Il bosone di Higgs

L'elemento mancante del Modello Standard

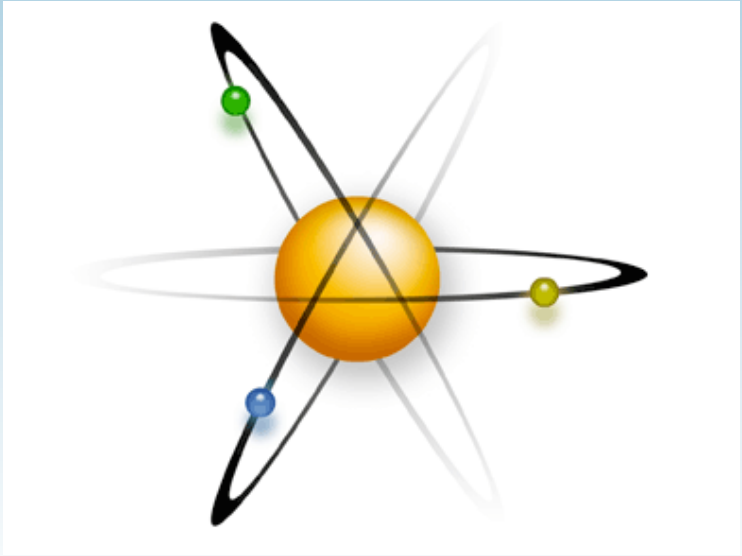
Massimo Passera
INFN Padova

Le 4 interazioni fondamentali

- elettromagnetiche
- deboli
- forti
- gravitazionali

Forza elettromagnetica

- tiene insieme atomi e molecole
- spiega tutti i fenomeni em & ottici
- raggio d'azione infinito
- mediata dal fotone (QED)



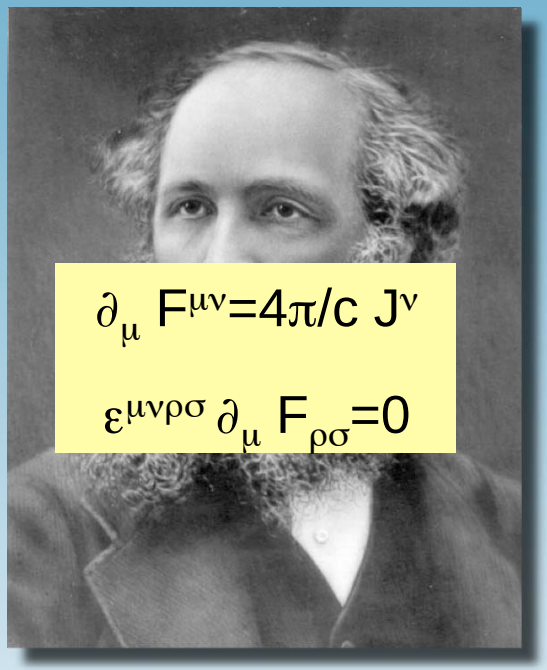
Le equazioni di Maxwell (1864)

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

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

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

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

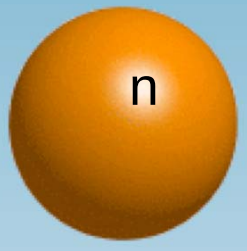


$\partial_\mu F^{\mu\nu} = 4\pi/c\, J^\nu$

$\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma}\, \partial_\mu F_{\rho\sigma} = 0$

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

Le interazioni *deboli*



Decadimenti β Decadimento del muone

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

Le forze forti

- tengono insieme i nuclei atomici
- confinano i quark nei protoni e neutroni
- sono mediate da gluoni (QCD)
- si indeboliscono a piccole distanze

Le 4 interazioni fondamentali

- elettromagnetiche
- deboli
- forti
- gravitazionali

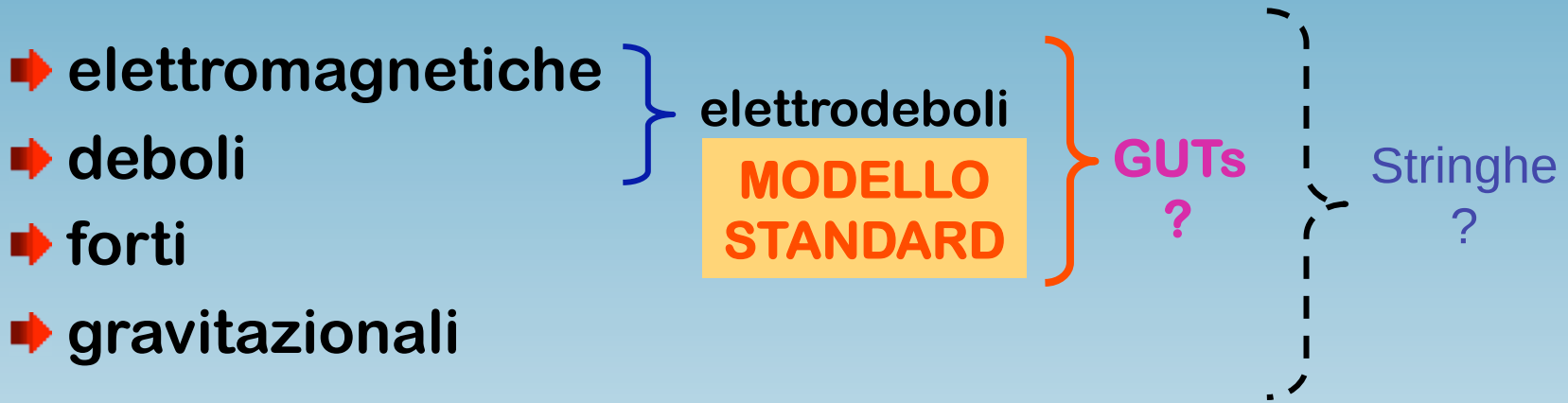
Sono molto molto più deboli delle altre interazioni

Relatività generale
Einstein 1916

Non esiste una teoria quantistica consistente della gravitazione

Le 4 interazioni fondamentali

- elettromagnetiche
- deboli
- forti
- gravitazionali

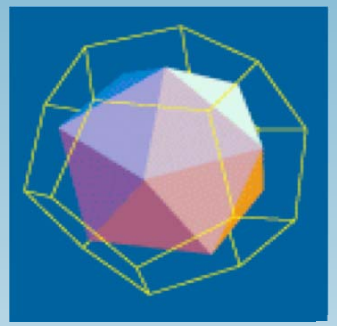


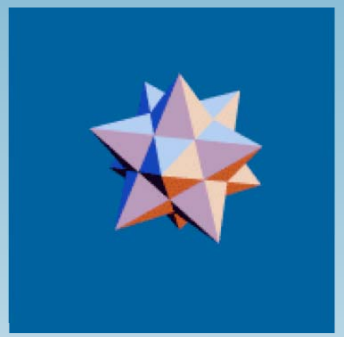
Tutte le interazioni dettate da un principio di simmetria (*simmetria di gauge*)

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)
Le simmetrie possono essere *discrete*





oppure *continue*

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

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

In teoria relativistica dei campi l'invarianza per un cambio di fase corrisponde alla conservazione della carica elettrica

$$\phi(x) \rightarrow e^{i\alpha}\phi(x) \quad \text{GLOBALE} \Rightarrow \text{Conservazione carica}$$

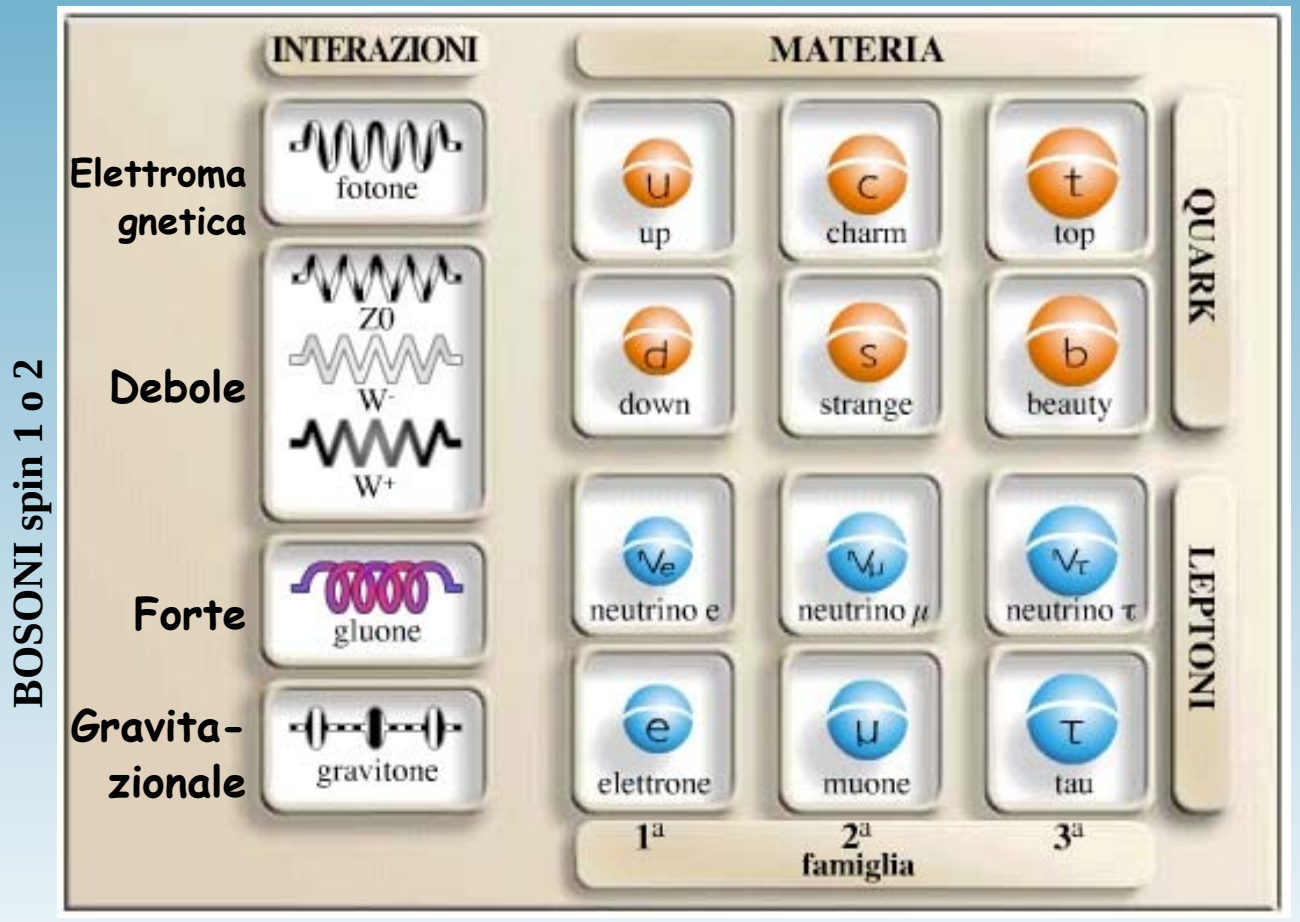
$$\phi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)}\phi(x) \quad \text{LOCALE} \Rightarrow \text{elettromagnetismo}$$

La richiesta di invarianza per cambiamenti locali di fase impone l'accoppiamento con il campo elettromagnetico

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

Un procedimento simile sta alla base della relatività generale (1916).

Materia e quanti d'interazione

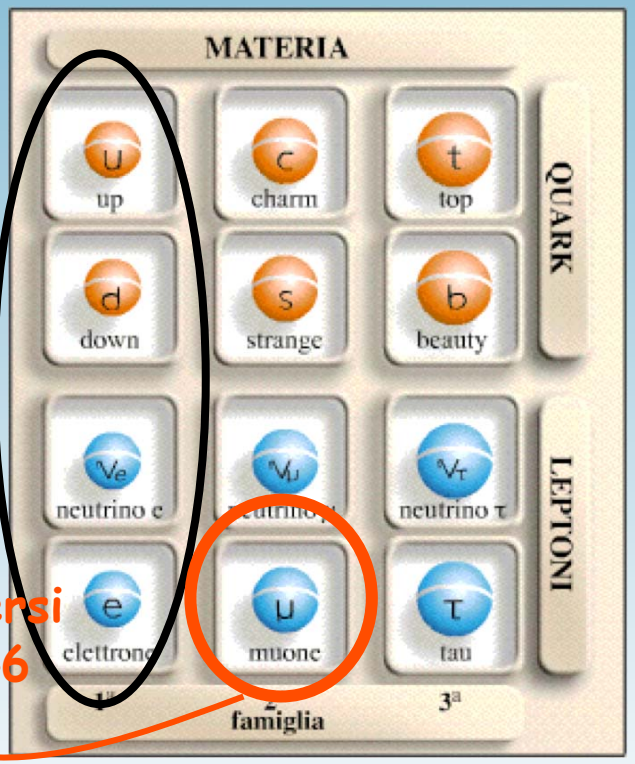


Non c'è ad oggi evidenza di una struttura dei leptoni e dei quark

3 generazioni:

lo zoo delle particelle ridotto a mattoni fondamentali

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



nei raggi cosmici: Conversi Piccioni e Pancini, 1946

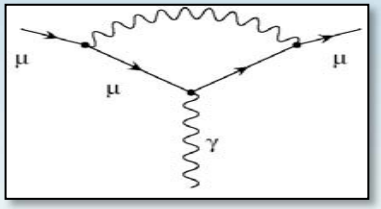
Per osservare i mattoni più pesanti sono necessari gli acceleratori

Due strade complementari per osservare gli effetti di nuove particelle:

Produzione diretta ma anche Ricerca indiretta

Gli effetti virtuali (loops) di particelle pesanti sono piccoli, ma utili:

Esempio: il momento magnetico anomalo del muone (g-2), misurato con precisione di 0.5ppm (!), è sensibile a possibili effetti di fisica al di là del MS



nuova fisica nel g-2 del muone? (forse sì...)

Segnali indiretti hanno sovente anticipato scoperte dirette (x es: top)

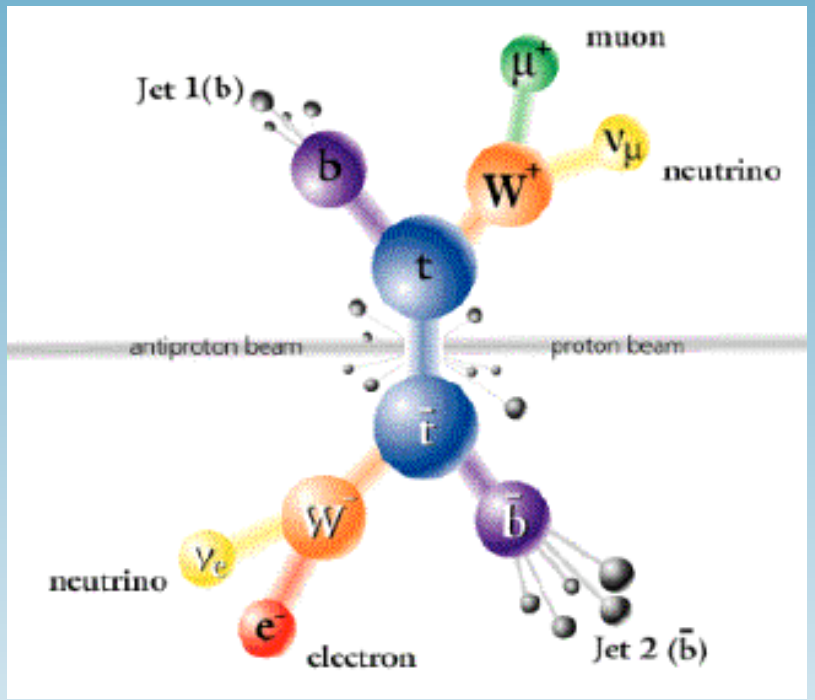
I test di precisione ed il quark TOP

11/1994: i fit alle misure di precisione (LEP ecc) indicano $M_{top}=178\pm11^{+18}_{-19}$ GeV

03/1995: Fermilab annuncia la scoperta del top. Oggi è:

$M_{top}=173.1 \pm 1.3$ GeV

Grande successo del MS e del programma sperimentale!

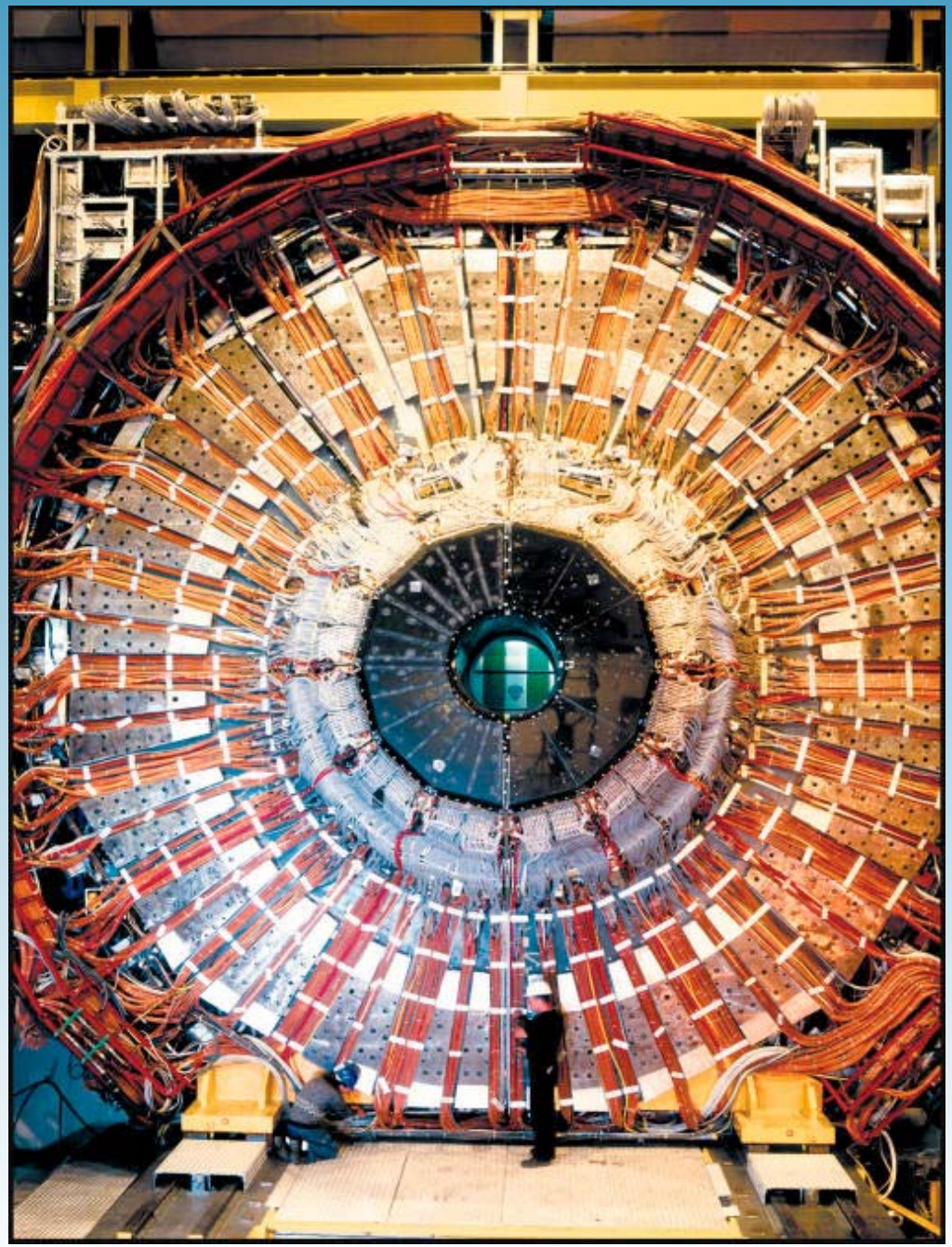


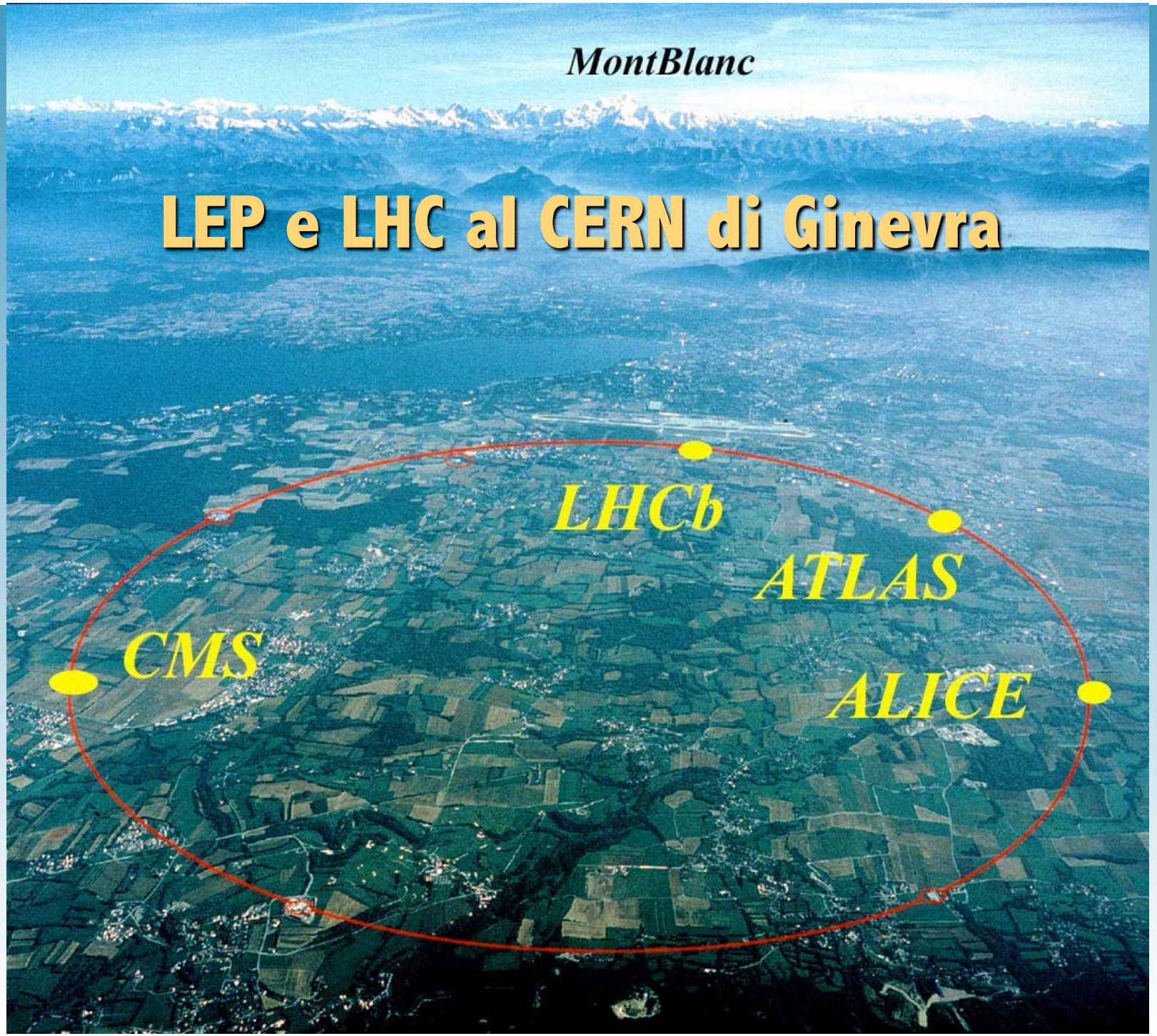
➡ Si può ripetere quest'analisi con il bosone di Higgs?

La sensitività a M_H è molto più debole (log M_H). See later...

La lezione di LEP

LEP non ha scoperto nuove particelle ma ha confermato le interazioni di gauge del MS con una fantastica precisione dello 0.1%!

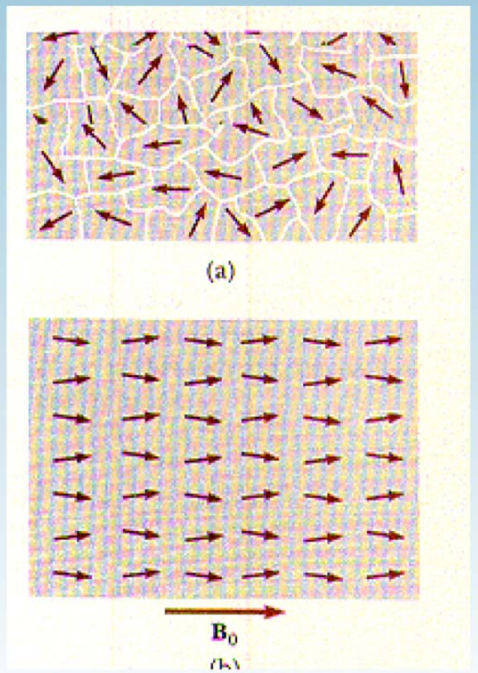



MontBlanc
LEP e LHC al CERN di Ginevra
LHCb
ATLAS
CMS
ALICE

La simmetria nascosta

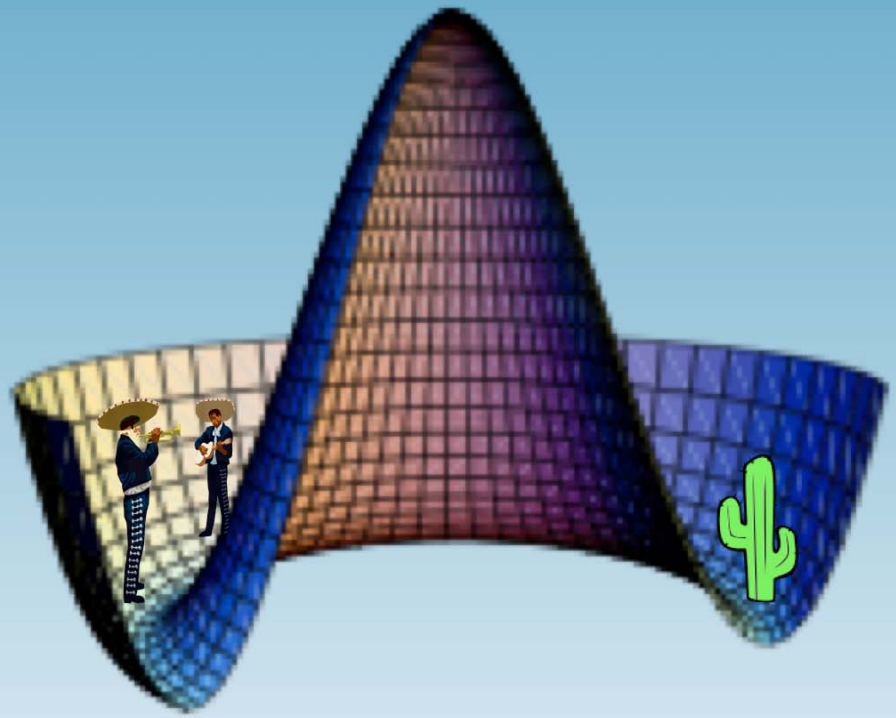
Il MS unifica interazioni deboli & elettromagnetiche. Ma se sono "unificate", perché ci appaiono così diverse? Esse hanno un raggio d'azione molto diverso, e crediamo che…

la simmetria che le unifica è "nascosta", cioè lo stato di minima energia (il vuoto) non è simmetrico



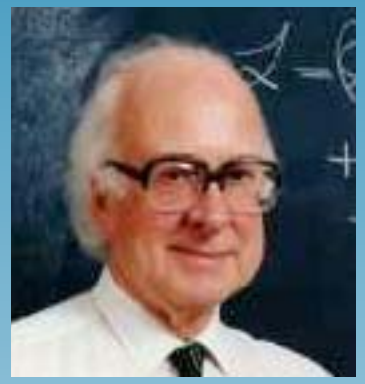
In natura è piuttosto comune che lo stato a più bassa energia non sia quello simmetrico: per esempio un **ferromagnete** sotto la temperatura di Curie

Rottura *spontanea* di simmetria



Crediamo che questo processo di rottura della simmetria sia l'origine delle masse delle particelle → ci sono buone probabilita' che LHC ci aiuti a capirle meglio!

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

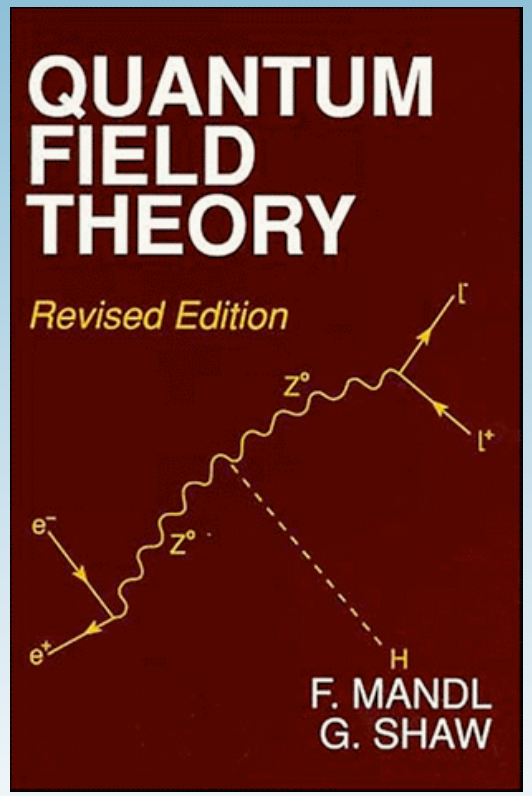
Può essere un nuovo campo elementare: il BOSONE di HIGGS
(o la manifestazione di qualcosa di più elaborato)

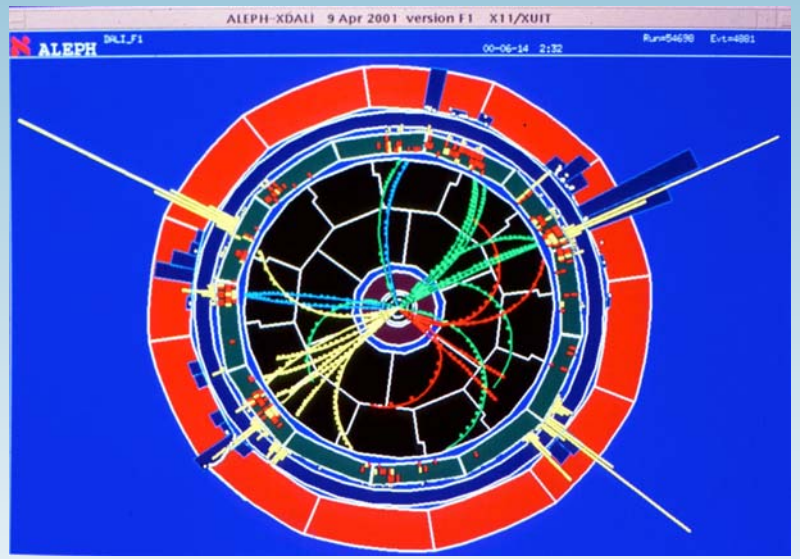
La massa dell'Higgs è l'ultimo parametro sconosciuto del MS.

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

Che cosa sappiamo dell'Higgs?

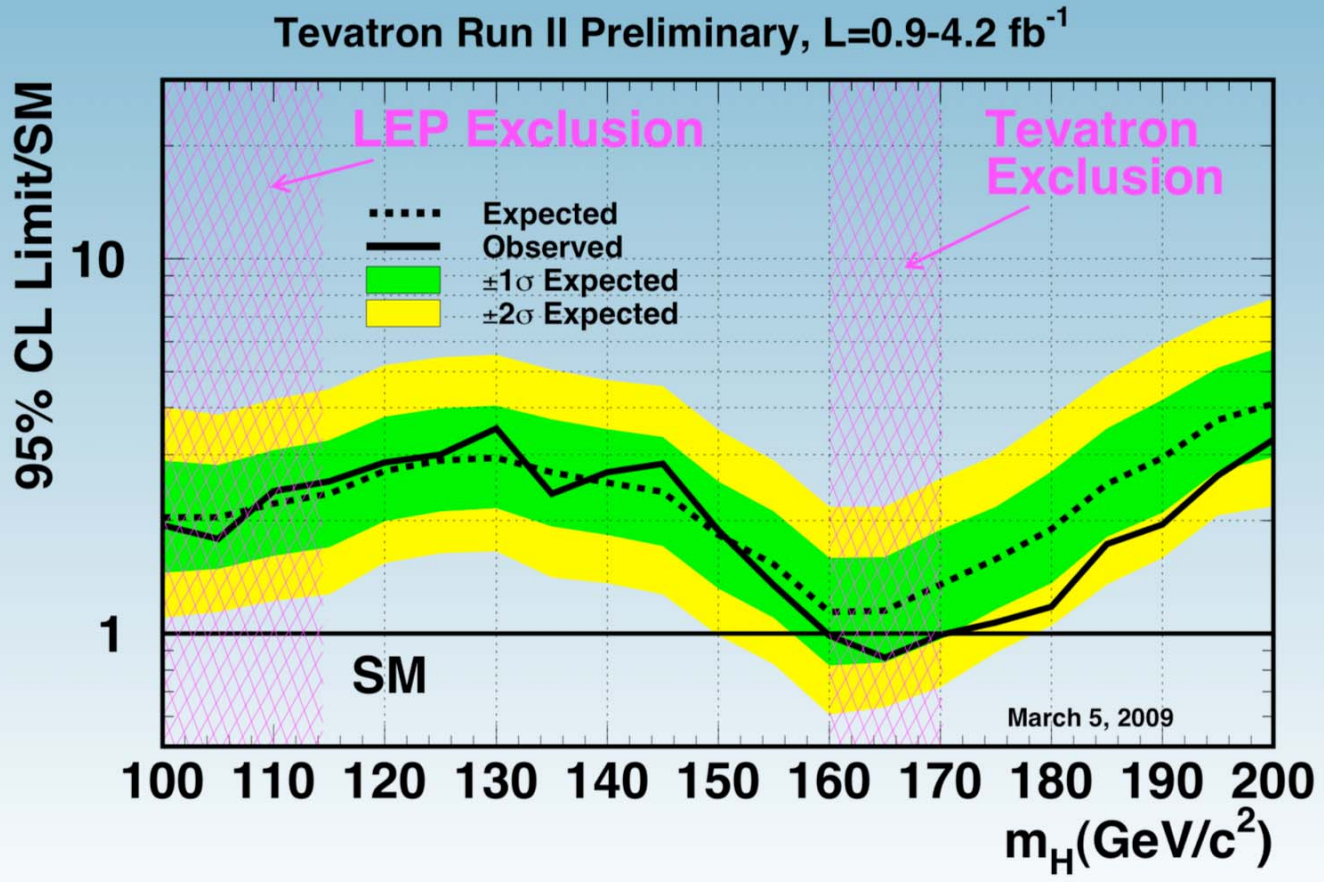
Ricerche dirette a LEP: M_H>114.4 GeV





Che cosa sappiamo dell'Higgs (II)

Ricerche dirette a TEVATRON:



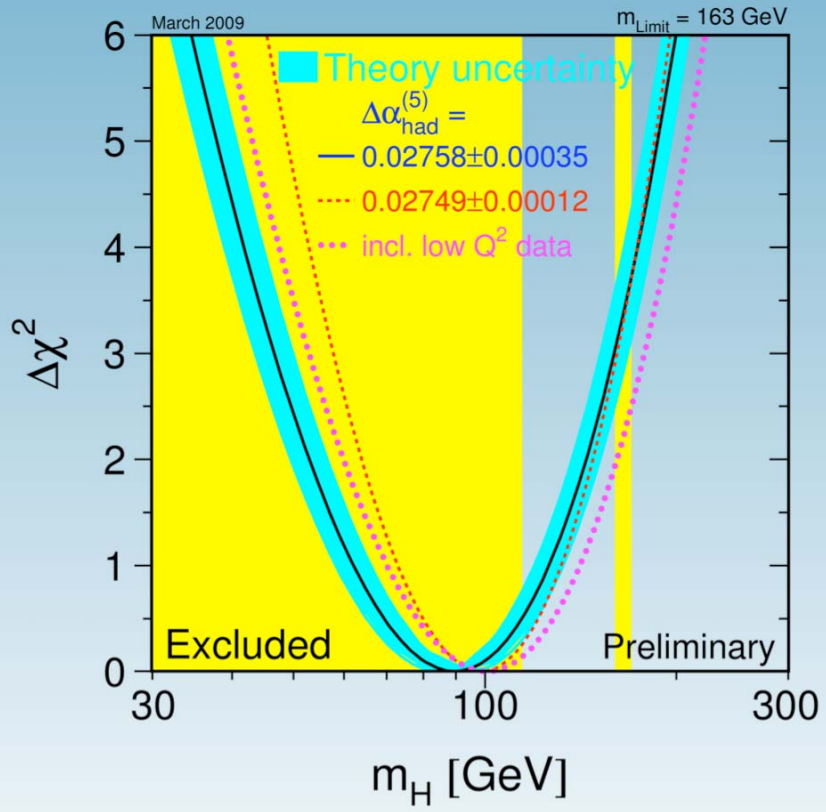
Che cosa sappiamo dell'Higgs (III)

La massa dell'Higgs è l'ultimo parametro sconosciuto del MS: dal confronto tra predizioni del MS (che dipendono da M_H) e misure sperimentali si ottengono limiti indiretti su M_H.

FIT alle osservabili elettrodeboli assumendo la validità del MS

Che cosa sappiamo dell'Higgs (IV)

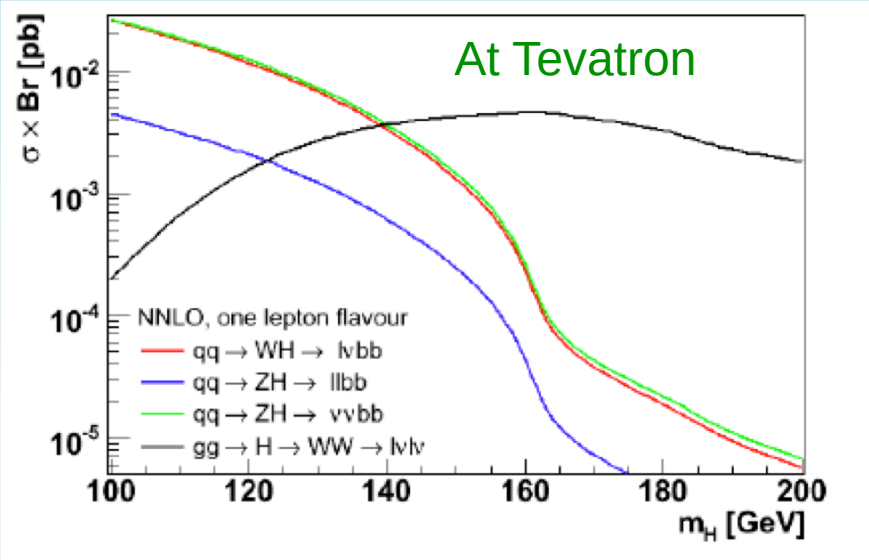
Determinazione indiretta: netta preferenza per un Higgs leggero (sotto i ~150 GeV).

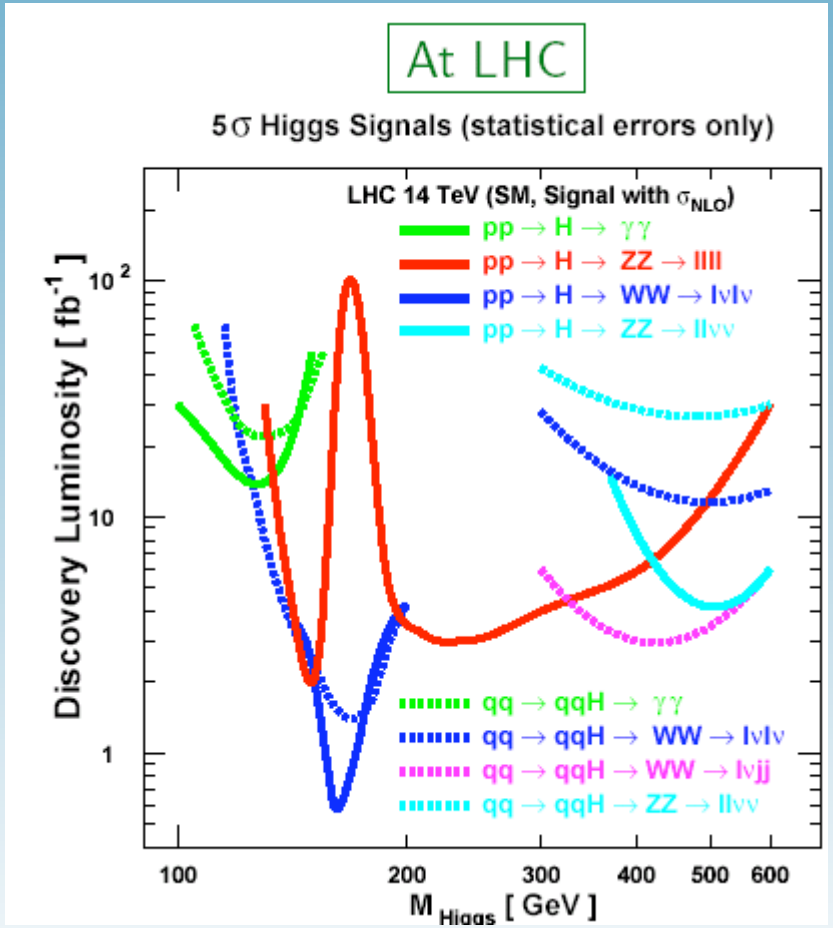


Da principi generali si ha anche un limite superiore di circa M_H < ~600 GeV.

Se c'è, l'Higgs verrà scoperto!

...come sentirete nei prossimi due talks





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. Perché 3 famiglie?
- 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

Il MS deve avere un completamento che ancora non conosciamo. La supersimmetria? Dimensioni nascoste?? Scoprendo l'Higgs, inizieremo a capire come completarlo.

The way to the future