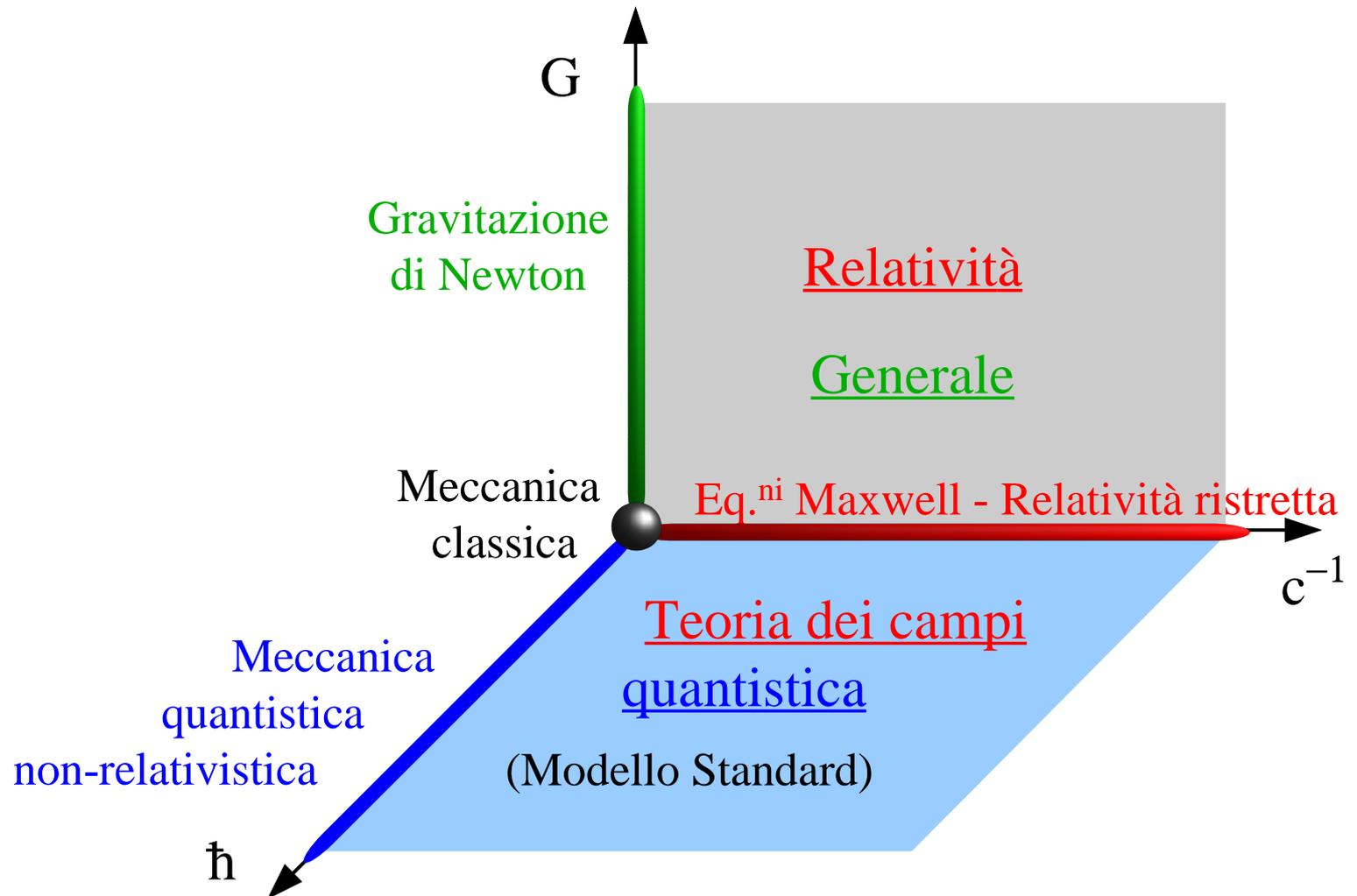


## VIII. Al di là del Modello Standard



## ► Al di là del Modello Standard

Vi sono diverse opzioni allo studio (e di fatto ancora nessuna opzione “preferenziale”). Fra le strade più promettenti vi è quella di estendere le simmetrie delle teorie di campo quantistiche nel settore “spazio-temporale”:



## ► Al di là del Modello Standard

Vi sono diverse opzioni allo studio (e di fatto ancora nessuna opzione “preferenziale”). Fra le strade più promettenti vi è quella di estendere le simmetrie delle teorie di campo quantistiche nel settore “spazio-temporale”:

Simmetrie Interne  
(*simm. colore, ...*)

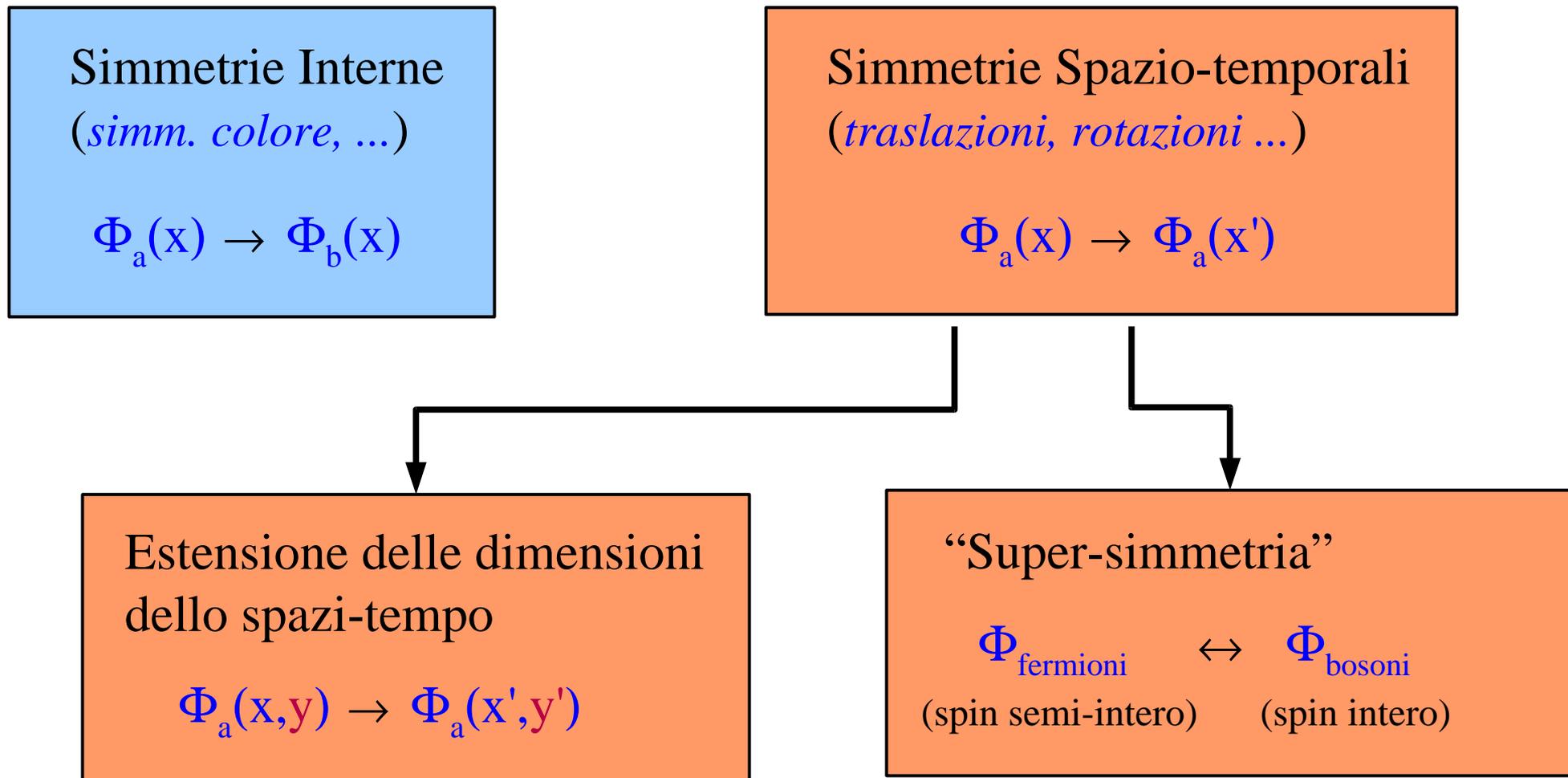
$$\Phi_a(x) \rightarrow \Phi_b(x)$$

Simmetrie Spazio-temporali  
(*traslazioni, rotazioni ...*)

$$\Phi_a(x) \rightarrow \Phi_a(x')$$

## ► Al di là del Modello Standard

Vi sono diverse opzioni allo studio (e di fatto ancora nessuna opzione “preferenziale”). Fra le strade più promettenti vi è quella di estendere le simmetrie delle teorie di campo quantistiche nel settore “spazio-temporale”:

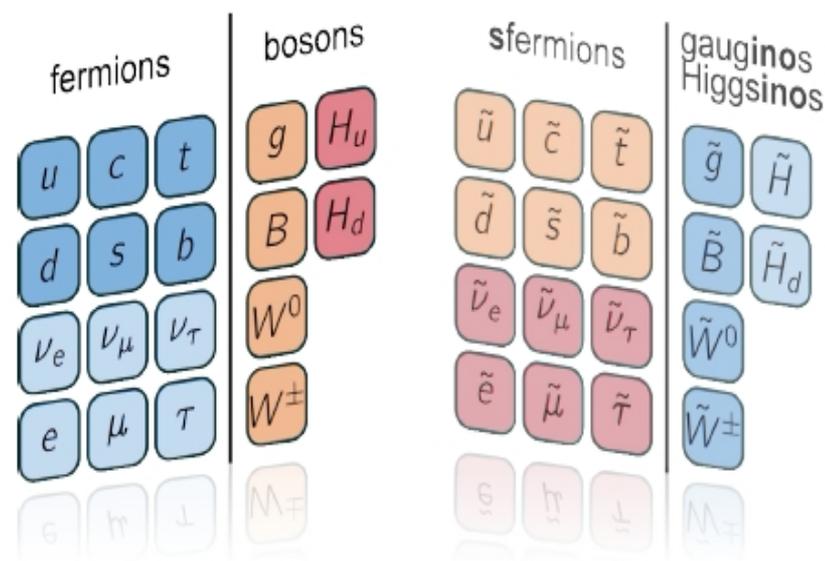


## ► Al di là del Modello Standard

La supersimmetria è forse la più interessante fra tutte le proposte alternative, e sicuramente è l'opzione più studiata [*le trasformazioni supersimmetriche rappresentano di fatto una nuova forma di trasformazioni spazio-temporali, in aggiunta alle “ordinarie” rotazioni e traslazioni*].

L'estensione super-simmetrica del Modello Standard prevede che

- Per ogni particella nota ve ne sia una con gli stessi numeri quantici ma spin differente [es: **elettrone** ( $s=1/2$ )  $\Leftrightarrow$  **s-elettrone** ( $s=0$ )]

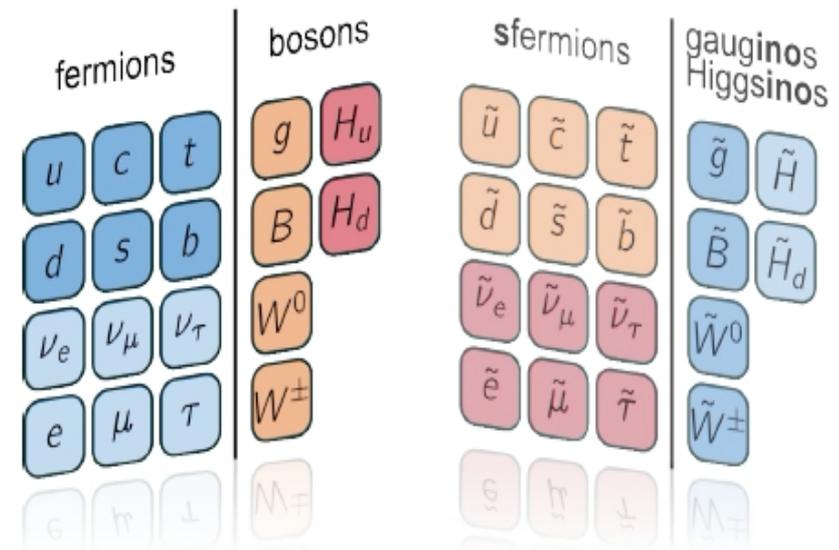


## ► Al di là del Modello Standard

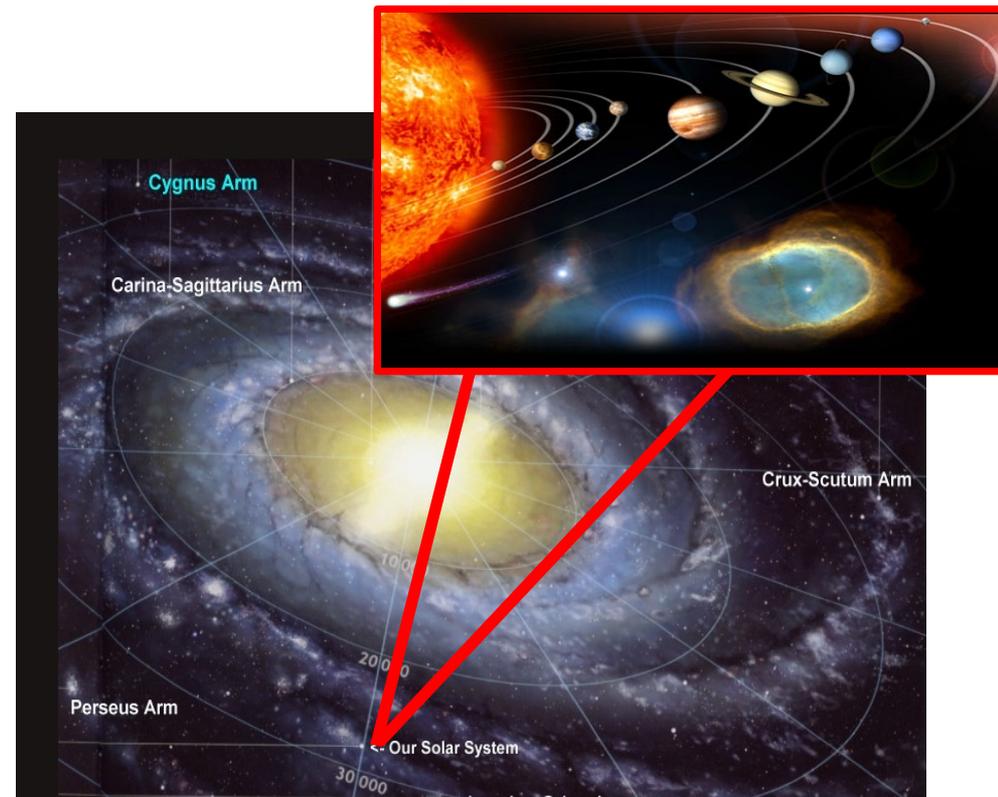
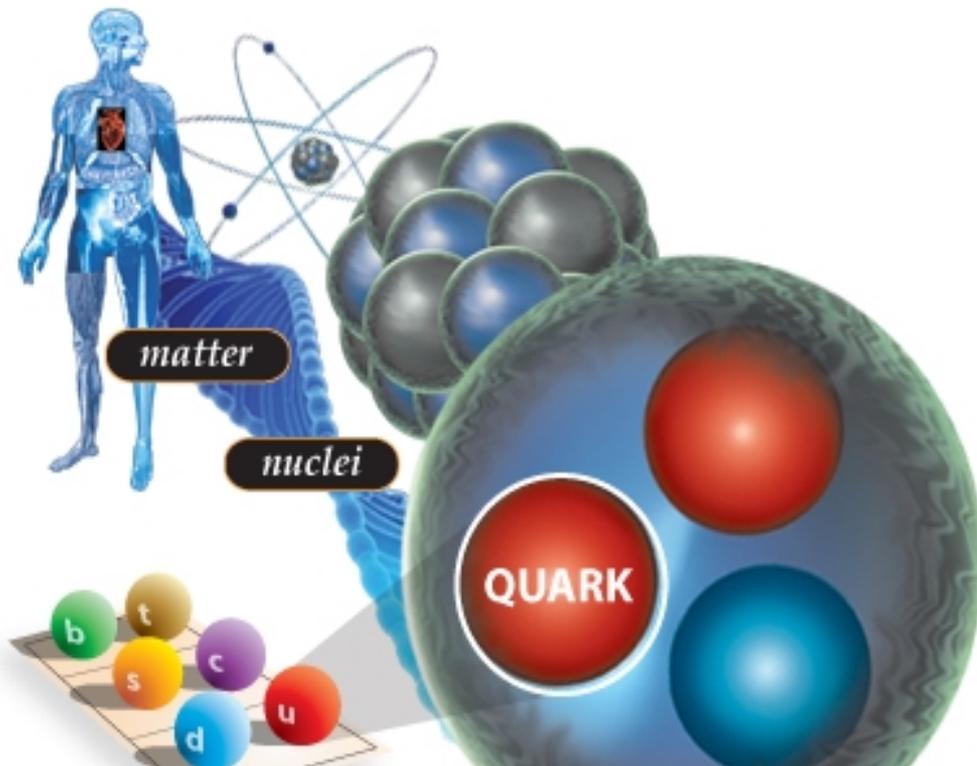
La supersimmetria è forse la più interessante fra tutte le proposte alternative, e sicuramente è l'opzione più studiata [*le trasformazioni supersimmetriche rappresentano di fatto una nuova forma di trasformazioni spazio-temporali, in aggiunta alle “ordinarie” rotazioni e traslazioni*].

L'estensione super-simmetrica del Modello Standard prevede che

- Per ogni particella nota ve ne sia una con gli stessi numeri quantici 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 (al CERN)
- Una di queste particelle sarebbe un ottimo candidato per la materia oscura...
- Il fenomeno dell'unificazione delle forze, che funziona solo in modo approssimato nel Modello Standard, potrebbe funzionare esattamente...



## IX. Conclusioni



Stiamo per traversare 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>