

Simmetrie nel Modello Standard della Fisica delle Particelle

Seminari di Fisica

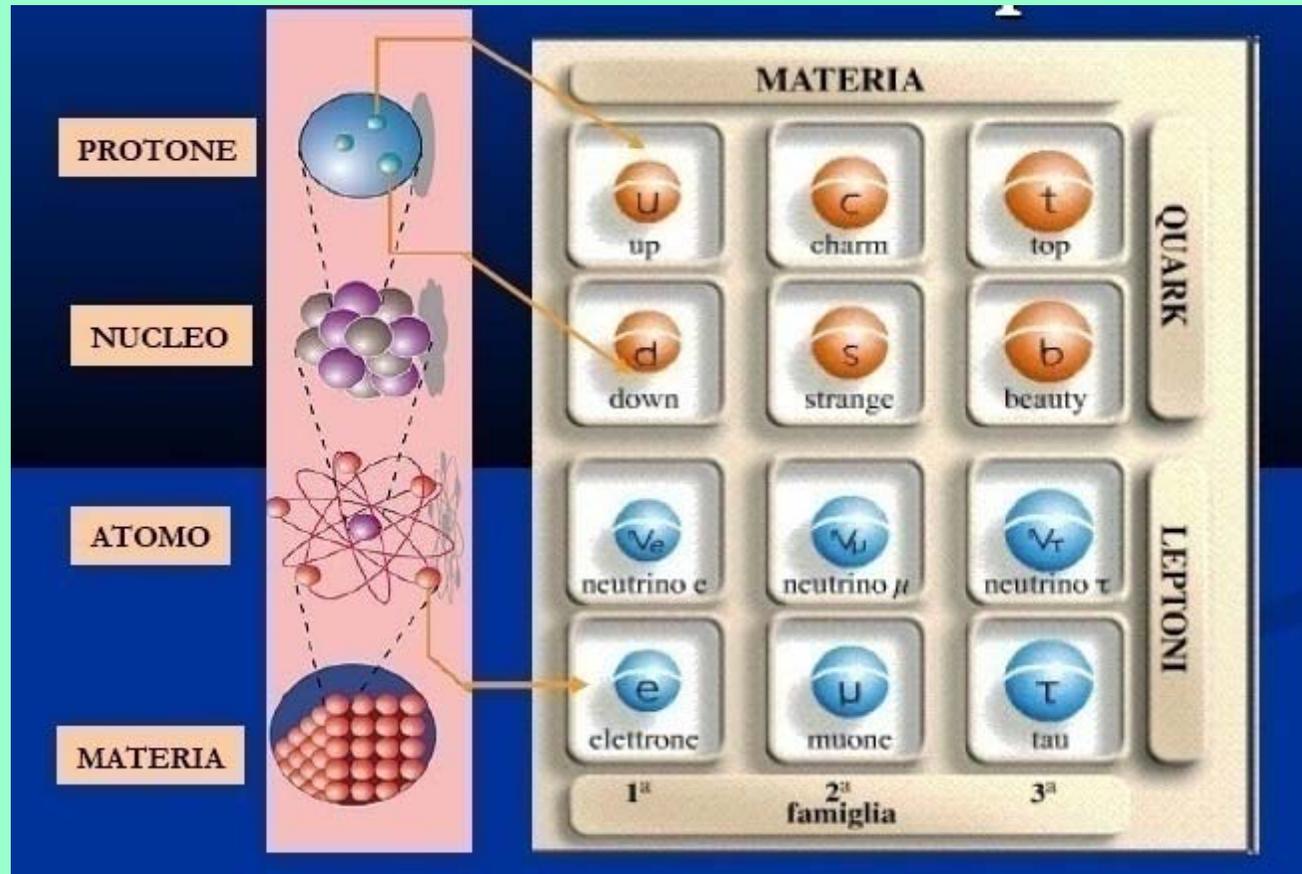
Dipartimento di Fisica
dell'Università di Torino
10 dicembre 2013

Alessandro Bottino
INFN/Università di Torino

Contenuto

- ★ Interazioni fondamentali ed invarianza di gauge
- ★ Unificazione elettrodebole
- ★ Meccanismo di Higgs (rottura spontanea di simmetria)
- ★ Transizione di fase di Higgs nel Cosmo
- ★ Particella di Higgs al Large Hadron Collider del CERN

Tutte le particelle che conosciamo sono riconducibili ai seguenti costituenti (quarks e leptoni)



e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

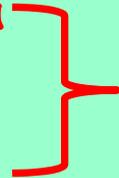
$$q \rightarrow \bar{q}; \quad e^- \rightarrow e^+, \quad \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

Interazioni fondamentali

interazione elettromagnetica

interazione debole

interazione forte



Modello Standard delle
particelle subatomiche

interazione gravitazionale

- ★ queste interazioni sono contraddistinte da loro caratteristiche distinte
- ★ ambizione dei fisici: farle discendere da principi comuni di simmetria (invarianze)

In elettromagnetismo conviene esprimere campo elettrico e campo magnetico in funzione di un "tetrapotenziale"

$$A_\mu \equiv (A_0, A_k) \quad (\mu = 0,1,2,3; k = 1,2,3)$$

ossia

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad } A_0, \quad \vec{H} = \text{rot } \vec{A}$$

\vec{E} ed \vec{H} sono invarianti per trasformazione di gauge (di secondo tipo)

$$\left[\begin{array}{l} A_0(x) \rightarrow A'_0(x) = A_0(x) - \frac{\partial \lambda(x)}{\partial t} \\ \vec{A}(x) \rightarrow \vec{A}'(x) = \vec{A}(x) + \text{grad } \lambda(x) \end{array} \right] \longrightarrow A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = A_\mu(x) + \frac{\partial \lambda(x)}{\partial x^\mu}$$

Questa proprietà di invarianza non esisterebbe se il fotone avesse massa diversa da zero

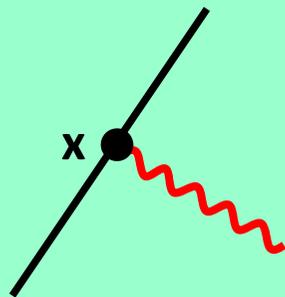
Particella carica descritta da un campo $\psi(x)$; **l'equazione di campo** contiene le derivate prime $\frac{\partial\psi(x)}{\partial x^\mu}$, quindi, **in assenza di interazione, non è invariante** per la **trasformazione (di gauge di primo tipo)** $\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\alpha(x)}\psi(x)$

infatti:

$$\frac{\partial\psi'(x)}{\partial x^\mu} = e^{i\alpha(x)} \frac{\partial\psi(x)}{\partial x^\mu} + \underbrace{ie^{i\alpha(x)}\psi(x)}_{\text{termine aggiuntivo}} \frac{\partial\alpha(x)}{\partial x^\mu}$$

termine aggiuntivo

Pero', **se la particella è in interazione** con il campo elettromagnetico $A_\mu(x)$, il termine aggiuntivo puo' essere riassorbito in una ridefinizione (di gauge) del campo $A_\mu(x)$ \longrightarrow **invarianza di gauge**

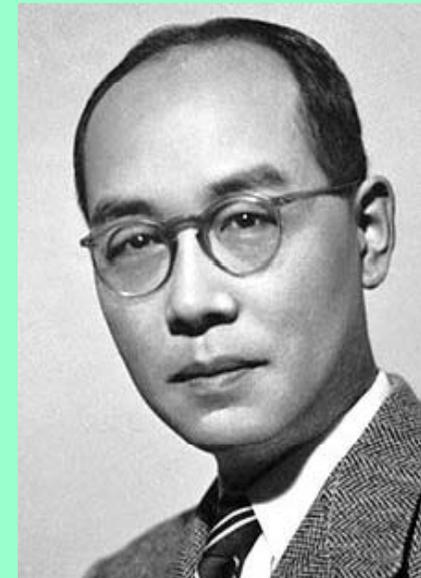
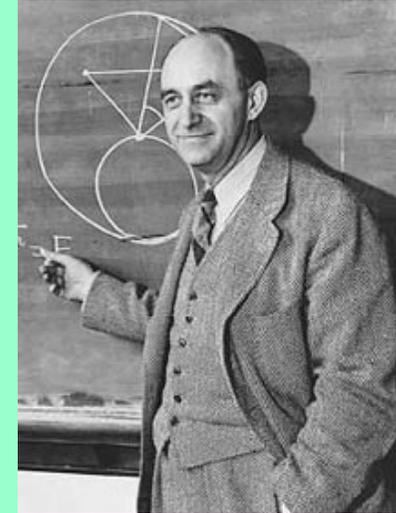


il campo elettromagnetico è **un campo di gauge** (o di Yang-Mills)

Unificazione di interazione elettromagnetica e interazione debole, prime idee:

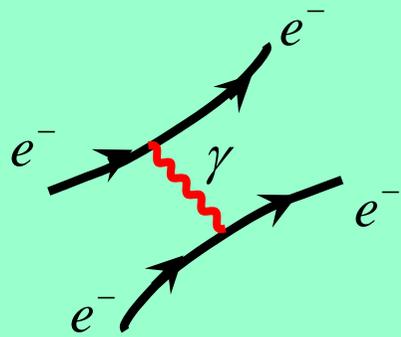
- ★ **Enrico Fermi (1933)**: appena dopo l'ipotesi di Pauli sull'esistenza del neutrino, delinea una teoria dell'int. debole in analogia con processi elettromagnetici

Nota di S. Weinberg nell'articolo sul Modello Standard:
La storia dei tentativi di unificare le interazioni deboli ed elettromagnetiche e' molto lungo, e non viene qui discussa. E' possibile che la prima citazione sia E. Fermi, Z. Physik 88 (1934) 161



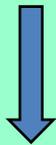
- ★ **Hideki Yukawa (1935)**: ipotesi che l'interazione debole sia mediata da un bosone intermedio (W)

Il modello standard realizza l'unificazione di int. elettromagnetica e int. debole

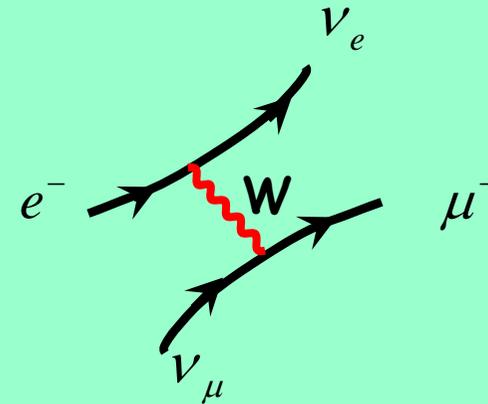


l'inter. elettromagnetica avviene tramite il **campo elettromagnetico**, ossia per scambio di un **fotone**

il fotone e' privo di massa



la teoria dell'elettromagnetismo gode di **particolari proprieta' di invarianza** (invarianza di gauge)



l'int. debole avviene tramite un **campo debole**, ossia per scambio di un **bosone W** (o di un **bosone Z**)

i bosoni W e Z sono massivi



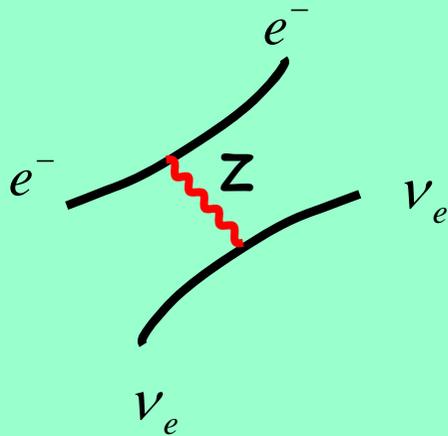
la teoria debole gode delle **proprieta' di invarianza dell'el.magn.** solo se le masse di W e Z vengono poste uguali a zero

Interazione debole: l'esistenza dei bosoni W^+ , W^- conduce all'introduzione di un **tripletto di campi**:

$$W_\mu^+, W_\mu^-, W_\mu^\circ$$

ma W_μ° non puo' coincidere con $A_\mu^{\text{e.m.}}$, quindi si introducono quattro campi $W_\mu^+, W_\mu^-, W_\mu^\circ; B_\mu$

$$A_\mu^{\text{e.m.}}, Z_\mu$$



previsione di processi con correnti deboli neutre

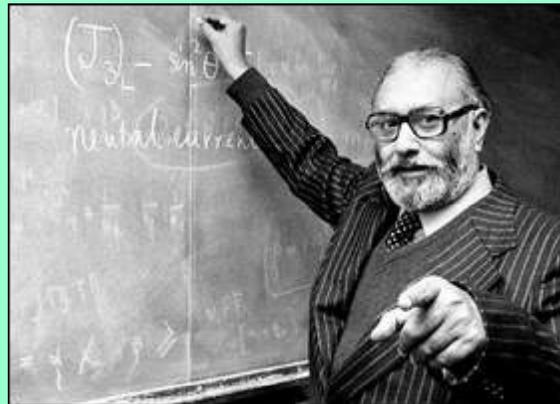
- ★ Nel modello standard viene formulata per l'interazione debole una teoria analoga a quella dell'interazione elettromagnetica **mettendo provvisoriamente a zero la massa dei mediatori W e Z**
- ★ analogamente vengono provvisoriamente messe a zero le masse di tutte le particelle (leptoni e quarks)
- ★ una volta sviluppata la teoria, **per conferire a tutte le particelle e ai mediatori (campi) di interazione i loro valori fisici di massa** viene utilizzato il "meccanismo" di Higgs

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

Premi Nobel 1979



Sheldon L. Glashow



Abdus Salam

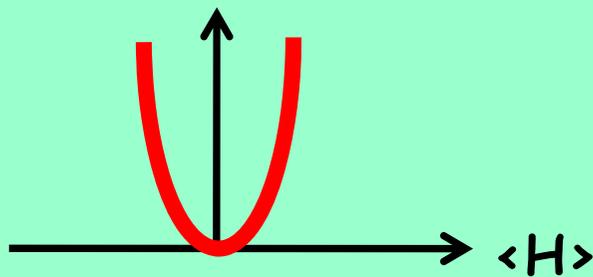


Steven Weinberg

Meccanismo di Higgs

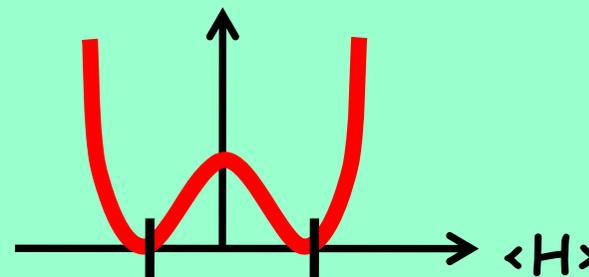
- 1) ipotesi: esiste in tutto lo spazio di un campo di Higgs, esso stesso, inizialmente, con massa nulla
- 2) tutte le particelle e i mediatori di interazione (tranne il fotone) acquisiscono massa, tramite la loro interazione con il campo di Higgs H

funzione di Higgs



la particella di Higgs
ha massa nulla

funzione di Higgs

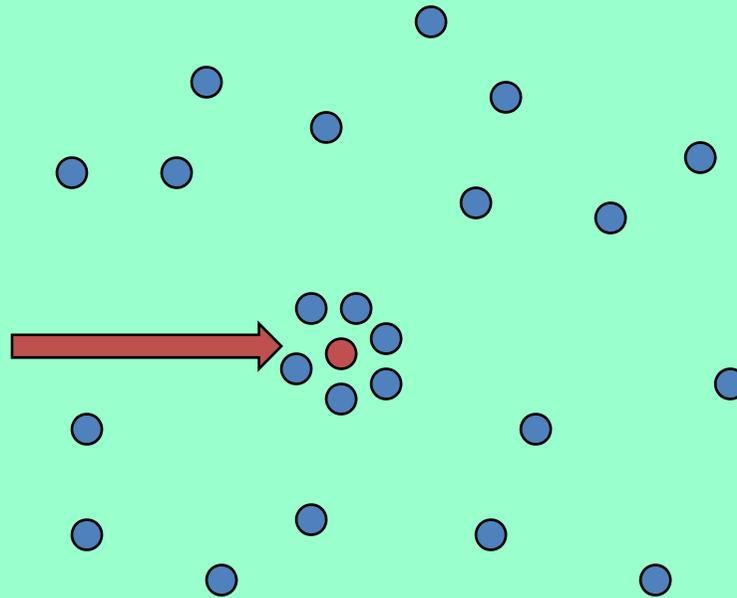


la particella di Higgs
e' massiva

transizione

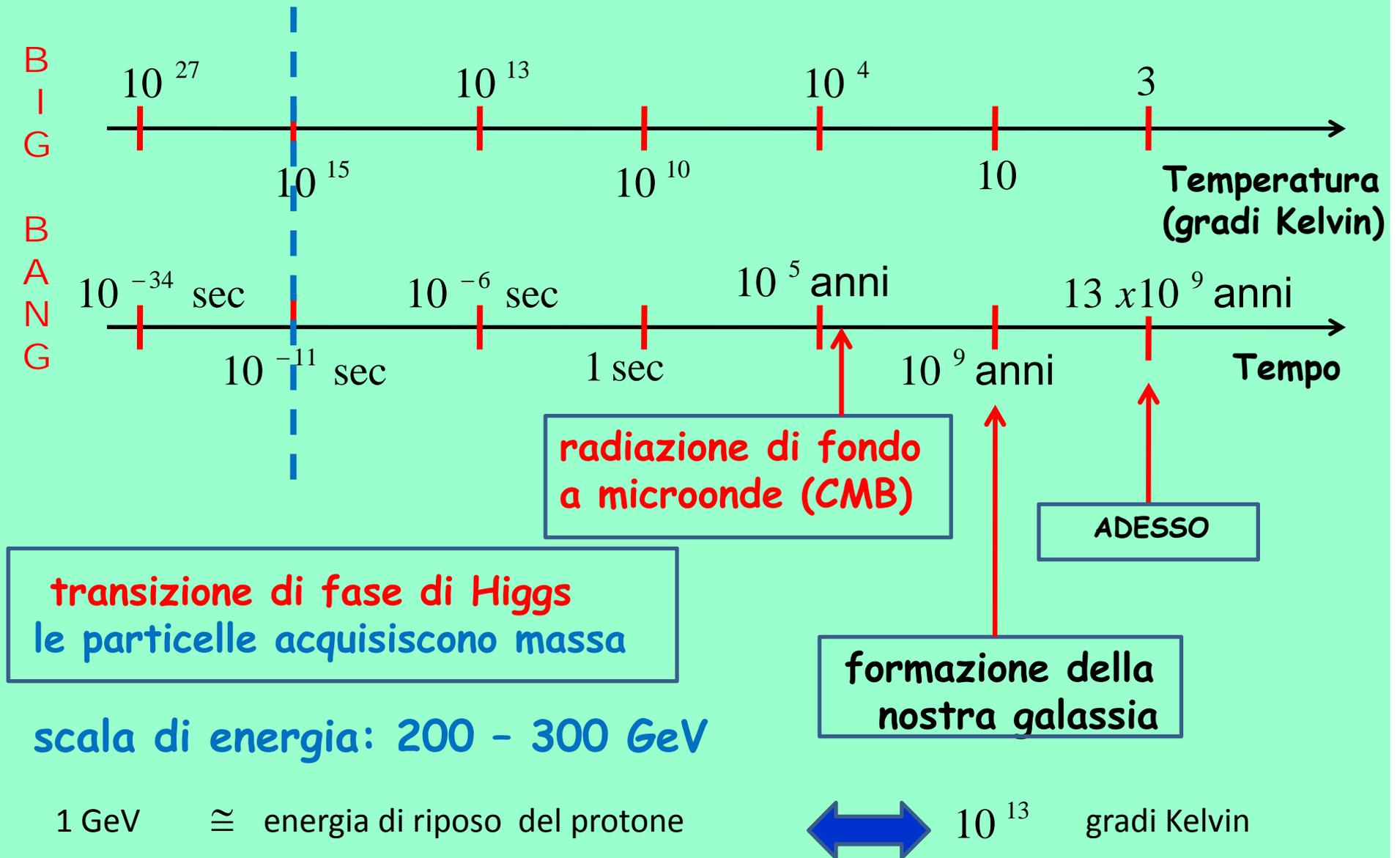
come effetto di abbassamento di temperatura
rottura spontanea di simmetria

Le singole particelle **acquistano massa**

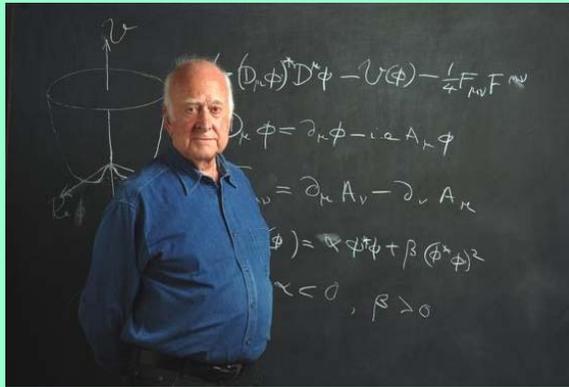


quanto maggiore e' la capacita' della particella di interagire con il campo di Higgs **tanto maggiore e' l'inerzia della particella e quindi la sua massa**

nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda



Premio Sakurai 2010 conferito dall'American Physical Society



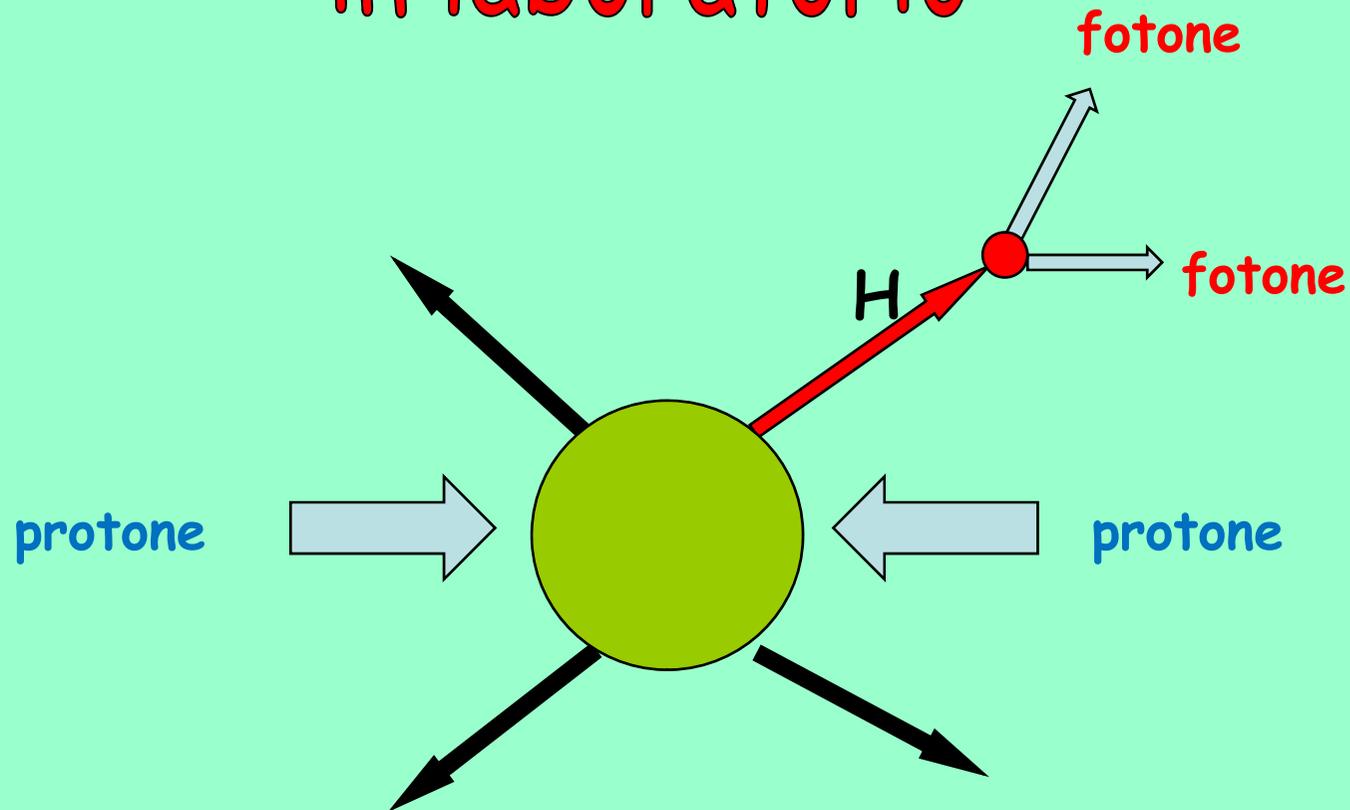
Peter Higgs



F. Englert, R. Brout

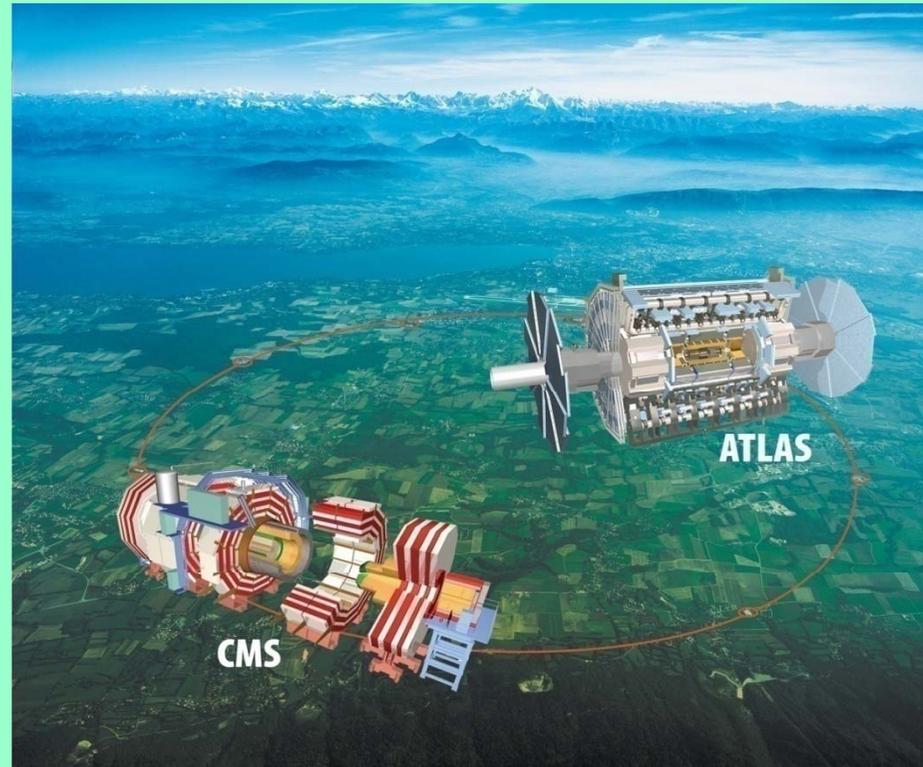
T.W.B. Kibble, G.S. Guralnik, C.R. Hagen

produzione di una nuova particella in laboratorio



due particelle note vengono fatte collidere

Large Hadron Collider (CERN)

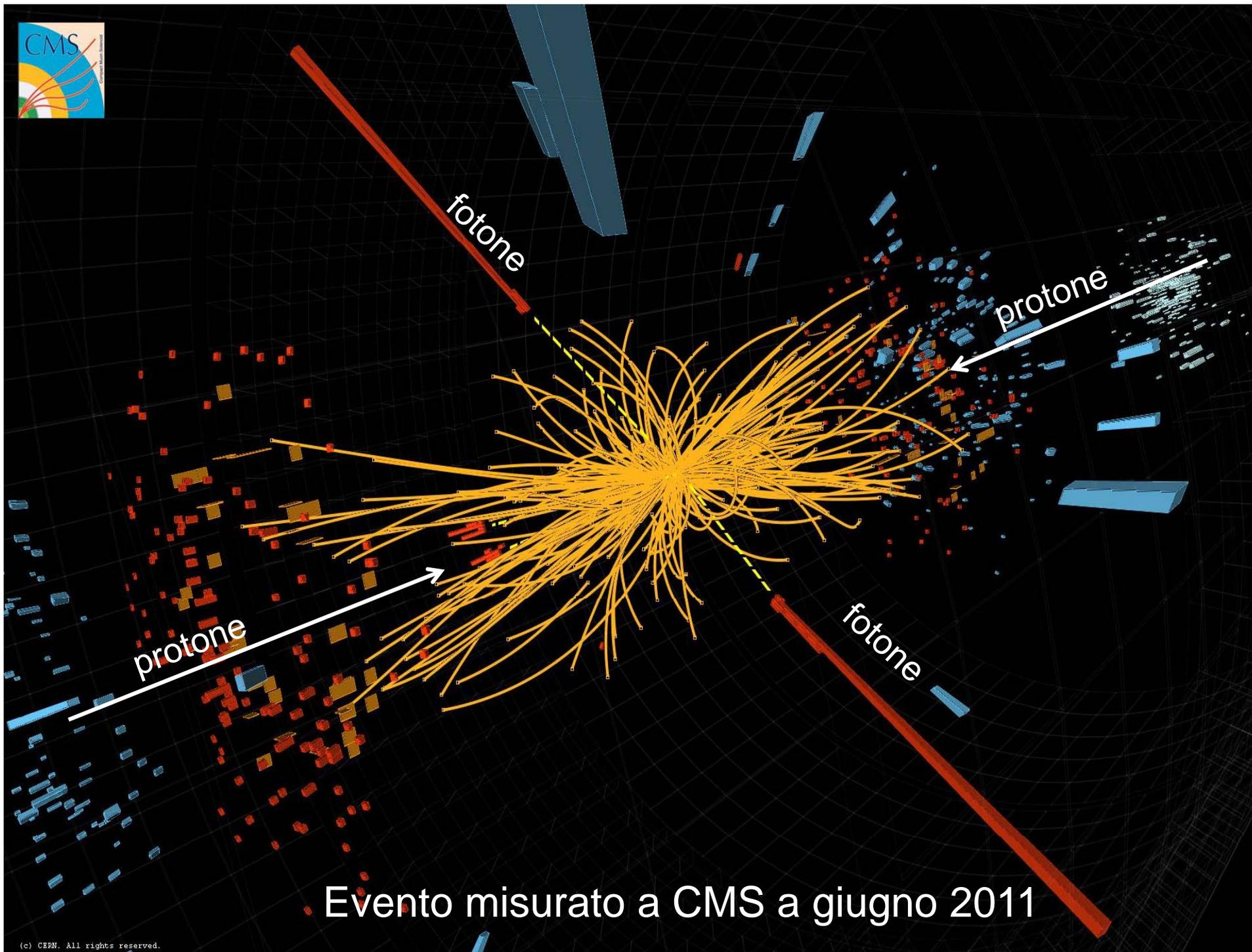
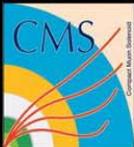


- ★ circonferenza di 27 km - tunnel sotterraneo a 50 - 175 metri di profondita'
- ★ 2 fasci di protoni circolanti in verso opposto per provocare collisioni
- ★ ogni protone ha un'energia 7.000 volte piu' grande della propria energia di riposo

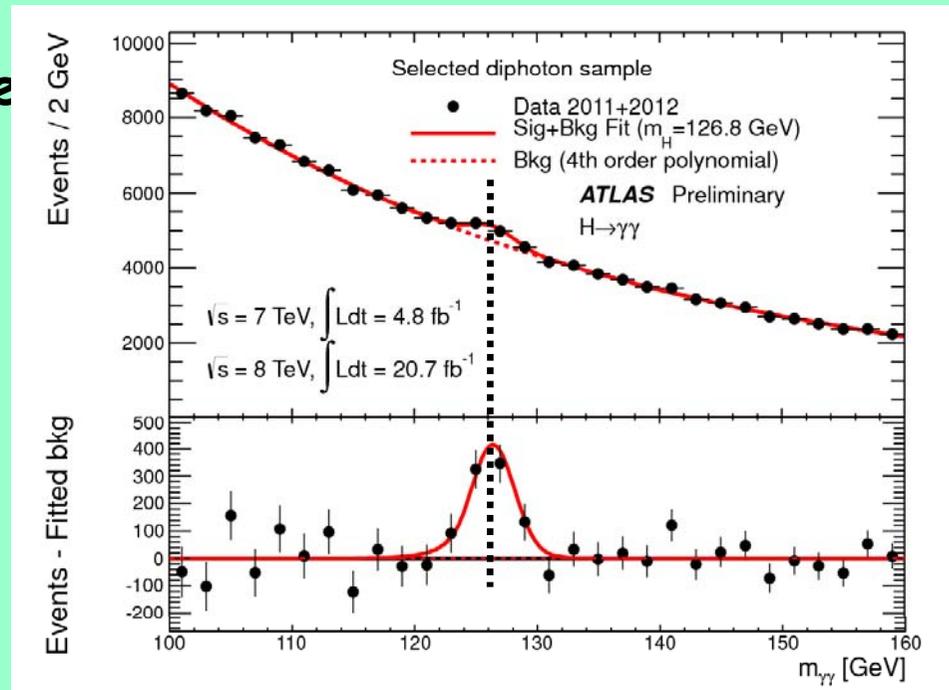
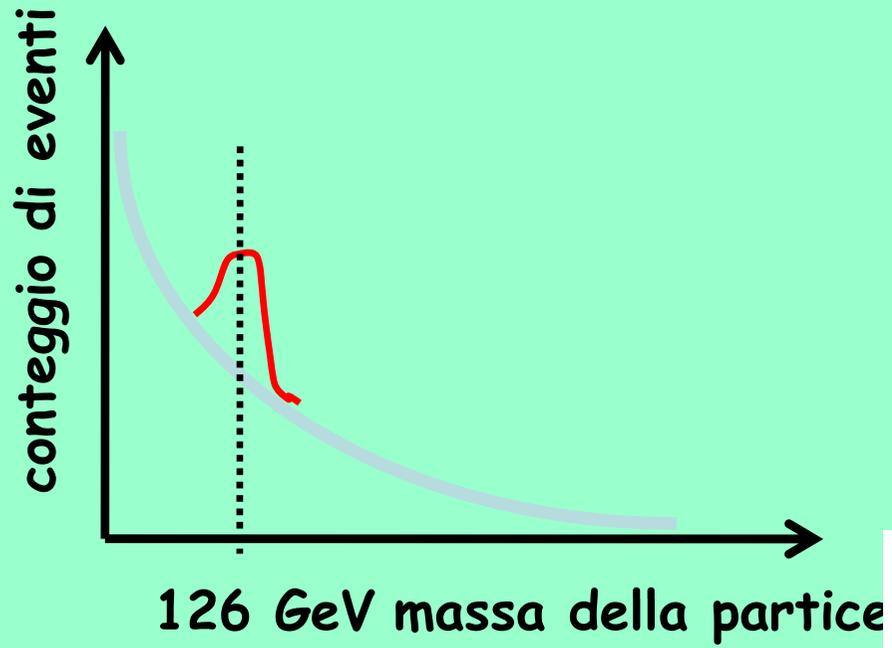
Per arrivare alla scoperta: 30 anni di lavoro!

- ◆ **1982:** Iniziano gli studi preliminari
- ◆ **1994:** il CERN Council approva il progetto LHC (Large Hadron Collider)
- ◆ **1996:** Decisione finale di cominciare la costruzione di LHC
- ◆ **2004:** Inizio dell'installazione dell'acceleratore
- ◆ **2006:** Inizia la messa a punto
- ◆ **2008:** Primi fasci
- ◆ **2009:** Primi dati di fisica
- ◆ **2012:** 1 miliardo di interazioni al sec





Evento misurato a CMS a giugno 2011



J. Ellis, M.K. Gaillard, D.V. Nanopoulos, Nucl. Phys. B 106 (1976) 292:

" We should perhaps finish with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, unlike the case with charm, and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people performing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up."

John Ellis, Summary of the Nobel Symposium on LHC Results (2013):

Fortunately, the LHC community did not pay attention to the caveat in the last sentence of our paper that: "we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson", and the ATLAS and CMS experiments announced the discovery of a candidate for a (the?) Higgs boson on July 4th 2012

1964 **ipotesi teorica** del meccanismo di Higgs (Higgs, Englert & Brout, ...)

1967 **formulazione del Modello Standard delle particelle** (Glashow, Salam, Weinberg) avente come ingrediente il meccanismo di Higgs

Anni '70-'80 **verifiche sperimentali delle previsioni del Modello Standard**, salvo verifica diretta dell'esistenza del campo di Higgs

Luglio 2012 annuncio ufficiale della **scoperta della particella di Higgs all'acceleratore LHC: massa ~ 126 GeV**



- ☆ Trionfo della teoria per aver predetto l'esistenza di una particella sulla base di proprietà generali di simmetria e di consistenza interna del modello.
- ☆ Grande successo sperimentale/fenomenologico per aver dimostrato l'esistenza della particella di Higgs utilizzando tecniche molto sofisticate. In questa parte, importante contributo dei fisici di Torino (Dipartimento di Fisica e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare).

☆ Il Modello Standard della fisica delle particelle e' costruito sulla base di proprieta' di invarianza di gauge e su rottura spontanea di simmetria.

☆ Tutte le previsioni del Modello Standard:

valore di massa del bosone W

esistenza e massa del bosone Z

esistenza di processi deboli con correnti neutre

particella di Higgs

sono state verificate sperimentalmente.