



Perché LHC?

Breve viaggio
nella fisica delle
particelle

Paolo Gambino
Università di Torino

Alla ricerca della semplicità

LHC è una straordinaria avventura: una sfida tecnologica senza precedenti, ma soprattutto un'**avventura intellettuale**

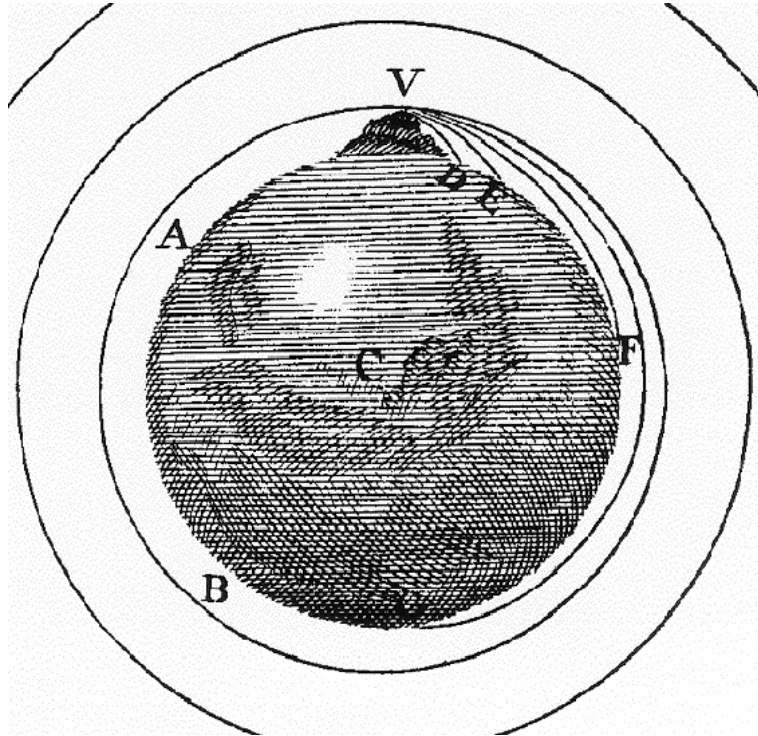
Esistono leggi fisiche più **fondamentali** di altre?

Certo! I fenomeni naturali possono essere spiegati *almeno in principio* da una catena di spiegazioni causali

Alla cui base sono una serie di **leggi fondamentali**:
Newton spiega Keplero, la MQ spiega le proprietà di atomi e molecole

Nella storia della fisica ciò che è fondamentale abbraccia un arco sempre più ampio di fenomeni **unificandoli**

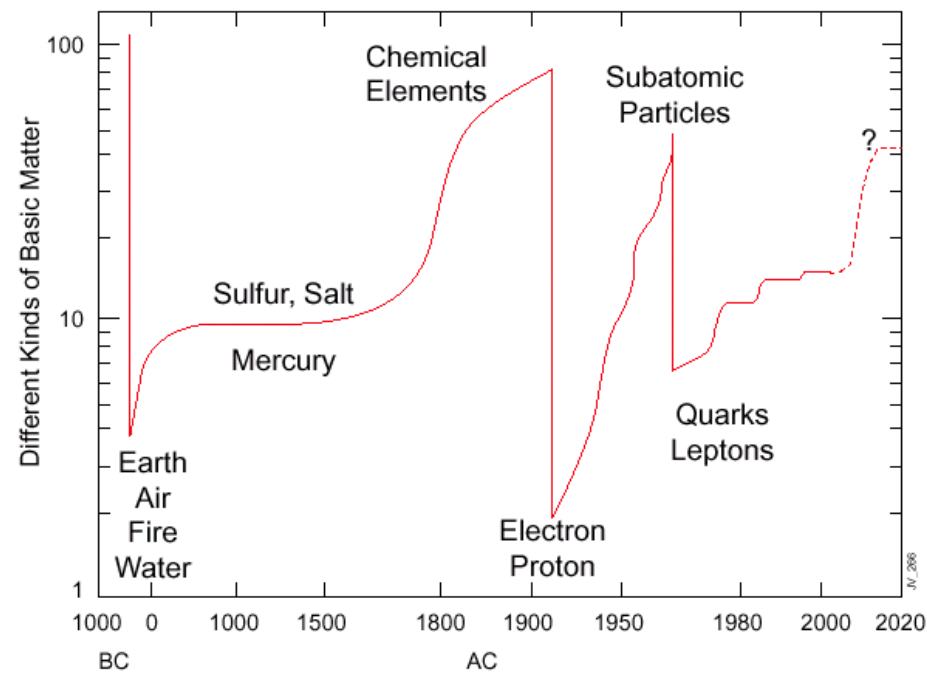
Il cammino dell'unificazione



**Newton con la teoria della gravitazione unifica
(descrive con le stesse leggi) fenomeni terrestri e celesti**

Ricerca di semplicità e costituenti elementari

Constituents of Matter



**Oggi tocca alla fisica delle particelle
chiarire le leggi fondamentali della natura**

Le interazioni fondamentali



Le particelle di materia interagiscono tra loro scambiandosi *bosoni*
la forza può essere attrattiva o repulsiva
e il raggio d'azione dipende dalla massa del *bosone*

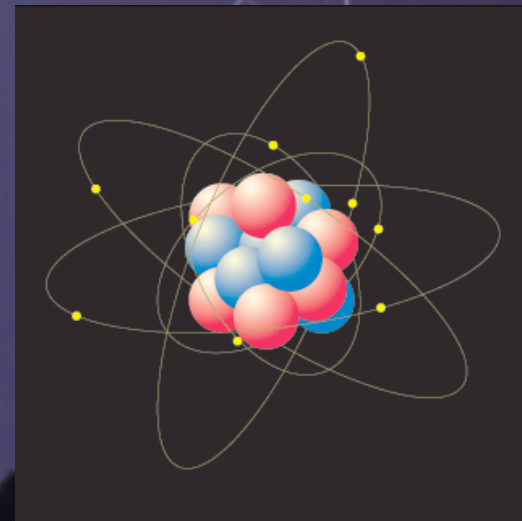
Le 4 interazioni fondamentali

- ➔ elettromagnetiche
- ➔ deboli
- ➔ forti
- ➔ gravitazionali

Elettromagnetismo

Forza elettromagnetica

- tiene insieme atomi e molecole
- spiega tutti i fenomeni em & ottici
- raggio d'azione infinito
- schermata a grandi distanze
- mediata dal fotone



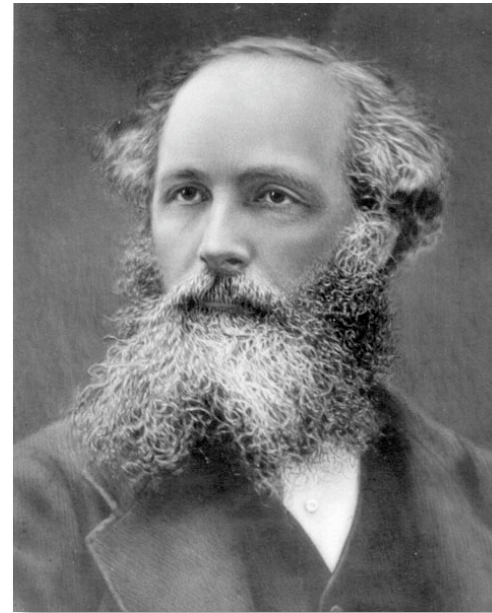
Le equazioni di Maxwell (1864)

$$\text{I. } \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{II. } \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

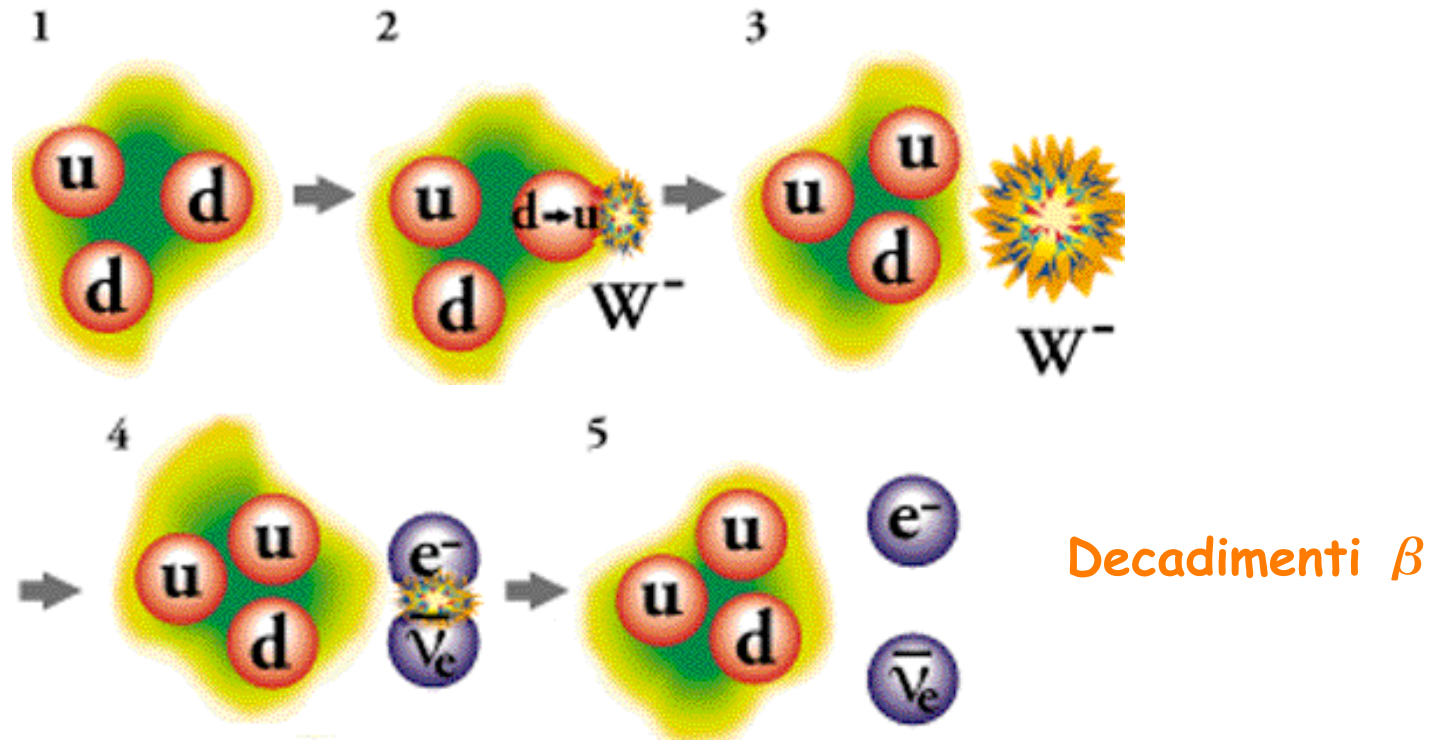
$$\text{III. } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\text{IV. } c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



Unificando elettricità e magnetismo, Maxwell spiega la natura della luce:
l'ottica diventa una branca dell'elettromagnetismo
Con le sue eq. inizia l'abbandono del meccanicismo in fisica

Le interazioni deboli

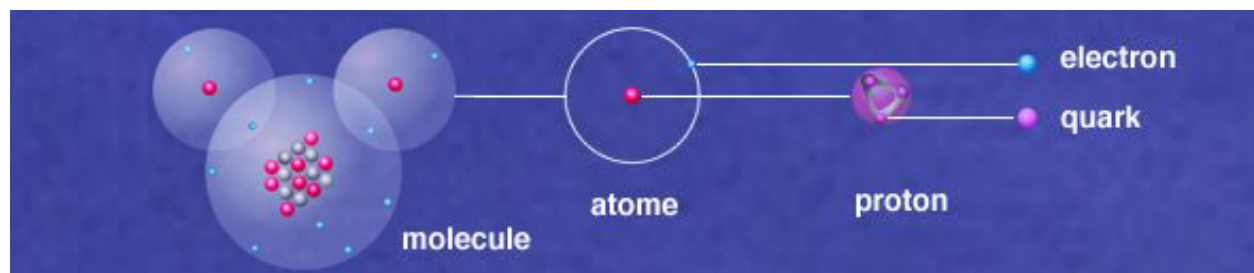


All'origine di radioattività naturale, sono deboli solo a bassa energia mediate da W e Z, raggio d'azione molto piccolo: il W e lo Z hanno massa pari a 80 e 90 masse del protone. Distinguono tra particelle destrorse e sinistrorse (violano la parità)

Le 4 interazioni fondamentali

- ➔ elettromagnetiche
 - ➔ deboli
 - ➔ forti
 - ➔ gravitazionali
- } elettrodeboli

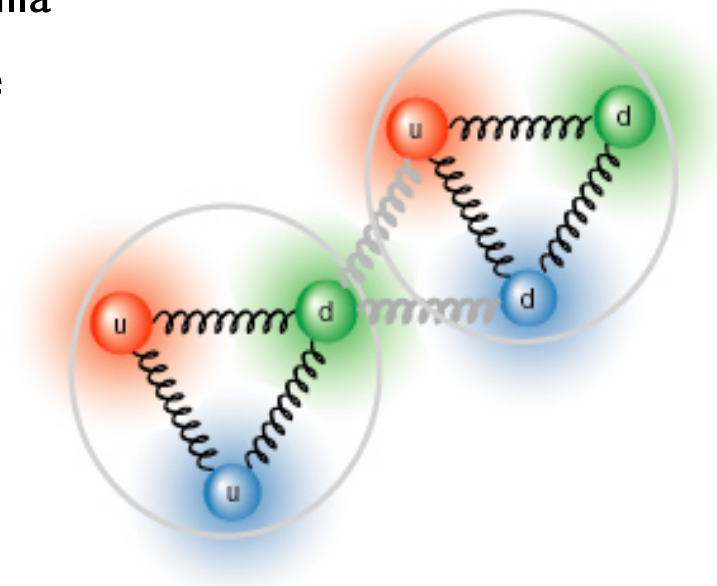
MODELLO
STANDARD



Non c'è ad oggi evidenza di una struttura dell'elettrone e dei quark

Interazioni forti

- Tengono insieme i nuclei atomici
- confinano i quark nei protoni e neutroni
- sono mediate da gluoni a massa nulla
- si indeboliscono a piccole distanze



Le 4 interazioni fondamentali

➔ elettromagnetiche

➔ deboli

➔ forti

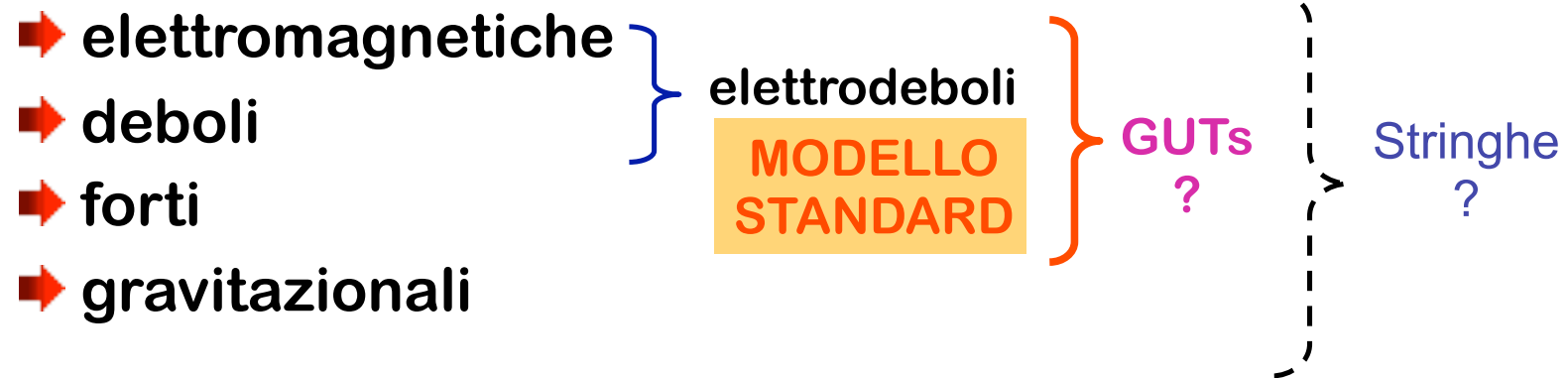
➔ **gravitazionali**

Sono molto molto più deboli delle altre interazioni

Relatività generale
Einstein 1916

Non esiste una teoria
quantistica consistente
della gravitazione

Le 4 interazioni fondamentali



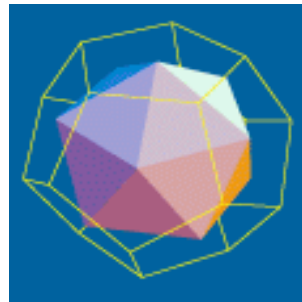
tutte le interazioni sono dettate da un principio di simmetria
(simmetria di gauge)

E' possibile *unificare* tutte le forze utilizzando simmetrie più ampie?

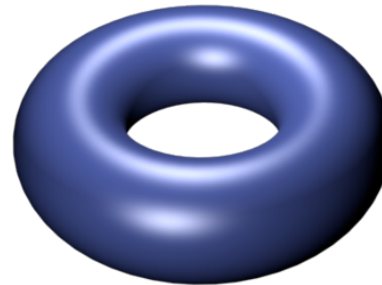
Simmetrie

In fisica parliamo di *simmetria* quando un sistema è invariante rispetto a una certa trasformazione (per es di coordinate)

simmetria
discreta



simmetria
continua



A ogni simmetria continua corrisponde la conservazione di una grandezza fisica. **Le simmetrie dello spazio tempo determinano le costanti del moto:** inv. per traslazioni → conservazione del momento

La simmetria detta la dinamica

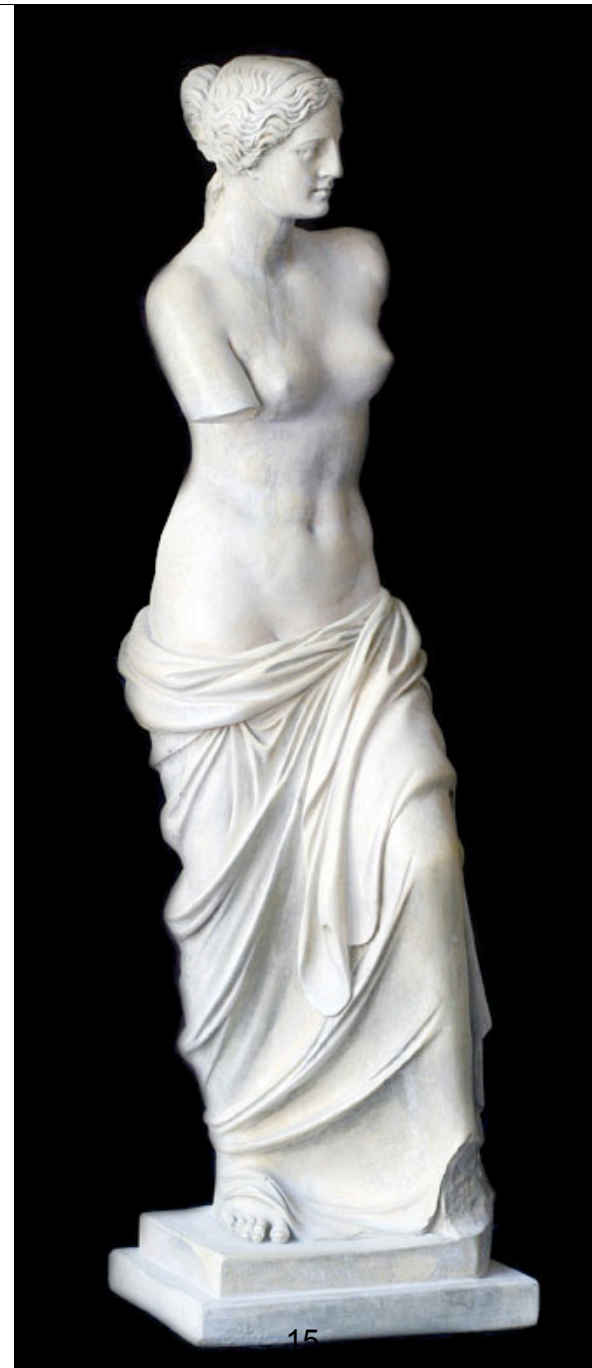
E' inevitabile che le leggi fisiche soddisfino certe simmetrie (inv per traslazioni, rotazioni...)

Ma oggi pensiamo che la simmetria determini *la forma* delle leggi fondamentali della fisica

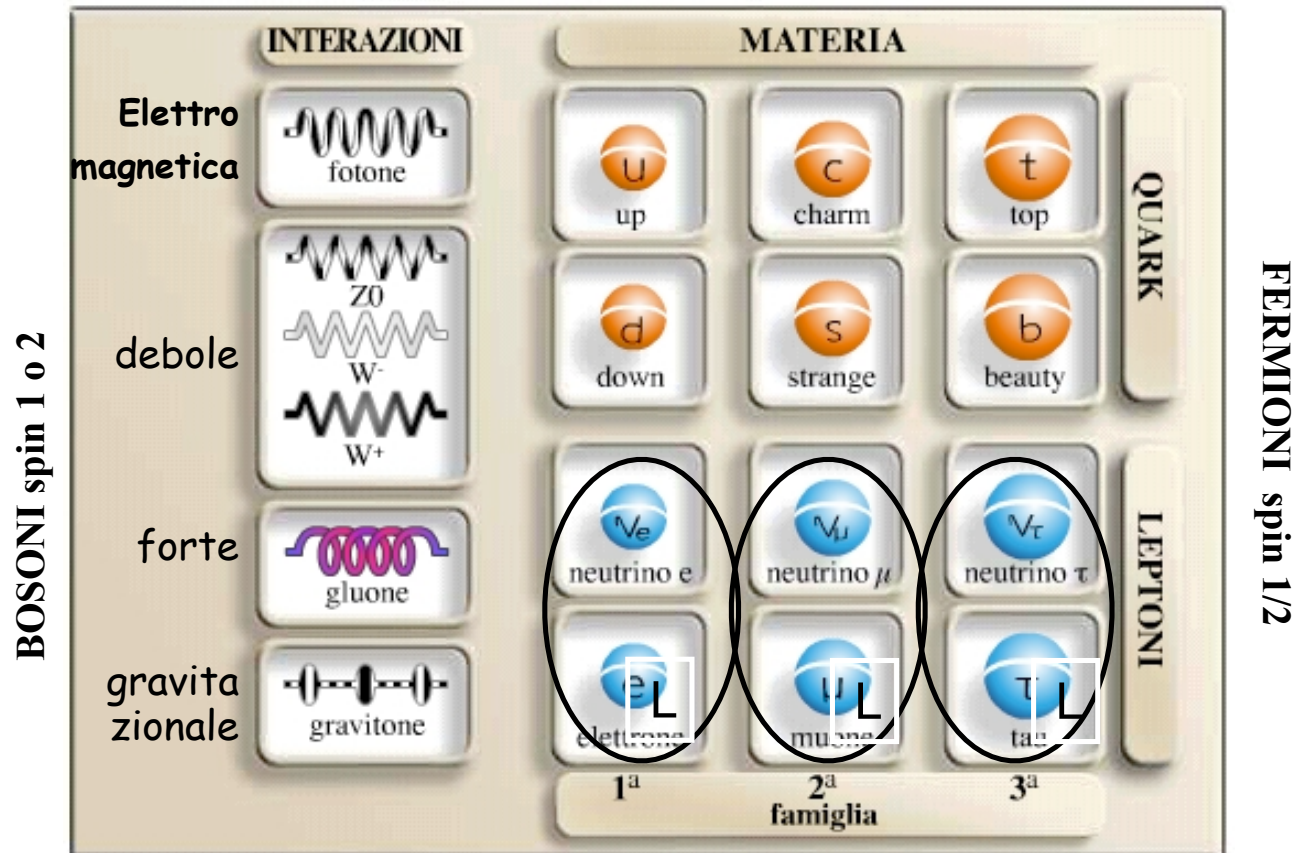
La **relatività generale** (1916)

postula l'invarianza delle leggi di natura per cambiamenti *locali* di coordinate spazio-temporali (principio di equivalenza)

Il **modello standard** è una *teoria di gauge* locale in cui l'invarianza è rispetto a rotazioni locali generalizzate in uno spazio interno



Materia e quanti d'interazione

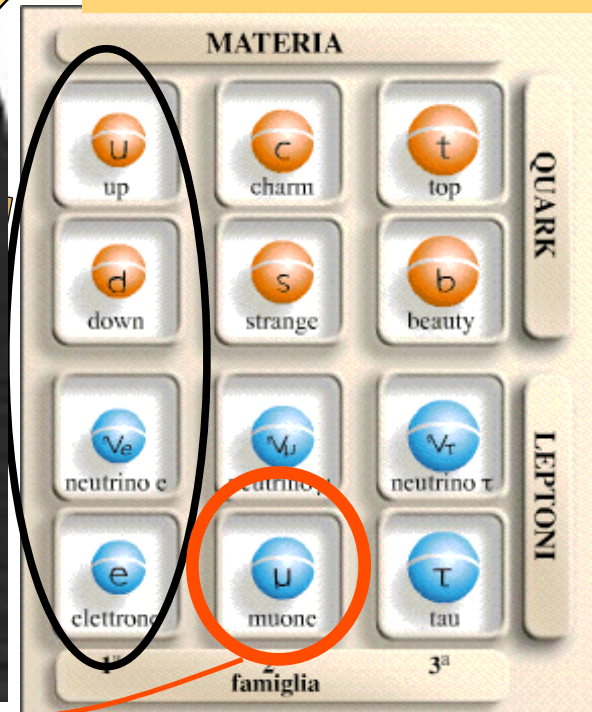
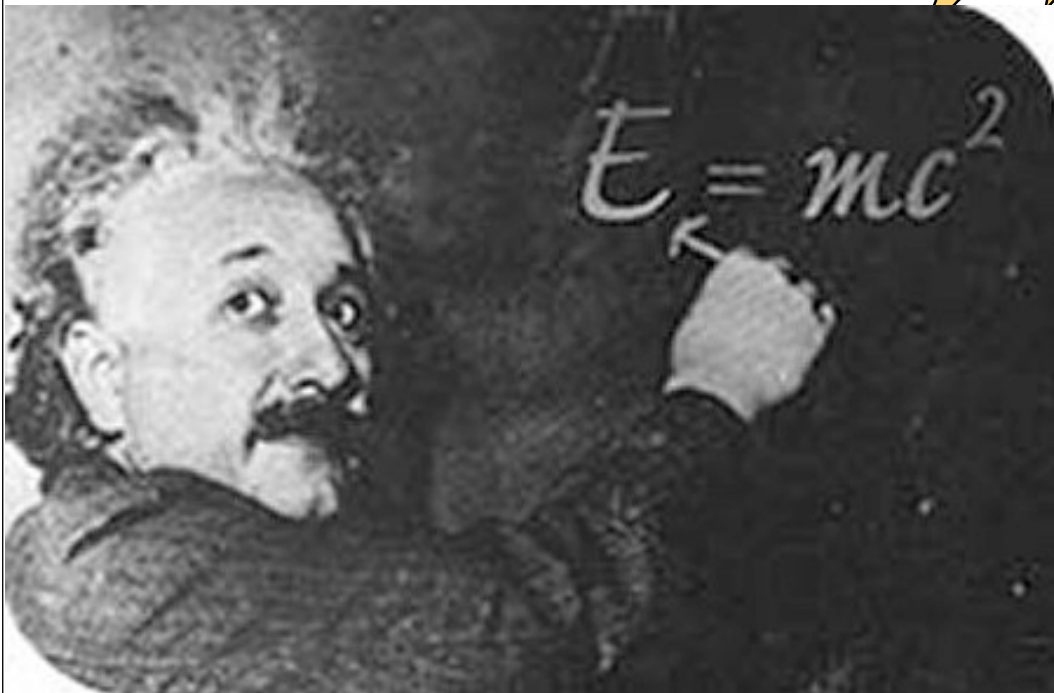


doppietti elettrodeboli: le due particelle sinistrorse sono manifestazioni diverse di una stessa particella

3 generazioni:

lo zoo delle particelle ridotto a mattoni fondamentali

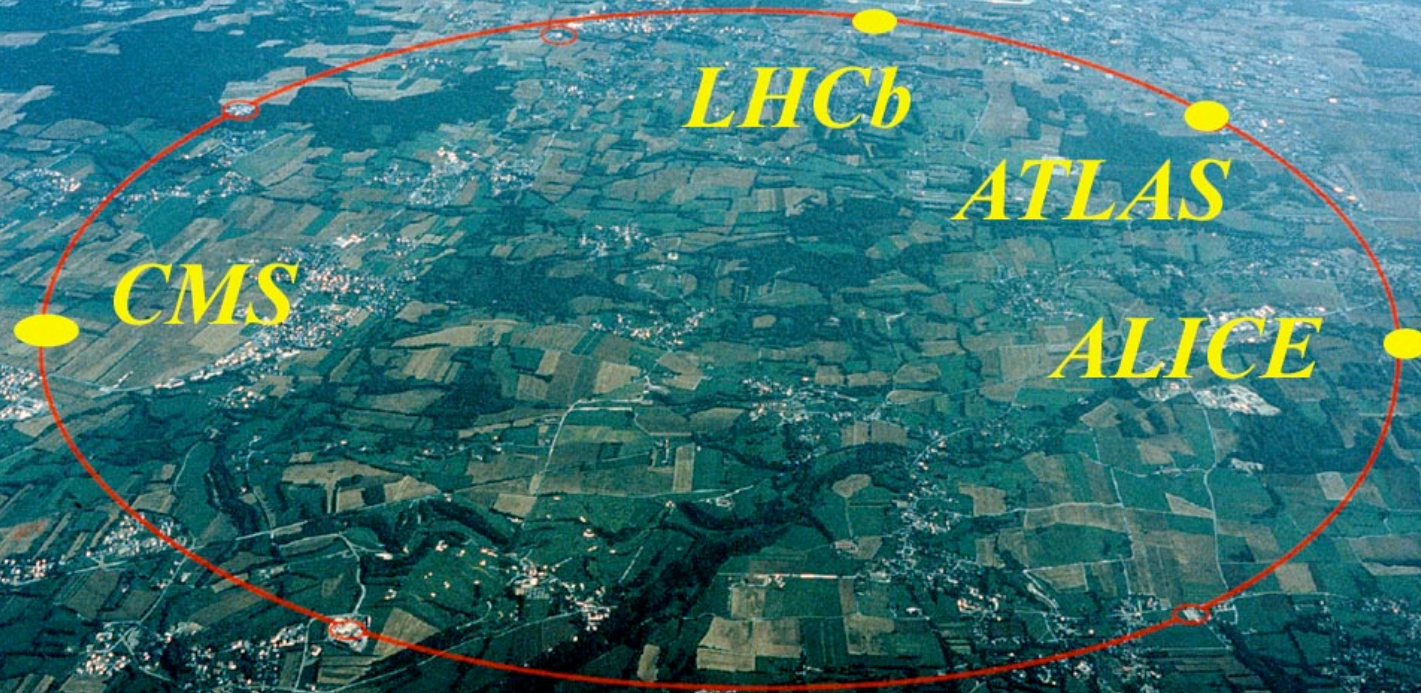
A prima vista solo la prima famiglia entra nella vita di tutti i giorni



Per osservare i mattoni più pesanti sono necessari gli acceleratori

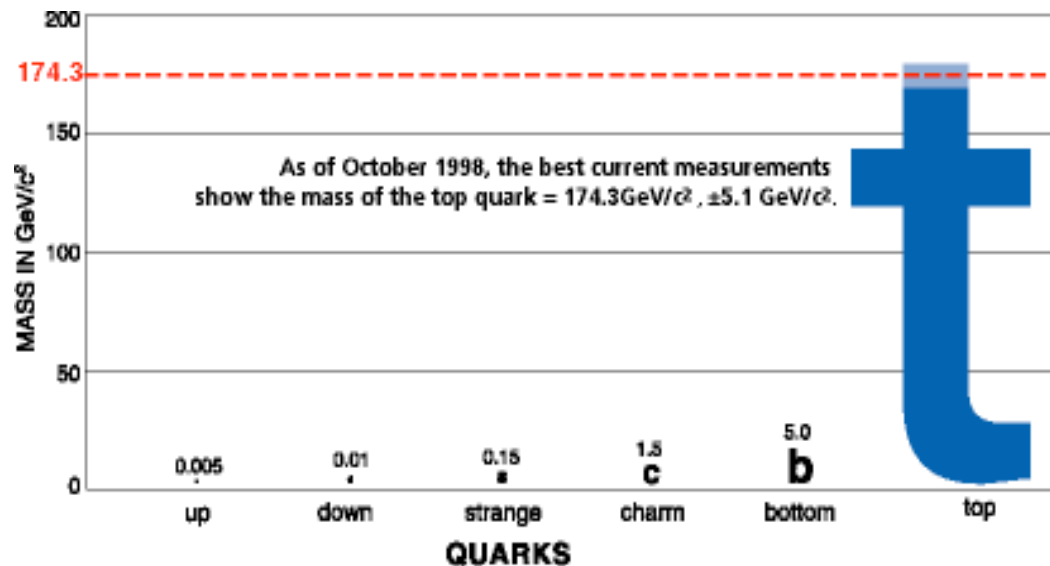
MontBlanc

LHC al CERN di Ginevra



Ma la simmetria c'è o non c'è?

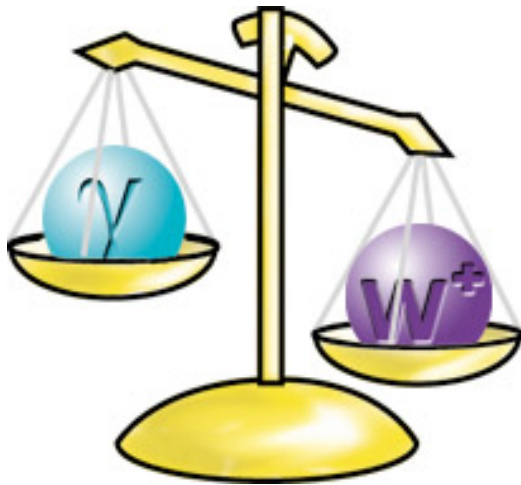
le interazioni di gauge del MS sono state confermate con grande precisione
Tuttavia la simmetria è **incompatibile** con le masse dei quark, leptoni e bosoni



Oggi crediamo che la **simmetria di gauge sia corretta** e abbia un significato profondo **nonostante** sia incompatibile con le masse

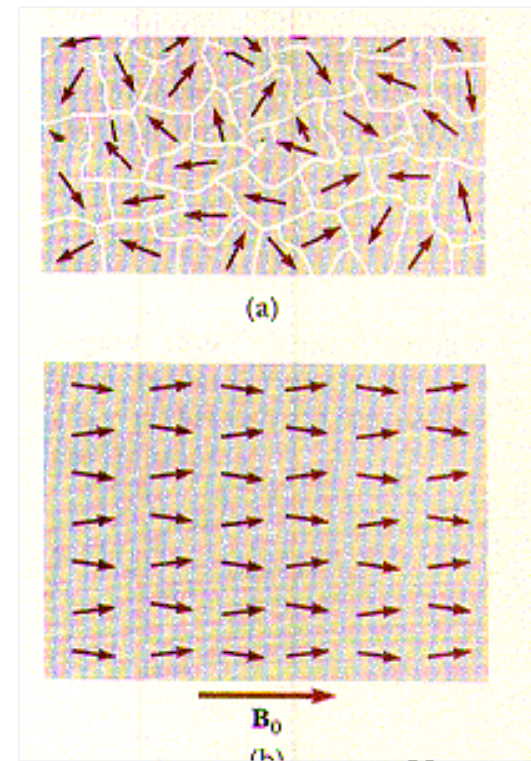
La simmetria nascosta

Il MS unifica interazioni deboli & elettromagnetiche, sebbene esse abbiano raggio d'azione molto diverso...



La simmetria che le unifica è nascosta!

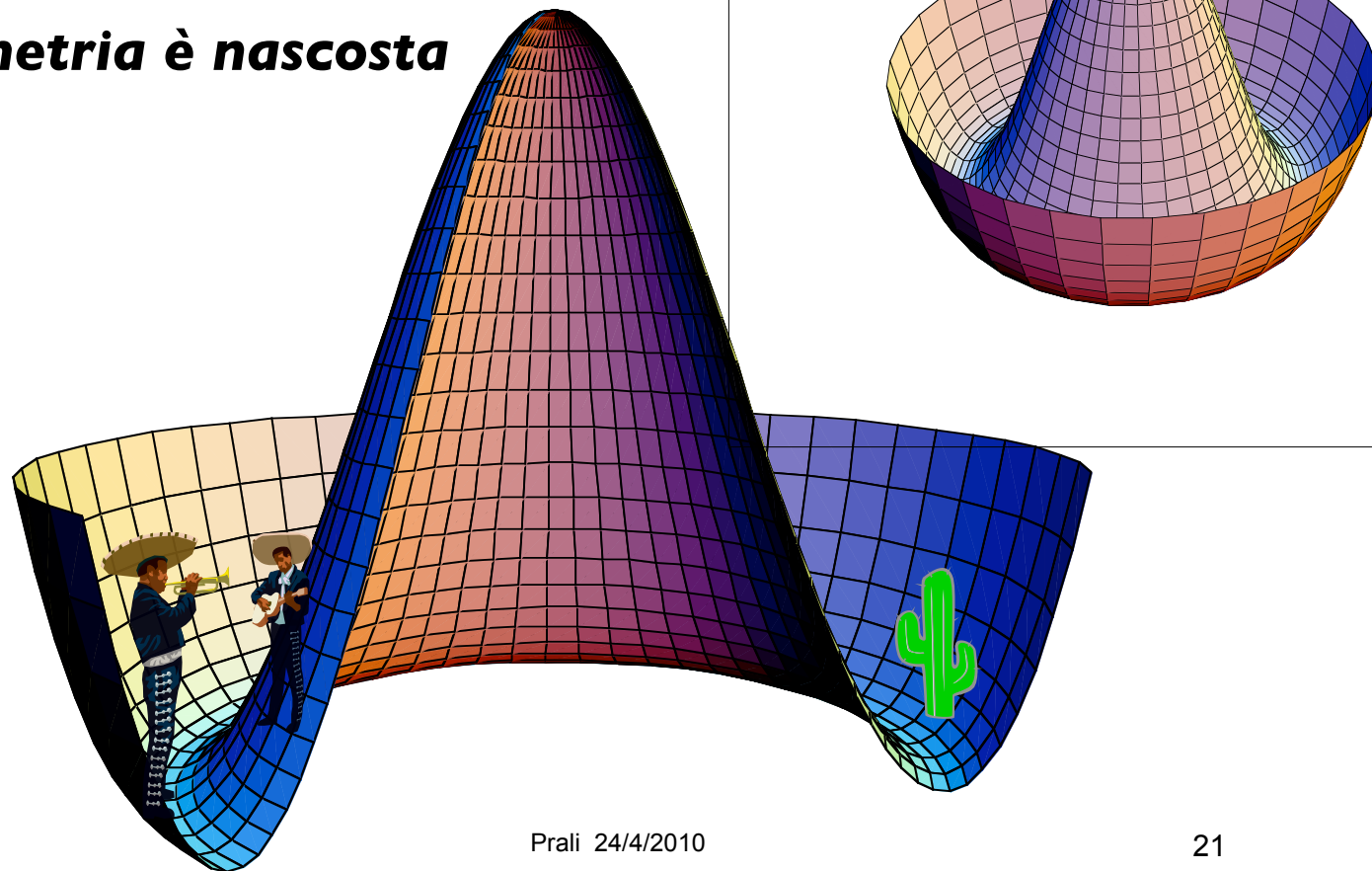
In natura è piuttosto comune che lo stato a più bassa energia non sia quello simmetrico: es. **ferromagnete** sotto la temperatura di Curie, l'orbita della terra non è simmetrica...

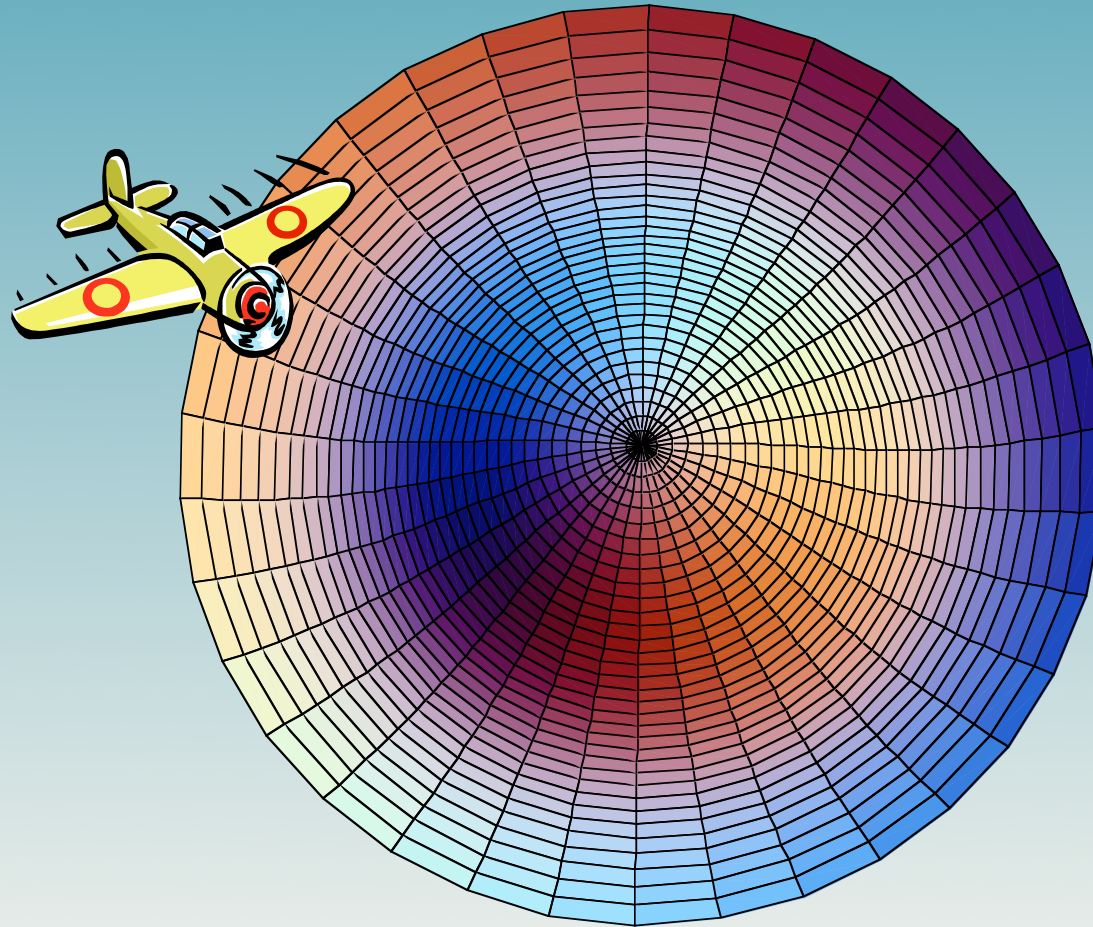


Rottura spontanea di simmetria

Lo stato di minima energia
(il vuoto) non è simmetrico:

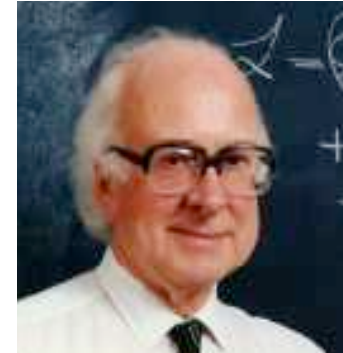
la simmetria è nascosta





Solo ad alte energie la simmetria nascosta diventa evidente

Il mistero dell'Higgs



Il vuoto deve perciò avere certe proprietà

$$m \neq 0 \iff \langle 0 | X | 0 \rangle \neq 0$$

Deve esistere un qualcosa X che rompe la simmetria del vuoto e interagendo con le particelle dà loro massa

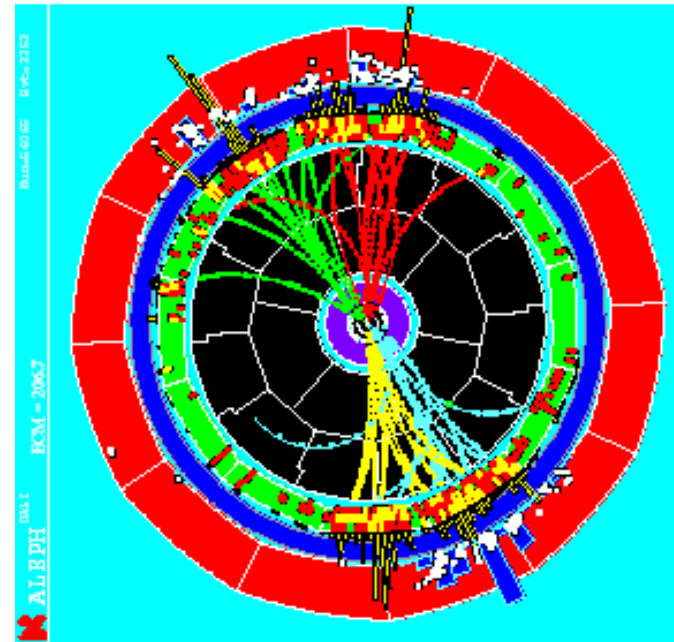
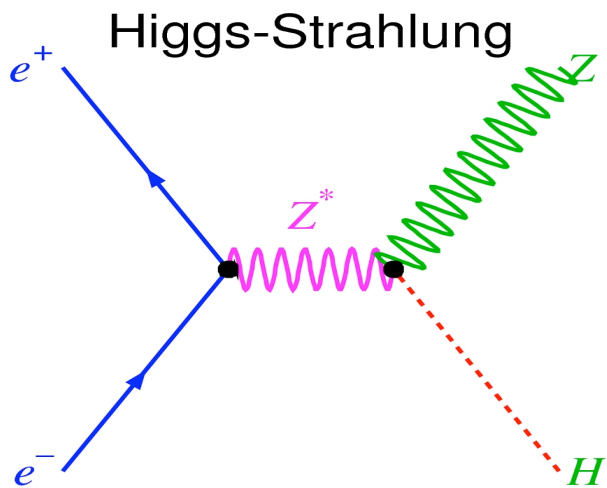
Può essere un nuovo campo elementare (BOSONE di HIGGS) o la manifestazione di una nuova interazione o di dimensioni extra

Abbiamo indicazioni a favore del bosone di Higgs.
La massa dell'Higgs è l'ultimo parametro sconosciuto del MS,
deve essere <600GeV

Il meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole è il problema centrale della fisica delle particelle attuale

Che cosa sappiamo dell'Higgs?

Ricerche dirette a LEP: $M_H > 114.4 \text{ GeV}$



Se esiste, il bosone di Higgs verrà scoperto a LHC

Perché non crediamo nel MS

Trovare l'Higgs è parte di un progetto più ambizioso:

capire l'origine della rottura di simmetria

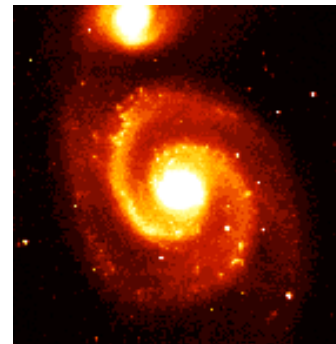
che genera le masse e la natura della scala elettrodebole

Il MS ha passato molti test, eppure anche se l'Higgs venisse trovato

- ✓ troppi parametri, 3 repliche senza spiegazione
- ✓ **incompleto: e la gravità? Perché è così debole?**
- ✓ non prevede masse per i **neutrini**, non ne spiega la piccolezza
- ✓ non spiega la **materia oscura** osservata, nè la bariogenesi



Materia oscura



Materia non oscura

La scommessa di LHC

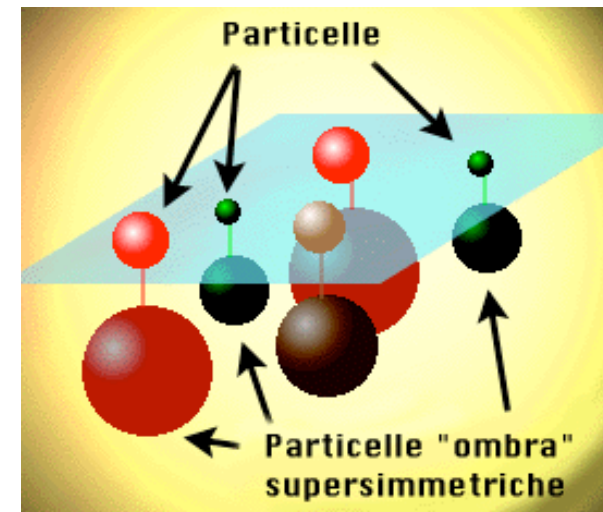
Il MS deve avere un completamento che ancora non conosciamo. Ma è una teoria protetta da effetti di scale alte (renormalizzabile).

L'estrapolazione del MS ad alte energie è problematica: la gerarchia (18 ordini di grandezza) tra scale di Fermi e di Planck è instabile proprio a causa dell'Higgs. La densità di materia oscura suggerisce novità a scale vicine

Ci aspettiamo **Nuova Fisica** sotto il TeV!

Per esempio **supersimmetria...**

...o delle **dimensioni nascoste...**





The way to the future