

Il Modello Standard ed oltre

Una panoramica sullo stato attuale delle conoscenze nella fisica delle particelle elementari e sulle questioni ancora aperte

Lorenzo Bellagamba
INFN Bologna

Il ruolo della ricerca in fisica delle particelle ai nostri giorni e' lo stesso di quello che aveva la filosofia naturale nell'antichita':

tentare di rispondere alle domande fondamentali sull'essenza delle "cose" e sul funzionamento della "Natura"

Macrocosmo



Microcosmo

- Come funziona il nostro universo?
- Da dove viene e dove sta andando?

- Quali sono i componenti fondamentali della materia?
- Quali sono le forze che governano i loro moti?

La piu' fondamentale di tutte le scienze

Anche l'approccio seguito dagli antichi filosofi e' del tutto sovrapponibile a quello della ricerca moderna: trovare una serie di pochi principi primi che possano descrivere la complessita' dei fenomeni naturali, tanto alla scala umana che a quella microscopica (composizione della materia) e macroscopica (il cielo, l'Universo).

Quello che e' cambiato nei secoli e' la percezione della reale complessita' delle cose, l'abilita' di eseguire misure quantitative di sempre maggior precisione e la definizione di un quadro epistemologico che chiarisca la completezza di una data teoria.

→ **Classificazione in termini di 2 categorie:**

- I componenti della materia
- Le forze che governano le loro interazioni

Domande base: *esistenza, cosa, come*

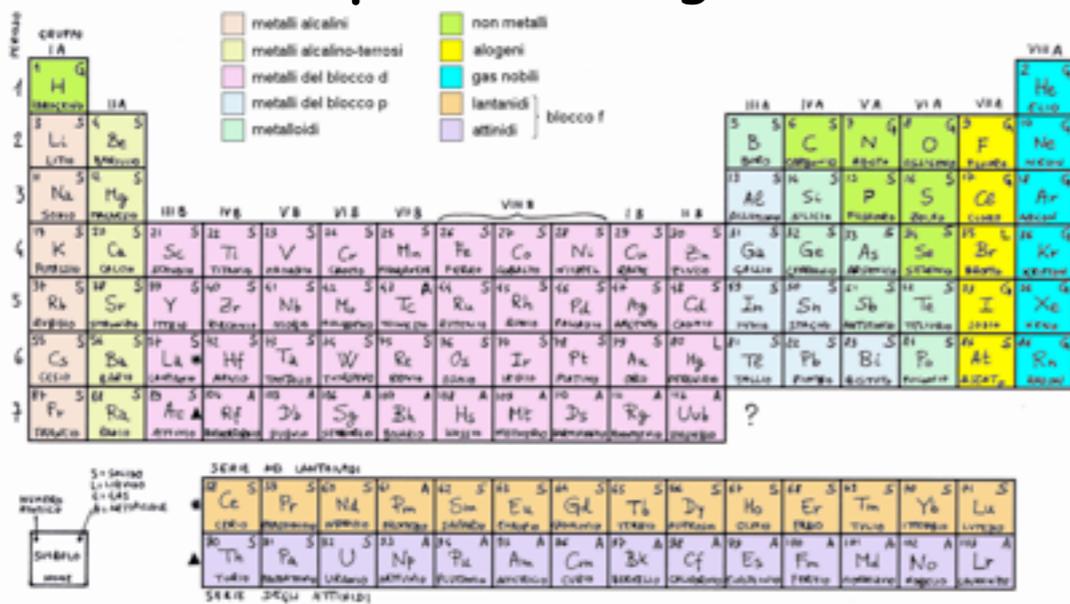
- **Esistono componenti elementari della materia?**
- **Se si, cosa sono?**
- **Come interagiscono tra loro?**
- **Come determinano le proprietà dell'Universo?**

La materia

Regolarita' e sottostrutture

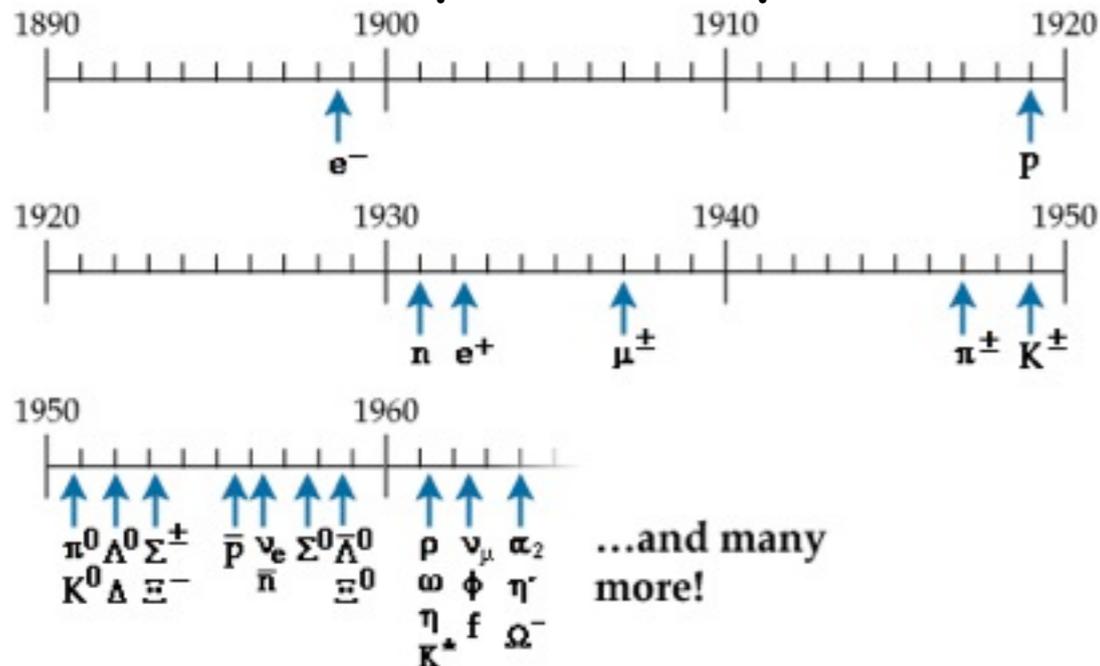
L'osservazione di regolarita' e di strutture ordinate e' il segno distintivo della presenza di sottostrutture:

Tavola periodica degli elementi



p (protone)
n (neutrone)
e (elettrone)

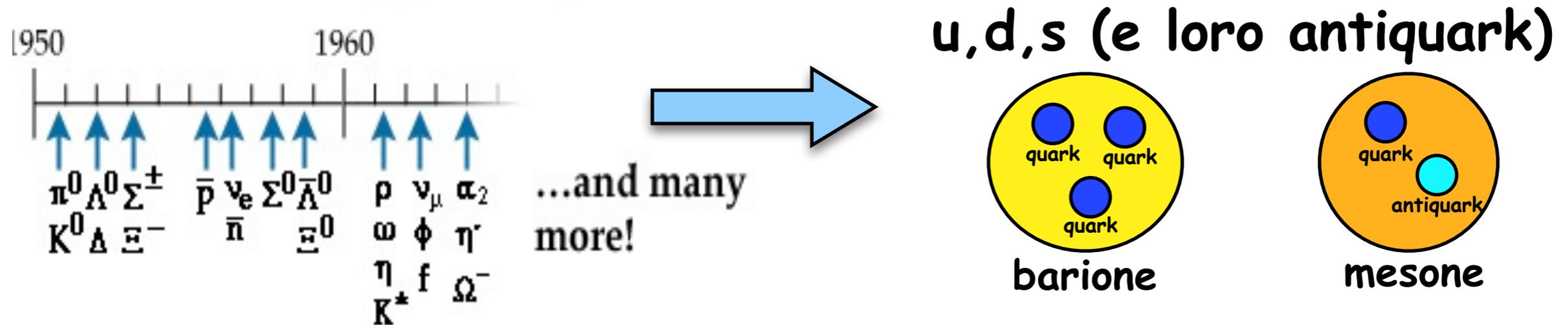
Anni di scoperta delle particelle



Dagli anni '50 con l'utilizzo dei primi acceleratori il numero di particelle scoperte aumento' in modo esponenziale. Inoltre questi nuovi stati potevano essere classificati in strutture estremamente regolari.

Possibile che tutti questi stati siano realmente elementari?

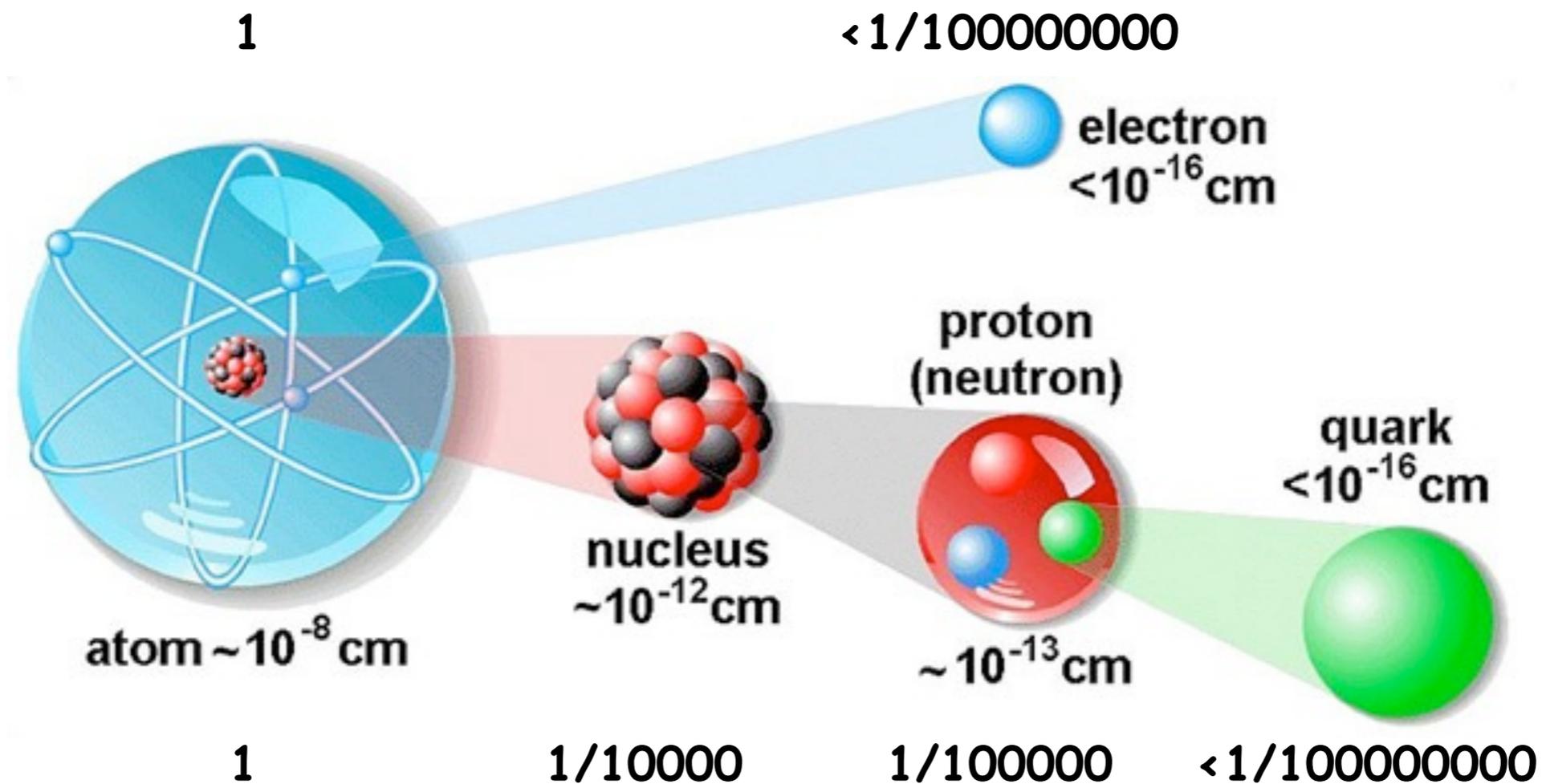
In effetti tutta questa grande varietà di nuove particelle prodotte in laboratorio si dimostrarono compatibili con stati legati formati da 3 "quark" o da una coppia quark-antiquark di 3 tipi differenti:



Quelli che oggi consideriamo i mattoni elementari della materia sono classificati in 2 categorie:

- **quark** → costituenti del protone e del neutrone che formano i nuclei atomici
- **leptoni** → tra cui c'è l'elettrone ed il suo neutrino

Quark (u,d) ed elettroni sono (ad oggi) gli oggetti piu' piccoli che riusciamo a risolvere nella materia.
 Questi oggetti non mostrano segni di ulteriori sottostrutture alle scale oggi raggiungibili (10^{-18} m)



Ma questa non e' tutta la storia!

Apparve infatti subito chiaro che:

- oltre a questi costituenti in laboratorio ne venivano prodotti altri analoghi ma di massa maggiore non presenti nella materia ordinaria
- ad ogni tipo di particella corrispondeva una analoga antiparticella di massa uguale ma cariche opposte anche queste non presenti nella materia ordinaria. Per di piu' particelle ed antiparticelle venivano prodotte in laboratorio piu' o meno nella stessa quantita'.

Perche' ci sono repliche a masse piu' elevate delle particelle che compongono la materia ordinaria ?

Perche' non osserviamo antimateria nel mondo che ci circonda mentre in laboratorio viene prodotta in abbondanza?

Le forze

Le forze

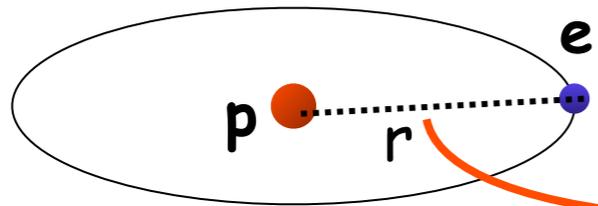
Responsabili di tutte le interazioni tra i costituenti della materia, in particolare consentono la formazione di stati legati e garantiscono la stabilita' della materia.

Tutta la varieta' dei fenomeni che conosciamo possono essere interpretati in termine di 4 forze:

inter.	sorgente	intensita'	azione
nucleare forte	carica di colore	1	10^{-13} cm
nucleare debole	carica debole	10^{-7}	nucleo
elettromagnetica	carica elettrica	10^{-2}	∞
gravitazionale	massa o meglio energia	10^{-39}	∞

Considerazione: il ruolo della forza gravitazionale a livello microscopico

Prendiamo in esame l'atomo di idrogeno:



$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_e q_p}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(0.5 \times 10^{-10})^2} = 9.2 \times 10^{-8} N$$

Raggio di Bohr
dell'atomo di Idrogeno

$$F_{gr} = G \frac{M_e M_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 1.7 \times 10^{-27}}{(0.5 \times 10^{-10})^2} = 4.1 \times 10^{-47} N$$

39 ordini di
grandezza !!!

La forza di gravita' e' del tutto trascurabile
nel mondo subatomico

I principi fondamentali della fisica

Le particelle elementari, come ogni altra cosa, sono soggette ai principi fondamentali della fisica:

- principio di causalita' (la causa "precede" l'effetto)
- leggi di conservazione di impulso, energia, momento angolare (legate alle proprieta' di invarianza delle leggi fisiche rispetto a traslazioni spaziali e temporali ed alle rotazioni)
- principio di relativita' speciale
- meccanica quantistica (dualismo onda-corpuscolo, principio di indeterminazione, quantizzazione dei livelli energetici...)

In particolare la **relativita'** e la **meccanica quantistica**, sono le due grandi teorie che hanno segnato il secolo scorso e sono a tutt'oggi i pilastri su cui ogni nuova teoria fisica deve poggiare.

La fisica delle particelle elementari e' il luogo naturale dove queste due teorie devono necessariamente incontrarsi e convivere.

Relativita' speciale (deviazione dalle leggi classiche ad alte velocita', parametro fondamentale velocita' della luce $c = 3 \times 10^{10}$ cm/sec):

- nessun segnale puo' propagarsi piu' velocemente della luce
- le leggi della fisica sono le stesse in sistemi di riferimento in moto relativo costante

 la luce ha la stessa velocita' in tutti i sistemi di riferimento, lo scorrere del tempo e' relativo

Meccanica Quantistica (deviazione dalle leggi classiche a piccole distanze, parametro fondamentale costante di Planck $h = 6,6256 \times 10^{-27}$ erg x s):

- principio di indeterminazione
- esistono coppie di grandezze (lunghezza/impulso, energia/tempo...) che non possono essere misurate contemporaneamente con precisione

infinita

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$



distrugge il concetto classico di traiettoria e di localizzazione di una particella

Ricapitolando

Le due grandi teorie fisiche che hanno segnato il secolo scorso sono la **Meccanica Quantistica** e la **Relativita'**.

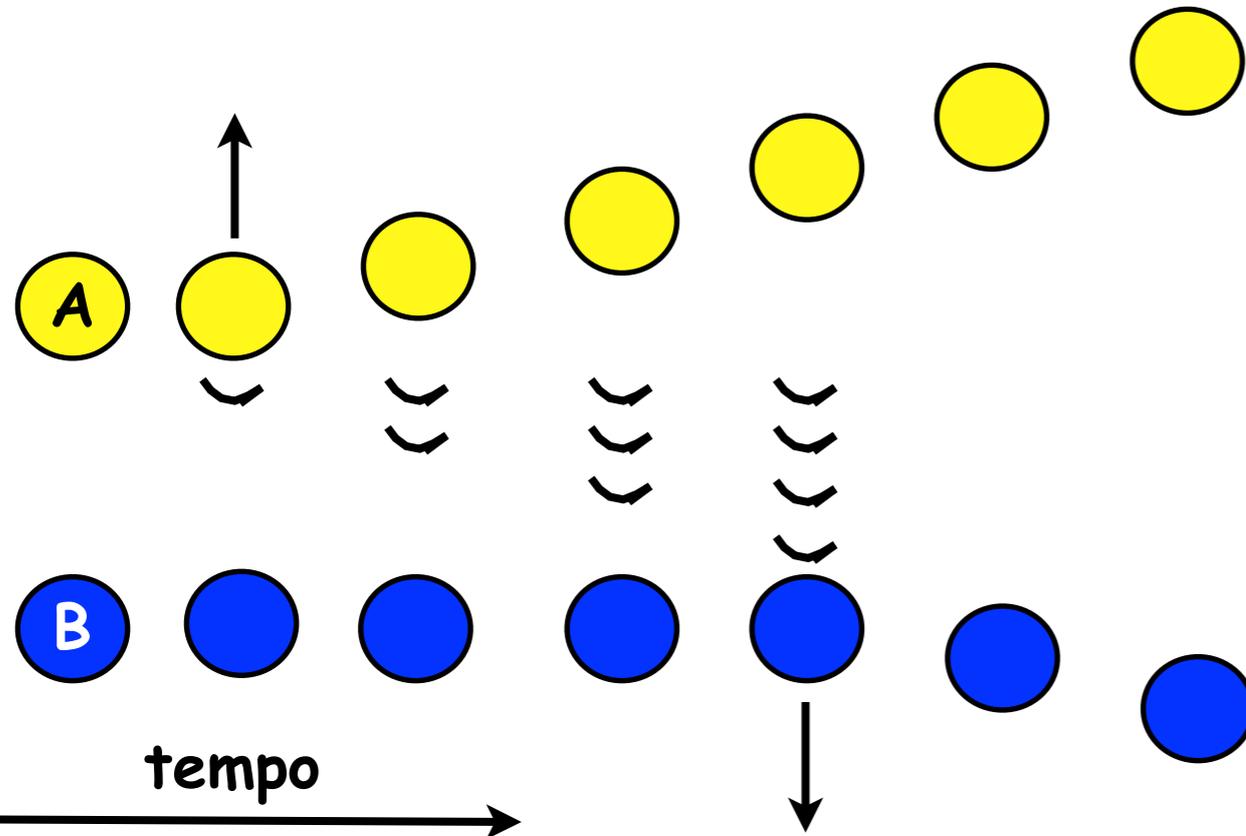
Oggi sono i pilastri su cui poggia ogni modello che pretende di descrivere la natura a livello fondamentale

Relativita'
Meccanica Quantistica

grandi velocita' (c = velocita' della luce)
mondo microscopico (h = costante di Planck)



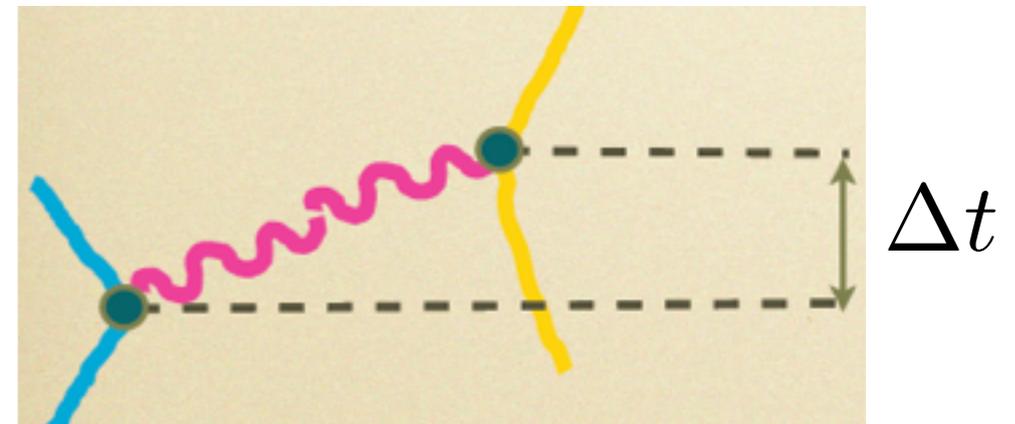
Interazione tra due particelle



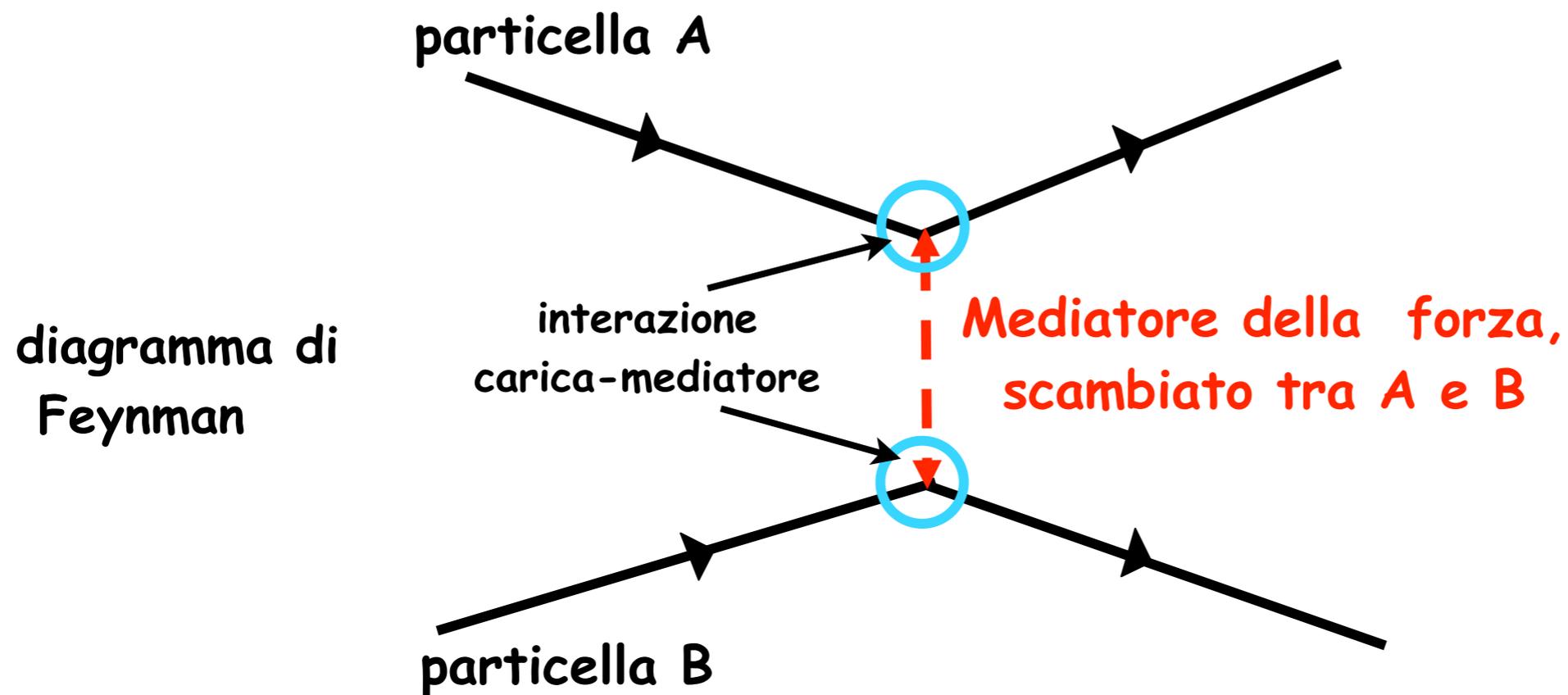
L'interazione si trasmette come un'onda da una particella all'altra con velocità c .
Ad un certo istante la particella A prima ferma comincia a muoversi lanciando il segnale verso la particella B.

Che ne è della conservazione dell'energia?

La meccanica quantistica mette le cose a posto: se il tempo Δt è sufficientemente breve la variazione di energia ΔE non può essere misurata con accuratezza e quindi è impossibile determinare se stiamo violando la sua conservazione. Il principio di indeterminazione permette quindi lo scambio di energia tra particelle entro Δt .



$$\Delta t < \frac{4\pi}{h} \Delta E$$

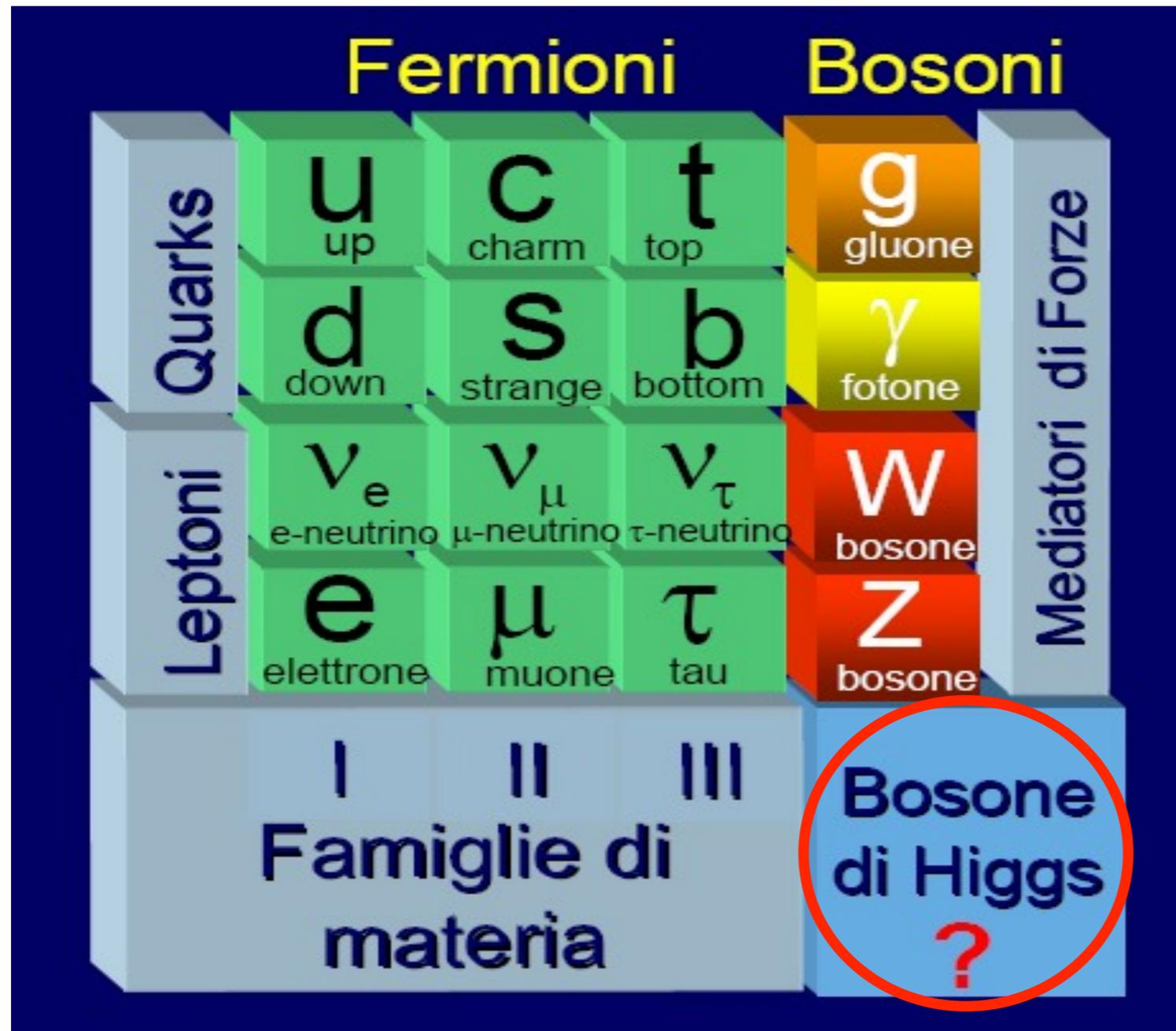


In meccanica quantistica onde e particelle sono rappresentazioni diverse ma equivalenti dello stesso oggetto, dunque all'onda che trasmette il segnale dell'interazione associamo una particella

Proprieta' delle interazioni tra particelle

- **Localita'** le proprieta' delle interazioni dipendono solo dalle proprieta' dei partecipanti in un punto definito dello spazio-tempo
- **Causalita'** l'effetto segue la causa. Non puo' manifestarsi prima del tempo necessario perche' un segnale di luce possa coprire la distanza fra causa ed effetto.
- **Universalita'** l'interazione fra 2 particelle fattorizza in termini delle proprieta' delle particelle singole (per es. la loro carica elettrica nel caso dell'interazione elettromagnetica)

Il Modello Standard



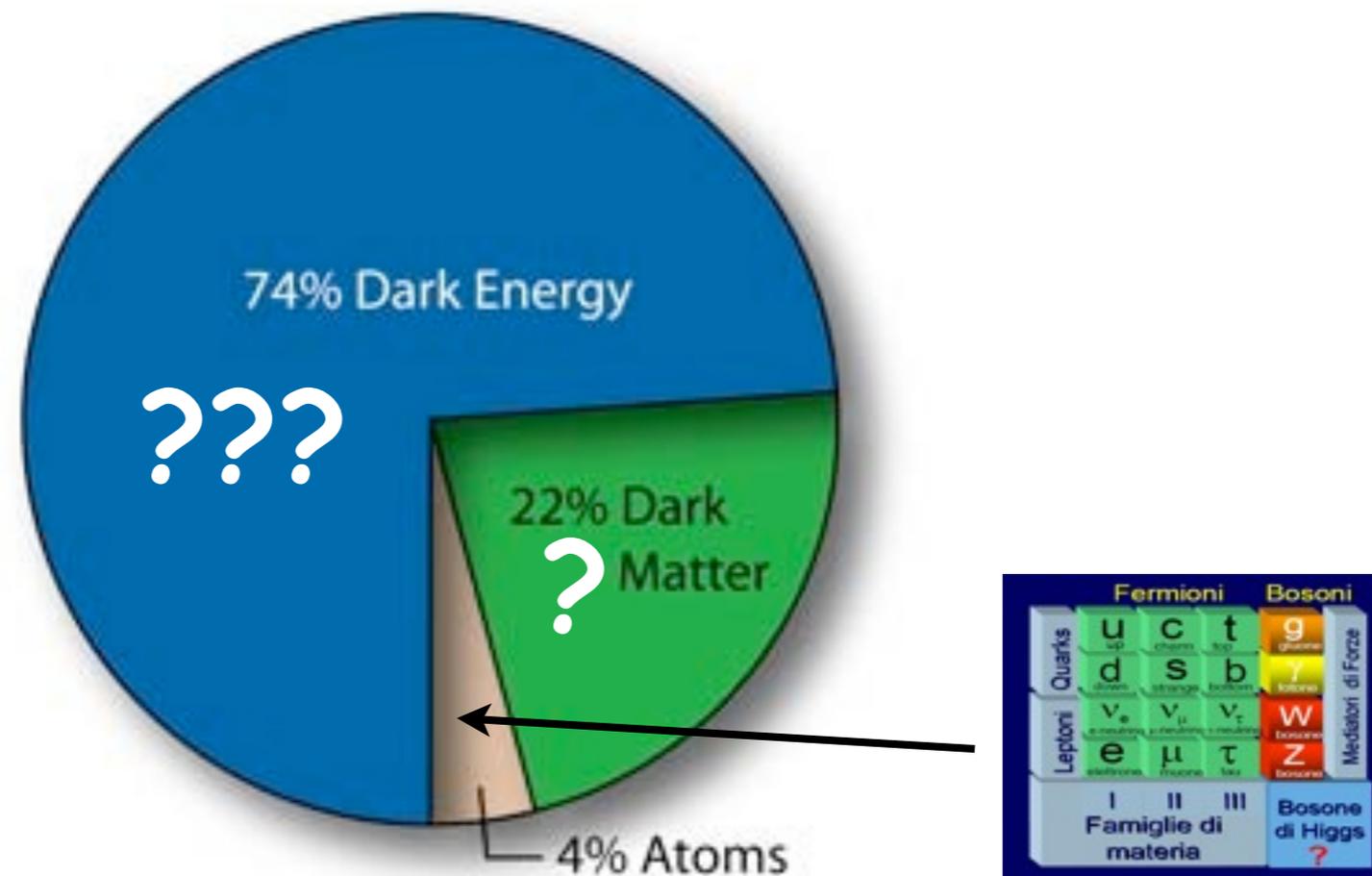
Fermioni
 spin semintero ($1/2$)
 principio di esclusione di Pauli
 alla base della stabilita' e diversita' della materia

Bosoni
 spin intero (1)

Grande successo: tutti i fenomeni conosciuti spiegati in termine di pochi mattoni fondamentali, eccezionale accordo con le misure sperimentali.

Ma allora perche' non siamo ancora soddisfatti ?

Composizione dell'universo secondo le ultime osservazioni astrofisiche:



Sembra che soltanto il 4% di tutto l'Universo sia composto dagli oggetti che costituiscono il modello Standard
Inoltre anche all'interno di questa parte che sembra residuale dell'Universo ci sono diversi aspetti non del tutto convincenti

Oltre il Modello Standard

Oltre il Modello Standard

Il Modello Standard e' stato sottoposto negli ultimi 10 anni ha test sempre piu' stringenti. Per il momento se l'e' sempre cavata bene

Nonostante questo una serie di domande aspettano ancora risposta

- Gravita' ?

- 20 parametri, un po' troppi

- perche' 3 famiglie ?

- perche' masse cosi' diverse ? Il quark top e' 350000 volte piu' pesante dell'elettrone, le masse delle altre particelle si collocano in modo apparentemente casuale tra queste due.

- simmetria leptoni-quark segno di una sottostruttura ulteriore ?

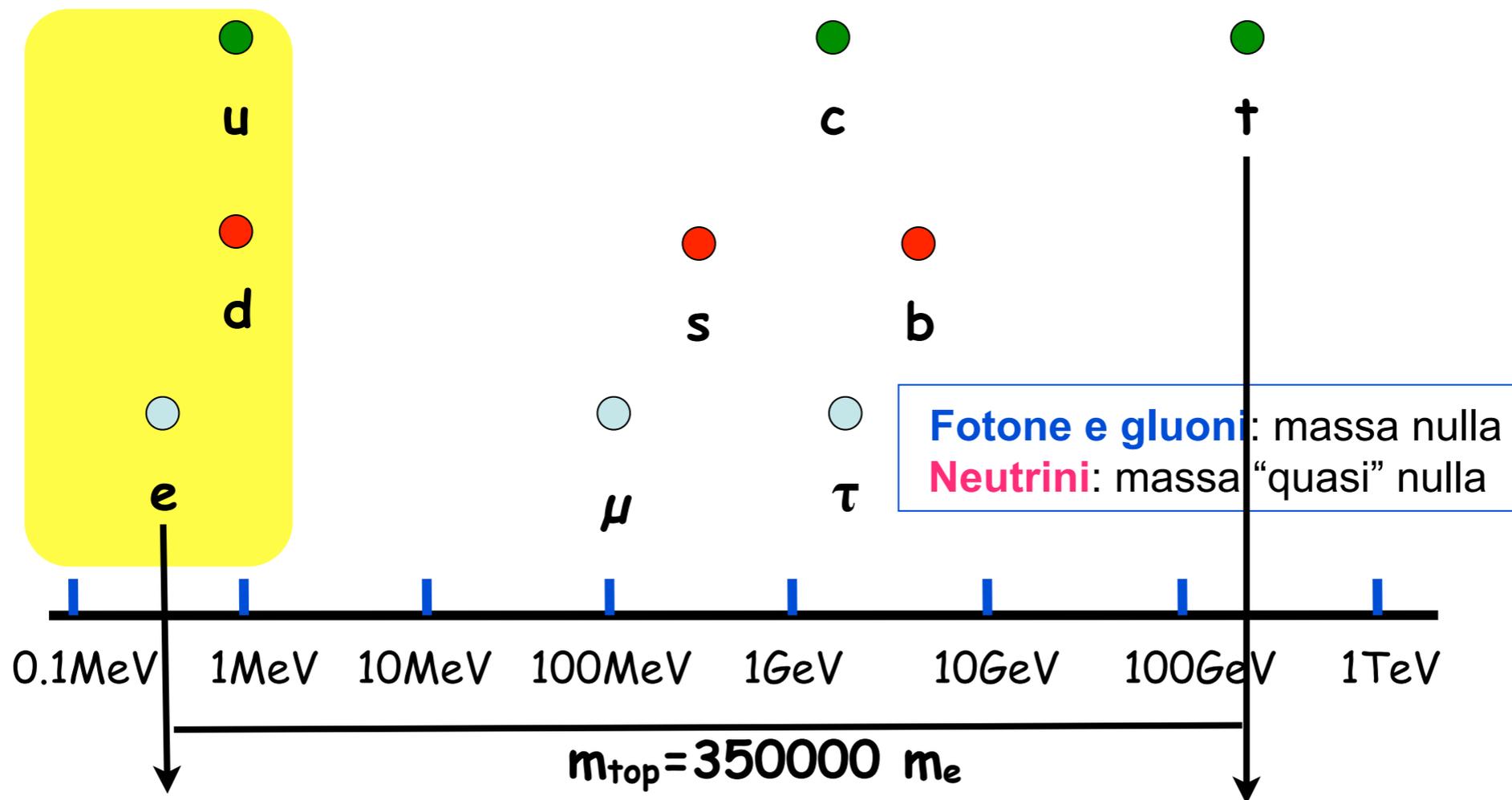
- Quale e' l'origine delle masse (particella di Higgs) ?

- materia oscura, quale e' la sua origine ?

Masse delle particelle fondamentali

Perche' questa differenza di masse ?

Materia ordinaria
I famiglia



Alcune considerazioni ulteriori sulle regolarita' non spiegate del Modello Standard

Simmetria leptoni quark segno di possibili sottostrutture?

Perche' l'atomo sia neutro occorre che elettrone e protone abbiano una carica elettrica esattamente uguale ed opposta. Se quark (che compongono il protone) ed elettroni fossero oggetti indipendenti come nel Modello Standard, non c'e' ragione per una assoluta uguaglianza delle cariche.

Se non fossero esattamente identiche?

Che margini abbiamo per ipotizzare una qualche differenza ?

Supponiamo $\frac{(|q_e| - |q_p|)}{|q_e|} = 10^{-15}$

Calcoliamo quale sarebbe la forza elettrica fra terra e sole:

$$N_{\text{protoni_Terra}} = M_{\text{terra}} / 2M_p = 6 \cdot 10^{24} / 1.6 \cdot 10^{-27} = 1.8 \cdot 10^{51}$$

$$N_{\text{protoni_Sole}} = M_{\text{sole}} / 2M_p = 2 \cdot 10^{30} / 1.6 \cdot 10^{-27} = 0.6 \cdot 10^{57}$$

$$q_{\text{terra}} = q_p \cdot 10^{-15} \cdot N_{\text{protoni_terra}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-15} \cdot 1.8 \cdot 10^{51} = 3 \cdot 10^{17} \text{ C}$$

$$q_{\text{sole}} = q_p \cdot 10^{-15} \cdot N_{\text{protoni_Sole}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-15} \cdot 0.6 \cdot 10^{57} = 1 \cdot 10^{23} \text{ C}$$

$$F_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{terra}q_{sole}}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{0.3 \times 10^{41}}{(1.5 \times 10^{11})^2} = 1.2 \times 10^{28} N$$

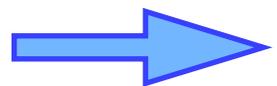
Per confronto la Forza di Gravita' fra terra e sole:

$$F_{grav} = G \frac{M_{terra}M_{sole}}{r^2} = 6.7 \times 10^{-11} \frac{1.2 \times 10^{55}}{(1.5 \times 10^{11})^2} = 3.6 \times 10^{22} N$$

La forza di gravita' terra-sole sarebbe trascurabile rispetto alla forza elettrica !!!

Non sarebbe possibile costituire alcun aggregato di materia

- "Identita'" di carica elettrone-protone assolutamente necessaria perche' a grandi distanze domina la gravita' sull'elettromagnetismo e l'Universo sia come lo conosciamo
- Innaturale se elettroni e quark sono oggetti indipendenti



Segnale di una sottostruttura comune ????

Il bosone di Higgs e la massa delle particelle elementari

$$\text{massa} = E/c^2$$

per un sistema composto la massa puo' essere ottenuta risolvendo le equazioni dinamiche del sistema legato:

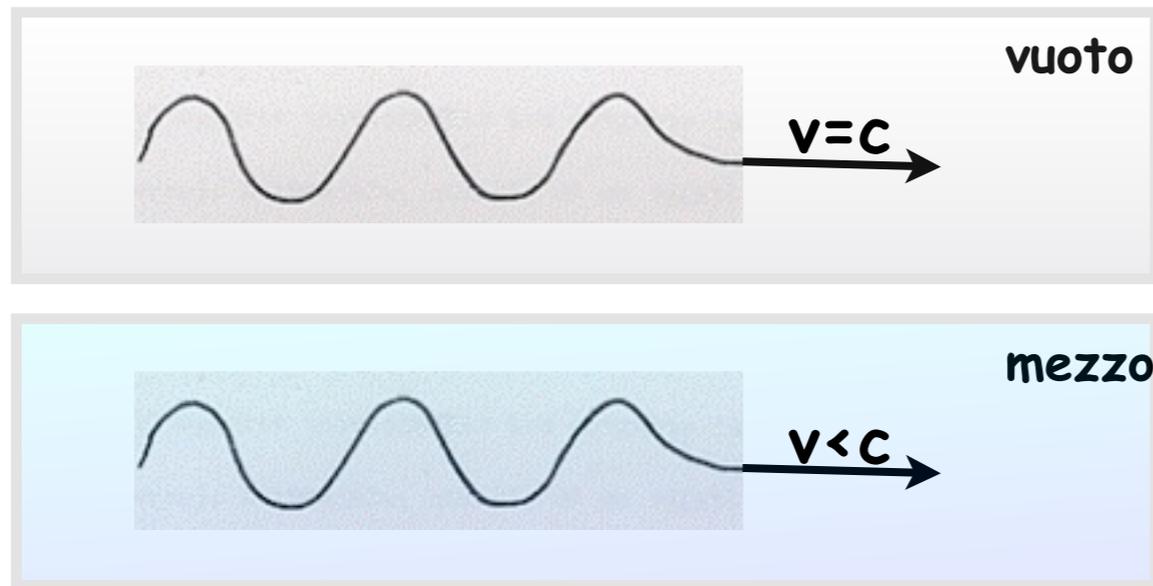
$$E = E_{\text{cinetica}} + E_{\text{potenziale}}$$

per esempio per un barione la massa e' determinata da come quark e gluoni interagiscono.

Diversa la situazione per una particella elementare che per definizione non ha struttura interna

Occorre quindi una teoria che spieghi cosa sia la massa di una particella elementare e che ne determini il valore

La luce che si propaga in un mezzo rallenta per via delle interazioni elettromagnetiche del fotone con il mezzo



La luce acquista inerzia a causa delle interazioni con il mezzo

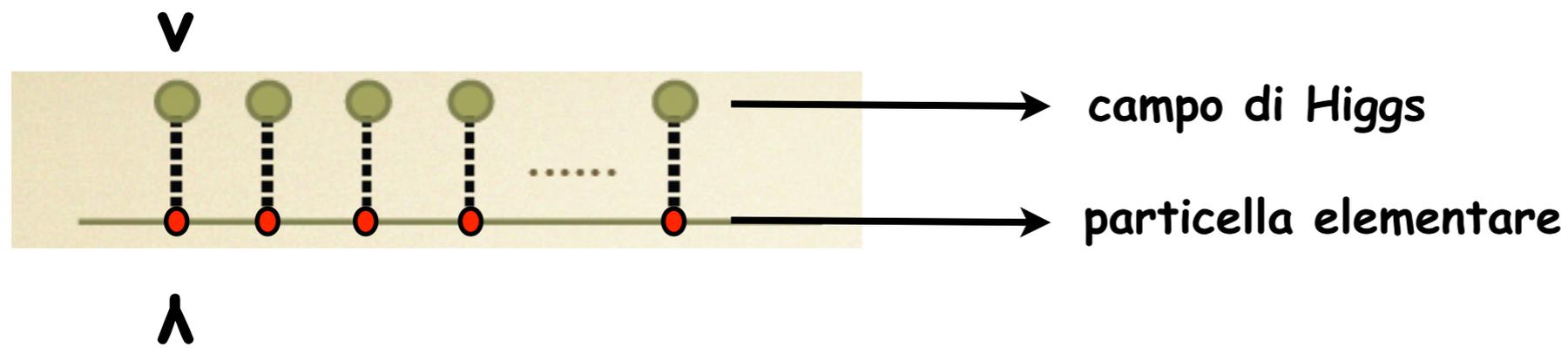
Il campo di Higgs e' una sorta di mezzo che pervade tutto l'universo, le particelle elementari acquistano quell'inerzia tipica della massa a causa delle interazioni con questo campo



← campo di Higgs nel vuoto
(Cocktail del Conservative Party)

Particella massiva
(Margaret Thatcher che tenta di spostarsi tra la folla)





La quantità "v" è una proprietà del campo di Higgs
 "λ" è invece una proprietà della particella elementare
 che determina l'accoppiamento con il campo di Higgs
 particelle molto massive hanno grande λ

$$m \propto \lambda v$$

La domanda perché le particelle elementari hanno massa
 diventa quindi perché hanno accoppiamento $\lambda \propto m/v$ con il
 campo di Higgs

però abbiamo almeno un meccanismo che spiega come le
 particelle acquistino massa

Vincoli sulla massa dell'Higgs

Limite sperimentale: $m_H > 114 \text{ GeV}$ (LEP)

Da relazioni che legano la massa dell'Higgs a parametri del Modello Standard possiamo ipotizzare che con buona probabilità

$$m_H < 200 \text{ GeV}$$

La finestra è quindi piuttosto stretta
possiamo essere confidenti che LHC dirà la parola definitiva sull'Higgs nei prossimi anni (a meno che il Tevatron non lo faccia prima).

Se non si trova nulla segnale certo di
fisica oltre il Modello Standard

Dove sta la gravita' ?

Come abbiamo visto la gravita' a livello della fisica delle particelle sembra essere del tutto trascurabile.

Nondimeno una teoria completa dovrebbe includerla anche perche' ad altissime energie questa forza diventa confrontabile alle altre.

Al crescere dell'energia si arriva ad un regime in cui gli effetti quantistici diventano importanti, la teoria classica della relativita' generale deve cedere il passo ad una teoria quantistica della gravita' che pero' al momento non esiste.

Ma quali sono queste energie?



La scala di Planck

La scala di Plank

Per capire la scala di Plank dobbiamo introdurre il poco rassicurante concetto di buco nero.



Questo concetto e' ben definito anche classicamente: ogni pianeta ha una ben definita velocita di fuga che dipende dalla massa M e dal raggio R del pianeta (in definitiva dalla gravita' sulla superficie).

Usando la conservazione dell'energia possiamo ricavare la velocita' di fuga imponendo l'annullamento dell'energia totale di un corpo di massa m che tenta di allontanarsi dalla superficie:

$$E_{tot} = E_{kin.} + E_{pot.} = \frac{1}{2}mv_f^2 - G\frac{mM}{R} = 0$$

$$\frac{1}{2}mv_f^2 = G\frac{mM}{R} \quad v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Se $v_f = c$ nulla puo' sfuggire ed abbiamo un buco nero (BH)
 Il raggio del BH si chiama raggio di Schwarzschild ed e'
 definito per ogni corpo di massa M :

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \quad \text{Nel caso della terra } R_S = 3\text{mm!}$$

La tipica scala alla quale gli effetti quantistici diventano importanti e' definita dalla lunghezza d'onda Compton: $\Lambda_C = \frac{h}{Mc}$

Gli effetti quantistici della gravita' diventano importanti quando queste due grandezze sono confrontabili

Scala di Plank definita come $\Lambda_C = R_S$

$$M^2 = \frac{hc}{2G} \quad E = Mc^2 \quad E_P = \sqrt{\frac{hc^5}{2G}} \approx 10^{19} \text{ GeV (Energia di Plank)}$$

$$\Lambda_P = \sqrt{\frac{2Gh}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ cm (Lunghezza di Plank)}$$

Alla luce di quanto visto

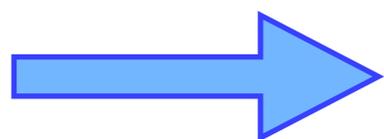
effetti gravitazionali possono essere visti ad LHC?

NO!

siamo enormemente lontani dal regime in cui la gravita' diventa confrontabile con le altre interazioni

A meno che non intervengano profonde modificazioni alla legge di gravita' su scale dell'ordine di qualche decina di micron (limiti sperimentali attuali sulla legge di gravita')

Extra dimensioni e possibilita' di produzione di buchi neri ad LHC

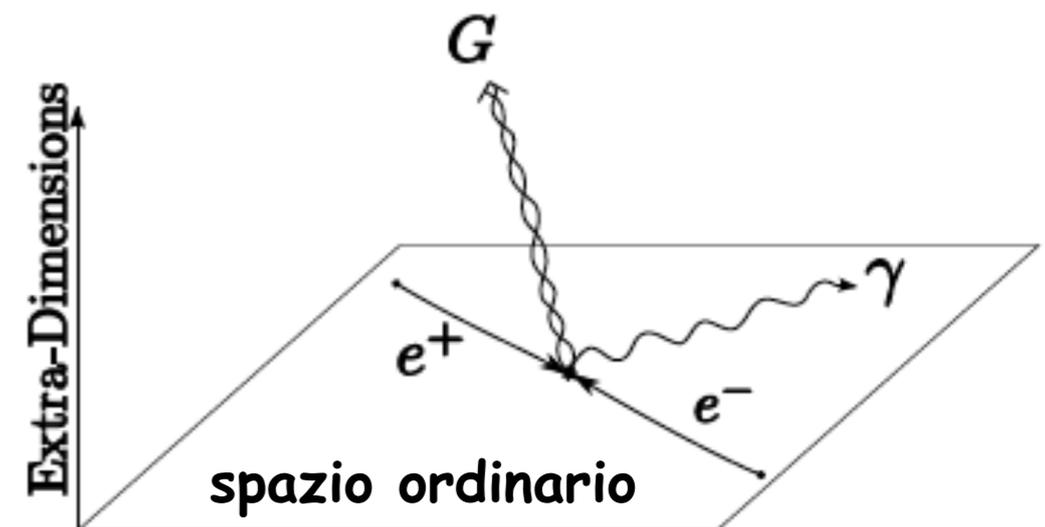


Large extra dimensions

La gravita' e' molto ben controllata a grandi distanze, dove lo spazio tempo e' certamente 4-dimensionale.

Ma molto meno bene a piccole distanze (~ 0.1 mm o meno). Quindi non si puo' escludere che esistano extra dimensioni (LED) a queste scale che modifichino il comportamento classico della gravita' a piccole distanze. Queste teorie ipotizzano che le interazioni e le particelle del modello standard siano cieche a queste dimensioni extra e solo la gravita' possa vederle.

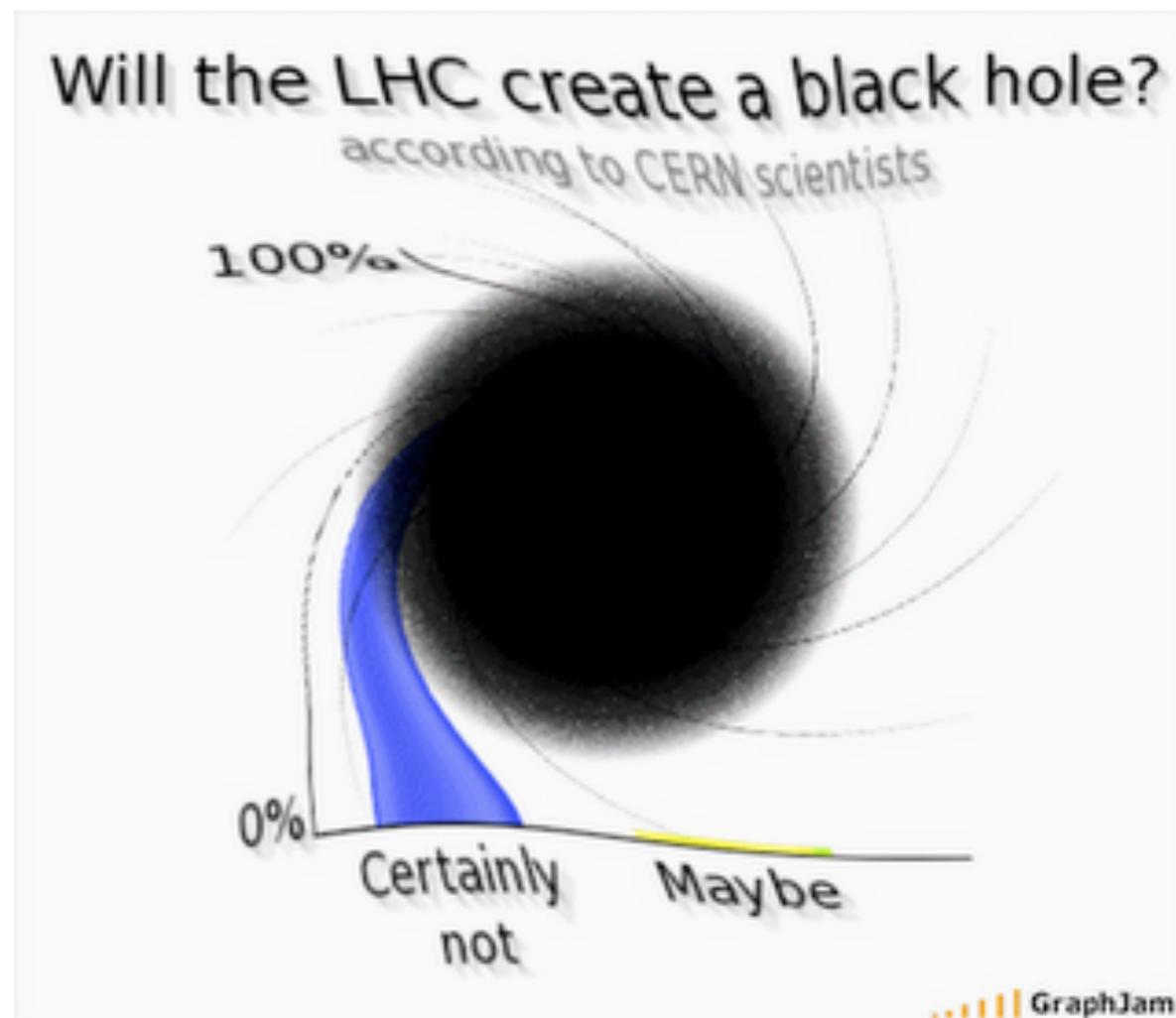
Una parte del campo gravitazionale sfugge in queste dimensioni extra, questo sarebbe il motivo per cui noi lo vediamo cosi' debole. Piu' grande e' il numero delle LED ed il loro raggio, maggiore e' l'intensita' della gravita' a livello microscopico.



Ci possono essere condizioni non ancora escluse sperimentalmente per cui la scala della gravita' scenda di 16 ordini di grandezza fino all'ordine del TeV consentendo la produzione di mini-BH ad LHC.

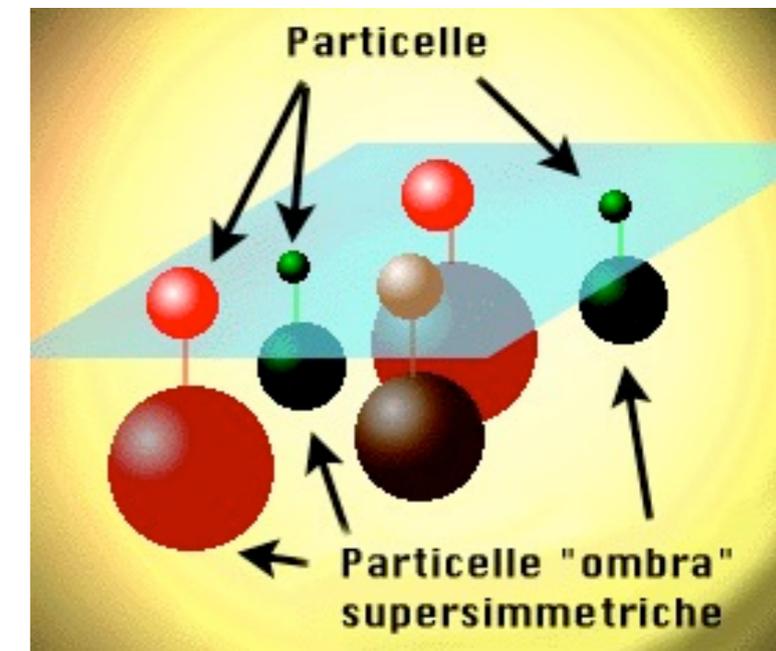
Secondo i proponenti il vantaggio di queste teorie sarebbe quello di eliminare l'innaturale differenza di scala che c'e' tra la gravita' e le altre interazioni

D'altra parte sembrano costruzioni un po' artificiali che si insinuano nelle pieghe dei limiti sperimentali senza motivazioni solide (mio giudizio).



Magari pero' saro' costretto presto a ricredermi.....

Supersimmetria e materia oscura



Supersimmetria: ovvero simmetria tra materia e forze ipotizza che per ogni fermione del MS esista un superpartner bosone ed analogamente per i bosoni. Evidentemente la simmetria non e' esatta (visto che al momento non abbiamo osservato niente) per cui se esistono le particelle devono avere masse non ancora sperimentalmente accessibili.

Ha avuto molto successo negli anni passati quando si era convinti che la sua scoperta fosse a portata di mano.

Dopo tanti anni di ricerche senza successo l'entusiasmo si e' molto raffreddato, comunque costituisce sempre uno dei campi di ricerca piu' popolari ad LHC

Tra le altre cose fornisce un candidato naturale per la materia oscura: la superparticella piu' leggera che e' stabile e molto debolmente interagente

Asimmetria materia-antimateria

All'interno del Modello Standard le interazioni deboli introducono violazioni della simmetria di parità P (scambio destra-sinistra) e di coniugazione di carica C (scambio carica-anticarica).

La simmetria materia-antimateria coinvolge entrambe queste trasformazioni e viene indicata con CP .

Mentre C e P vengono largamente violate dalle interazioni deboli, la violazione di CP è molto più piccola.

La violazione di CP è responsabile del fatto che non osserviamo antimateria nel nostro Universo.

Grazie a questa asimmetria un piccolo surplus di materia è riuscito a sopravvivere alle annichilazioni materia-antimateria, producendo l'Universo così come lo conosciamo.

L'interazione debole come detto produce una piccola violazione di CP , che però non sembra sufficiente a giustificare la grande asimmetria osservata in natura.

Conclusioni

Il Modello Standard e' certamente una delle grandi conquiste del '900. Possiamo considerarlo la sintesi di un secolo di grandi scoperte scientifiche che e' cominciato con la crisi della Meccanica Classica e l'affermazione delle teorie della relativita' e della meccanica quantistica e finito con i grandi acceleratori di particelle che hanno permesso misure sperimentali di una precisione senza precedenti.

Tutte queste misure hanno dato una serie di conferme a questo quadro teorico e lo hanno reso estremamente solido.

Nondimeno in questo quadro ci sono tutta una serie di regolarita' ed accidenti che non possiamo accettare come semplici e pure coincidenze. Inoltre la gravita' e' fuori dal quadro.

Per tutte queste ragioni siamo convinti che sia necessaria una fisica oltre il Modello Standard.

Il nuovo millennio si e' aperto con un nuovo acceleratore l'LHC che ha significato un salto in energia enorme rispetto alle macchine della precedente generazione, le aspettative per i prossimi anni sono quindi enormi.

L'investimento e' stato ingente, ora e' arrivato il momento di raccogliere i frutti.