

Bosone di Higgs e Modello Standard della Fisica delle Particelle

Biblioteca Civica Multimediale Archimede

Settimo Torinese, 28 gennaio 2014

Alessandro Bottino

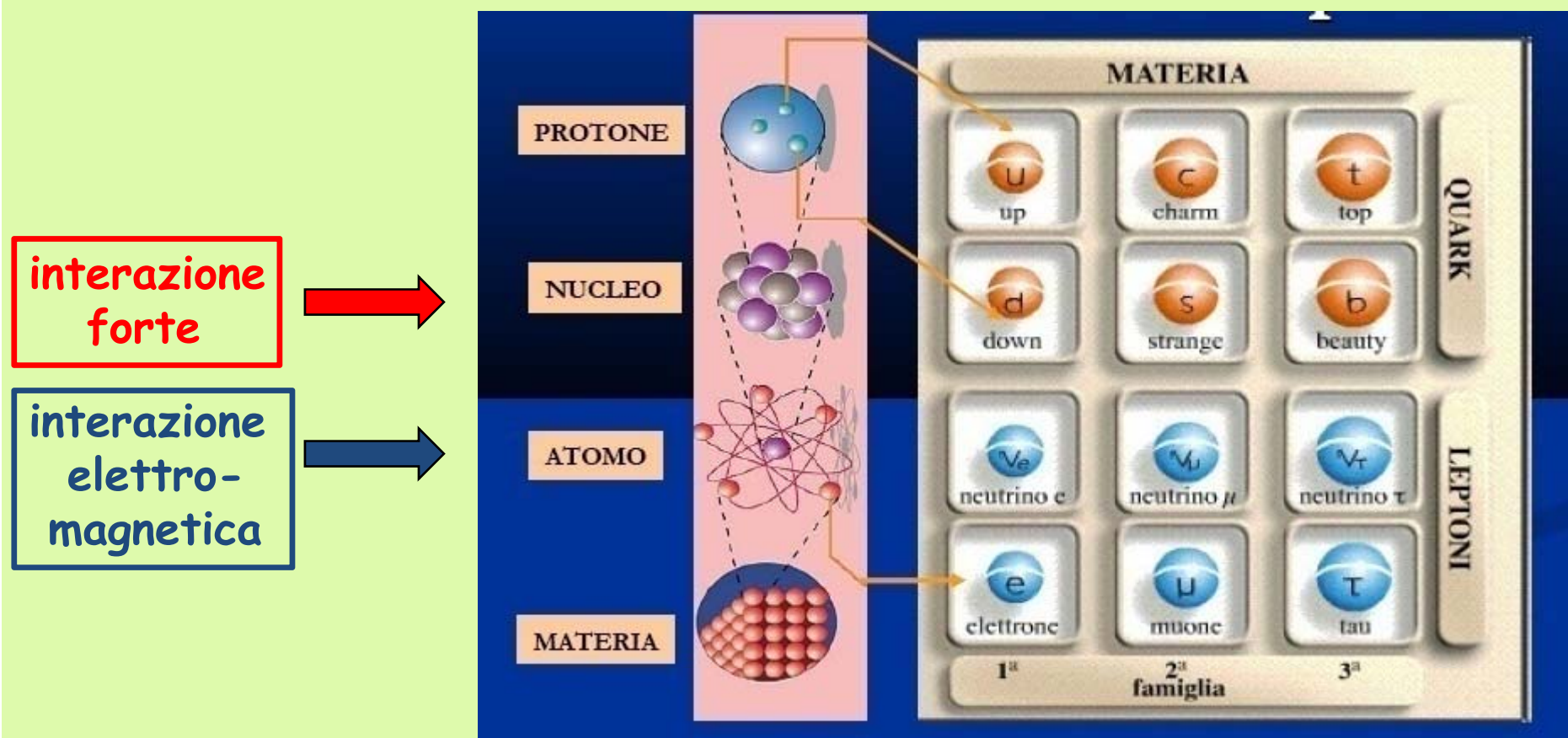
Contenuto

- ★ Particelle ed interazioni nel Modello Standard
- ★ 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
- ★ Un approfondimento: il potenziale di Higgs

Per il file pdf di questa presentazione:

http://www.alessandrobottino.it/Higgs_Archimede_2014.pdf

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

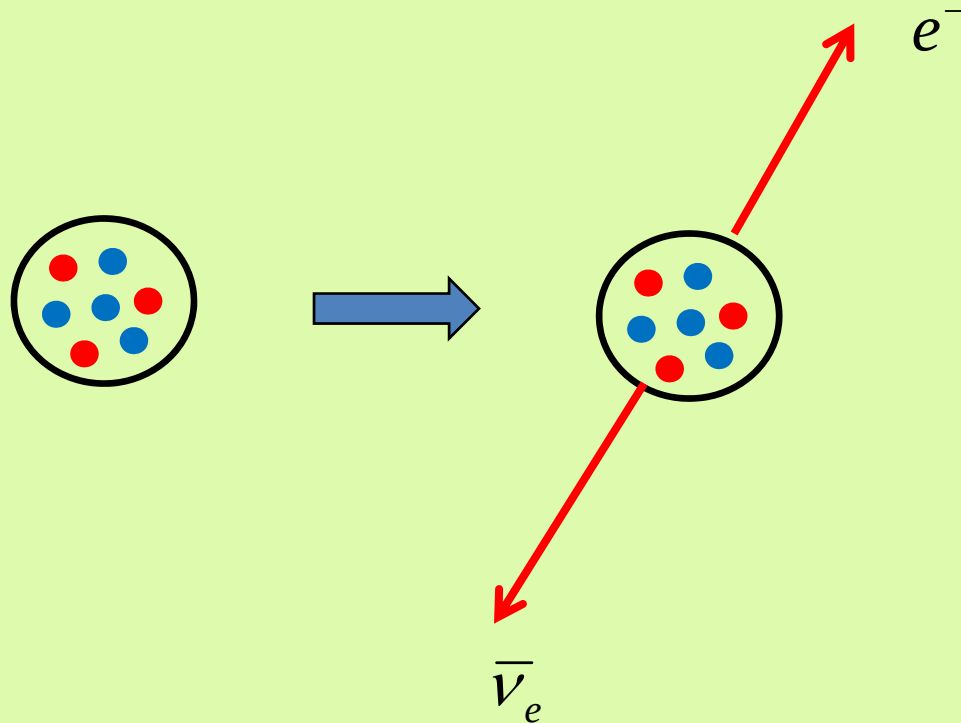


e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

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

decadimento beta di un nucleo

$$N_i \Rightarrow N_f + e^- + \bar{\nu}_e$$



decadimento beta del neutrone

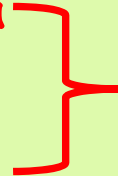
$$n \Rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Interazioni fondamentali

interazione elettromagnetica

interazione debole

interazione forte

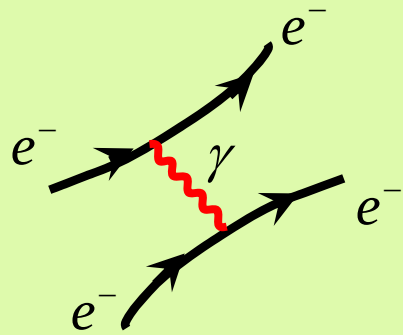


Modello Standard delle
particelle subatomiche

interazione gravitazionale

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

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

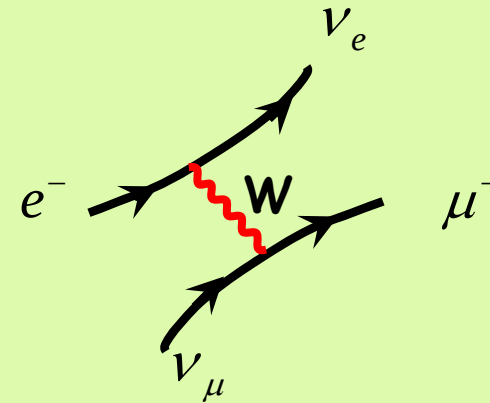


l'inter. elettromagnetica avviene tramite il **campo elettromagnetico**, ossia per scambio di un **fotone**

il fotone e' privo di massa



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



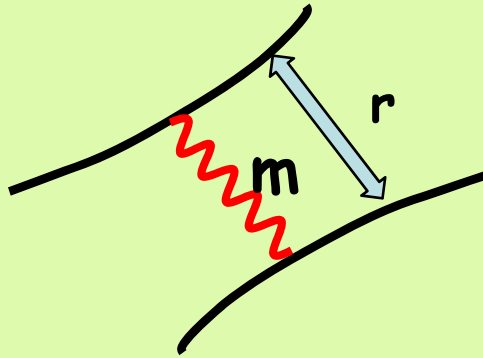
l'int. debole avviene tramite un **campo debole**, ossia per scambio di un **bosone W** (o di un **bosone Z**)

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

Raggio d'azione (portata) dell'interazione



Se le particelle interagiscono mediante scambio di un "mediatore" di massa m , il raggio d'azione dell'interazione è

$$r \approx \frac{h}{m \cdot c}$$

(dal principio di indeterminazione della Meccanica Quantistica)

Ossia il raggio di azione dell'interazione e' inversamente proporzionale alla massa del mediatore.

il fotone ha massa nulla $\longrightarrow$ l'int. elettromagnetica ha raggio infinito

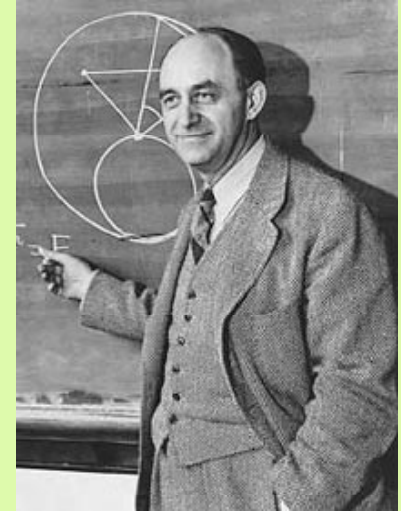
l'interazione debole ha raggio d'azione finito $\longrightarrow$ massa del W non nulla

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

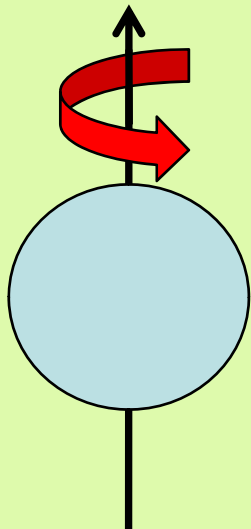
Nota di S. Weinberg nell'articolo sul Modello Standard (1967):

"La storia dei tentativi di unificare le interazioni deboli ed elettromagnetiche e' molto lunga, 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)

Spin di una particella = suo momento angolare intrinseco



Spin = concetto quantistico

lo spin puo' solo avere valori interi o semi-interi

una particella con **spin intero** viene detta **BOSONE**

una particella con **spin semi-intero** viene detta **FERMIONE**

★ leptoni e quarks sono fermioni (spin $\frac{1}{2}$)

★ mediatori di interazione (fotone, W, Z, ...) sono bosoni

STRATEGIA DEL MODELLO STANDARD

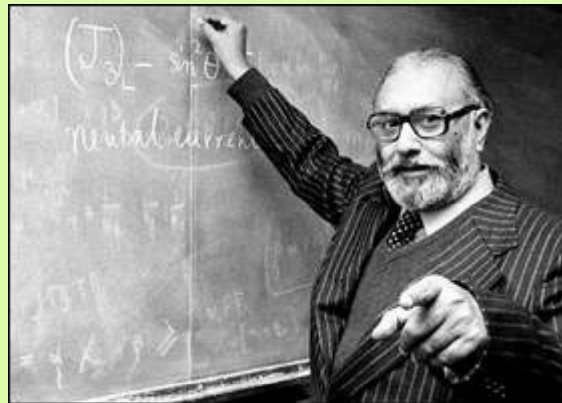
- ★ Nel modello standard viene formulata per l'interazione debole una teoria analoga a quella dell'interazione elettromagnetica mettendo provvisoriamente a zero la massa dei mediatori W e Z
- ★ analogamente vengono provvisoriamente messe a zero le masse di tutte le particelle (leptoni e quarks)
- ★ una 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

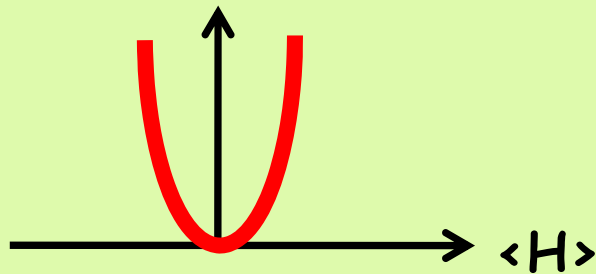


Steven Weinberg

Meccanismo di Higgs

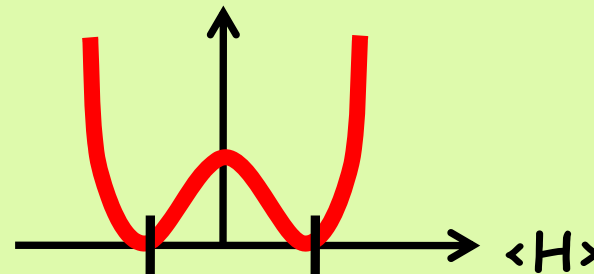
- 1) ipotesi: esiste in tutto lo spazio di un campo di Higgs, esso stesso, inizialmente, con massa nulla
- 2) tutte le particelle e i mediatori di interazione (tranne il fotone) acquisiscono massa, tramite la loro interazione con il campo di Higgs H

funzione di Higgs



la particella di Higgs
ha massa nulla

funzione di Higgs

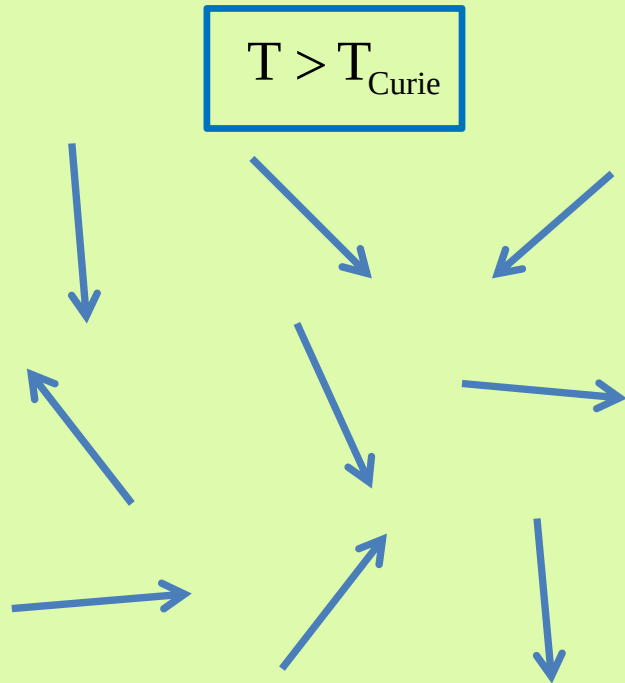


la particella di Higgs
e' massiva

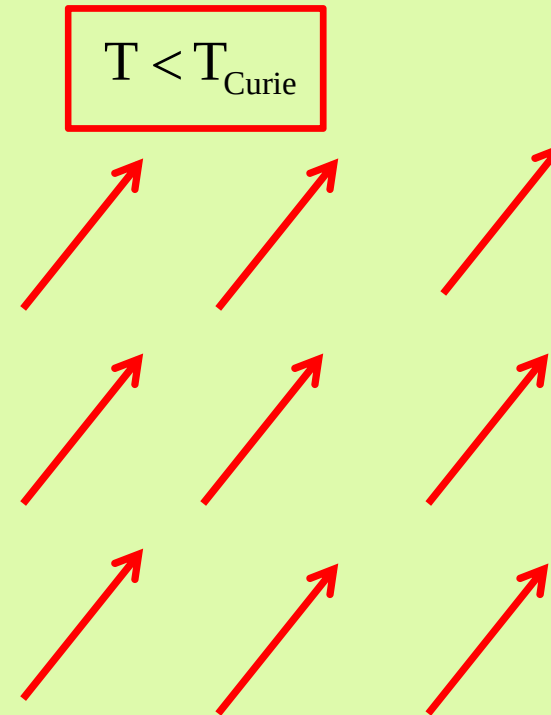
transizione

come effetto di abbassamento di temperatura
rottura spontanea di simmetria

Un esempio di questo fenomeno: raffreddamento di un materiale ferromagnetico

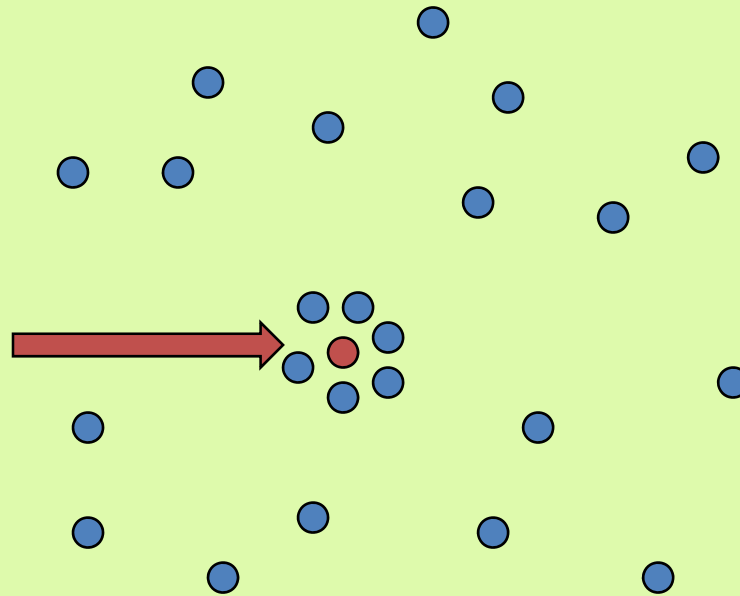


le orientazioni dei momenti magnetici intrinseci degli atomi sono "a caso", non correlate e rapidamente fluttuanti - non vi è nessuna direzione privilegiata nello spazio: **SIMMETRIA**



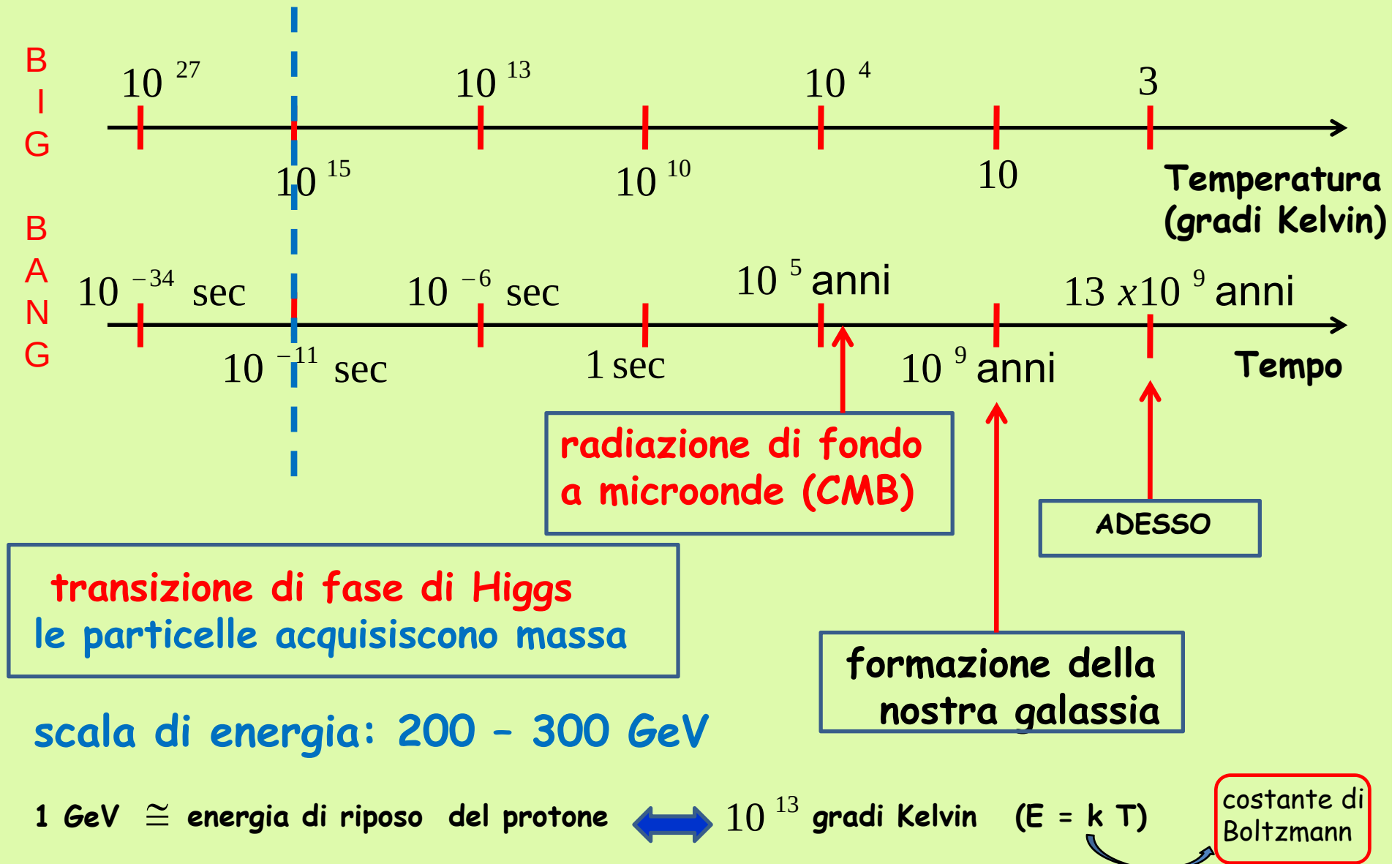
i momenti magnetici intrinseci degli atomi si correlano tra di loro e si allineano in una certa direzione (casuale) - **ROTTURA SPONTANEA DI SIMMETRIA**

Le singole particelle **acquistano massa**



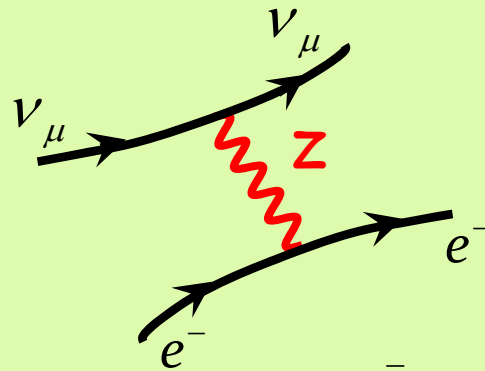
quanto maggiore e' la capacita' della particella di interagire con il campo di Higgs **tanto maggiore e' l'inerzia della particella e quindi la sua massa**

nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda

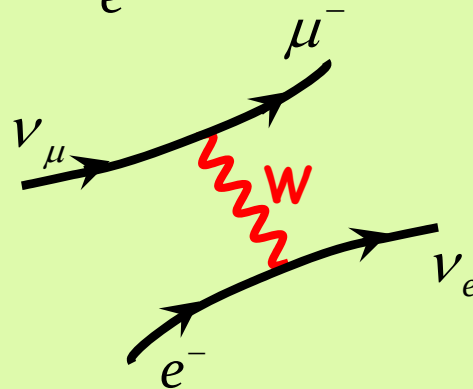


Importanti previsioni del Modello Standard delle particelle:

1) esiste anche un campo Z, mediatore di processi deboli del tipo



analogamente a

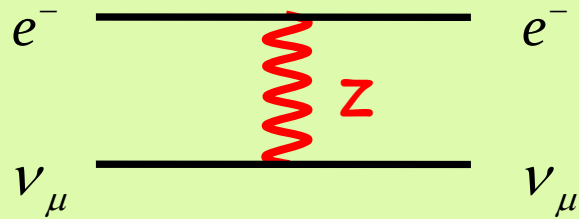


2) massa del W $\approx 80 \text{ GeV} / c^2$

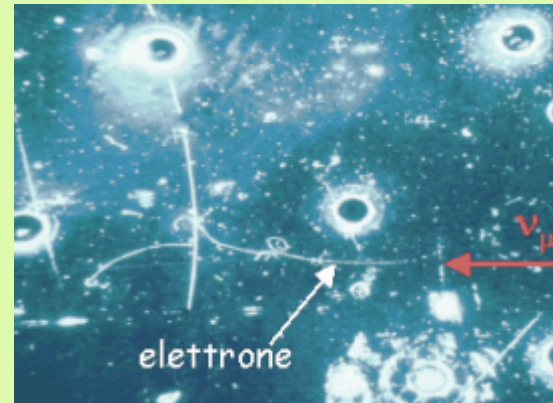
massa dello Z $\approx 91 \text{ GeV} / c^2$

Proprieta' verificate
sperimentalmente

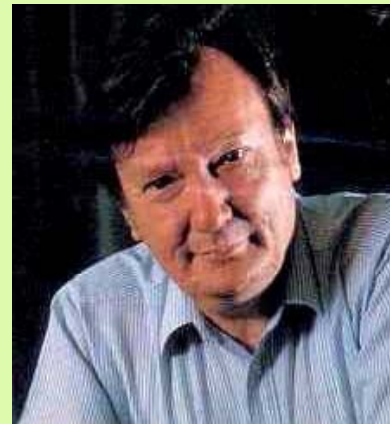
Verifiche sperimentali del MS



Processi dovuti a bosone Z misurati
al CERN (rivelatore Gargamelle) nel 1973



Misure delle masse dei bosoni W e Z
al collisore protoni-antiprotoni
del CERN (1983)

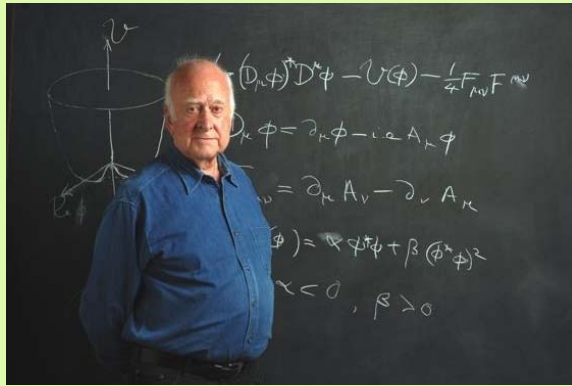


Carlo Rubbia



Simon van Der Meer

Premio Sakurai 2010 conferito dall'American Physical Society



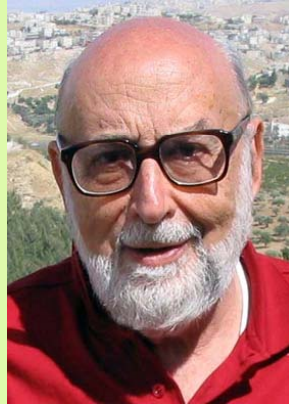
Peter Higgs



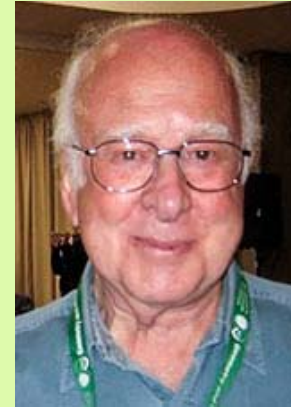
F. Englert, R. Brout

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

Premio Nobel per la Fisica 2013
assegnato congiuntamente a

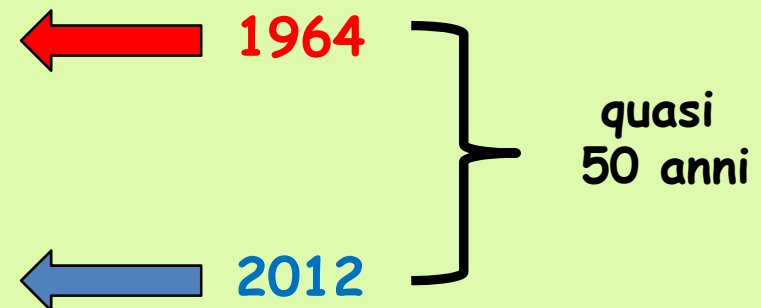


François Englert
Université Libre de Bruxelles

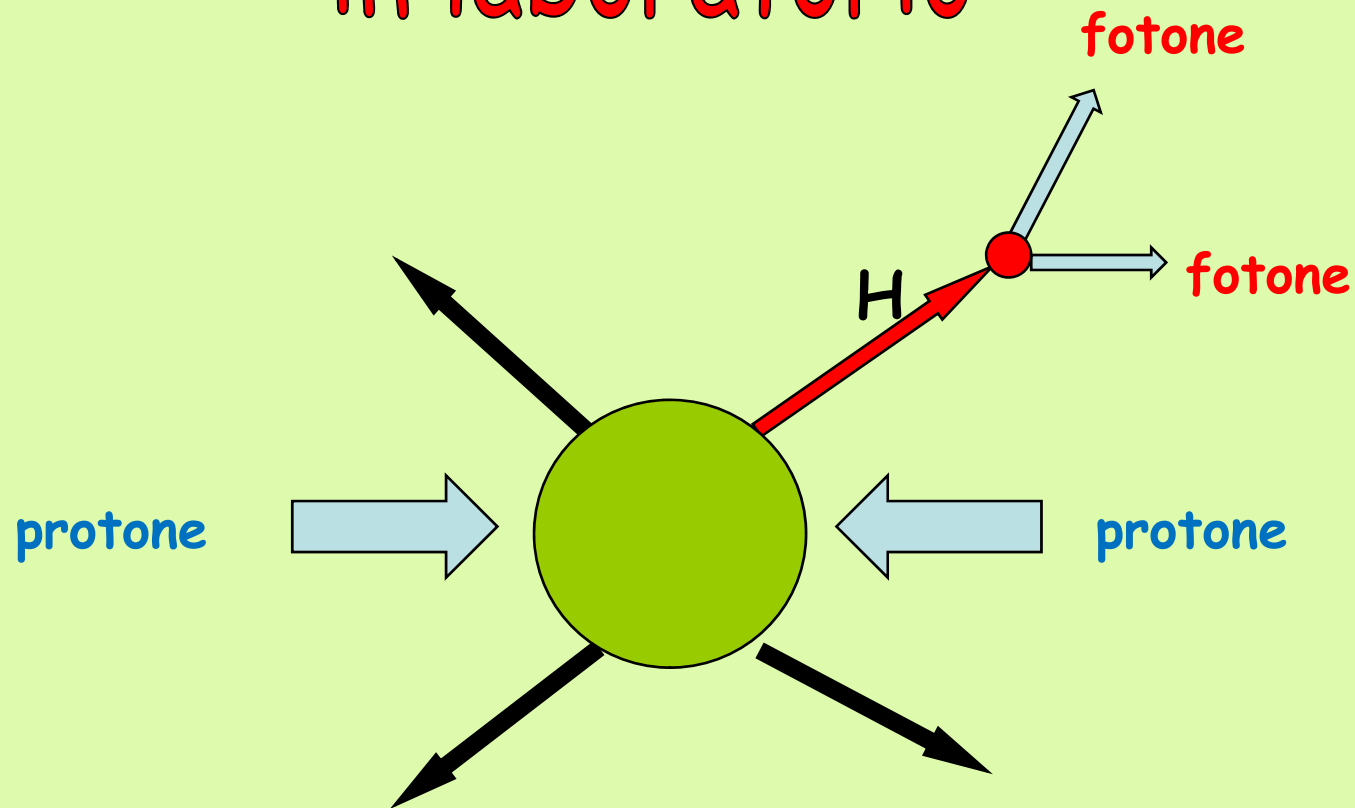


Peter W. Higgs
University of Edinburgh

Motivazione: "per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine delle masse delle particelle subatomiche e che recentemente e' stato confermato mediante la scoperta della particella fondamentale predetta, dagli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN.

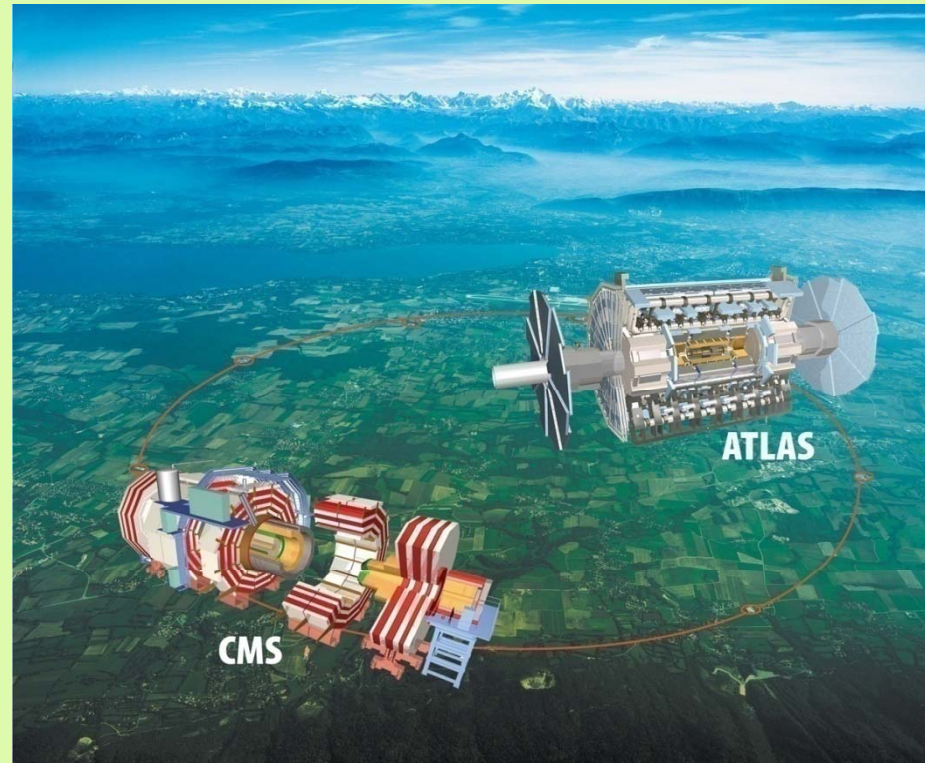


produzione di una nuova particella in laboratorio



due particelle note vengono fatte collidere

Large Hadron Collider (CERN)

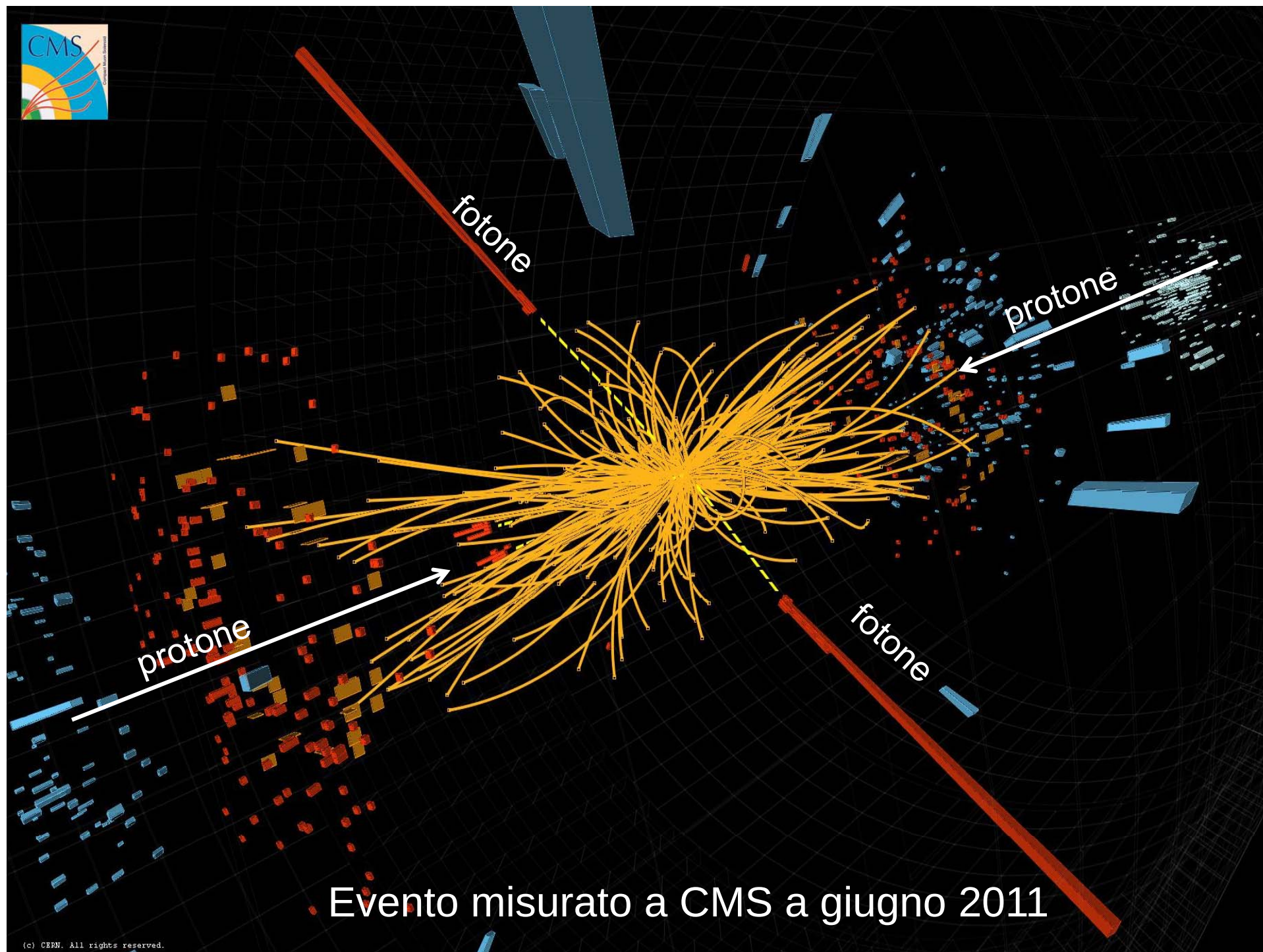
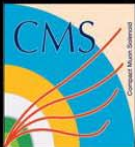


- ★ circonferenza di 27 km - tunnel sotterraneo a 50 - 175 metri di profondità
- ★ 2 fasci di protoni circolanti in verso opposto per provocare collisioni
- ★ ogni protone ha un'energia 7.000 volte piu' grande della propria energia di riposo

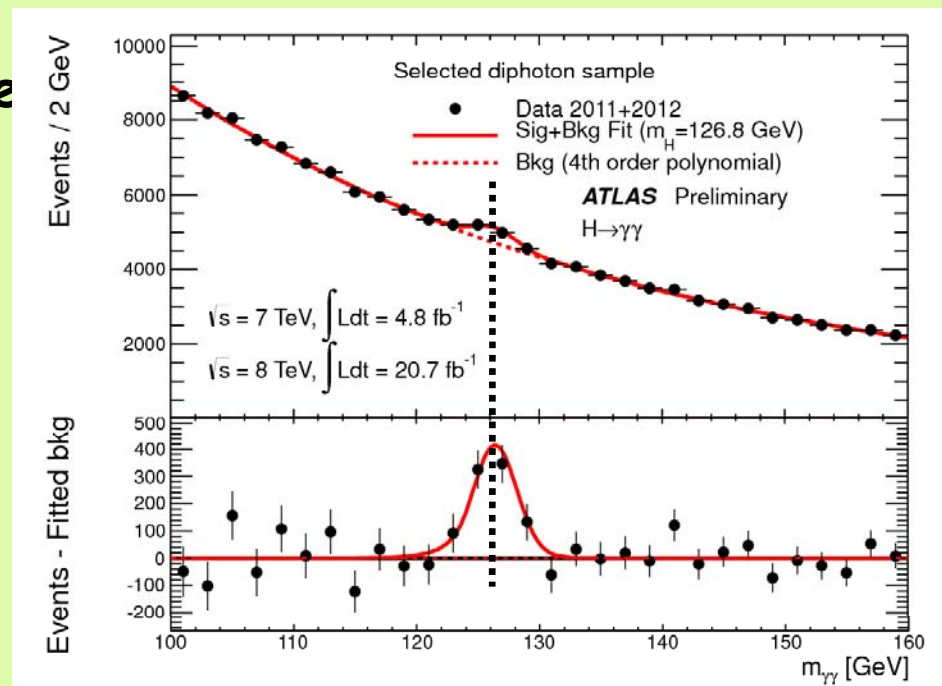
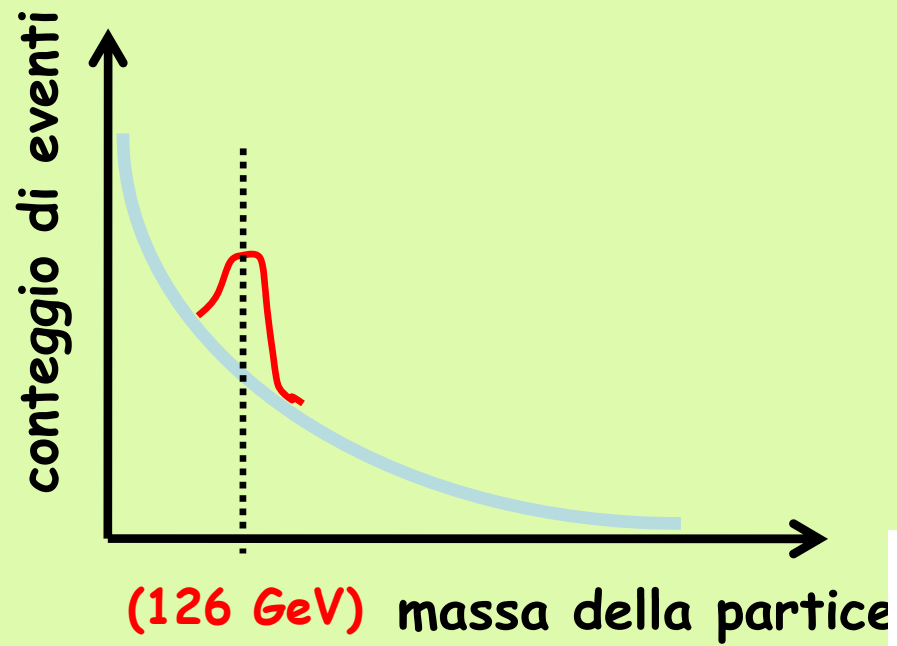
Per arrivare alla scoperta: 30 anni di lavoro!

- **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



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**



☆ 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.

Utili da visitare

Esperimenti a LHC per ricerca del bosone di Higgs

sito della Collaborazione ATLAS (CERN)

<http://atlas.ch/>

sito della Collaborazione CMS (CERN)

<http://cms.web.cern.ch/>

Peter Higgs & University of Edinburgh

<http://www.ph.ed.ac.uk/higgs>

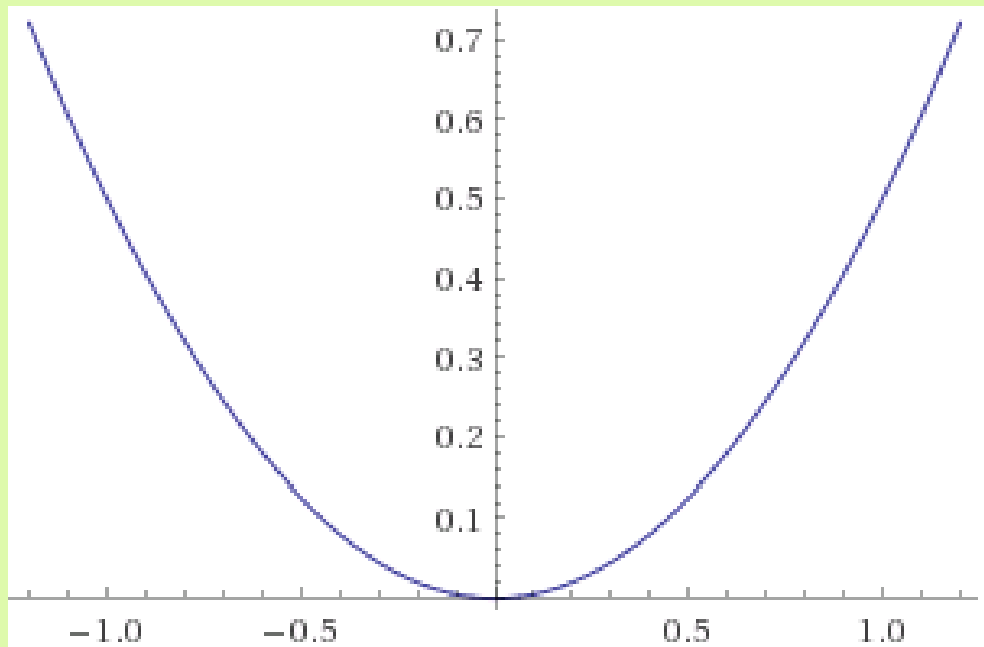
Un approfondimento:
il potenziale di Higgs

Un richiamo:

forza elastica (forza proporzionale a spostamento) $F = -k x$

energia potenziale $V = \frac{1}{2} k x^2$

moto armonico



$k = 1$

(in unita' opportune)

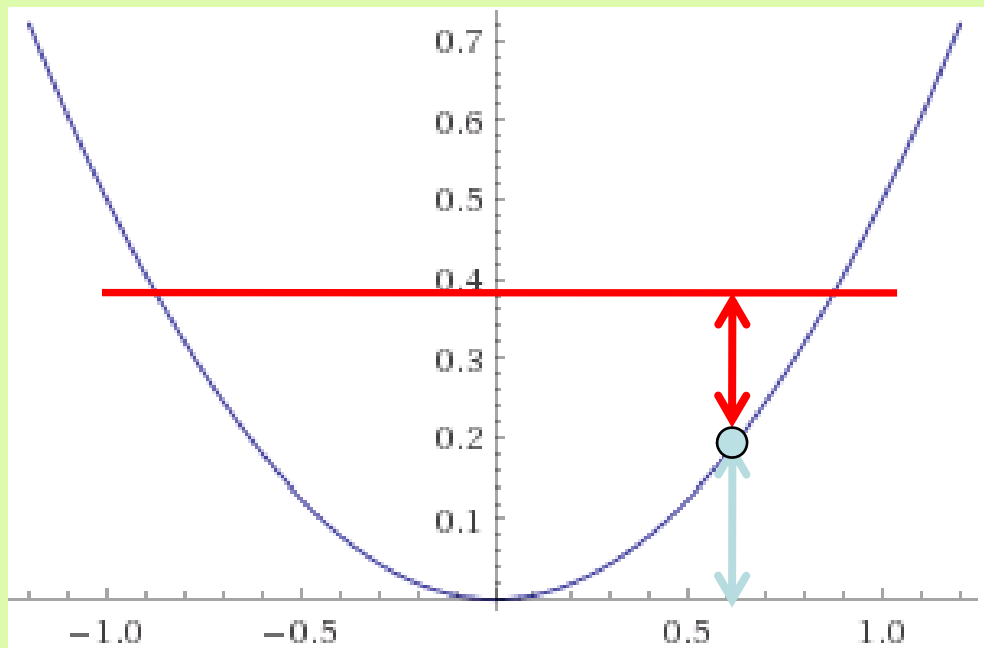
Un richiamo:

forza elastica (forza proporzionale a spostamento) $F = -k x$

energia potenziale

$$V = \frac{1}{2} k x^2$$

moto armonico



$$k = 1$$

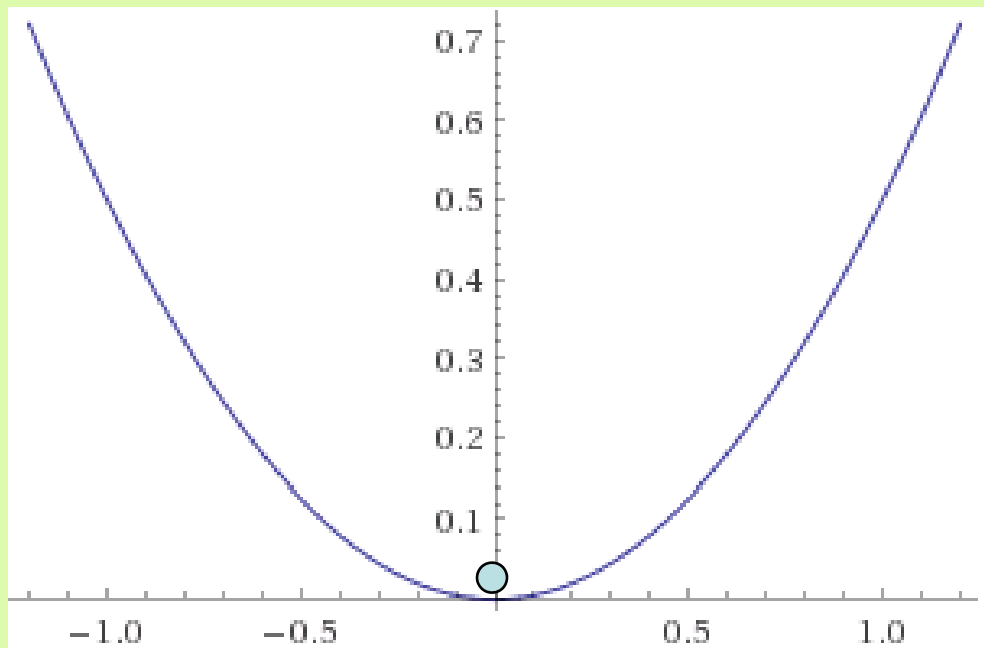
(in unita' opportune)

Un richiamo:

forza elastica (forza proporzionale a spostamento) $F = -k x$

energia potenziale $V = \frac{1}{2} k x^2$

moto armonico



$k = 1$

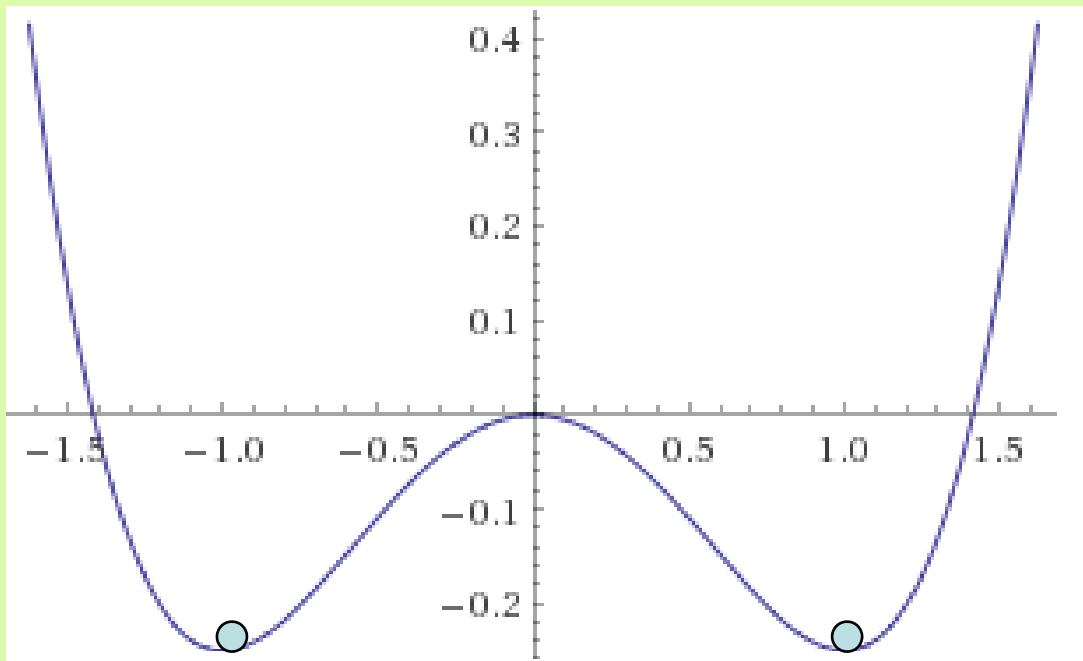
(in unita' opportune)

esiste uno stato di energia minima (posizione della pallina nell'origine)

Consideriamo adesso un diverso potenziale

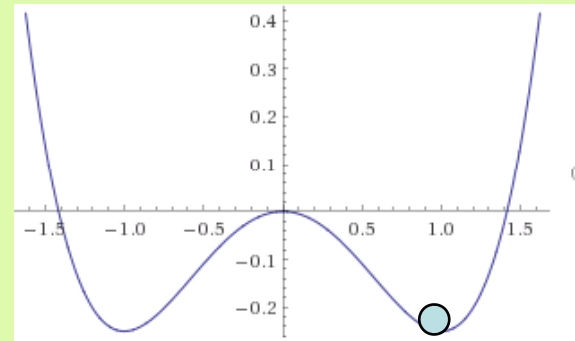
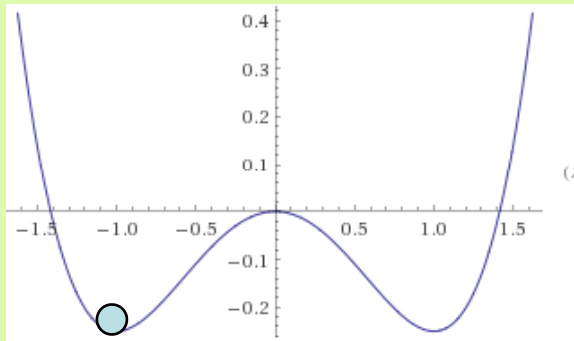
$$V = \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{4} \lambda x^4$$

il potenziale ha una simmetria per
riflessione $x \longrightarrow -x$



$k=1, \lambda=1$ (in unita' opportune)

esistono due posizioni di energia minima (equivalenti)



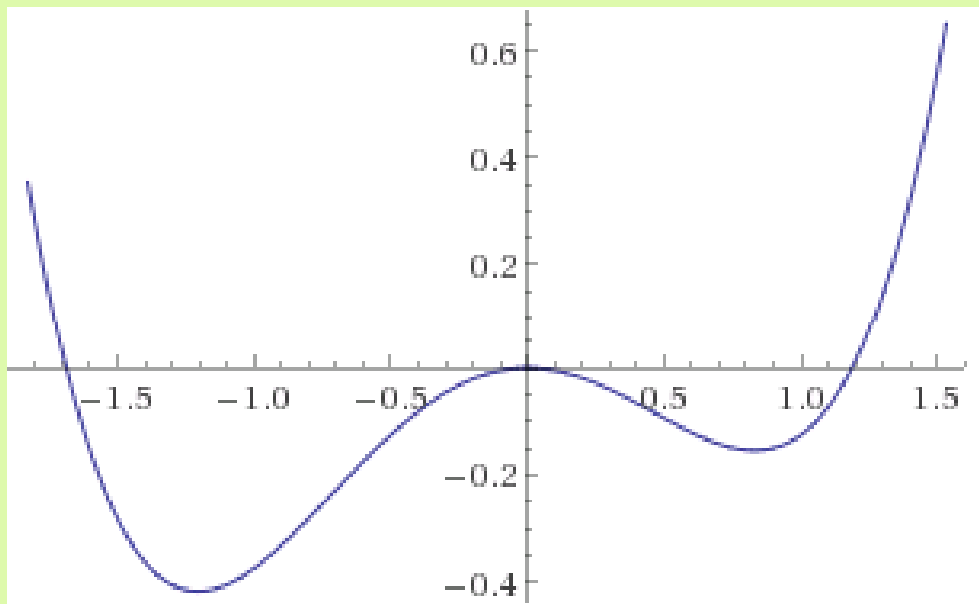
il potenziale ha una **simmetria per riflessione** $x \longrightarrow -x$

ma **esistono 2 configurazioni equivalenti**, ciascuna di queste **non e' simmetrica per riflessione**

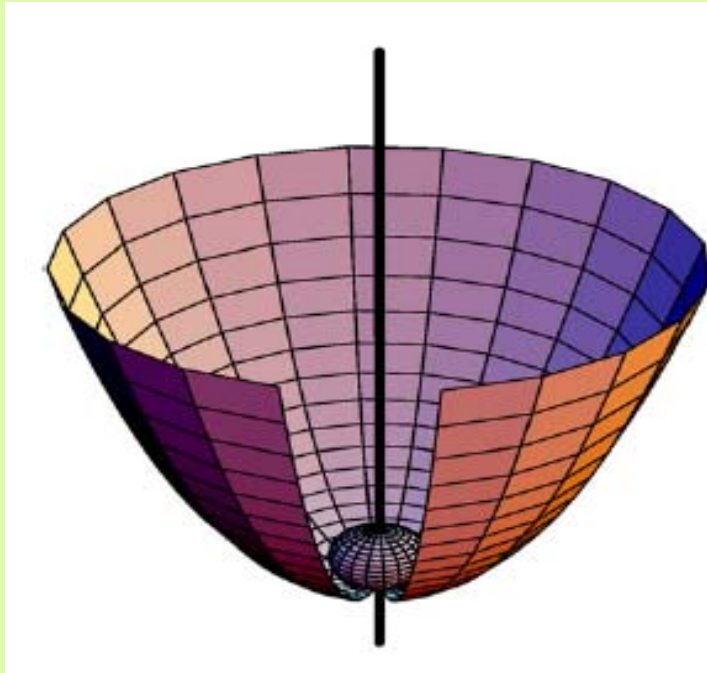
il verificarsi di una delle 2 configurazioni costituisce **una rottura spontanea di simmetria**

In contrapposizione alla **rottura spontanea di simmetria**, un esempio di **rottura dinamica di simmetria**

$$V = -\frac{1}{2} X^2 + \frac{1}{4} X^4 + \frac{1}{8} X^3$$



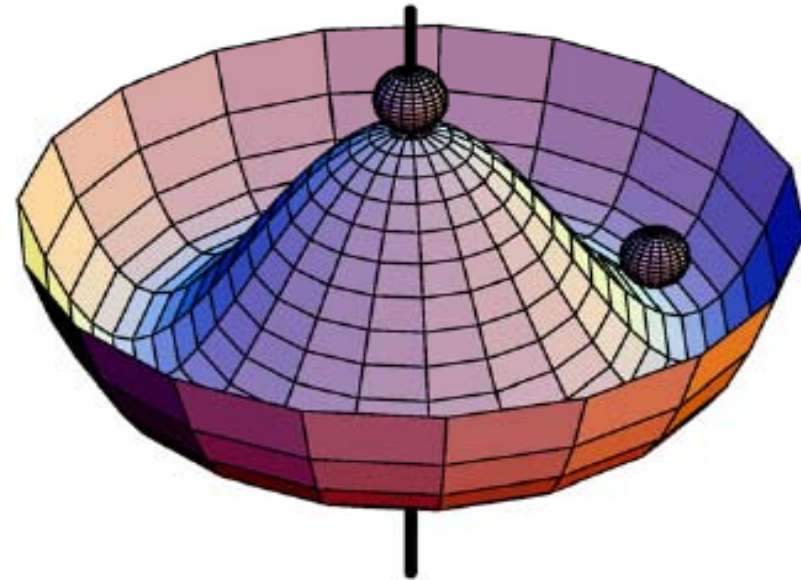
confinamento da superficie
parabolica



potenziale parabolico

esiste una sola configurazione
di energia minima

confinamento da superficie
a forma di "sombbrero"

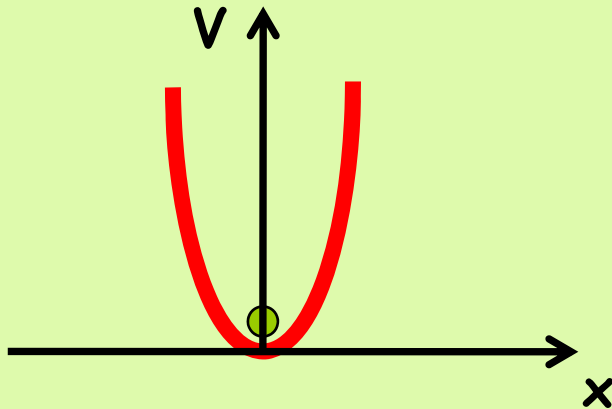


potenziale di Higgs

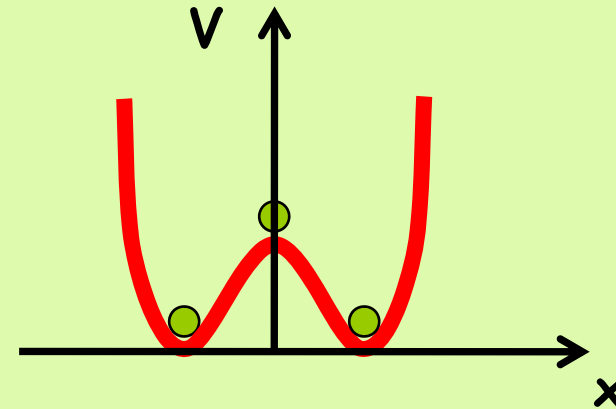
esistono infinite soluzioni di energia
minima - al verificarsi di una di
queste si ha una rottura "spontanea"
di simmetria - ma la simmetria del
potenziale confinante resta inalterata

Caso unidimensionale

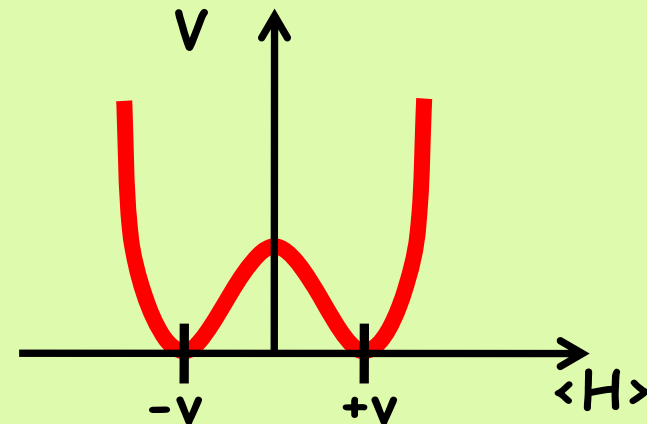
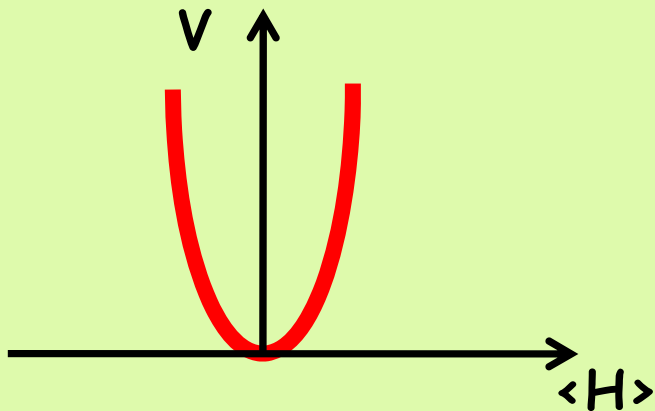
potenziale parabolico



potenziale di Higgs



analogamente per il campo di Higgs H



esiste uno stato di energia minima
(stato di vuoto) con $\langle H \rangle_0 = 0$
la particella di Higgs ha massa = 0

esistono 2 stati energia minima
(stati di vuoto) con $\langle H \rangle_0 \neq 0$
la particella di Higgs e' massiva