

Bosone di Higgs e rottura spontanea di simmetria

Biblioteca Civica Archimede

Settimo Torinese, 20 febbraio 2013

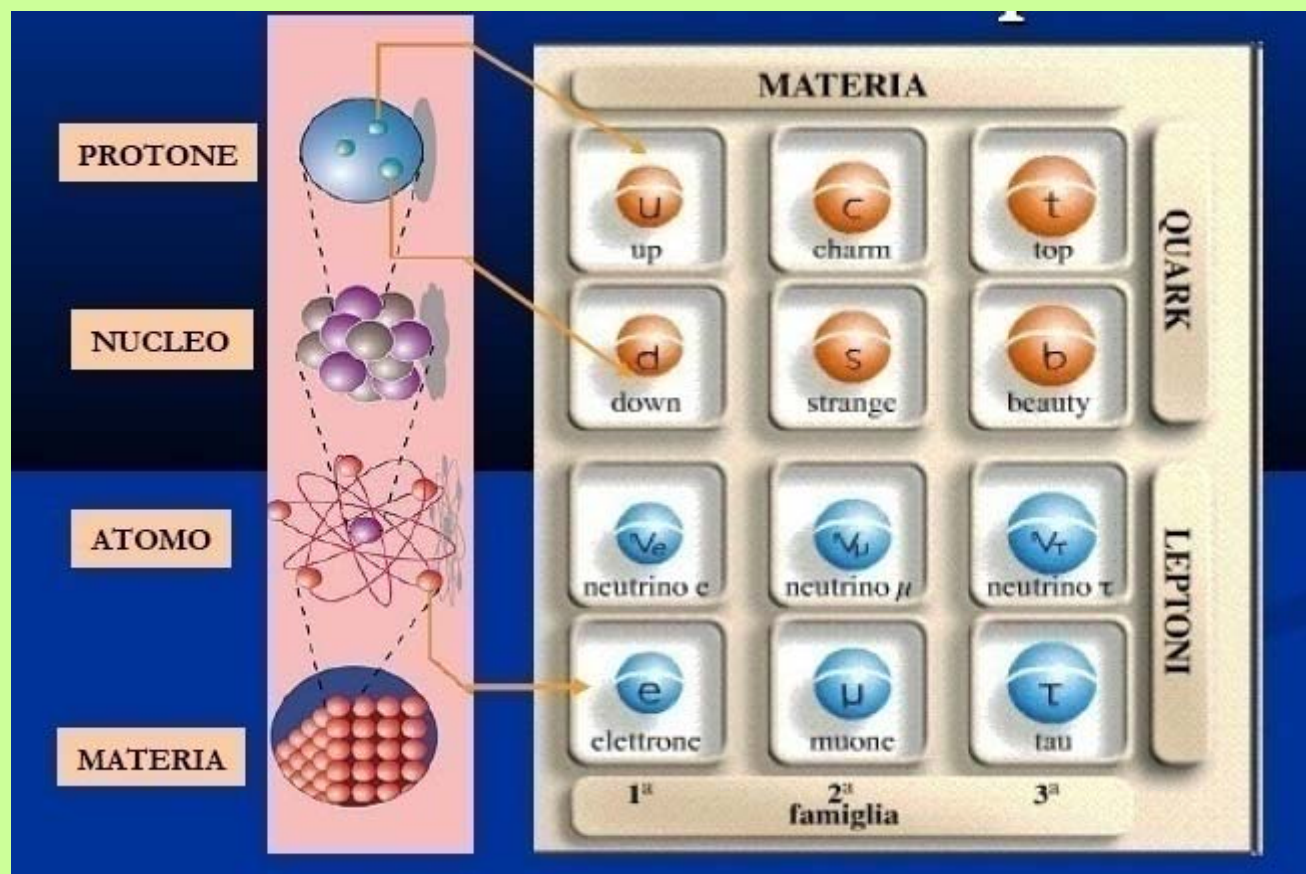
Alessandro Bottino

Università di Torino/INFN

Contenuto

- ★ Il bosone di Higgs come previsione del Modello Standard delle particelle
- ★ Rottura spontanea di simmetria e generazione di massa
- ★ Particella di Higgs al Large Hadron Collider del CERN
- ★ Implicazioni cosmologiche del bosone di Higgs

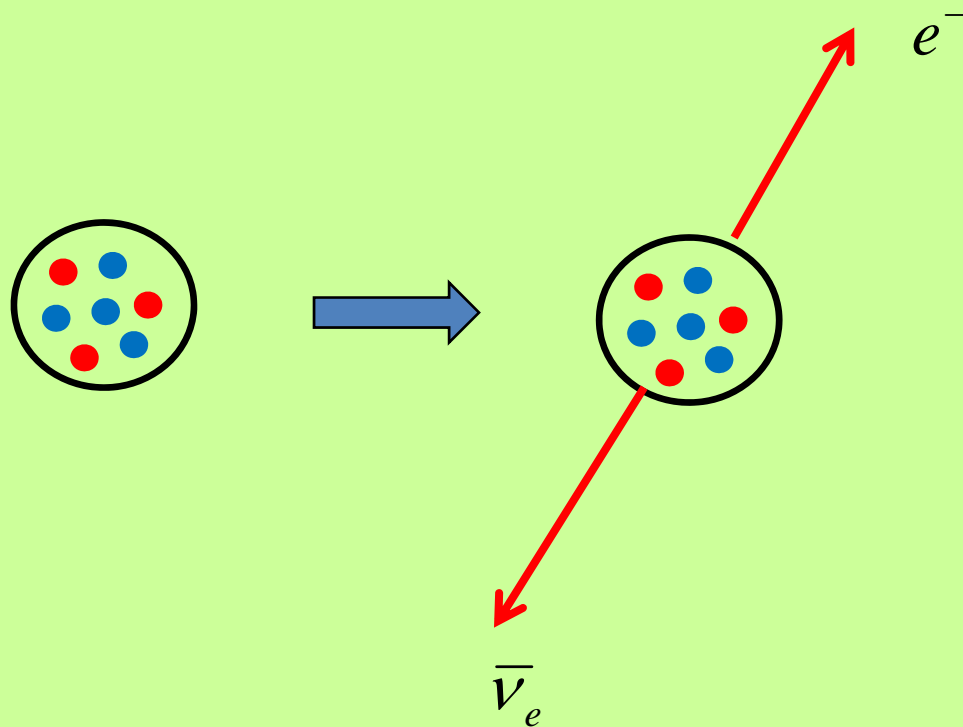
Tutte le particelle che conosciamo sono riconducibili ai seguenti costituenti (**quarks e leptoni**)



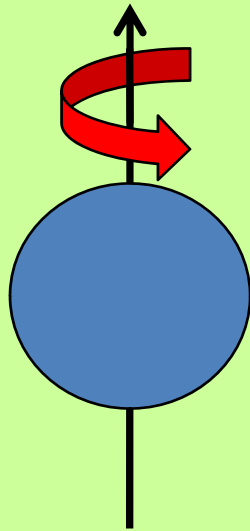
e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

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

decadimento beta di un nucleo



Spin di una particella = suo momento angolare **intrinseco**



Spin = concetto **quantistico**

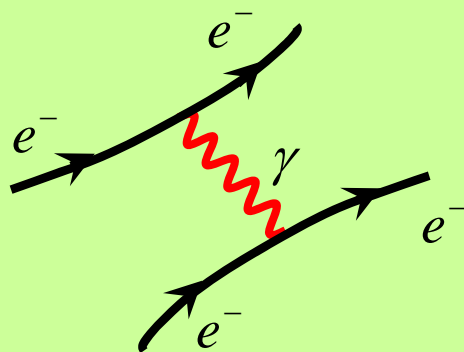
lo spin può solo avere **valori interi o semi-interi**

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

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

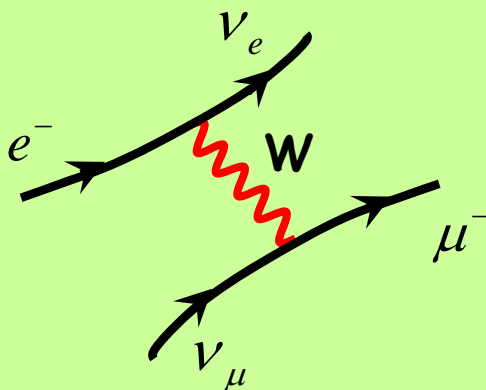
Mediatori dell'interazione elettromagnetica e dell'interazione debole

un generico **processo elettromagnetico**, per esempio:



ha come campo “mediatore” dell’interazione il **campo elettromagnetico**,
ossia il **fotone**

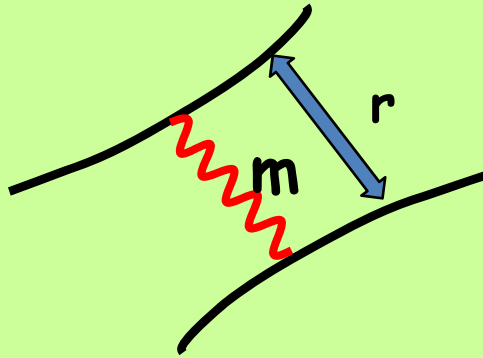
un generico **processo debole**, per esempio:



Attenzione: la particella W
deve essere carica W^\pm

ha come campo “mediatore” dell’interazione il **campo debole**, ossia
il **bosone W**

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

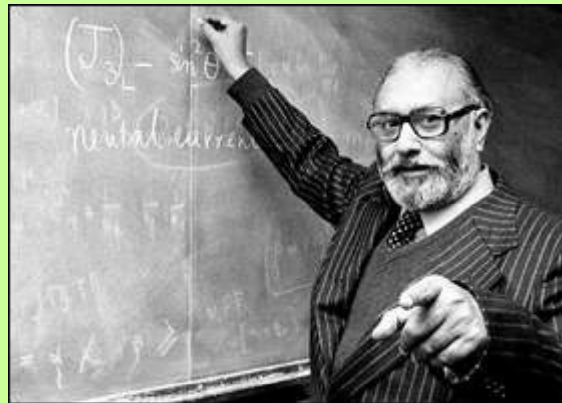
Modello standard delle particelle
(unificazione dell'interazione elettromagnetica e
di quella debole)

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

Premi Nobel 1979



Sheldon L. Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

- ★ Teoria dell'interazione elettromagnetica = teoria perfetta
- ★ se vogliamo formulare per l'interazione debole una teoria analoga a quella dell'interazione elettromagnetica occorre provvisoriamente mettere a zero la massa del mediatore W
- ★ analogamente vengono provvisoriamente messe a zero le masse di tutte le particelle (leptoni e quarks)
- ★ una volta sviluppata la teoria, occorrerà trovare un "meccanismo" per conferire a tutte le particelle e ai mediatori (campi) di interazione i loro valori fisici di massa

Nel Modello Standard il “meccanismo” adottato e' il
Meccanismo di Higgs:

- 1) viene ipotizzata l'esistenza in tutto lo spazio di un campo di Higgs, esso stesso, inizialmente, con massa nulla
- 2) avviene un fenomeno di **rottura spontanea di simmetria**
- 3) questo fenomeno genera massa per:
 - il campo di Higgs
 - i campi di interazione (salvo il campo elettromagnetico)
 - i campi di materia

La teoria con particelle massive, così' generata, mantiene le “buone” proprietà' della teoria originaria con masse nulle

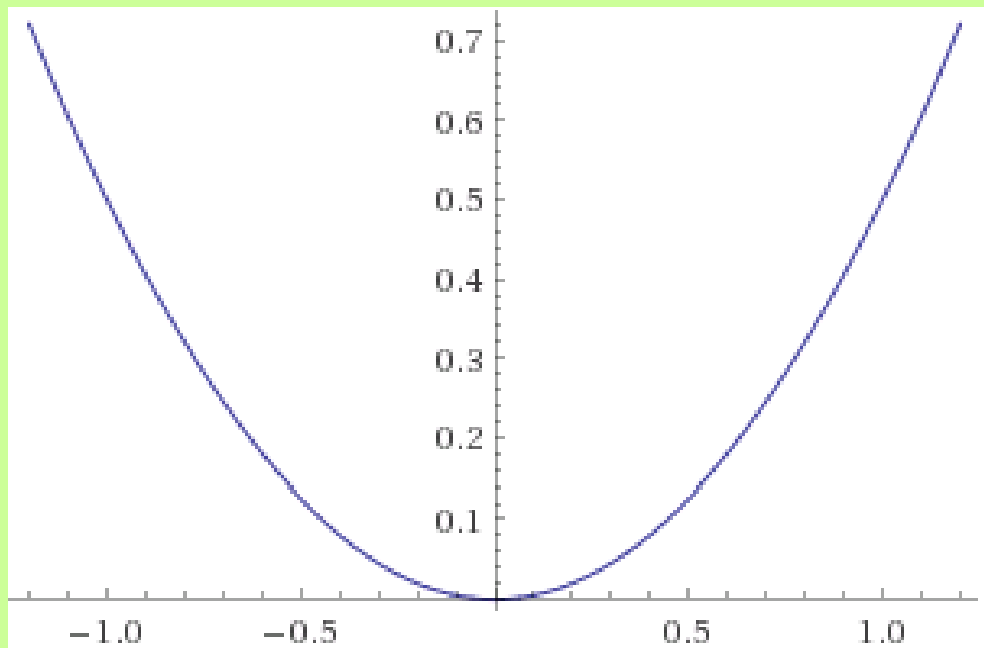
**Campo di Higgs e
rottura spontanea di simmetria**

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)

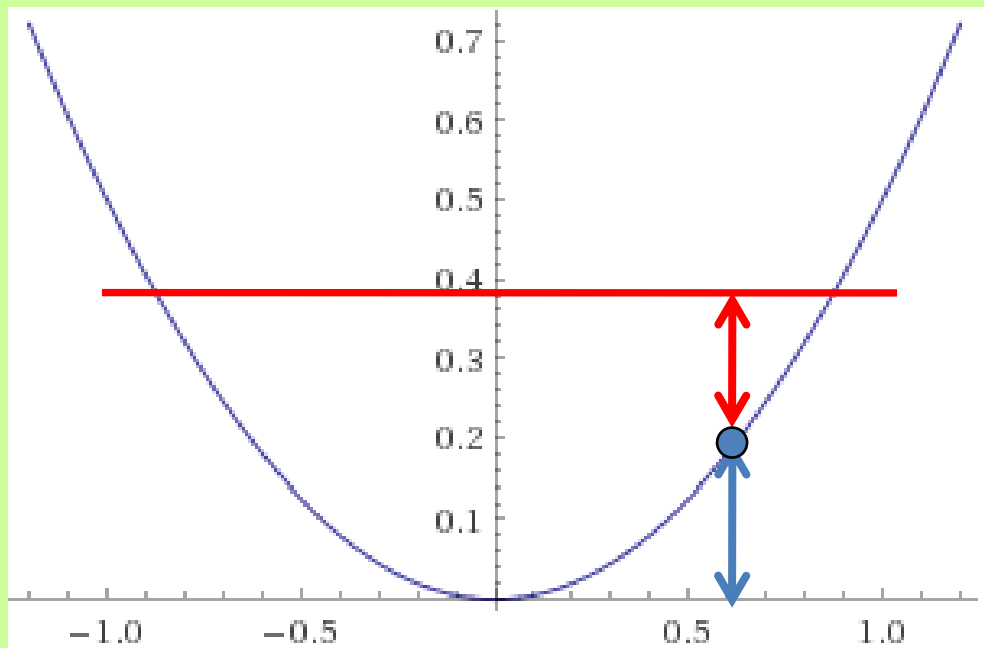
Un richiamo:

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

energia potenziale

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

moto armonico



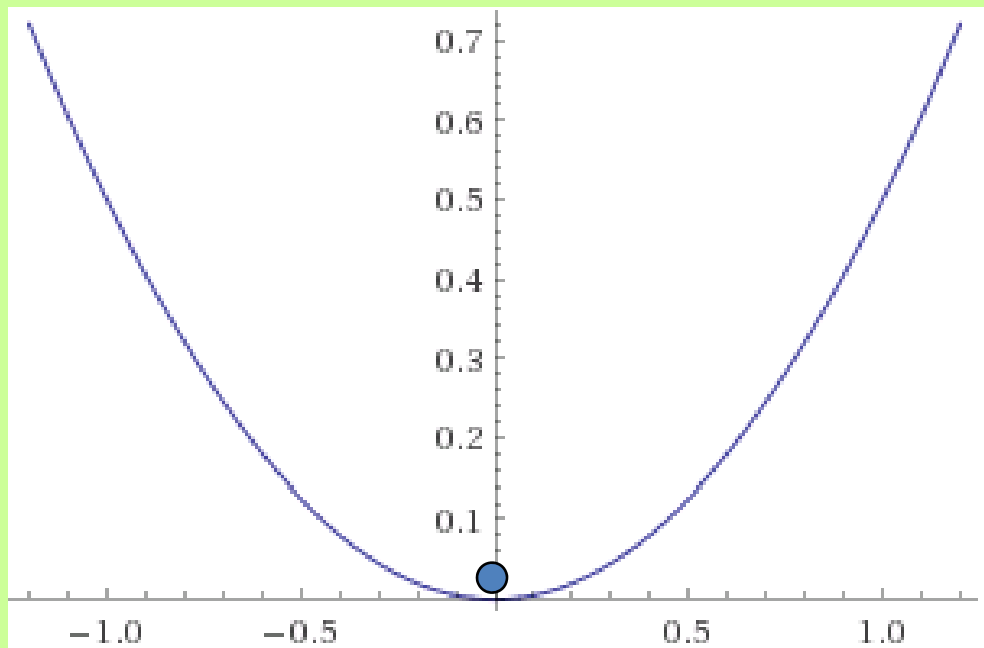
$k = 1$
(in unita' opportune)

Un richiamo:

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

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

moto armonico



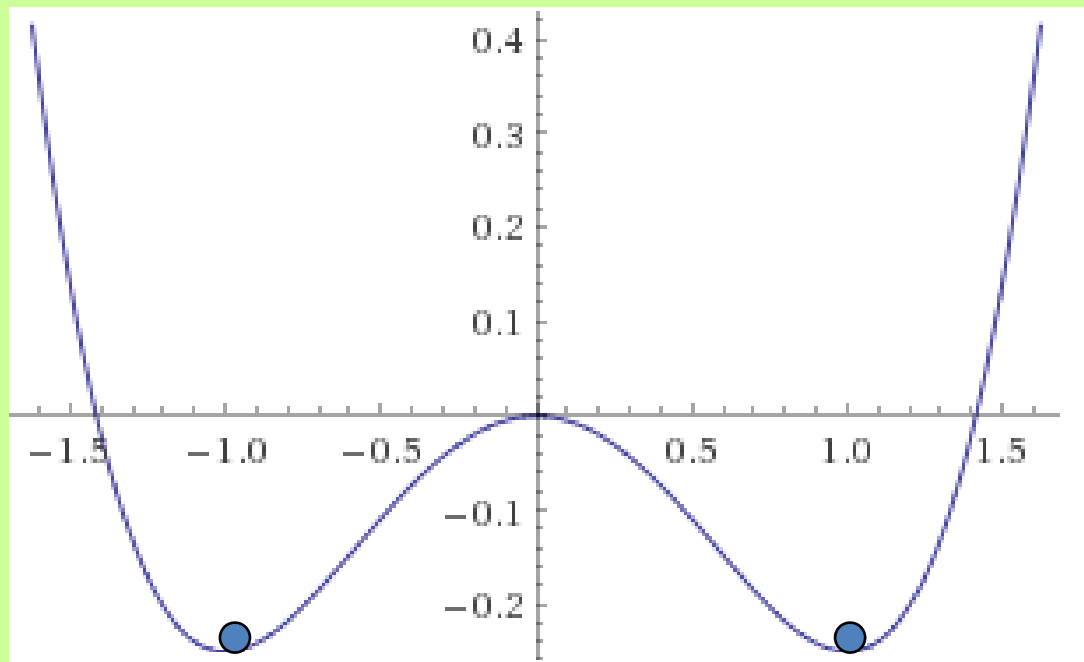
$k = 1$
(in unita' opportune)

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

Consideriamo adesso un diverso potenziale

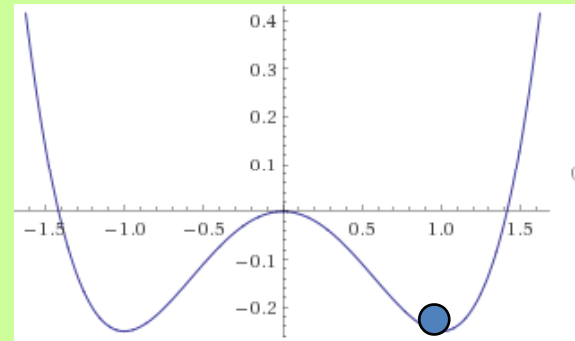
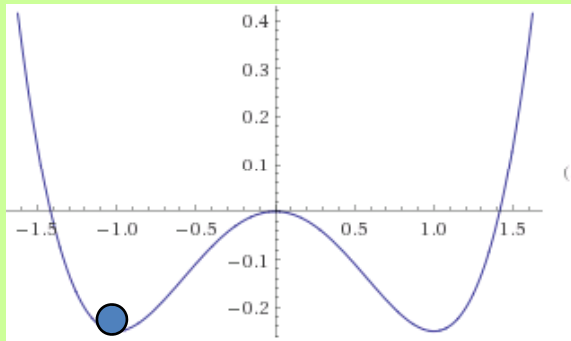
$$V = \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{4} \lambda x^4$$

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



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

esistono due posizioni di energia minima (equivalenti)



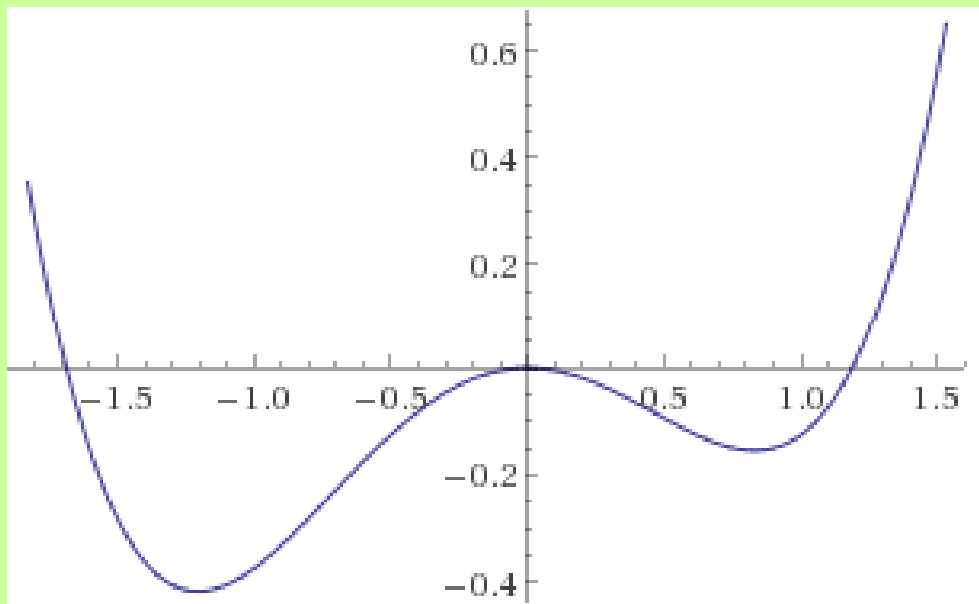
il potenziale ha una **simmetria per riflessione** $x \longrightarrow -x$

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

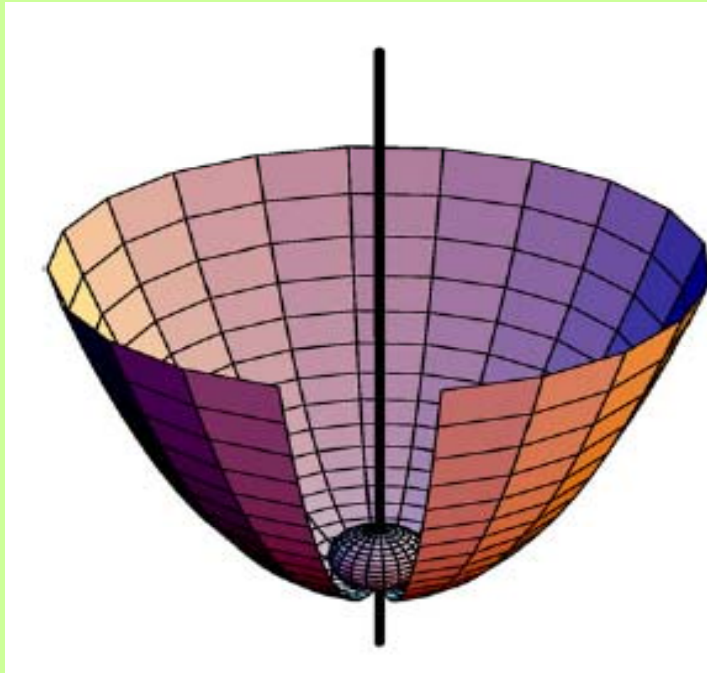
il verificarsi di una delle 2 configurazioni costituisce **una rottura spontanea di simmetria**

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

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



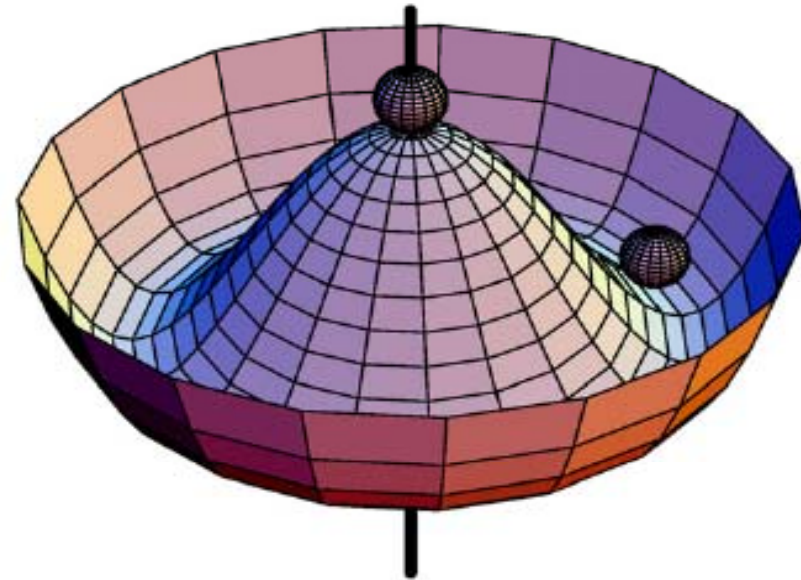
confinamento da superficie
parabolica



potenziale parabolico

esiste una sola configurazione
di energia minima

confinamento da superficie
a forma di "sombbrero"

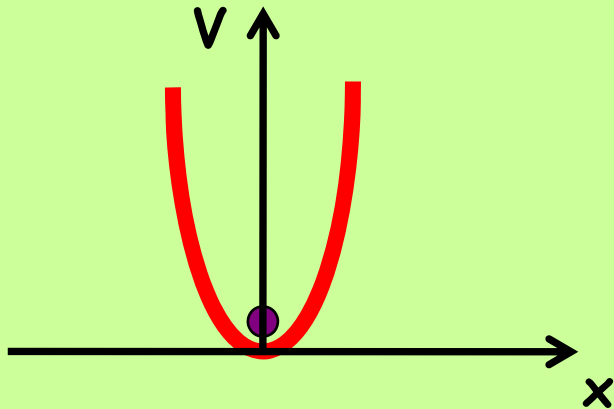


potenziale di Higgs

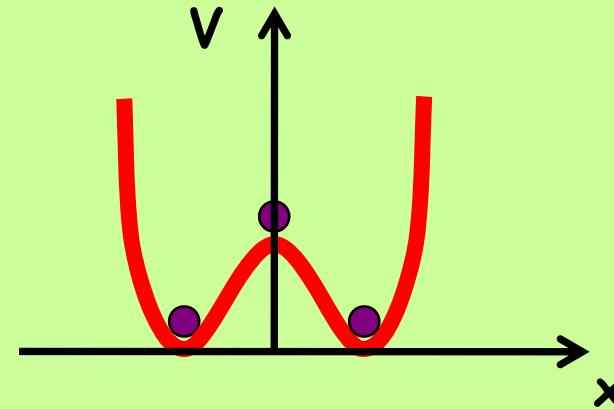
esistono infinite soluzioni di energia
minima - al verificarsi di una di
queste si ha una rottura "spontanea"
di simmetria - ma la simmetria del
potenziale confinante resta inalterata

Caso unidimensionale

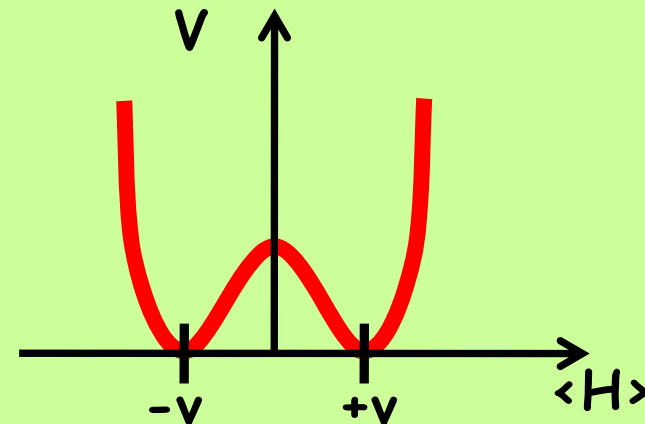
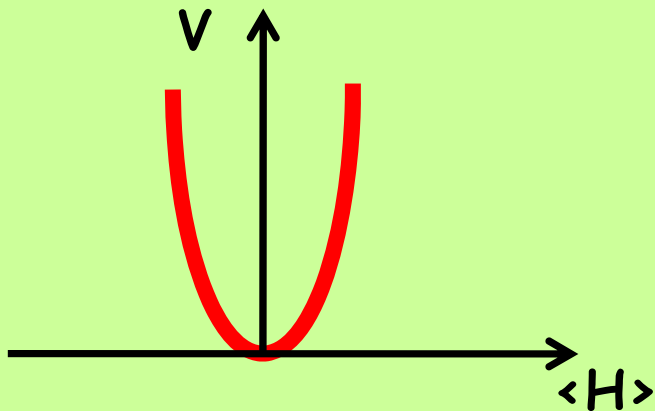
potenziale parabolico



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

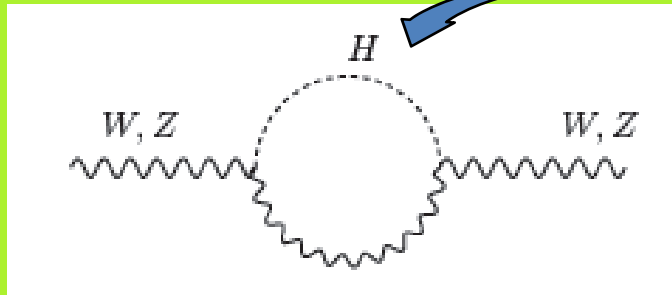
Nel Modello Standard il "meccanismo" adottato e' il
Meccanismo di Higgs:

- 1) viene ipotizzata l'esistenza in tutto lo spazio di un campo di Higgs, esso stesso, inizialmente, con massa nulla
- 2) avviene un fenomeno di **rottura spontanea di simmetria**
- 3) questo fenomeno genera massa per:

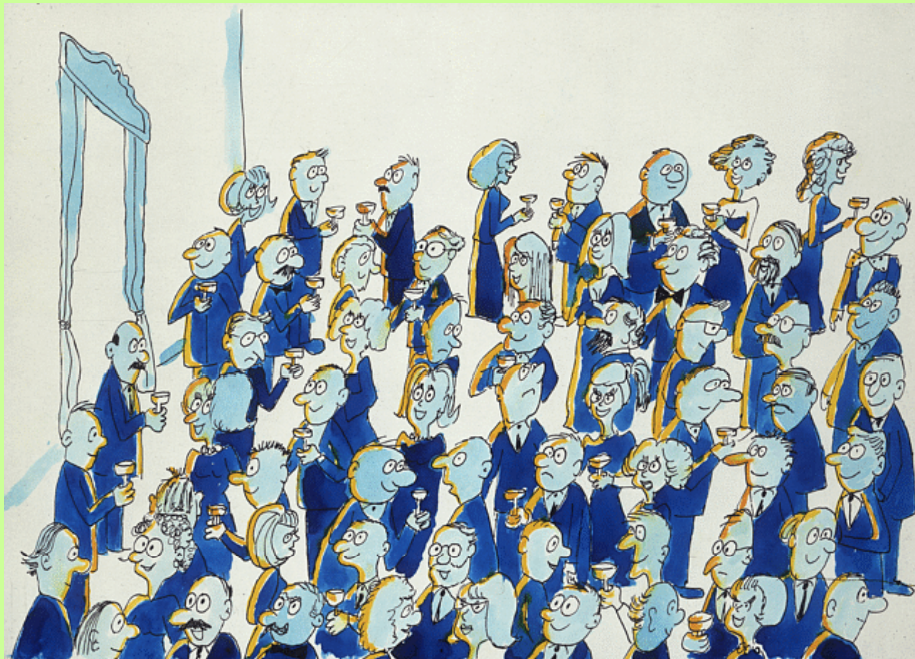
-  - il campo di Higgs
-  - i campi di interazione (salvo il campo elettromagnetico)
- i campi di materia

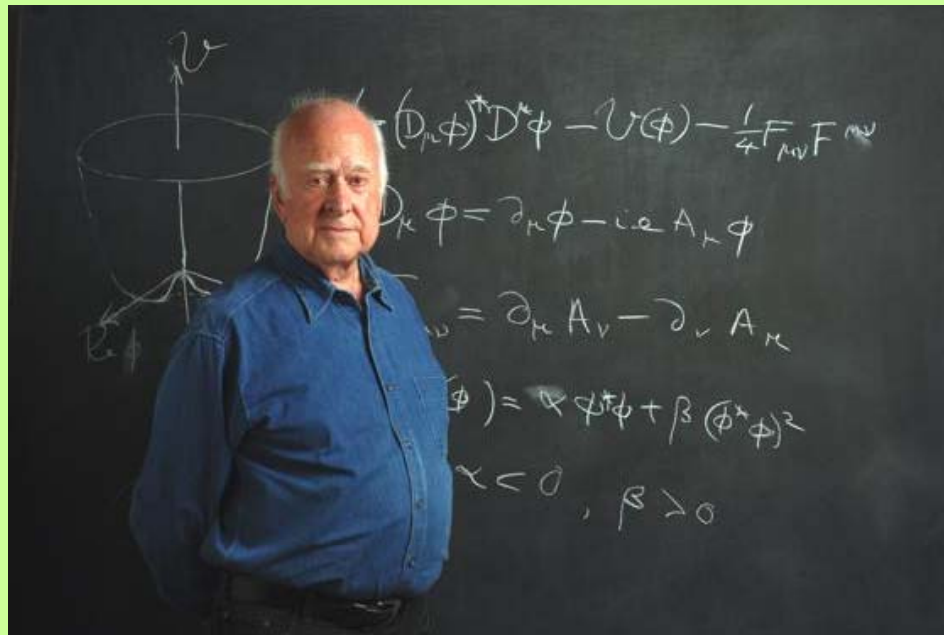
La teoria con particelle massive, cosi' generata, mantiene le "buone" proprieta' della teoria originaria con masse nulle

Per esempio, il bosone W “dialoga” con il mezzo circostante pervaso dal campo di Higgs, ossia acquista massa con processi del tipo



processo con particelle “virtuali”





Peter Higgs e la particella di Higgs



Peter Higgs by Ken Currie 2008

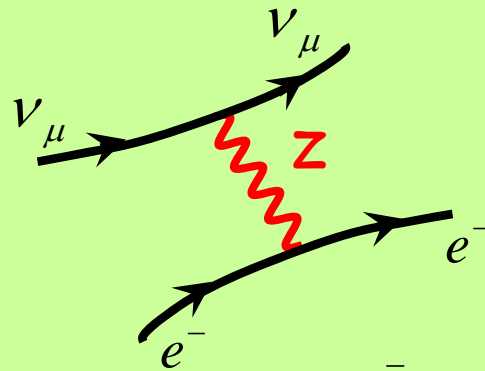


T.W.B. Kibble, G.S. Guralnik, C.R.Hagen, F. Englert, R. Brout

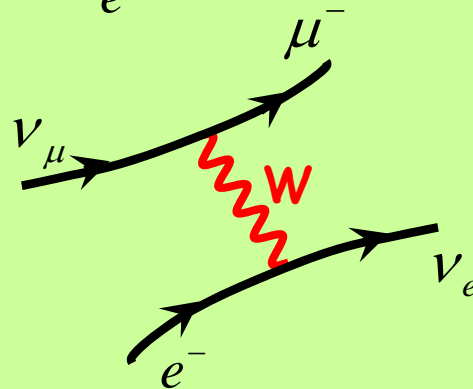
premio Sakurai 2010

Importanti previsioni del Modello Standard delle particelle:

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



analogamente a

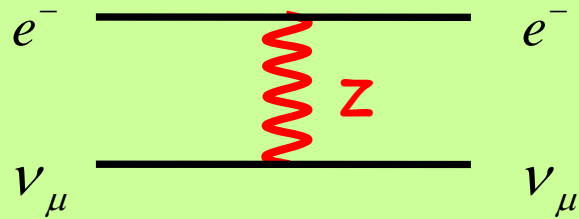


2) massa del W $\approx 80 \text{ GeV} / c^2$

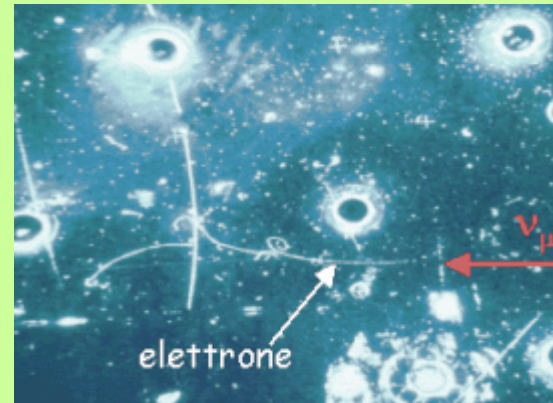
massa dello Z $\approx 91 \text{ GeV} / c^2$

Proprietà' verificate
sperimentalmente

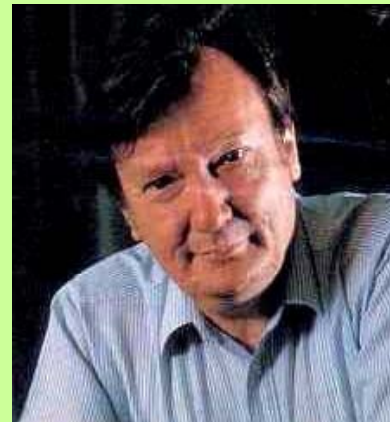
Verifiche sperimentali del MS



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)



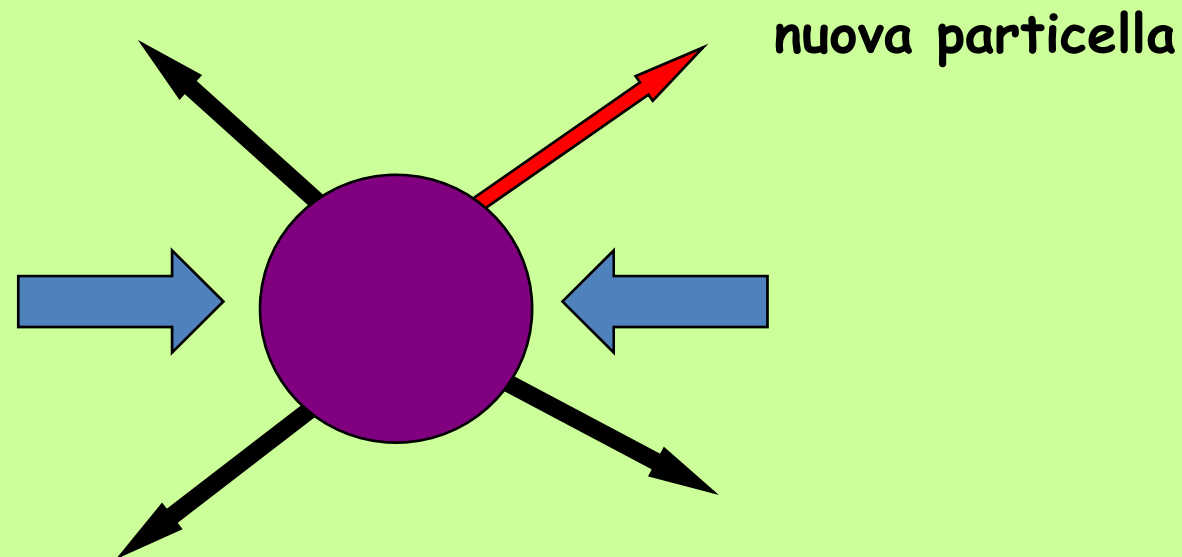
Carlo Rubbia



Simon van Der Meer

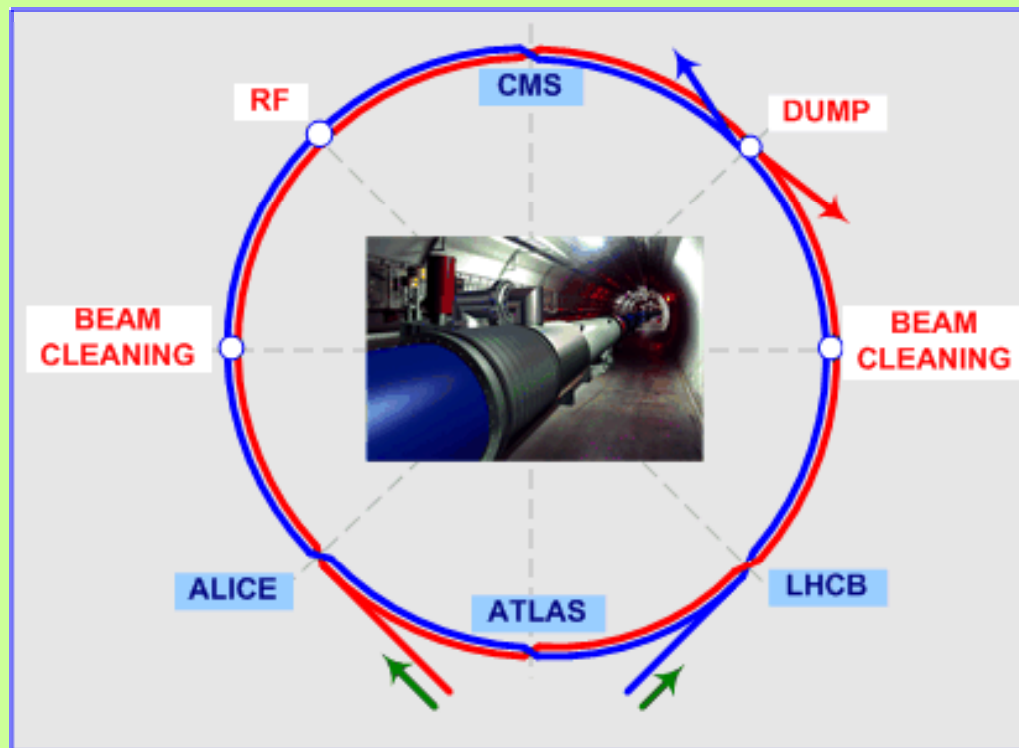
Ricerca della particella di Higgs ad LHC

produzione di una nuova particella in laboratorio



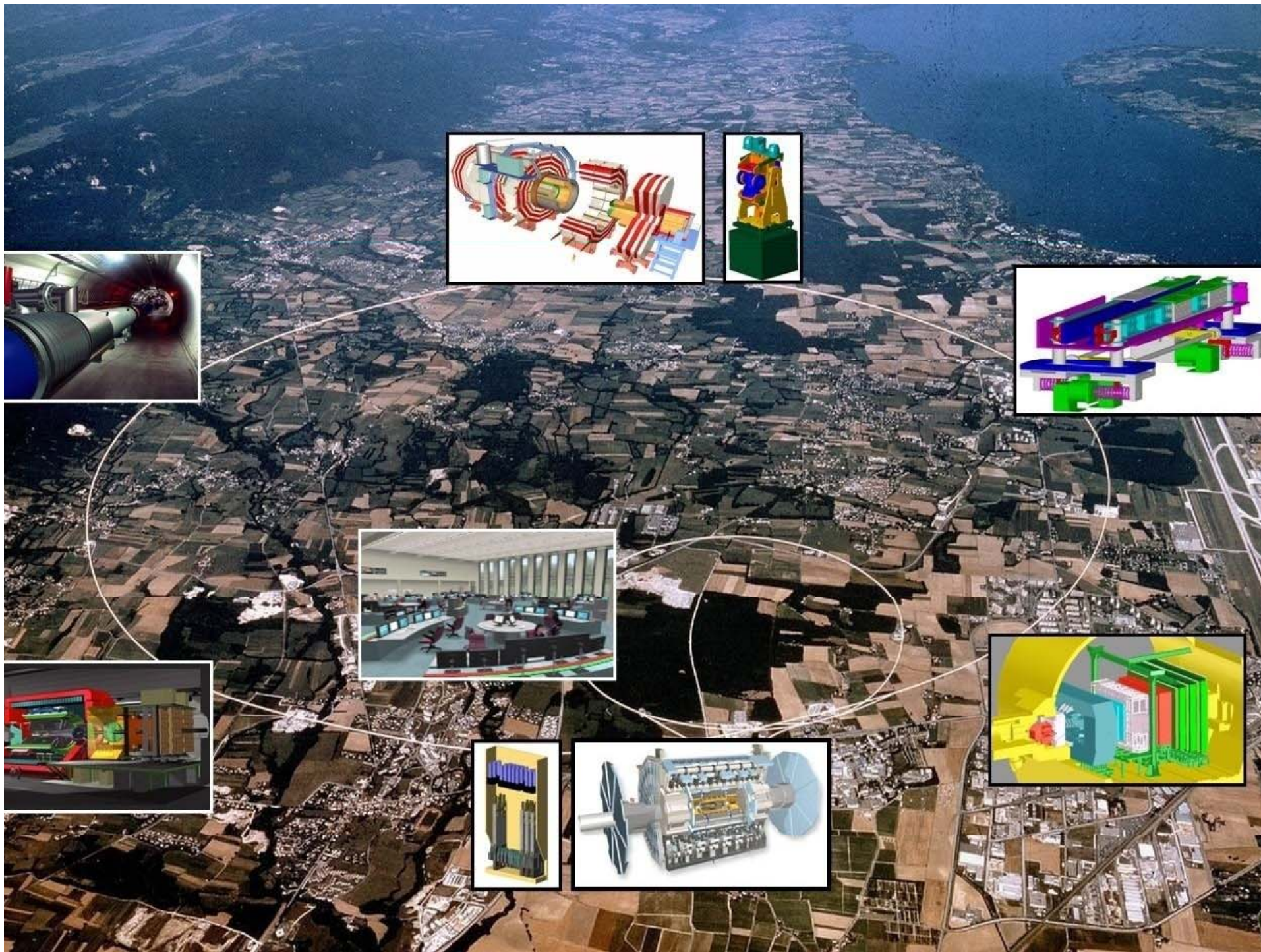
due particelle note vengono fatte collidere

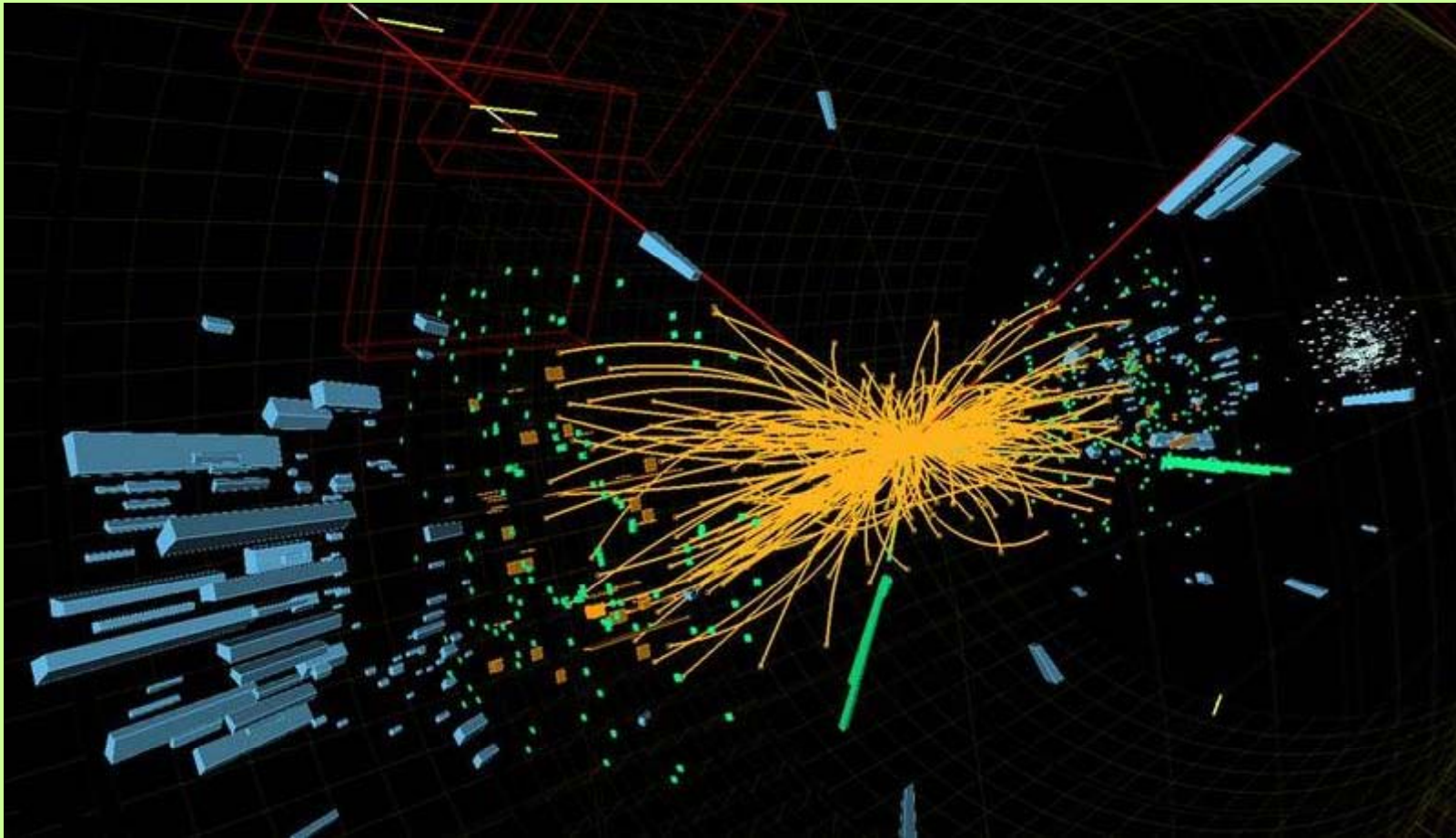
Large Hadron Collider (CERN)



- ★ 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 più grande della propria energia di riposo







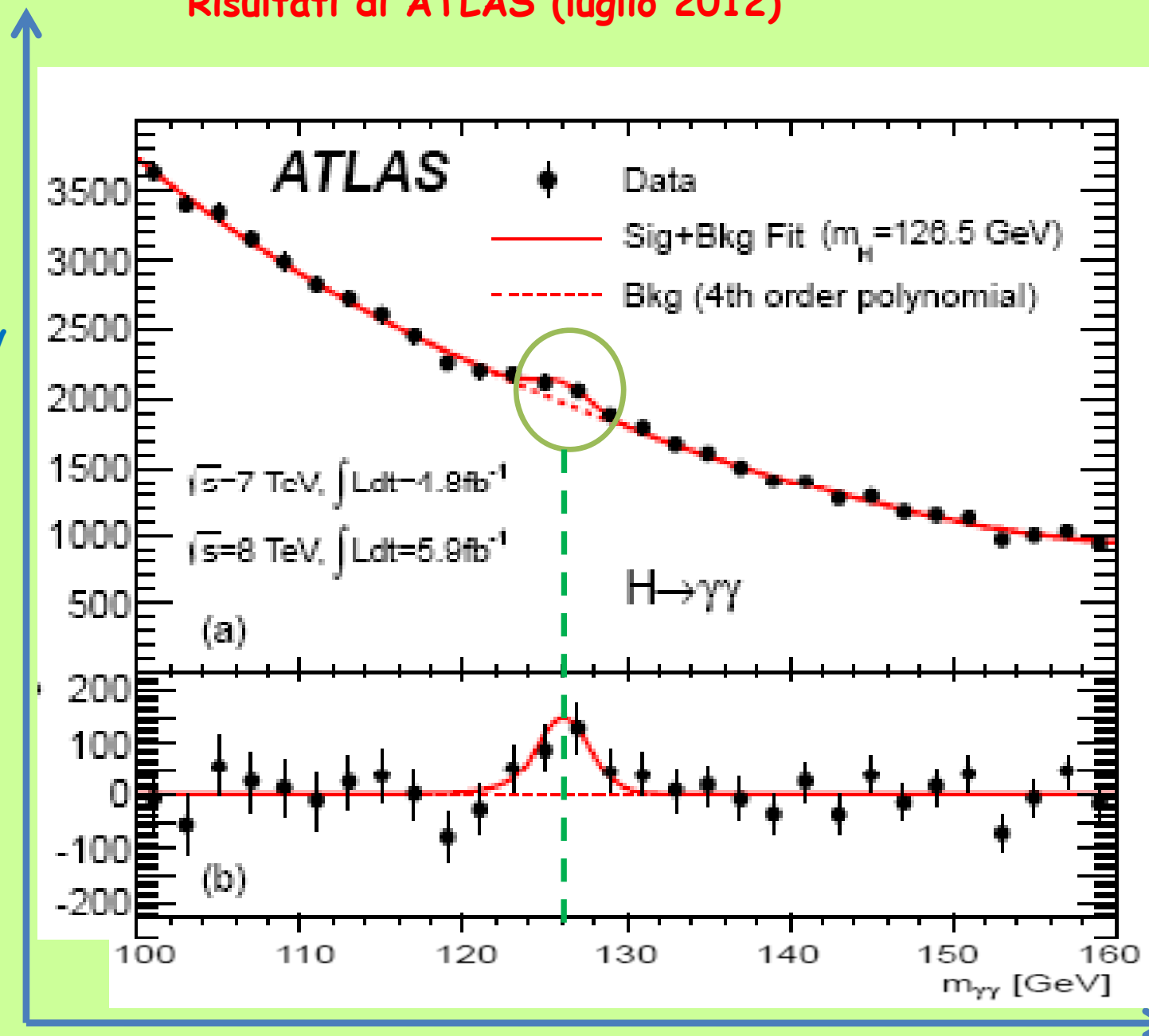
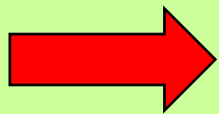
Verde = elettrone positrone
Rosso = $\mu + \mu -$

Risultati di ATLAS (luglio 2012)

numero eventi
in intervallo di
energia di 2 GeV



numero
eventi
con fondo
sottratto



I dati indicano la produzione di un bosone neutro con
massa $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys) GeV}$

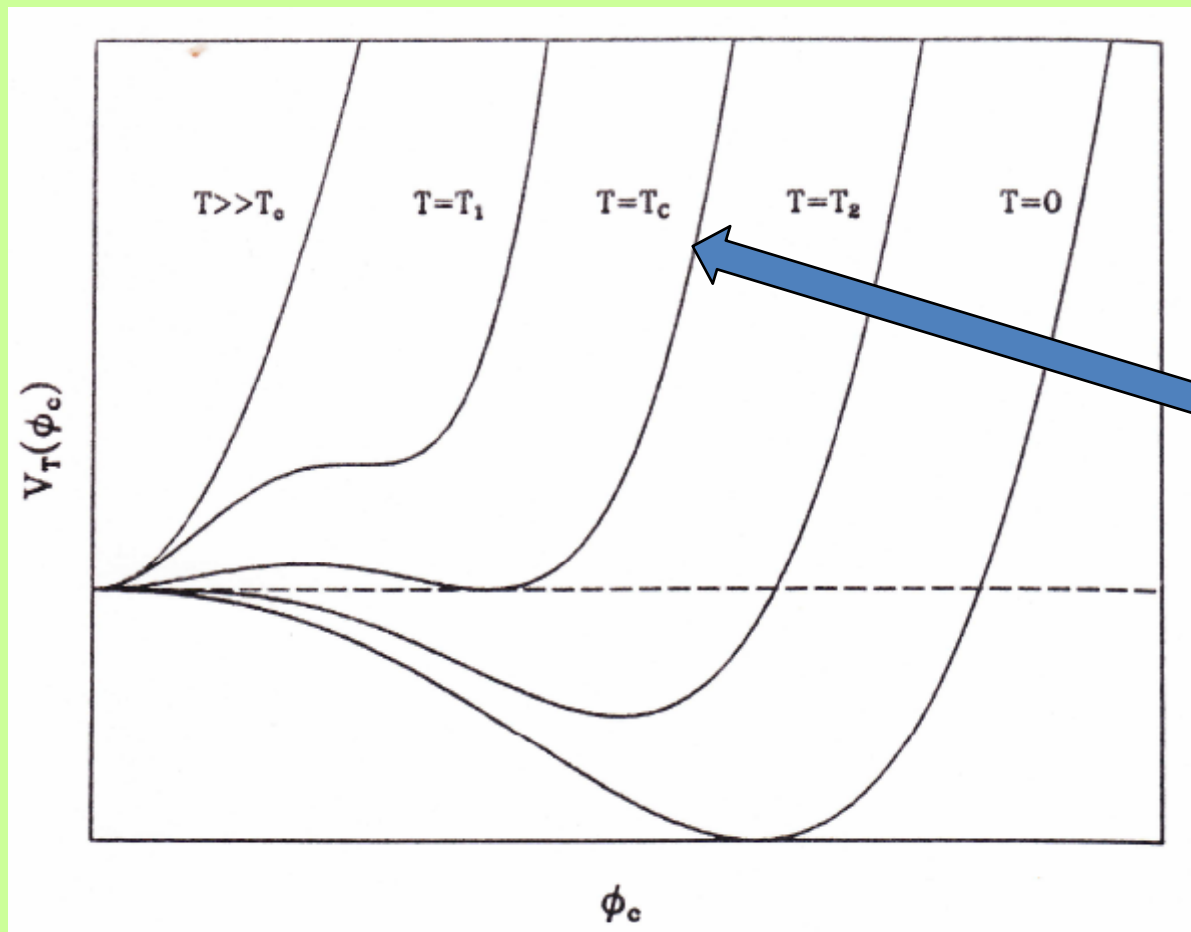
Significativita' statistica **5.9 deviazioni standard**
(probabilita' di una fluttuazione del fondo di 1.7×10^{-9} .)

Misura compatibile con la produzione e il decadimento
del **bosone di Higgs del Modello Standard**

Risultati analoghi ottenuti dalla Collaborazione CMS

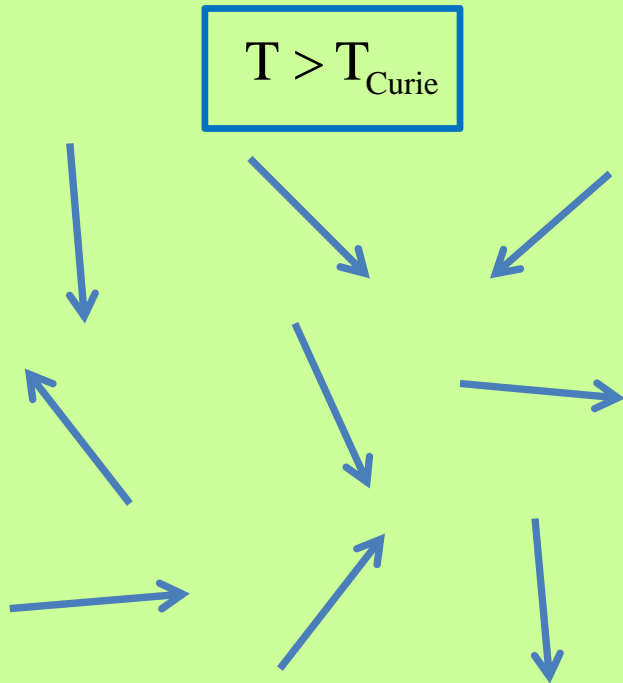
Rottura spontanea di simmetria in cosmologia

Evoluzione del potenziale di Higgs in funzione della temperatura

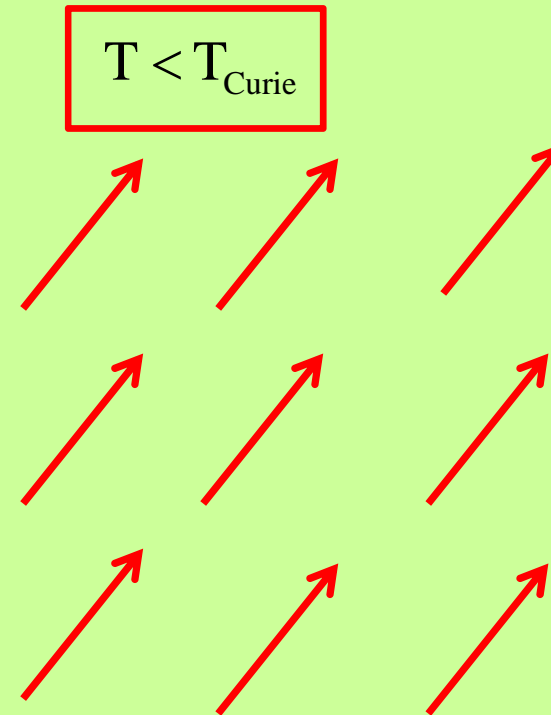


temperatura critica

Un esempio di questo fenomeno: raffreddamento di un materiale ferromagnetico

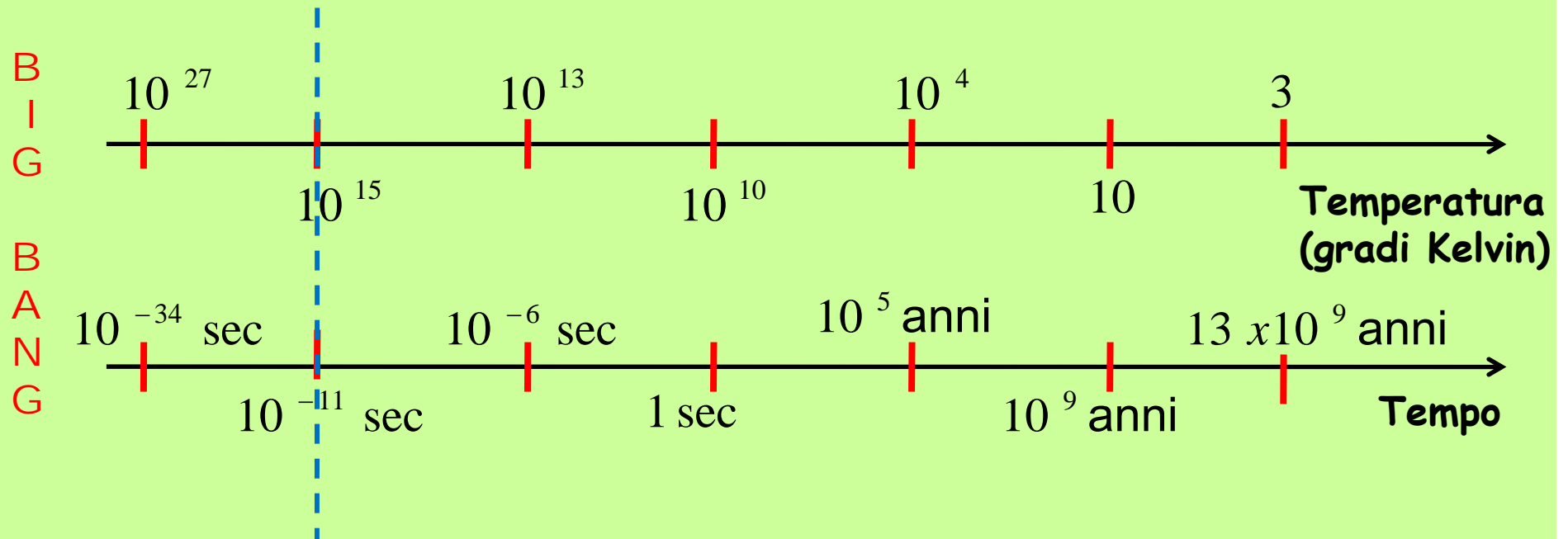


le orientazioni dei momenti magnetici intrinseci degli atomi sono "a caso", non correlate e rapidamente fluttuanti - non vi e' nessuna direzione privilegiata nello spazio: **SIMMETRIA**



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

nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda

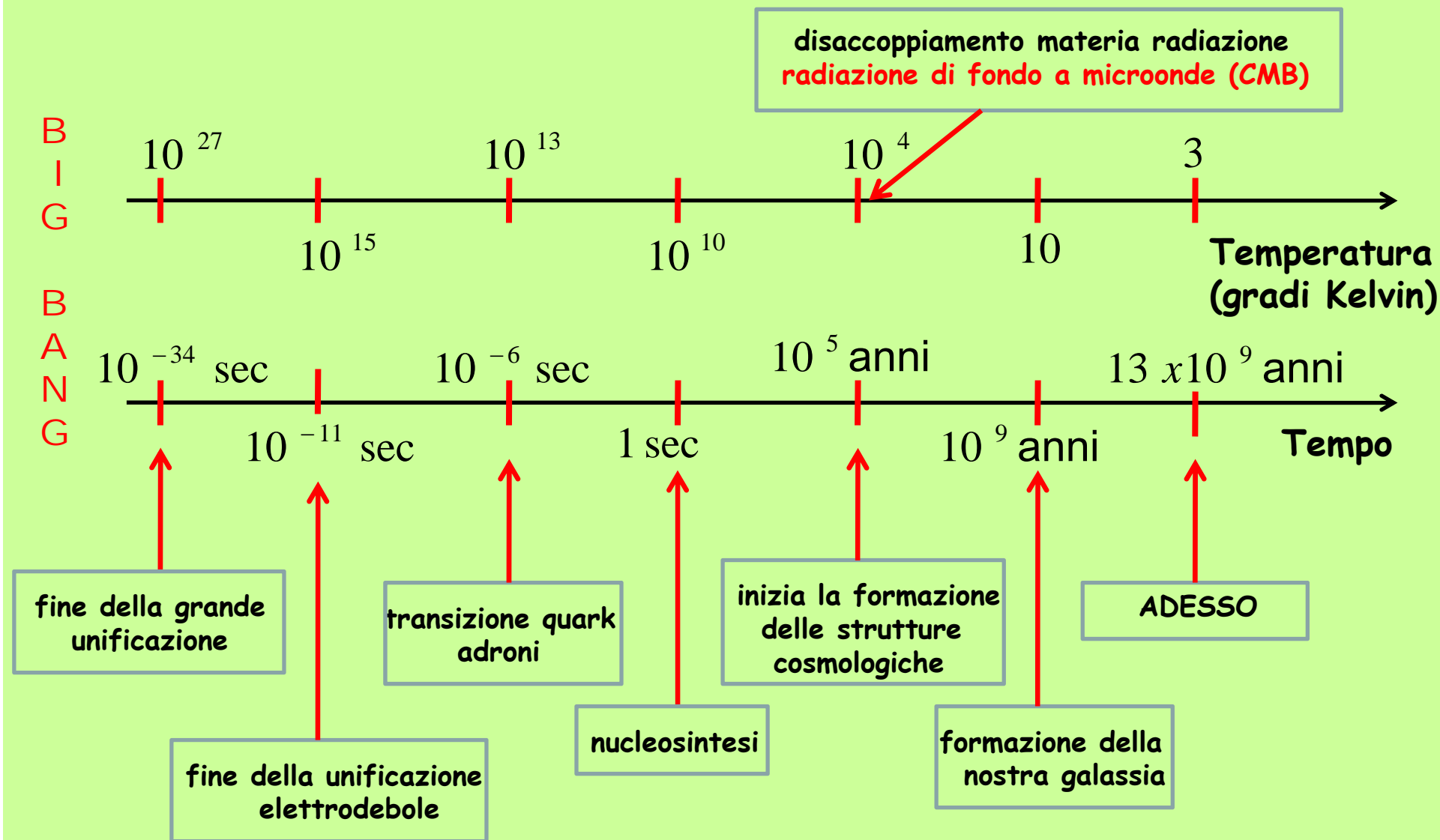


rottura spontanea di
simmetria elettrodebole

scala di energia \cong 200 - 300 GeV

1 GeV \cong energia di riposo del protone

\longleftrightarrow 10^{13} gradi Kelvin



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>

Qualche informazione giornalistica sulla figura di Peter Higgs

<http://www.samiraahmed.co.uk/?p=1689>

Per il file pdf di queste lezioni:

<http://personalpages.to.infn.it/~bottino/archimede>