

Introduzione al Modello Standard delle particelle elementari

Terza lezione

Marco Bonvini

INFN Sezione di Roma

MasterClass 2021

Laboratori Nazionali di Frascati

10 Marzo 2022



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di ROMA

Abbiamo visto che:

- le leggi fisiche si possono formulare tramite un **principio di minima azione**
- la teoria fisica è quindi identificata dalla lagrangiana \mathcal{L} che definisce l'azione

$$S = \int d^4x \mathcal{L}$$

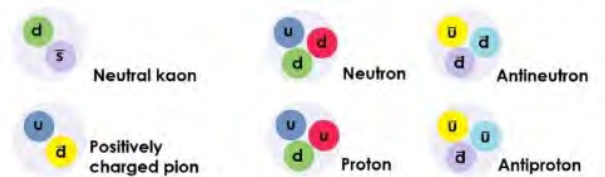
- nella teoria quantistica relativistica (teoria dei campi), ci sono i campi per
 - la materia (elettroni ψ , etc) che hanno spin $\frac{1}{2}$
 - le interazioni (fotoni A^μ , etc) che hanno spin 1
- le interazioni sono collegate alle simmetrie della lagrangiana:

simmetria locale (di gauge) \leftrightarrow interazione

- i campi di gauge hanno **massa nulla** per costruzione

L'interazione forte - SU(3)

Oltre agli elettroni ci sono altre particelle che formano la materia: i **quark**. *Protoni e neutroni*, che formano i nuclei atomici, sono composti di quark.



I quark hanno carica elettrica e *anche* un altro tipo di carica: il **colore**.

NB: “colore” è solo un nome, utile per fare un’analogia, ma nulla di più...

Ci sono tre colori base: **R**, **G**, **B**

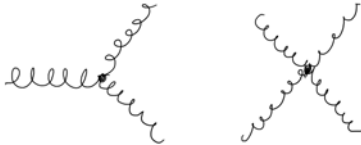
Ogni quark si trova in una combinazione di questi colori base, e la lagrangiana del Modello Standard è invariante per “rotazioni nello spazio del colore” - SU(3).

L'interazione associata a questa simmetria di gauge si chiama interazione forte. La teoria che la descrive si chiama QCD (quantum chromo-dynamics).

L'interazione forte - i gluoni

I mediatori dell'interazione forte si chiamano *gluoni*.
Essendo bosoni di gauge, hanno massa nulla.

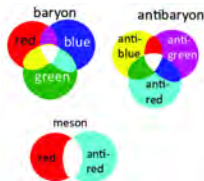
A differenza dei fotoni, che non hanno carica elettrica, i gluoni hanno carica di colore, e quindi possono *interagire tra loro*



Questo rende le interazioni forti più complicate da descrivere, e dà luogo a una ricca fenomenologia

L'interazione forte - il confinamento

Una particolarità di questa teoria è che non esistono particelle *libere* colorate. Tutte le particelle libere sono stati composti di quark e gluoni (come i protoni, i neutroni, i pioni, ...) e sono "bianchi" (ovvero non hanno carica di colore). Il fenomeno si chiama *confinamento*.

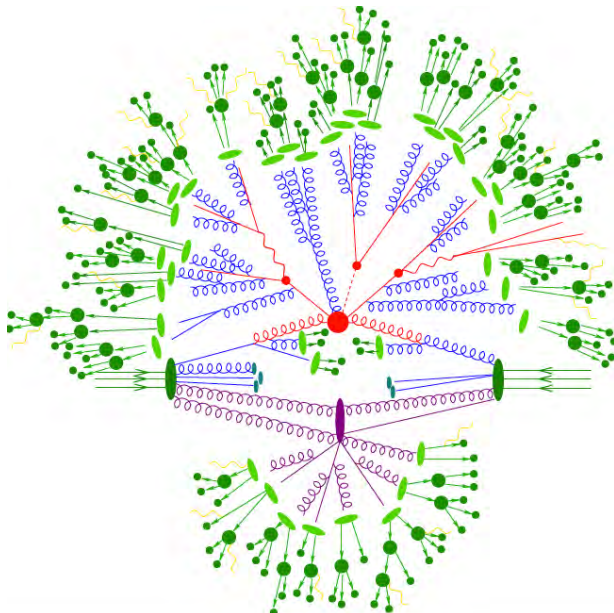


Quark e gluoni partecipano ai processi di interazione anche negli urti o decadimenti tra particelle composte, ma solo per un tempo molto breve. Immediatamente si ricombinano in altre particelle composte.

Esempio: decadimento $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$.



Collisione protone-protone a LHC



L'interazione debole - SU(2)

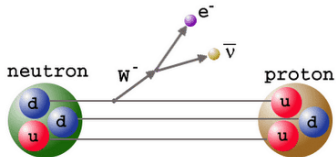
Quark, elettroni e anche *neutrini* hanno anche un altro tipo di carica, detta carica debole.

Ci sono due tipi di carica di base, e la lagrangiana è invariante per rotazioni nello spazio di questa carica bidimensionale - SU(2).

I mediatori di questa interazione sono due bosoni che si chiamano W e Z .

Il W ha anche una carica elettrica, e quindi interagisce col fotone.

Questa interazione è responsabile di molti decadimenti (conversioni tra particelle) visto che coinvolge e "mischia" tutte le particelle di materia, anche di famiglie diverse.



L'interazione debole è l'unica che non "genera" una forza.

Attenzione! I bosoni W e Z hanno una massa! Come è possibile?

Questo è il motivo per cui l'interazione ha un raggio d'azione molto piccolo.

Vi ho detto che per una simmetria di gauge i bosoni di gauge (i mediatori) devono avere massa nulla. Qualcosa non va.

Soluzione: la simmetria $SU(2)$ deve essere **rotta**.

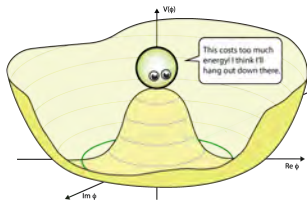
Questo significa che la lagrangiana è simmetrica per l'azione di $SU(2)$, ma la Natura non lo è. Si dice che il "vuoto" della teoria non è simmetrico.

Per realizzare questa *rottura di simmetria*, occorre introdurre un nuovo campo scalare ϕ (spin 0) che sente l'interazione debole.

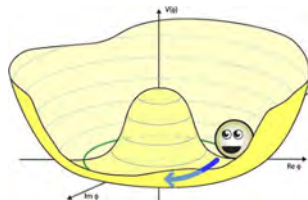
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Il bosone di Higgs

Questo campo ϕ deve avere un potenziale particolare:



fase simmetrica, non stabile



fase stabile (vuoto), non simmetrica

Nello stato di vuoto il campo scalare ha la forma

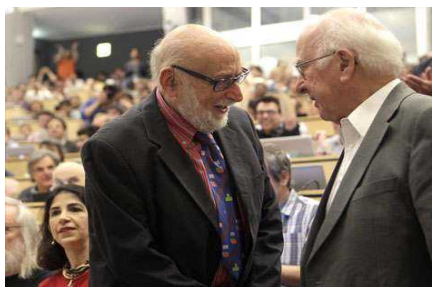
$$\phi(x) = v + H(x)$$

dove v è il valore di ϕ nel minimo del potenziale, e $H(x)$ è il campo dinamico che rimane.

Il campo scalare $H(x)$ è detto **bosone di Higgs**, e il meccanismo di rottura di simmetria di chiama meccanismo di Brout-Englert-Higgs, proposto nel 1964.

La scoperta di questa nuova particella nel 2012 a LHC è valsa il premio Nobel 2013 a François Englert e Peter Higgs (Brout è morto nel 2011).

CERN main auditorium, 4 luglio 2012



Bello, ma... la massa di W e Z ?

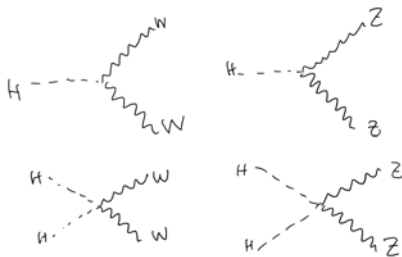
Lo scalare ϕ , avendo carica debole, interagisce con W e Z con termini nella lagrangiana del tipo $\phi^2 W^2$ e $\phi^2 Z^2$ (vengono da \mathcal{L}_{ϕ^2})

Quando ϕ va nel suo vuoto, $\phi = v + H$, essi diventano

$$\phi^2 W^2 = v^2 W^2 + 2vHW^2 + H^2 W^2$$

$$\phi^2 Z^2 = v^2 Z^2 + 2vHZ^2 + H^2 Z^2$$

che sono termini di **massa** per W e Z ($m \propto v$) e di interazione con H .



Si può fare una cosa simile per i fermioni: termini del tipo $\phi\bar{\psi}\psi$ (Yukawa) diventano

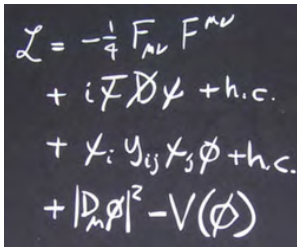
$$y\phi\bar{\psi}\psi = yv\bar{\psi}\psi + yH\bar{\psi}\psi$$

che sono termini di **massa** per i fermioni ($m \propto yv$) e di interazione con H .

La costante y dipende dal fermione, e ne determina di fatto la massa (altrimenti le masse sarebbero tutte uguali visto che v è unico).

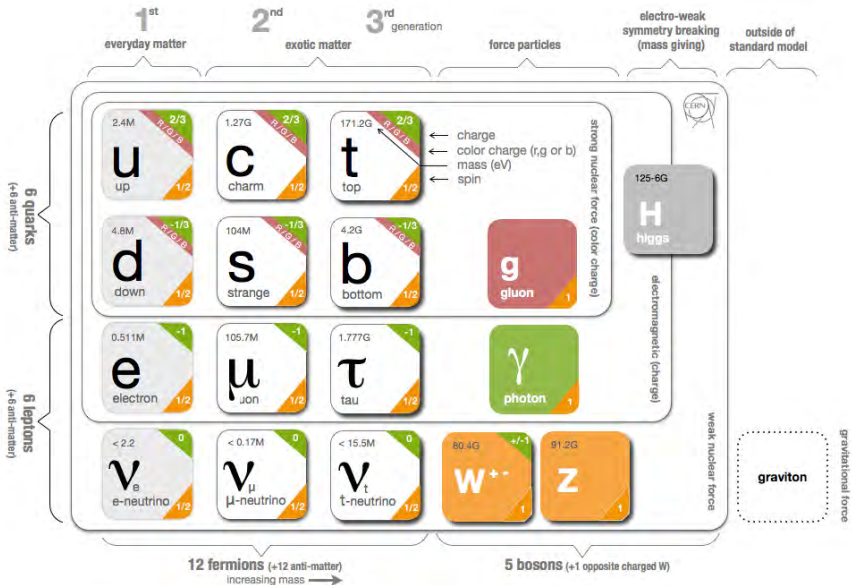
Una conseguenza interessante è che l'intensità dell'interazione tra fermioni e Higgs è proporzionale a y , e quindi alla massa del fermione.

L'Higgs interagisce principalmente con fermioni pesanti (e con W e Z).

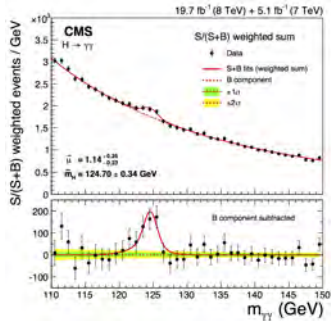
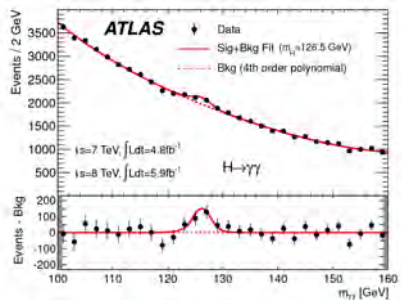

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Maglietta completata!

Il contenuto in particelle del Modello Standard

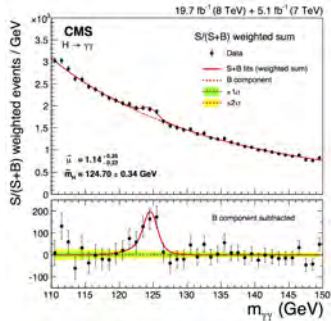
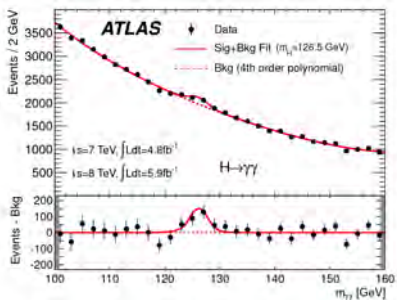


Danilo vi ha detto che ATLAS e CMS hanno visto l'Higgs che decade in due fotoni

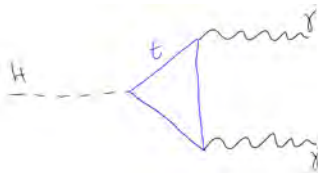


Ma i fotoni hanno massa nulla! Come è possibile?

Danilo vi ha detto che ATLAS e CMS hanno visto l'Higgs che decade in due fotoni



Ma i fotoni hanno massa nulla! Come è possibile?



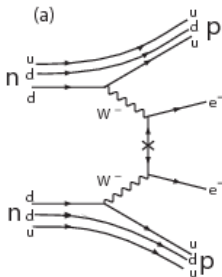
Nel modello standard i neutrini sono un po' strani: sono descritti senza massa e esistono solo nella versione "left-handed".

Sperimentalmente però sappiamo che almeno 2 neutrini su 3 hanno una massa non nulla (fenomeno delle oscillazioni tra neutrini).

Quindi per quanto riguarda i neutrini il modello standard è incompleto.

Ci sono modelli che descrivono la massa dei neutrini, ma le misure sperimentali non sono ancora abbastanza precise per confermare questi modelli.

Un esempio di predizione dei modelli è il doppio decadimento beta senza neutrini:

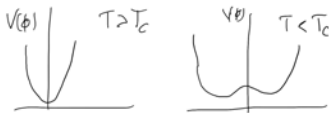


Da dove viene il potenziale dello scalare?

Ci si potrebbe chiedere come mai il potenziale $V(\phi)$ abbia quella forma, o se ce l'abbia sempre avuta (durante l'evoluzione dell'universo).

Non abbiamo ancora una risposta (anzi, questo è uno degli obiettivi della ricerca in fisica delle particelle oggi), ma abbiamo un esempio simile: la superconduttività.

La teoria di Landau spiega la superconduttività (la proprietà per cui un materiale ha resistenza nulla al passaggio della corrente elettrica) con un modello molto simile al meccanismo di Higgs, dove il potenziale dipende dalla temperatura



Per temperature $T < T_c$ (temperatura critica), la simmetria si rompe e si “accende” la superconduttività.

Oggi sappiamo che questo potenziale può essere spiegato dalla teoria BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer), dove coppie di elettroni (coppie di Cooper) a bassa temperatura formano uno stato legato che si comporta come un bosone.

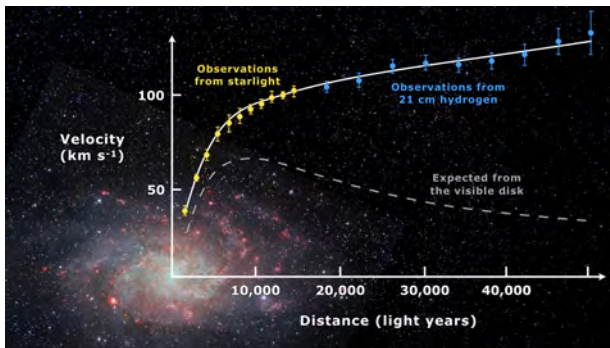
Il potenziale discende da una dinamica di altre particelle!

Magari l'Higgs è composto?

La materia oscura (dark matter)

Ci sono altri problemi a livello di universo.

Ad esempio, il moto delle galassie (e dei cluster di galassie) è diverso da quello che ci si aspetta sulla base della materia visibile



https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve

Deve esserci della materia “gravitazionale” che non emette luce (dark) nelle galassie e tra le galassie (oppure le leggi di gravitazione sono sbagliate)

L'ipotesi più semplice è che ci sia materia ordinaria ma “fredda”, che non emette luce. Potrebbero essere:

- gas
- pianeti
- mini buchi neri
- ...

Tuttavia nessuna di queste spiegazioni sembra compatibile con le osservazioni e con i modelli cosmologici.

È più verosimile immaginare che esista materia nuova, non appartenente al modello standard, e che interagisca in qualche modo (molto debolmente, altrimenti l'avremmo già vista) con la materia ordinaria.

Ricerca ai collider come LHC, finora inconcludente.

Oppure le leggi di gravitazione sono sbagliate...

Ci sono anche dei “problemi” o limitazioni del modello standard.

Ad esempio le masse delle particelle, ovvero gli accoppiamenti di Yukawa y sono molto diversi tra di loro.

Un criterio di “eleganza” delle leggi fondamentali della natura farebbe pensare che tutte le masse dovessero essere dello stesso ordine (tutti gli $y \sim 1$): *naturalzza*.

Ci sono dei modelli che potrebbero spiegare la gerarchia tra le masse introducendo una nuova interazione (quindi nuove particelle), ma finora non sono confermati sperimentalmente.

Un altro problema riguarda la massa dell'Higgs. Per il modo in cui funziona la teoria, la massa dell'Higgs dovrebbe essere molto più grande, ed è stranissimo che sia così piccola.

Un modo di spiegarlo è la *supersimmetria*: per ogni particella esiste un *superpartner* con le stesse proprietà (massa, cariche) ma con spin diverso.

Particelle supersimmetriche con la stessa massa di quelle ordinarie le avremmo già viste. Quindi o non esiste la supersimmetria, o è rotta.

Ma anche se fosse rotta, finora non abbiamo trovato nulla...

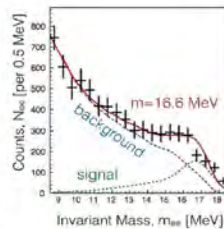
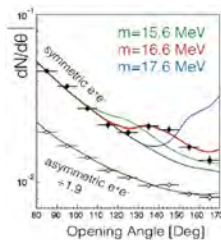
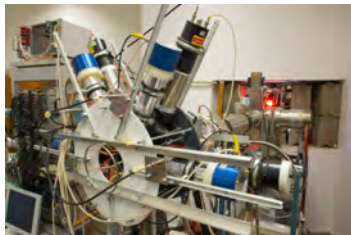
Ci sono anche recenti misure che non tornano con le predizioni del modello standard.

Ad esempio le *anomalie di flavour*

Il decadimento $B \rightarrow K\mu^+\mu^-$ e $B \rightarrow Ke^+e^-$ dovrebbero essere praticamente identici, ovvero avvenire con la stessa frequenza.

Tuttavia si misura una differenza sostanziale tra i due, che non si spiega nel modello standard.

Un altro esempio è la misura dell'esperimento Atomki, che misura la distribuzione angolare del decadimento del berillio-8



Il modello standard è una teoria di campo (quantistica e relativistica) che descrive tre delle quattro interazioni fondamentali che conosciamo: elettromagnetica, forte e debole.

L'interazione gravitazionale non è inclusa nel modello standard, ed è descritta dalla relatività generale. Vi sono tentativi di unificare le quattro interazioni (gravità quantistica, teoria delle stringhe).

Il modello standard non può essere la teoria definitiva:

- mancano le masse dei neutrini
- manca la materia oscura
- *non è abbastanza elegante*
- ci sono alcune evidenze sperimentali incoerenti con esso
- ci sono alcuni aspetti teorici problematici

Ci sono vari esperimenti e progetti per chiarire meglio questi aspetti e capire cosa c'è oltre il modello standard.

Se sceglierete fisica potrete essere protagonisti in queste sfide del prossimo futuro!