

Il Modello Standard

Giuseppe Salamanna

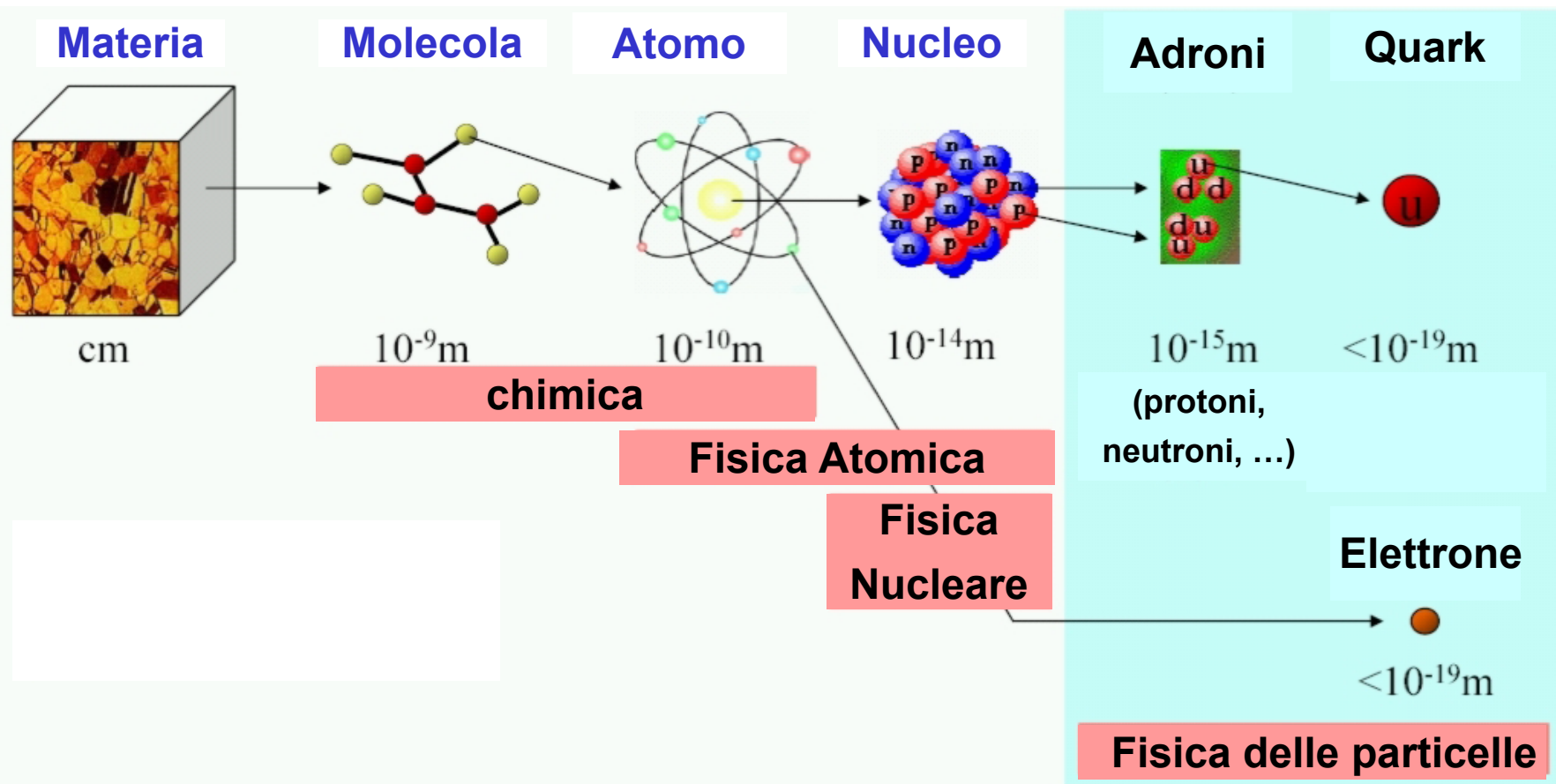
Università Roma Tre

Master Classes 27 marzo 2015

Sommario

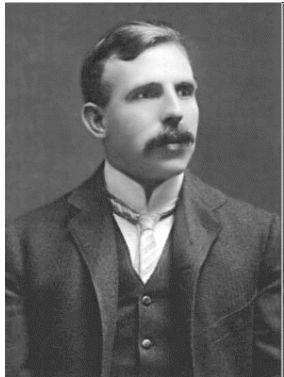
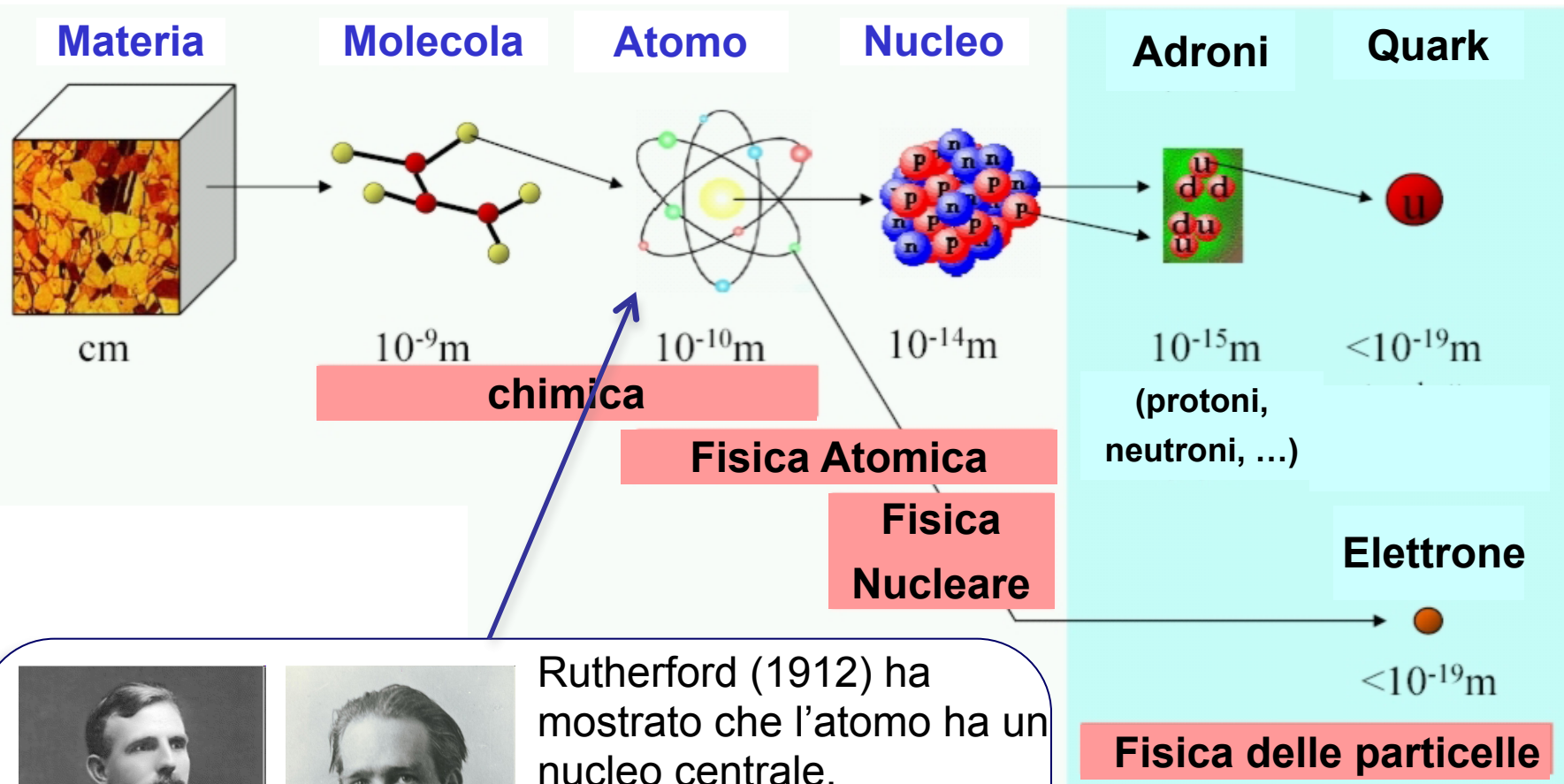
- ✘ I costituenti elementari della materia
- ✘ Tre famiglie di mattoni elementari
- ✘ Quattro forze fondamentali: mediatori e cariche
- ✘ Interazioni protone-protone
- ✘ Decadimenti
- ✘ Il bosone di Higgs

La materia



Partiamo dalle basi!
(brevemente e in maniera molto schematica...)

La materia



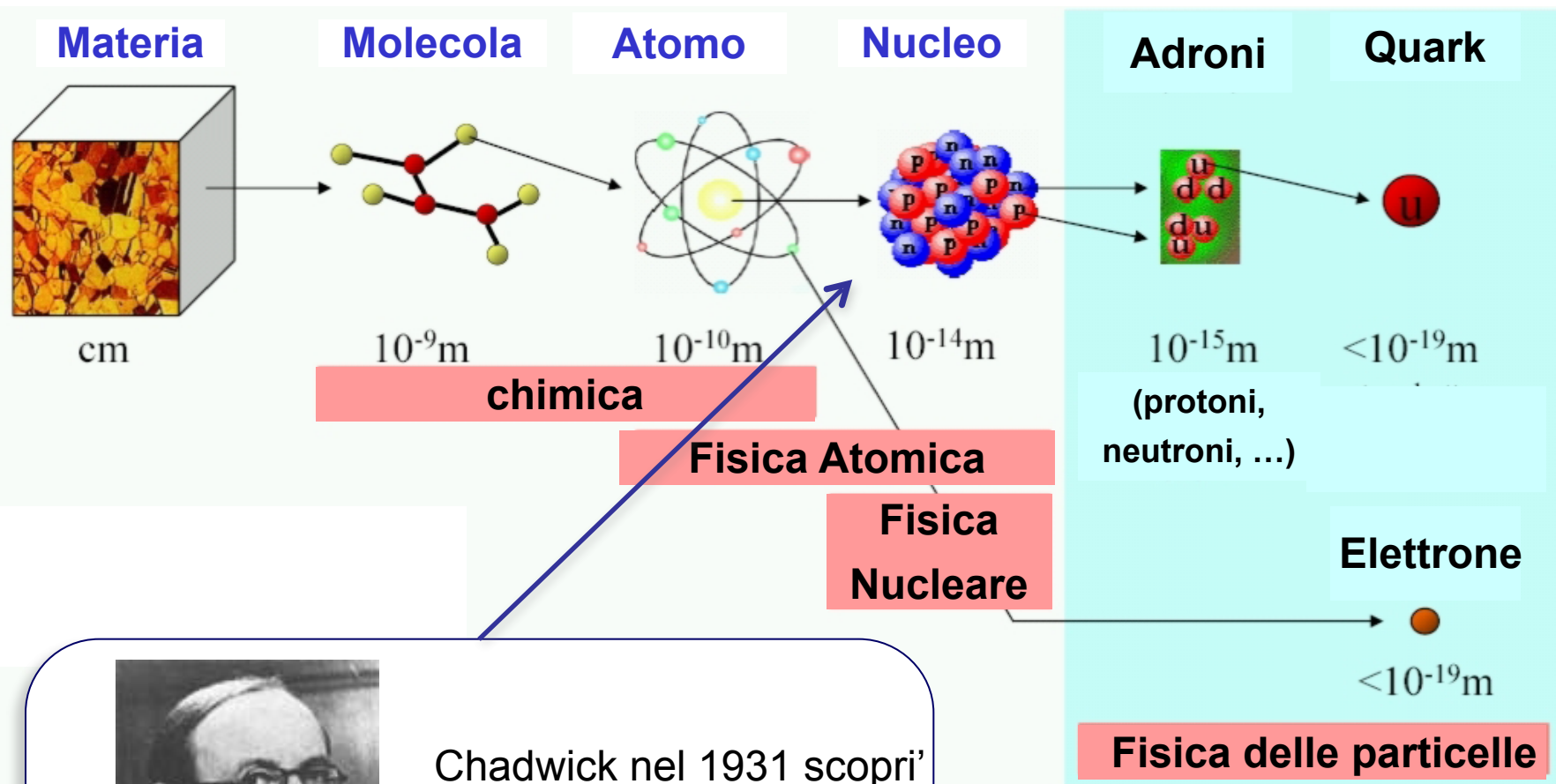
Rutherford



Bohr

Rutherford (1912) ha mostrato che l'atomo ha un nucleo centrale. Bohr ha sviluppato un modello atomico in cui gli elettroni orbitano attorno al nucleo con una energia ben determinata.

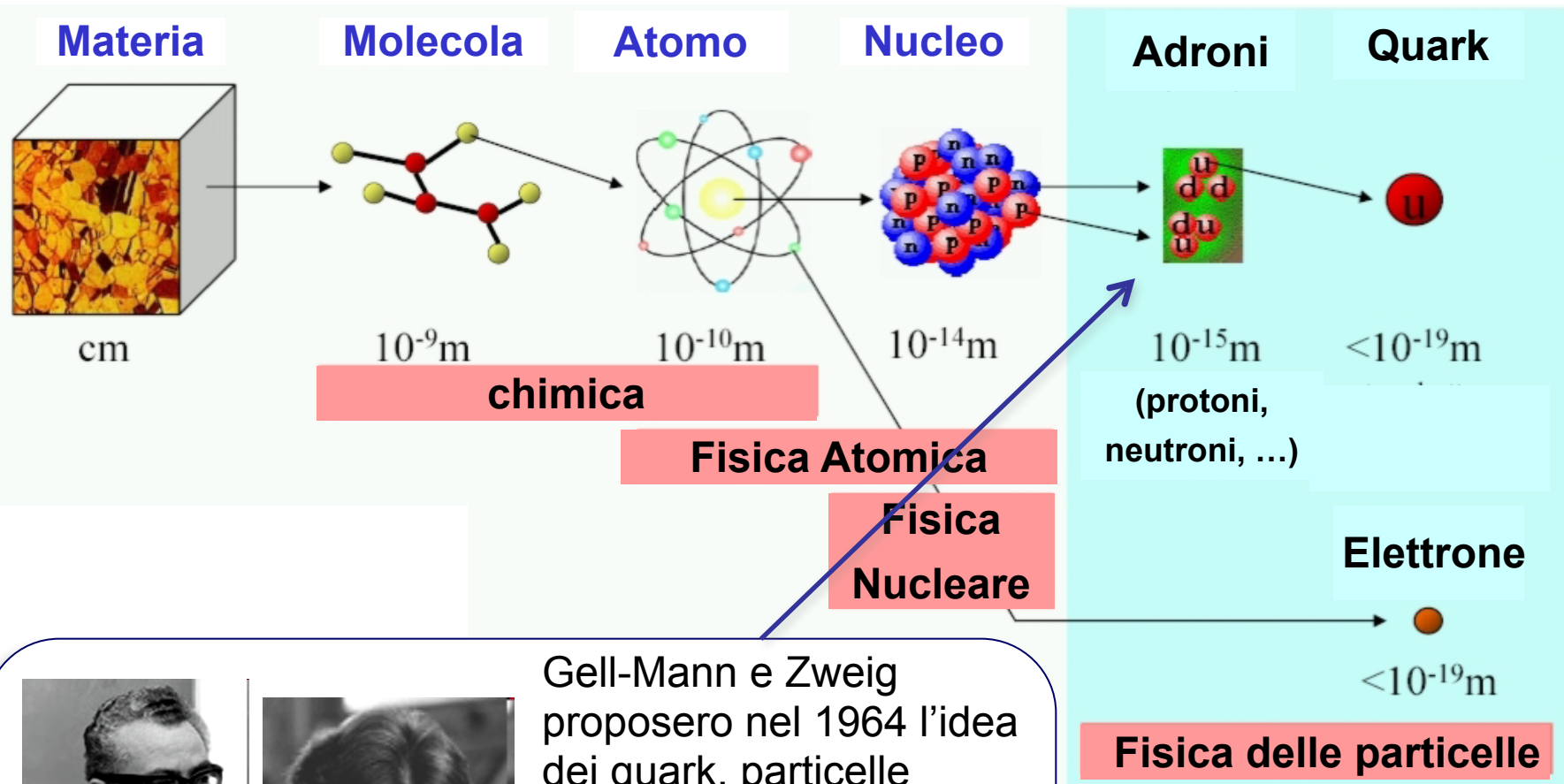
La materia



Chadwick

Chadwick nel 1931 scoprì il neutrone, una particella con massa molto simile a quella del protone ma di carica nulla.

La materia



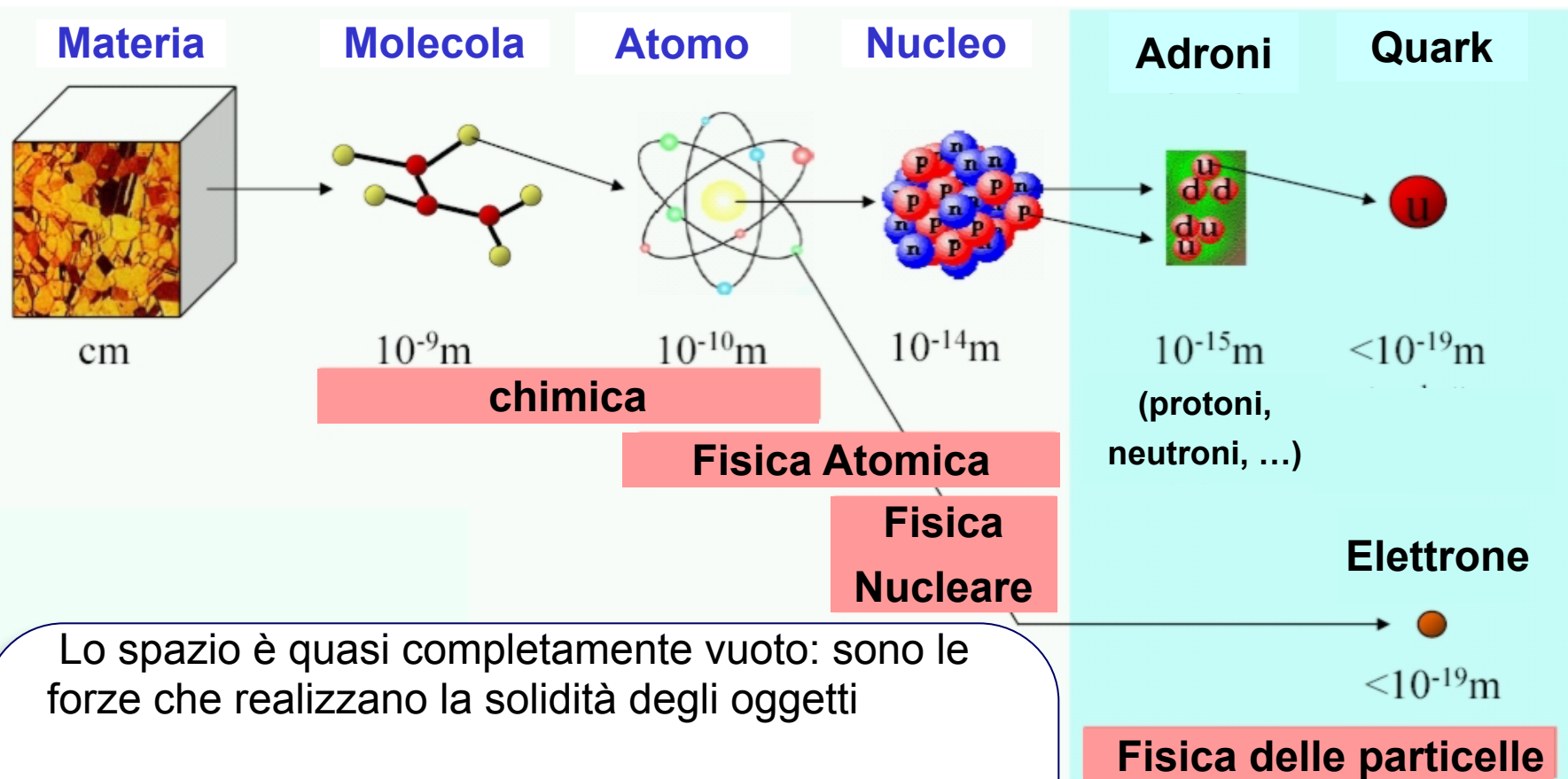
Gell-Mann



Zweig

Gell-Mann e Zweig proposero nel 1964 l'idea dei quark, particelle elementari di carica frazionaria con diversi "sapori" che si combinano a formare gli adroni (protone, neutrone, ...)

La materia



Lo spazio è quasi completamente vuoto: sono le forze che realizzano la solidità degli oggetti

La materia ordinaria è costituita da elettroni e quark leggeri

Ad oggi non si ha evidenza di una struttura interna dell'elettrone e dei quark: **sembrano essere i mattoni fondamentali**

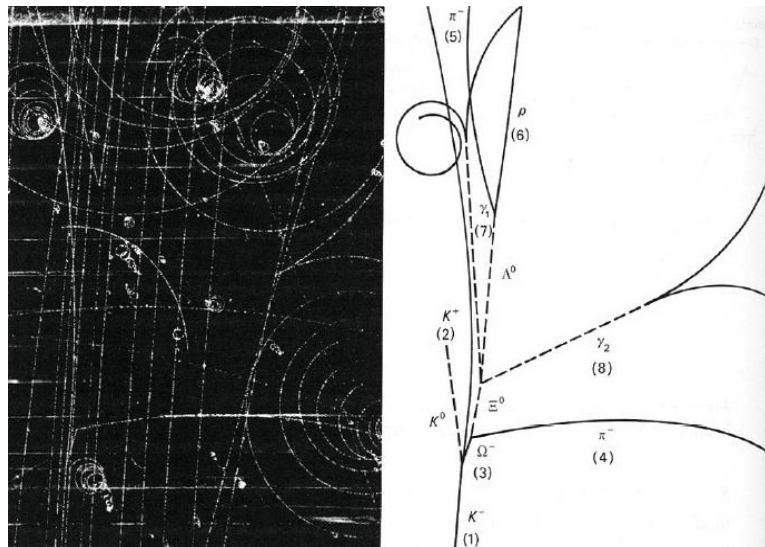
Altre particelle!

Il muone (μ)

Scoperto nella radiazione cosmica da Neddermeyer e Anderson (1936).

Sembra identico all'elettrone ma e' 200 volte piu' pesante.
Decade in $2.2 \mu\text{sec}$.

Le particelle "strane" -> nuovi quarks!



Il neutrino (ν)

Postulato da Pauli (1928).
Studiato da Fermi (1934).

Scoperto da Reines e Cowan solo nel 1956.

E' una particella neutra e debolmente interagente.



Cowan e Reines

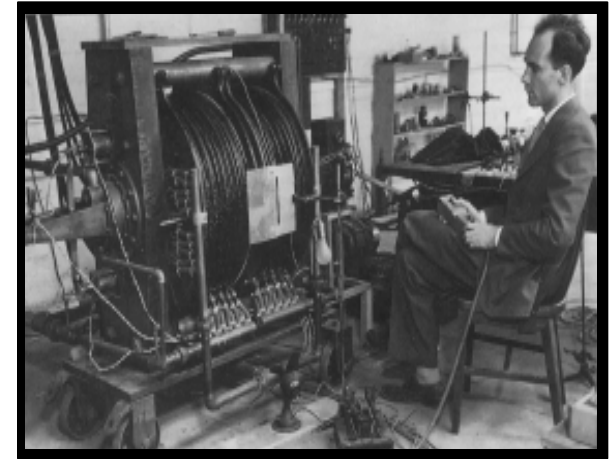
...e molte, moltissime
altre scoperte...

L'antimateria

Paul Dirac predisse l'esistenza del positrone (antiparticella dell'elettrone) nel 1928.

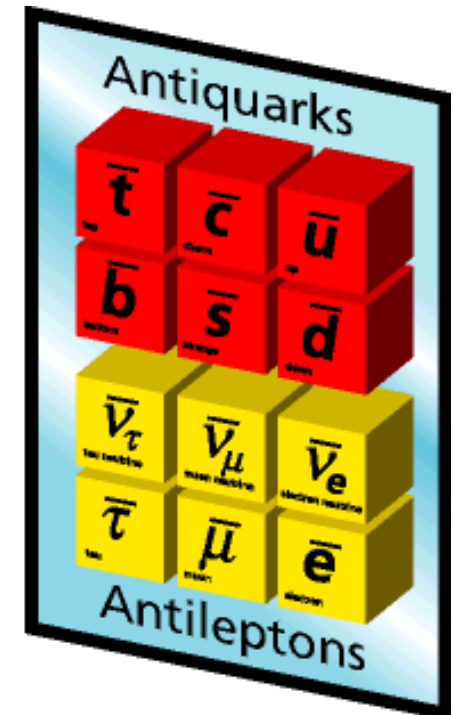
L'equazione di Dirac implica che abbia stessa massa dell'elettrone ma carica opposta.

Il positrone e' stato scoperto da Anderson nel 1932.



Ogni particella ha la corrispettiva antiparticella!

Questo e' il quadro completo:

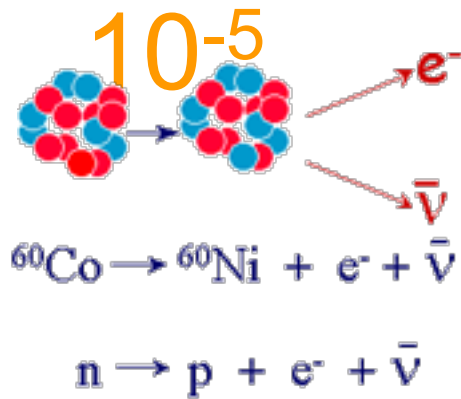


Le forze o interazioni

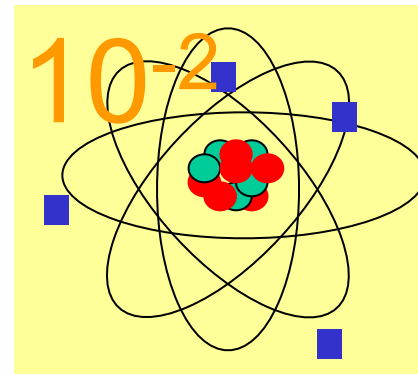
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali
Responsabili:
della coesione della materia
del suo decadimento



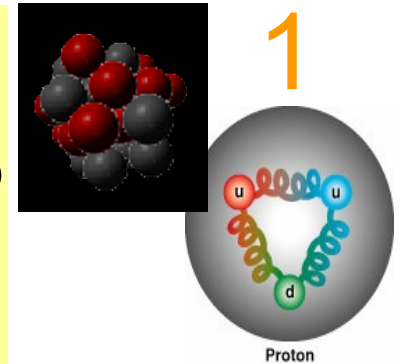
Forza
gravitazionale



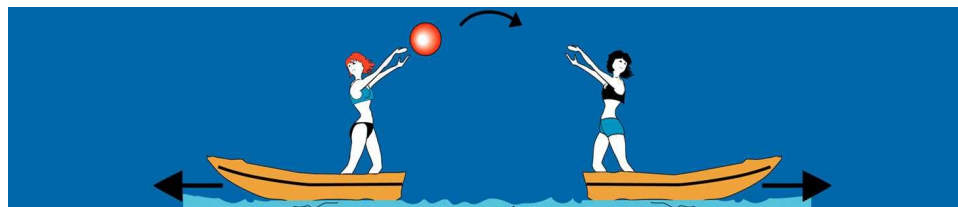
Forza debole



Forza
elettromagnetica



Forza forte
(o di colore)



L'interazione avviene grazie allo scambio di particelle

CERN AC_Z04_V25/8/1992

Sono i bosoni (spin intero), i
"quanti" del campo di
interazione.

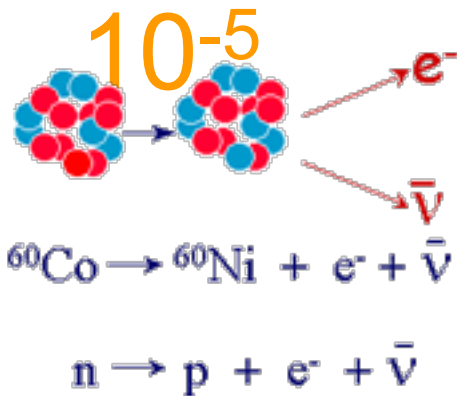
Es: Il fotone è il quanto del campo
di interazione elettromagnetica

Le forze o interazioni

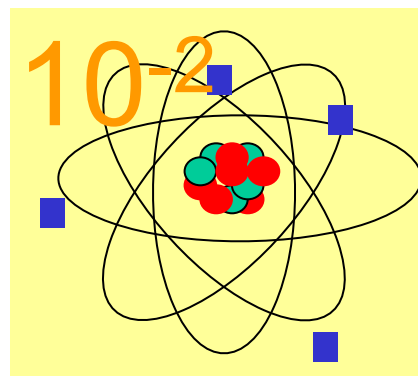
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali
Responsabili:
della coesione della materia
del suo decadimento



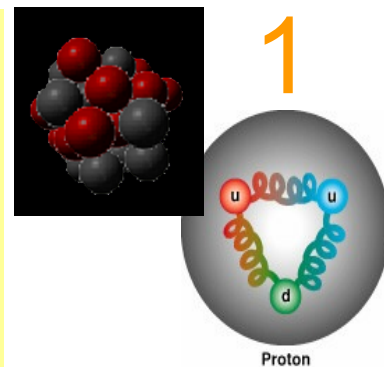
Forza gravitazionale



Forza debole



Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)

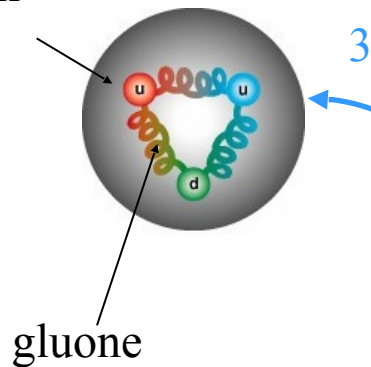


Mediatore	gravitone (G)	W	Fotone (γ)	Gluone (g)
Particelle coinvolte	tutte	Leptoni e quarks	Particelle cariche	Quark e gluoni

Le cariche

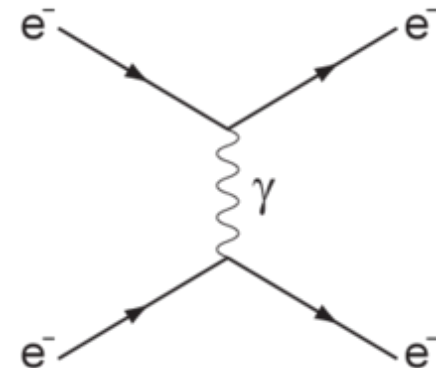
✗ L'intensità di una interazione tra particelle dipende dalla costante di accoppiamento (carica) tra queste e la particella mediatrice

quark

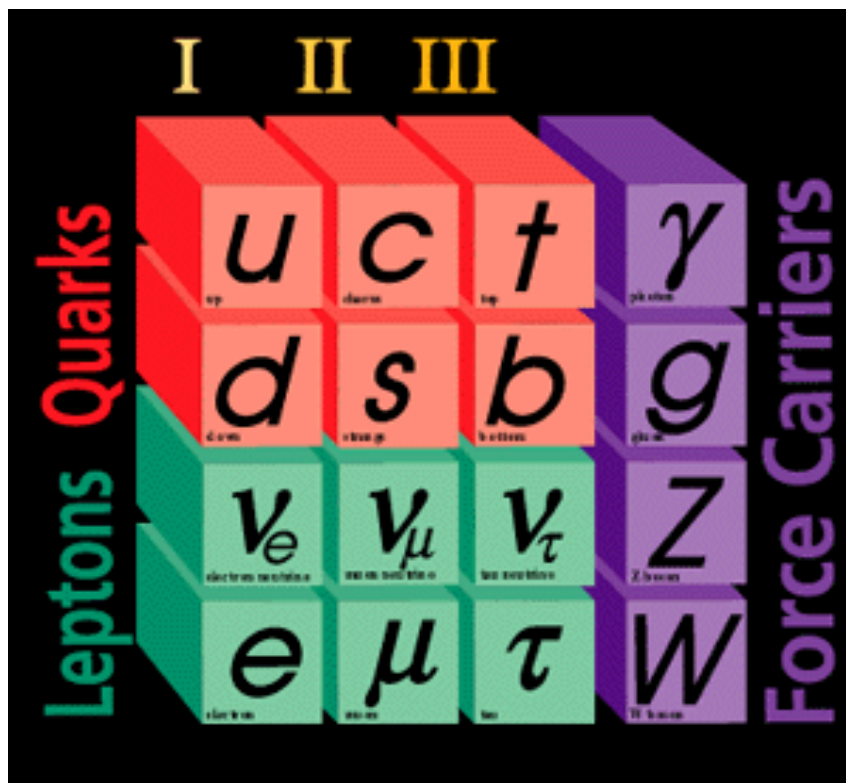


	Quarks		Leptons	
Generation 1	 Up	 Down	 Electron	 Electron-neutrino
Colour charge	X	X		
Electric charge	X	X	X	
Weak charge	X	X	X	X
Mass	X	X	X	?

FAMILY	QUARKS		LEPTONS	
1	u +2/3	d -1/3	ν_e 0	e -1
2	c +2/3	s -1/3	ν_μ 0	μ -1
3	t +2/3	b -1/3	ν_τ 0	τ -1



Il Modello Standard (MS) delle particelle elementari



Le forze sono mediate dallo scambio di bosoni (spin 1)

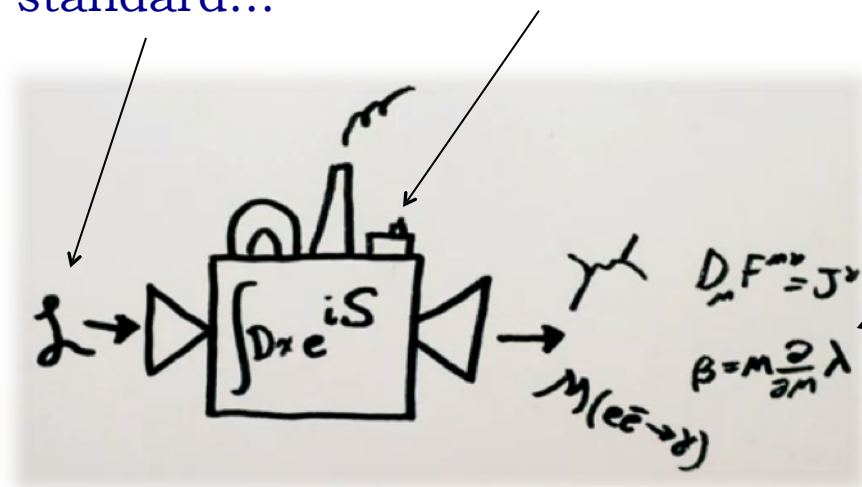
La materia e' composta da particelle di spin $\frac{1}{2}$ (fermioni) divisi in **leptoni** e **quarks** a seconda delle forze cui sono soggetti.

I quark non possono esistere come particelle libere ma possono solo formare particelle piu' pesanti (protone, neutrone, ...)

Leptoni e quark si dividono in 3 famiglie di massa crescente.

Modello standard: istruzioni per l'uso

Partendo dal
modello
standard...
... e
utilizzando
“un po’” di
matematica...



Standard Model

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F^2 + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

electrons, quarks - charged matter

photons, gluons - forces

... otteniamo una previsione
teorica di un qualsiasi
processo.

Ci serve per capire come funziona la
natura

Possiamo **misurare**
sperimentalmente lo stesso
processo e confermare la nostra
teoria

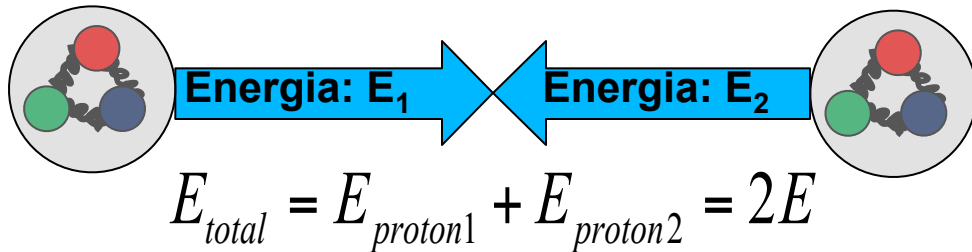
**Il Modello Standard descrive
in maniera estremamente
accurata i processi che
abbiamo verificato finora!**

Produrre nuove particelle con gli acceleratori

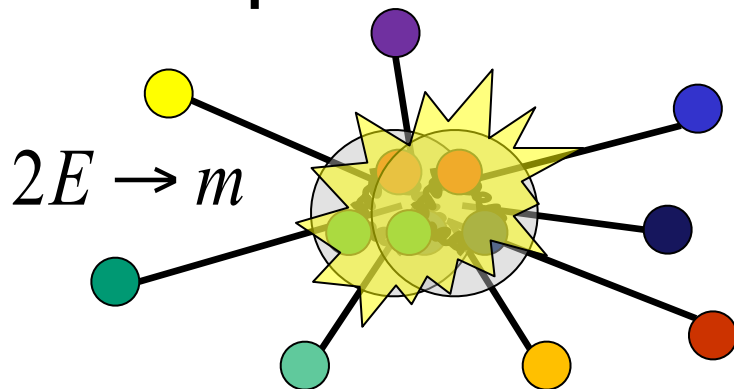
Prima della collisione

Protone 1

Protone 2



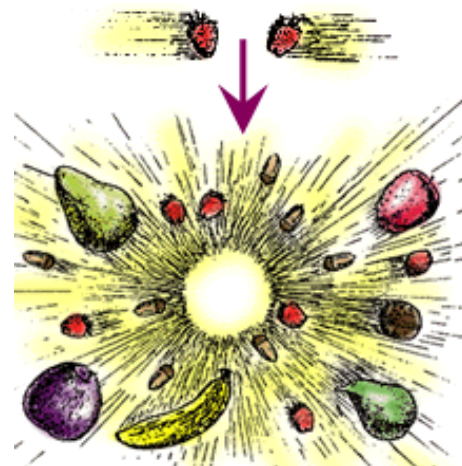
Dopo la collisione



...con l'energia disponibile
vengono create nuove particelle
(note o sconosciute)

Dalla famosa
relazione di
Einstein

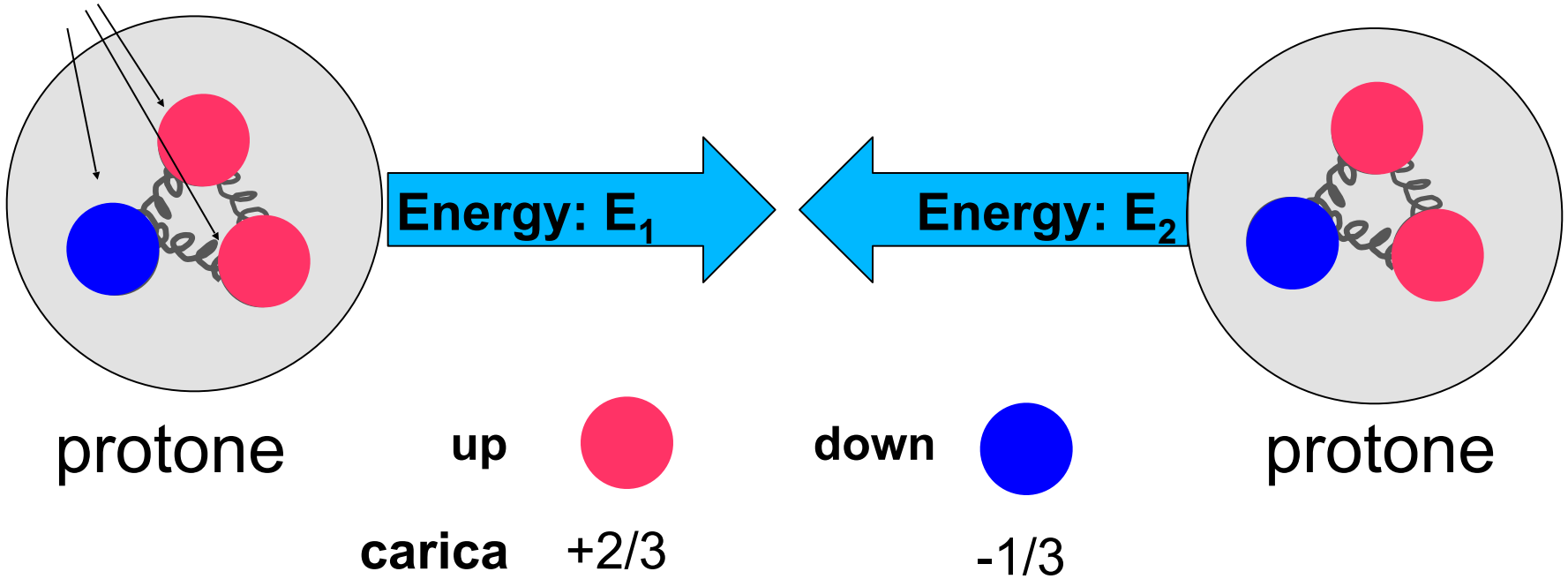
$$E = mc^2$$



... maggiore e' l'energia,
maggiore la probabilita'
di produrre nuove
particelle "pesanti"

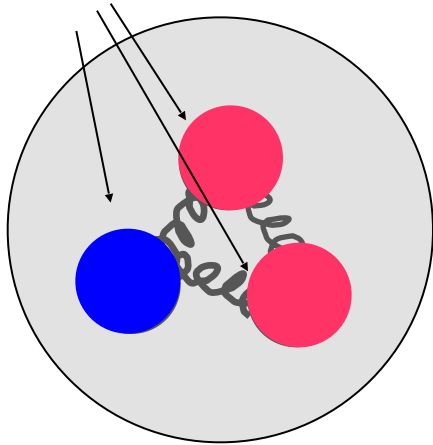
Produzione di W

quarks di valenza



Produzione di W

quarks di valenza

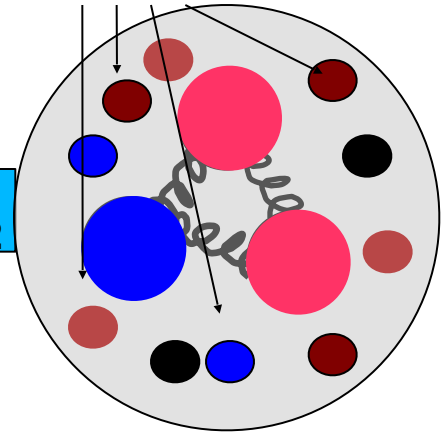


protone

Energy: E_1

Energy: E_2

quarks di mare

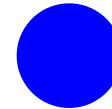


protone

up



down

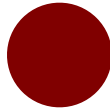


carica

$+2/3$

$-1/3$

anti up



anti down



carica

$-2/3$

$+1/3$

dove li
prendiamo
?


 $+$

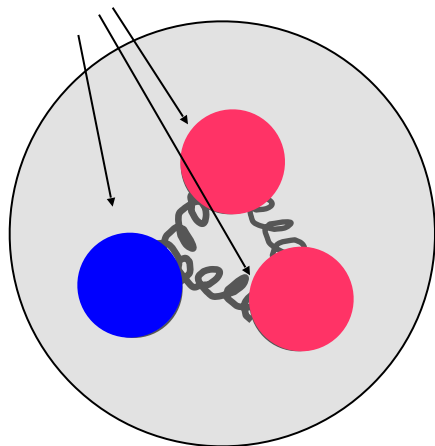
 $= W^+$
 carica $+2/3$ $+1/3$ $+1$


 $+$

 $= W^-$
 $-2/3$ $-1/3$ -1

Produzione di W

quarks di valenza

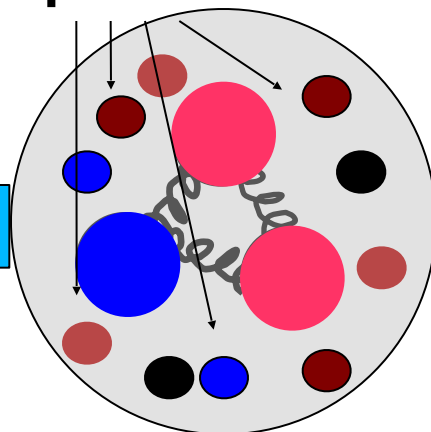


protone

Energy: E_1

Energy: E_2

quarks di mare



protone

carica

$$\begin{array}{ccccc} \text{red circle} & + & \text{black circle} & = & W^+ \\ +2/3 & & +1/3 & & +1 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccccc} \text{blue circle} & + & \text{dark red circle} & = & W^- \\ -2/3 & & -1/3 & & -1 \end{array}$$

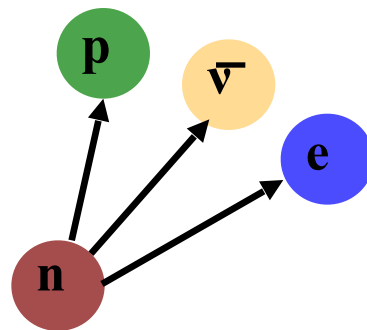
Il numero di quark up è maggiore del numero di quark down.

La probabilità che vengano prodotti bosoni W^+ è maggiore!

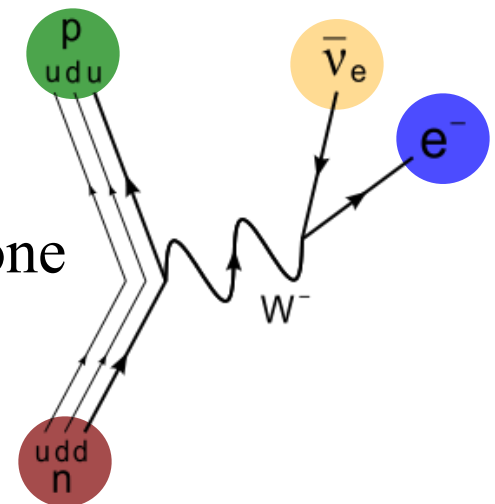
Decadimenti

- ✗ Quasi tutte le particelle elementari sono instabili
- ✗ Decadono in particelle di massa inferiore con tempi caratteristici (vite medie) che dipendono dall'interazione responsabile della disintegrazione
- ✗ **Regola: tutte quelle che possono decadere in particelle più leggere senza violare una legge di conservazione lo fanno!**
- ✗ Esempio: decadimento del neutrone

osservazione



interpretazione

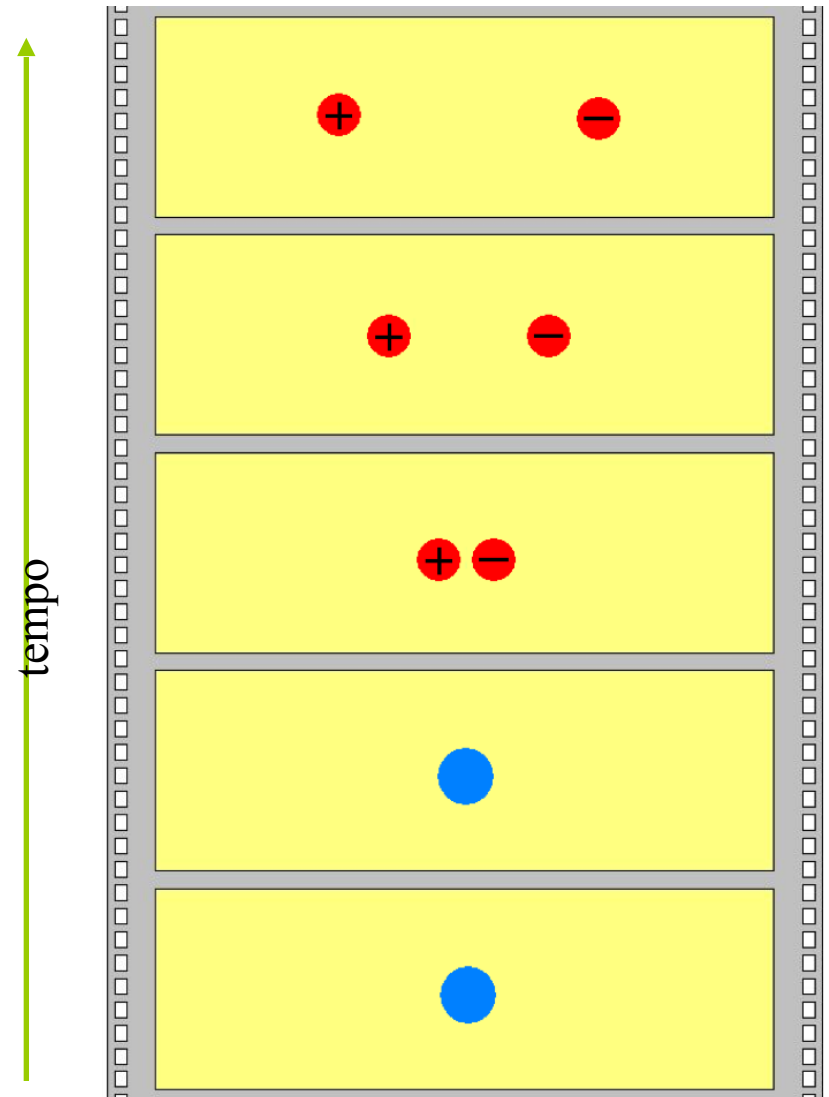


Decadimenti

La collisione crea nuove particelle che decadono in particelle necessariamente più leggere.

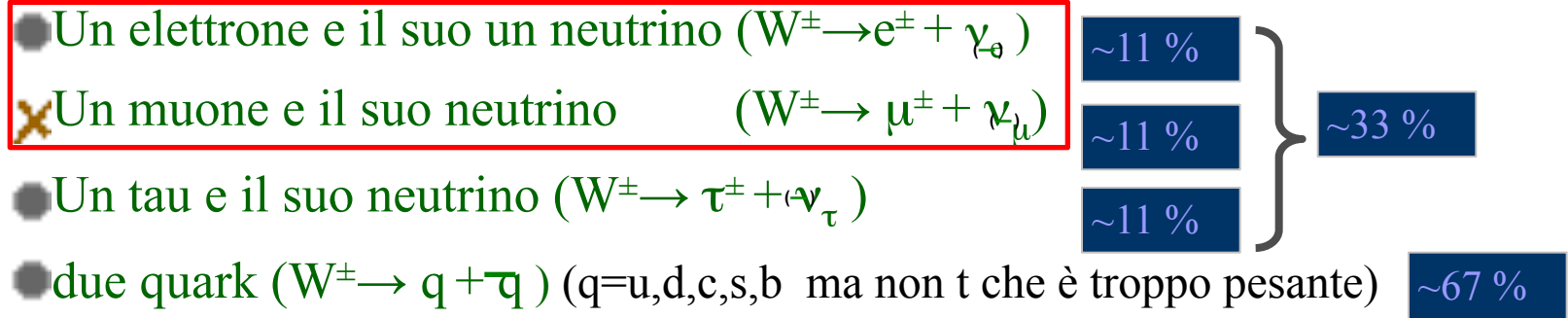
Gli stati finali ottenibili sono vincolati dalle leggi di conservazione.

Sapreste nominare qualcuna di queste leggi?



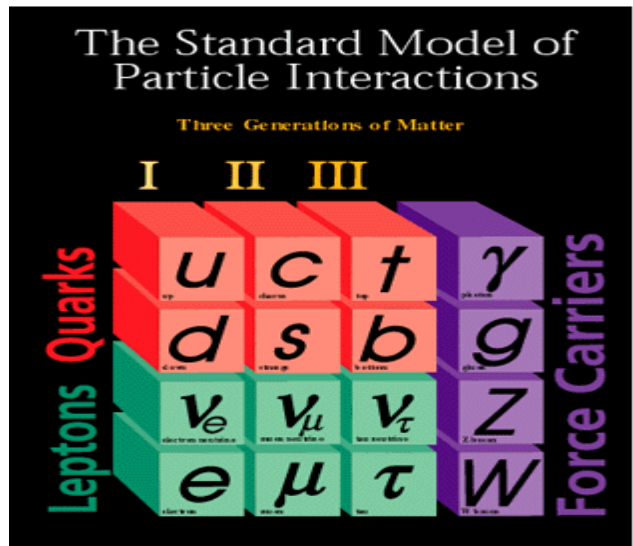
Decadimenti del W

- ✗ Ogni singola particella $W^\pm$ deve decadere, ma è impossibile sapere in anticipo in quale tipo di particelle decadrà.
- ✗ Tutto ciò che si può dire è che ha una certa probabilità di decadere in un certo tipo di particelle e le frequenze dei diversi tipi di decadimento possono essere calcolate teoricamente nel Modello Standard
- ✗ Una particella $W^\pm$ può decadere in:



- ✘ Nel resto della mattinata imparerete in dettaglio come le particelle vengono prodotte, rivelate e studiate
- ✘ Capirete come misurare la probabilità che una particella venga prodotta
- ✘ Nel pomeriggio analizzerete i dati di LHC per misurare la probabilità di produrre W^+ e verificherete se davvero è maggiore di quella di produrre W^- .

Problemi col modello standard...



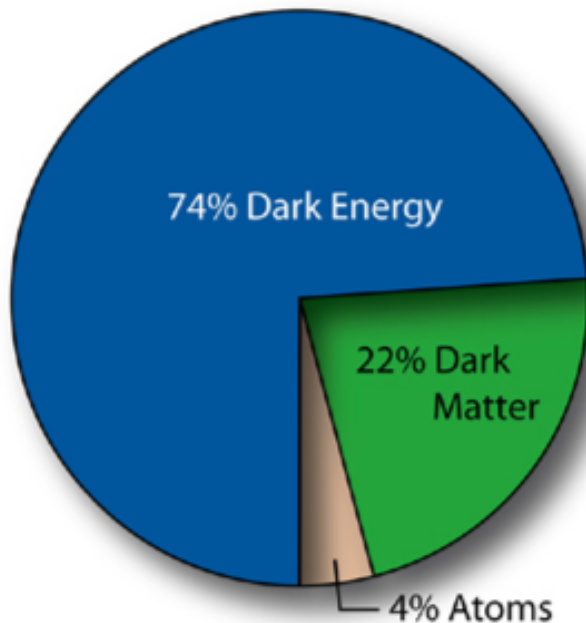
✗ Descrive con successo le nostre osservazioni

✗ Ma deve necessariamente essere esteso!

- Per spiegare l'eccesso di materia sull'antimateria
- Per spiegare da cosa sia fatta l'energia del nostro universo:

✓ la materia nota ne rappresenta solo il 4%

✓ cos'è il restante **96%**?



Altro problemino...

Inoltre il Modello Standard, nella sua formulazione iniziale (<1965), non solo NON dava massa alle particelle ma addirittura si 'rompeva' quando si tentava di introdurla.

Eppure la massa esiste!

E senza massa:

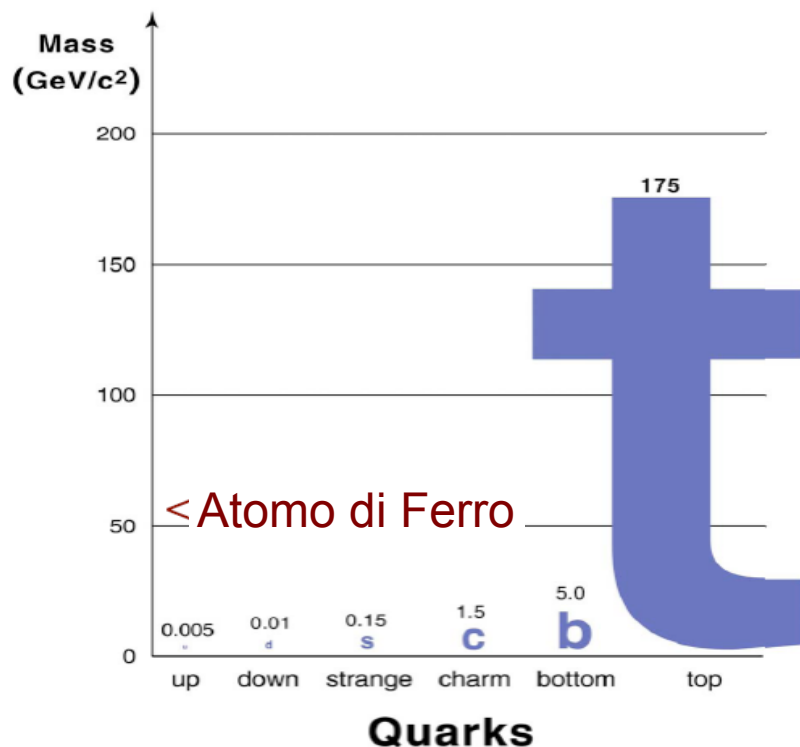
tutte le particelle si sarebbero mosse alla velocità della luce (come, appunto, i raggi di luce)

Niente attrazione gravitazionale

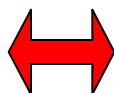
Quindi niente soli, pianeti, galassie

... quindi niente uomo ☹ (e donne)

L'enigma della massa



Interazione con il
campo di Higgs



Interazione con un
liquido viscoso



Perché le particelle elementari
hanno massa?

Perché hanno masse così
diverse?

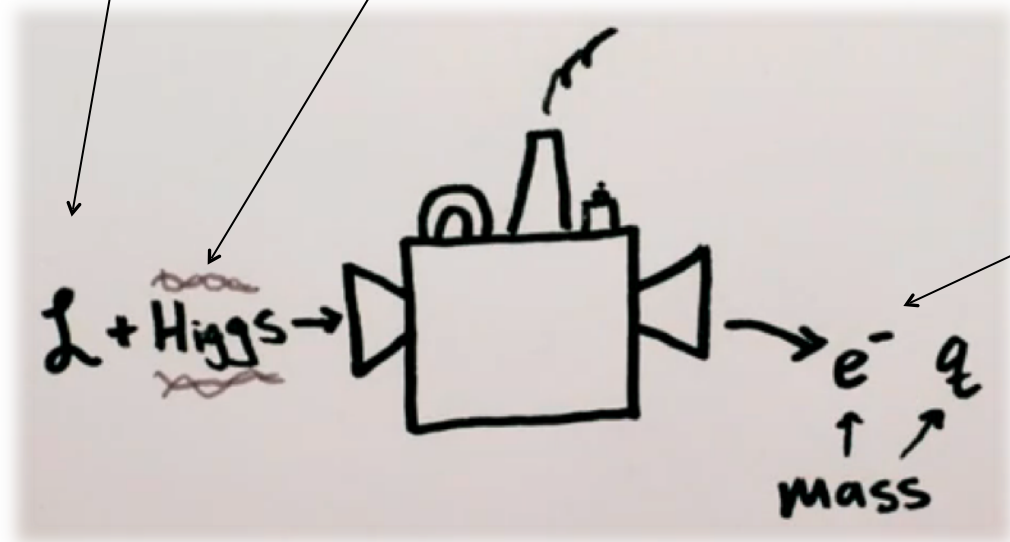
Il meccanismo di Higgs (+ Englert e
Brout) permette di attribuire loro delle
masse tramite l'interazione con un
campo (il campo di Higgs) che
permea tutto lo spazio.

Le particelle hanno massa
perché "rallentate"
dall'interazione col campo

Le masse sono diverse perché
ogni particella interagisce
diversamente col campo

Modello standard: istruzioni per l'uso aggiornate

Partendo dal
modello
standard...
... e
aggiungendo il
campo di
Higgs...



... la teoria descrive
molto accuratamente
il comportamento di
particelle DOTATE DI
MASSA.

Saremmo contenti... ma...

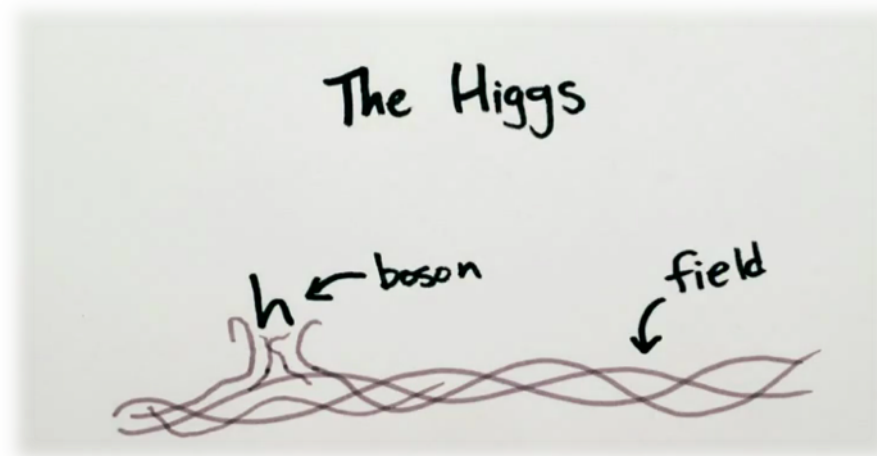
Che cos'è il BOSONE DI HIGGS??

Il Bosone di Higgs

Il meccanismo dell'introduzione del campo funziona ☺ e mantiene tutte gli aspetti positivi del Modello Standard precedenti.

E DA MASSA ALLE PARTICELLE

Pero': una eccitazione del campo di Higgs puo' generare una **particella di Higgs**



oltre al campo di Higgs il Modello Standard a questo punto prevede anche una particella di Higgs (un bosone di spin 0) che doveva essere trovata

Altrimenti tutto il meccanismo non sta in piedi!

4 Luglio 2012

BBC

News

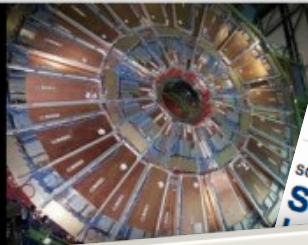
Art

Weather

Top News story

Higgs-like particle 'discovered'

Scientists at the Large Hadron Collider claim the discovery of a particle believed to be the long-sought Higgs boson.



la Repubblica

Corriere della Sera > Scienze > «Provata l'esistenza del bosone di Higgs» E' la particella all'origine dell'Universo

«Provata l'esistenza del bosone di Higgs» E' la particella all'origine dell'Universo

LA CONFERENZA STAMPA INTERNAZIONALE AL CERN DI GINEVRA

SCIENZA

Scoperto il Bosone di Higgs La particella di Dio esiste davvero

Ginevra individuato il Bosone di Higgs, che spiega come mai tutte le cose nell'universo hanno massa. Era stato teorizzato ben 48 anni fa dallo scienziato inglese, oggi 84enne e al pianto dalla standing ovation che gli hanno riservato (foto 1). Per lui si profila il premio Nobel più ambito.

ed in German
ers shot in
an
Clash over
language law

LE FIGARO.fr

ACTUALITÉ

ÉCONOMIE

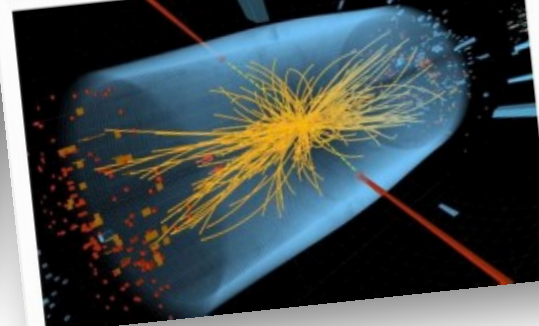
CULTURE

Le Cern dévoile le boson de Higgs

Mots clés : Boson De Higgs, Physique Des Particules, Cern

Par Tristan Vey

Mis à jour le 04/07/2012 à 10:50 | publié le 03/07/2012 à 16:49 Réactions (217)



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



8 Ottobre 2013

ROMA TRE

INFN

28

Masterclasses @ Roma Tre- 03/04/2014

- All'inizio di Luglio e' stata annunciata la scoperta di **una nuova particella nella regione di massa tra 125-126 GeV**
- **Il segnale di questa particella e' compatibile con quello che ci attendevamo dal bosone di Higgs**
- Altre misure sono in corso e altri dati verranno presi negli anni a venire
- Dobbiamo determinare la reale natura di questa particella per capire se si tratta esattamente di quella prevista da Higgs o se e' in realta' qualcosa di piu' complesso.
- E' comunque un passo fondamentale nella fisica; atteso da molti anni ci conferma la nostra visione di come funziona il mondo e, partendo da basi ancora piu' solide, apre la strada verso nuovi orizzonti.
- Oggi ripeterete un pezzo di questa misura!

Come cerchiamo il bosone di Higgs?

- Abbiamo a disposizione:
 - Un acceleratore per produrre nuove particelle
 - Dei rivelatori in grado di fotografare le collisioni
 - Un sistema di computing per il trattamento dei dati
- Sappiamo:
 - che puo' essere prodotto a LHC
 - che e' instabile: in meno di 10^{-22} secondi decade convertendo la sua energia in altre particelle
 - quali devono essere i suoi modi di decadimento
- Possiamo identificarlo dai suoi prodotti di decadimento!
- I canali di decadimento sono molti e vanno studiati tutti.
- ora pero' ci concentriamo su quello che misurerete anche voi:

$$H \rightarrow W^+ W^-$$

Segnale e “fondo”

Andrete ad analizzare i dati di un esperimento ad LHC alla ricerca di eventi in cui e' stato prodotto un bosone di Higgs.

Il decadimento scelto e':

$$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow l^+ \nu l^- \bar{\nu}$$

Questi saranno i vostri **eventi di segnale**

Altri tipi di collisioni possono produrre le stesse particelle ma senza passare dall'Higgs e ne rendono piu' difficile l'identificazione

(ad esempio la produzione di $W^+ W^-$ senza passare per la produzione dell'Higgs)

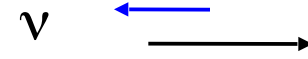
- Questi sono **eventi di fondo** (background)
- Bisogna imparare a distinguerli!

Correlazioni di spin nel decadimento $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

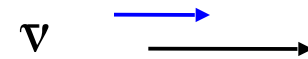
$$W^+ \rightarrow l^+ \nu \quad W^- \rightarrow l^- \bar{\nu} \quad l = e, \mu, \tau$$

$$\text{Spin} \quad 1 \quad 1/2 \quad 1/2 \quad 1 \quad 1/2 \quad 1/2$$

Spin



Quantità di moto



I neutrini hanno sempre lo spin anti-parallelo alla direzione di moto

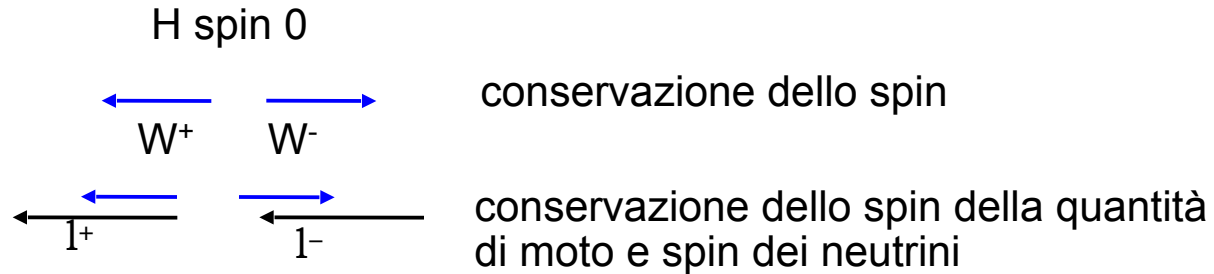
Gli anti-neutrini hanno sempre lo spin parallelo alla direzione di moto

Nei decadimenti si conservano sia lo spin che la quantità di moto



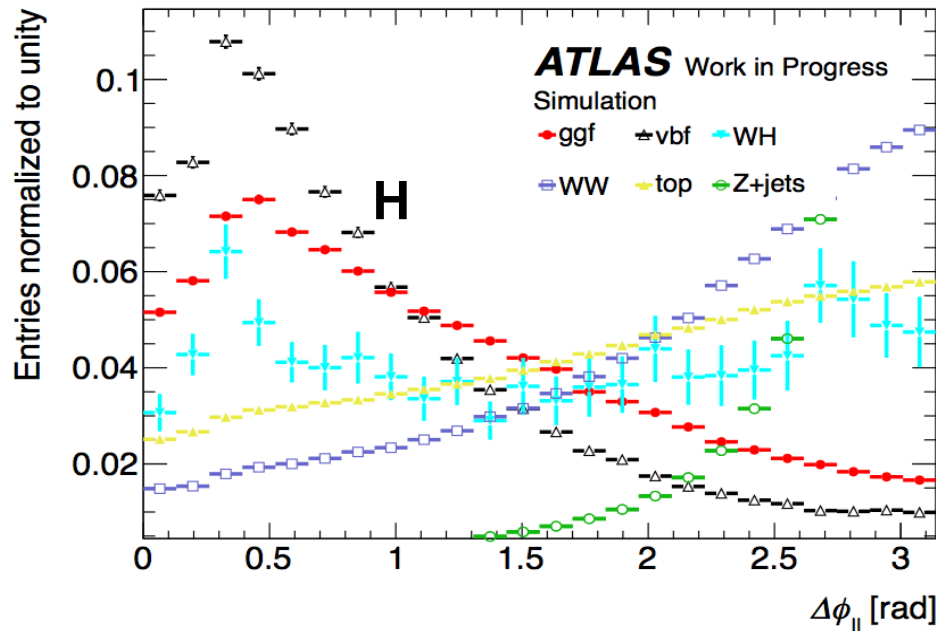
Per conservare la quantità di moto e lo spin l^+ è emesso nella direzione dello spin del W^+ e l^- nella direzione opposta allo spin del W^-

Il decadimento del bosone di Higgs



I leptoni prodotti sono emessi preferibilmente nella stessa direzione

-> valore dell'angolo di apertura nel piano trasverso ($\Delta\phi_{\parallel}$) piccolo.



Buon proseguimento!