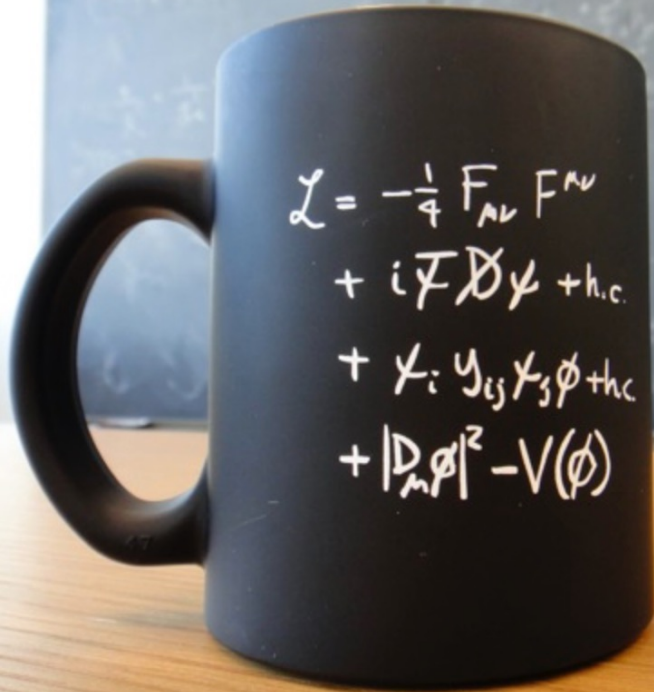


International Day  
of Women  
and Girls in Science

# Il Modello Standard delle Particelle Elementari



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

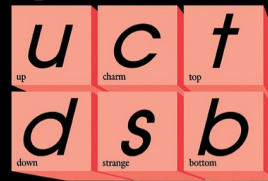
*Michela Biglietti*

*INFN Roma Tre*

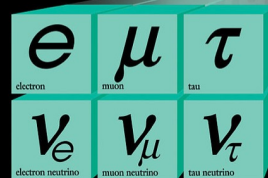
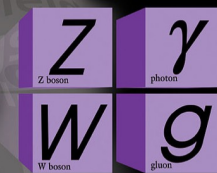
*Masterclass di Fisica  
delle Particelle  
Elementari*

*10 Febbraio 2023*

Quarks



Forces

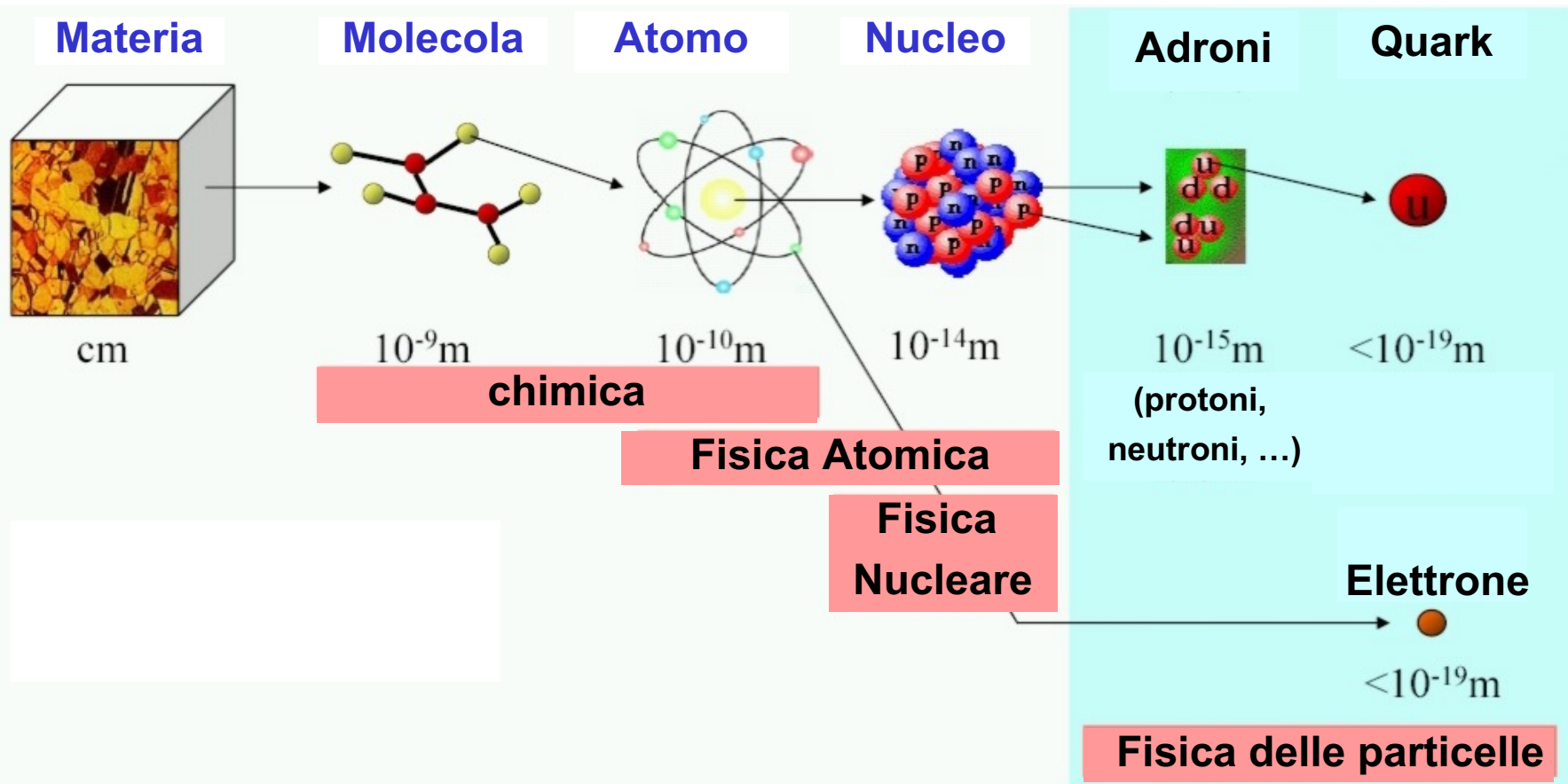


Leptons

# 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

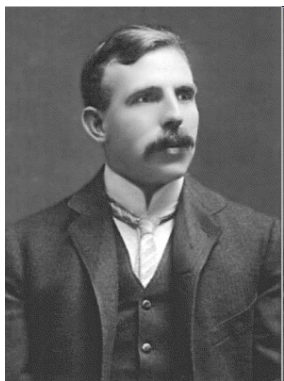
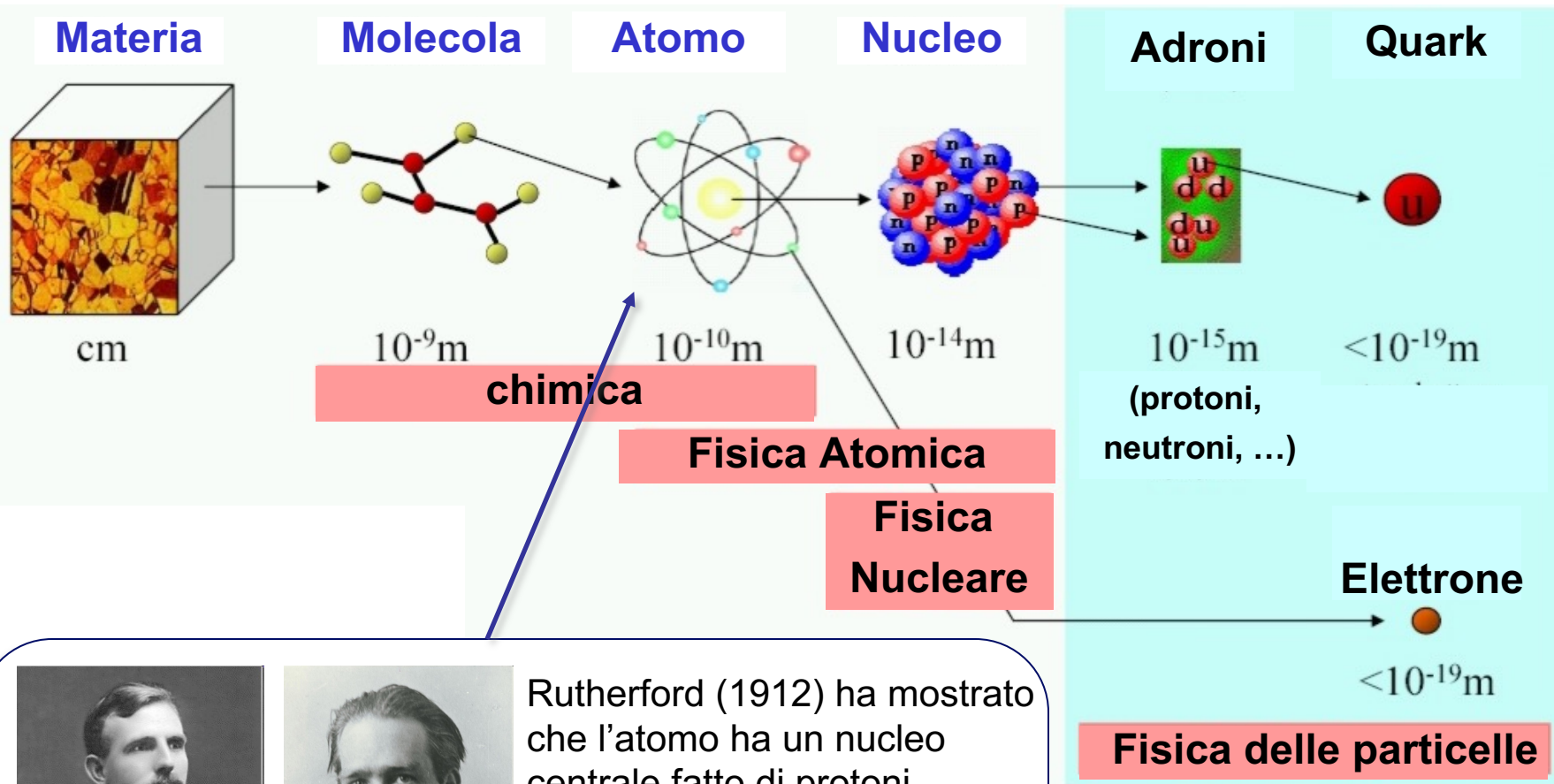
# La materia



**Partiamo dalle basi!**

**(brevemente e in maniera molto schematica...)**

# La materia



Rutherford

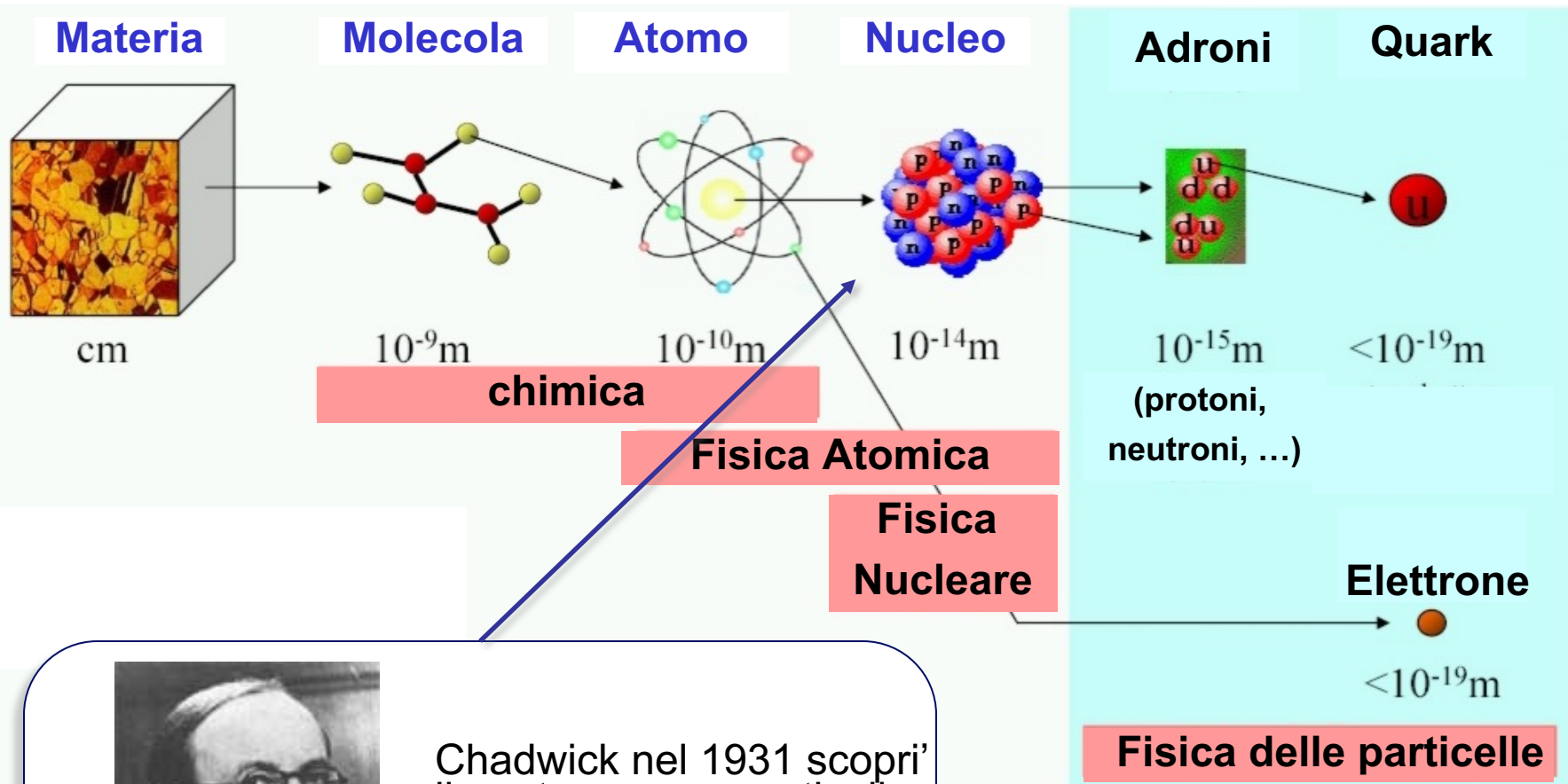


Bohr

Rutherford (1912) ha mostrato che l'atomo ha un nucleo centrale fatto di protoni.

Bohr ha sviluppato un modello atomico in cui gli elettroni orbitano attorno al nucleo con una energia ben determinata.

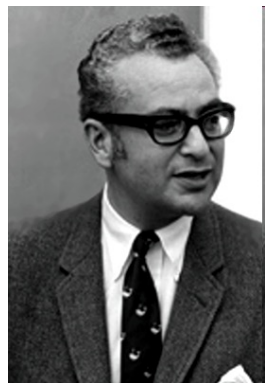
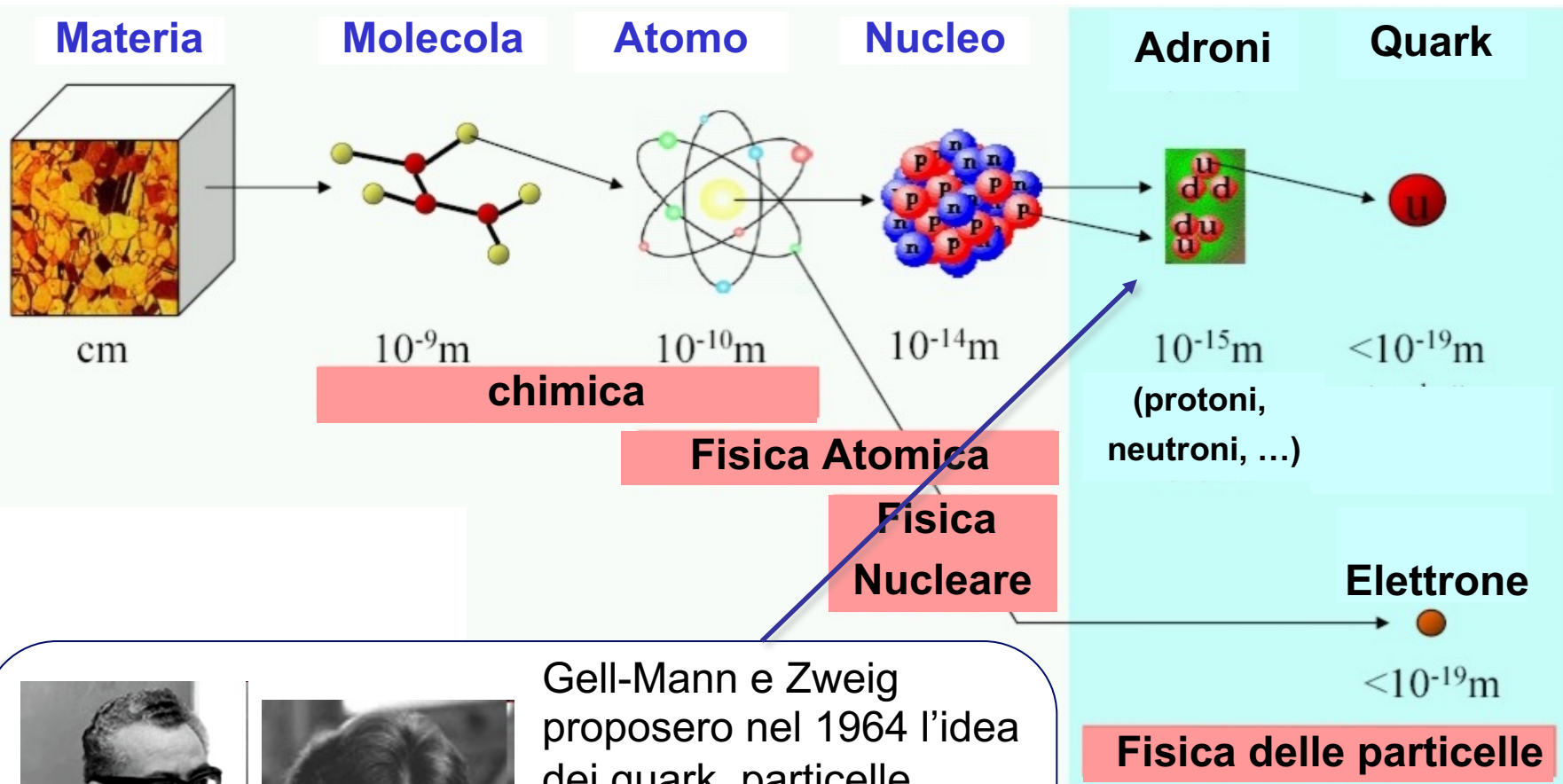
# La materia



**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



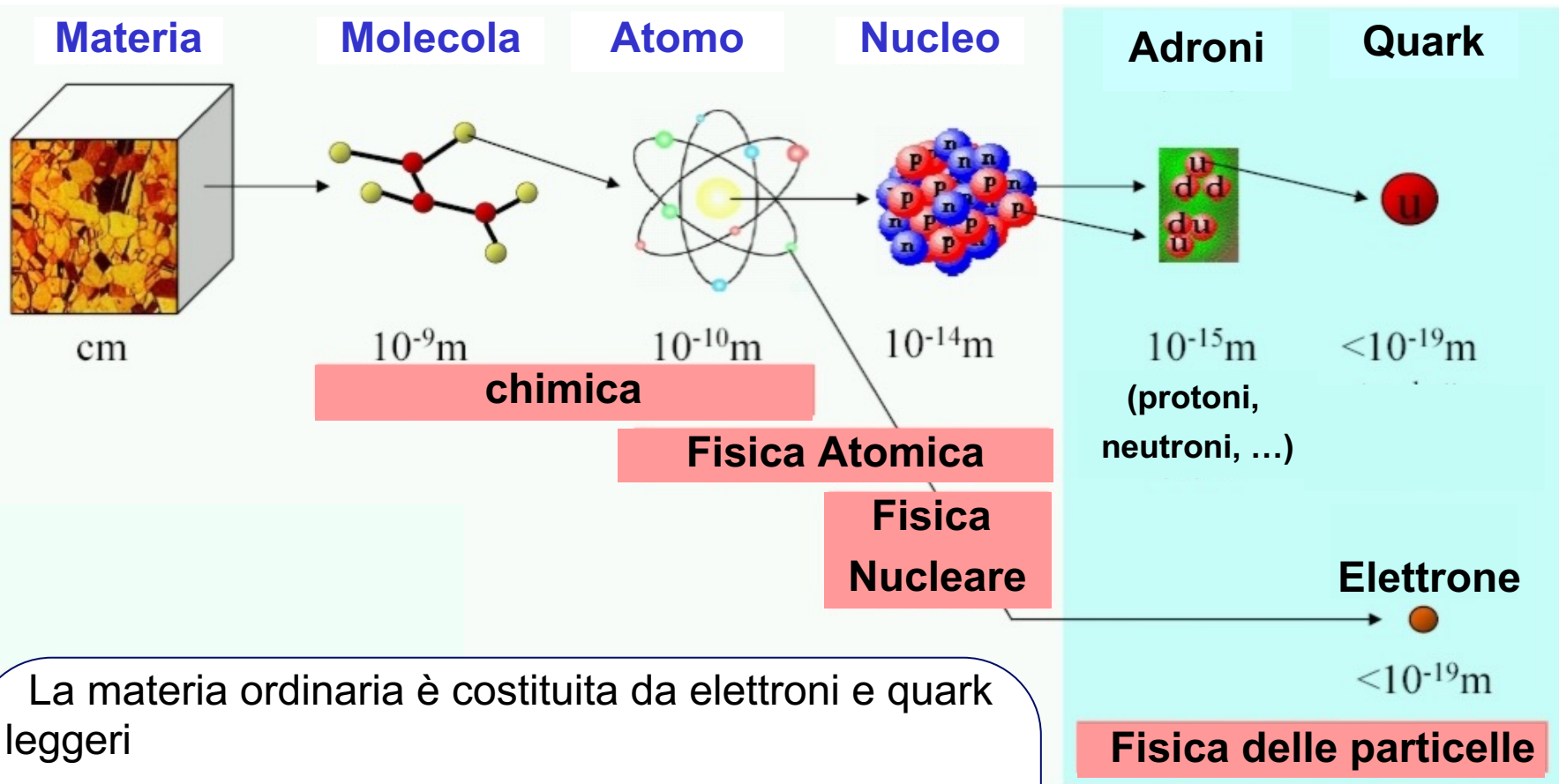
Zweig

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, ...)

che quindi non sono elementari!



# La materia



La materia ordinaria è costituita da elettroni e quark leggeri

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

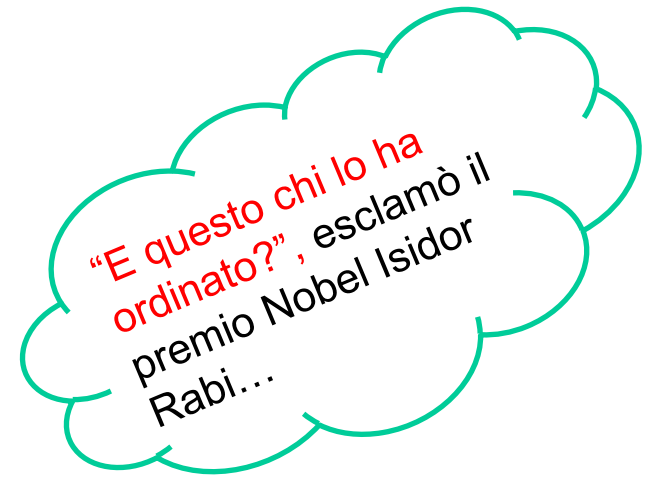
Ad oggi non si ha evidenza di una struttura interna dell'elettrone e dei quark: **sembrano essere i mattoni fondamentali**

# Altre particelle!

## Il muone ( $\mu$ )

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

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





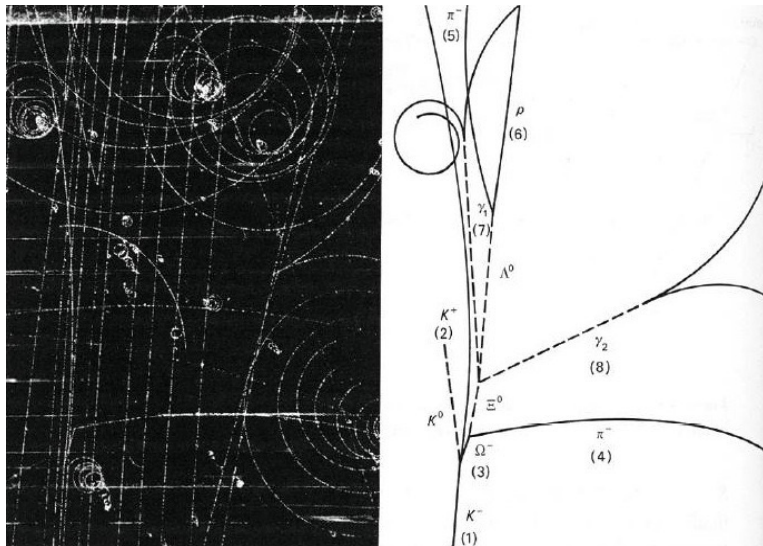
# Altre particelle!

## Il muone ( $\mu$ )

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!



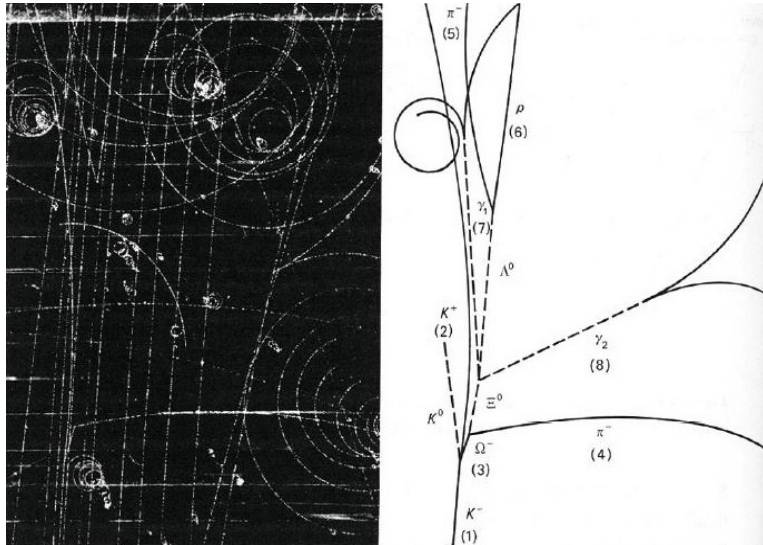
# Altre particelle!

## Il muone ( $\mu$ )

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 ( $\nu$ )

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

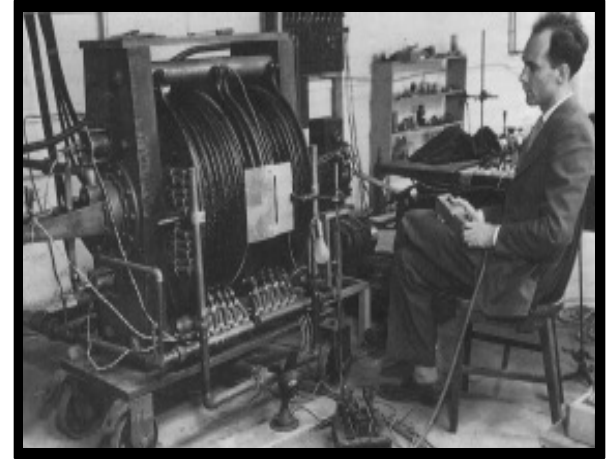
...e molte, moltissime  
altre scoperte...

# 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.

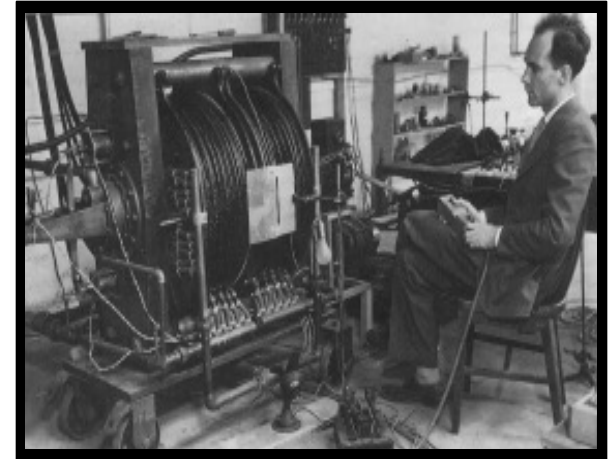


# L'antimateria

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

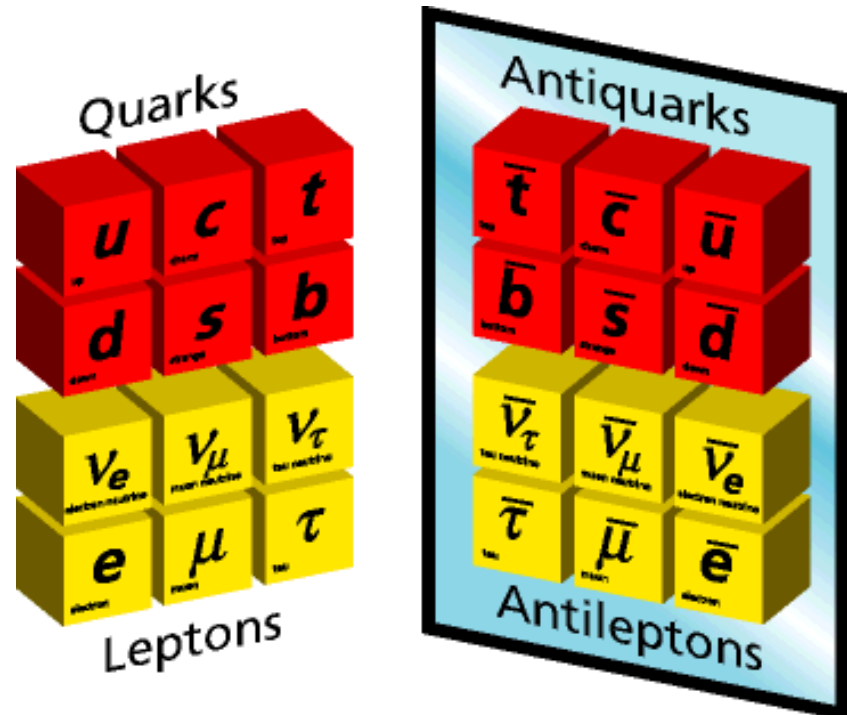
L'equazione di Dirac implica che abbia stessa massa dell'elettrone ma carica opposta.

Il positrone e' stato scoperto da Anderson nel 1932.



Ogni particella ha la corrispettiva antiparticella!

Questo e' il quadro completo:



# Le forze o interazioni

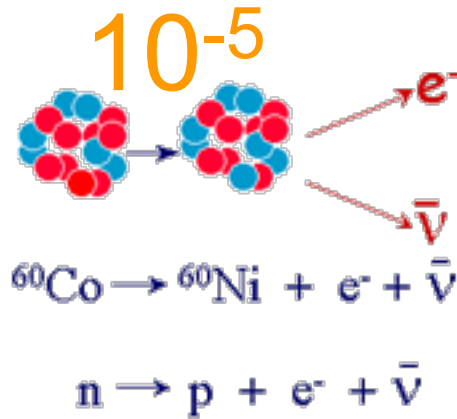
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali

Responsabili:

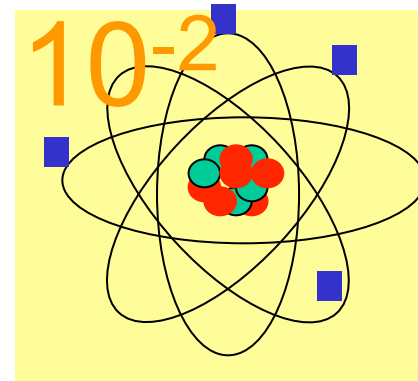
- della coesione della materia
- del suo decadimento



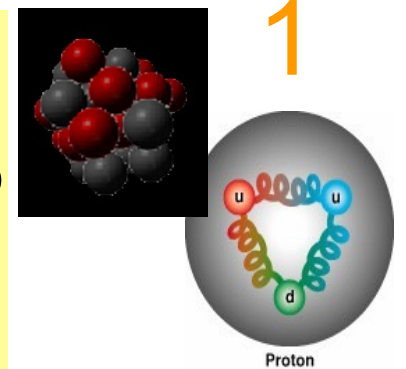
Forza gravitazionale



Forza debole



Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)



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

Es: Il fotone e' il quanto del campo di interazione elettromagnetica

# Le forze o interazioni

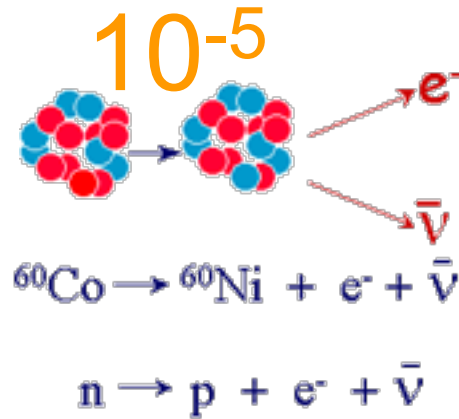
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali

Responsabili:

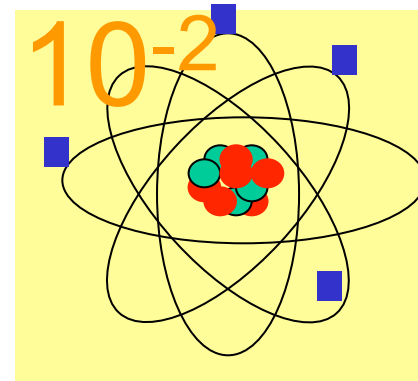
- della coesione della materia
- del suo decadimento



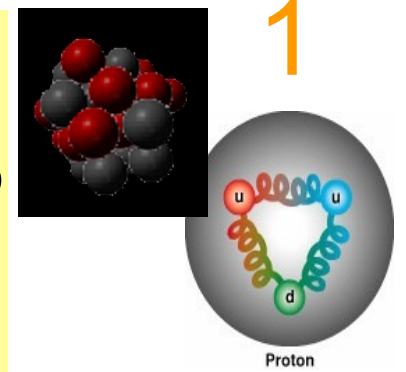
Forza gravitazionale



Forza debole



Forza elettromagnetica



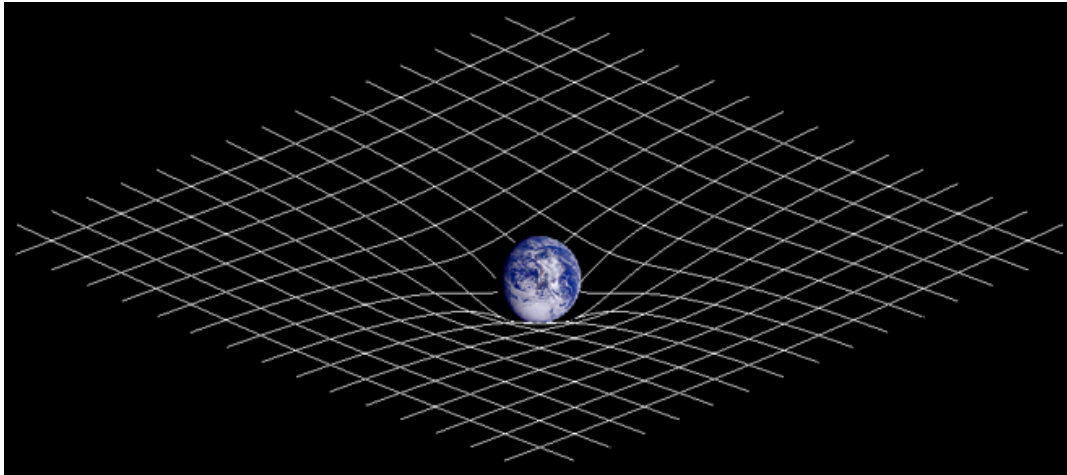
Forza forte (o di colore)



Mediatore	<b>gravitone (G)</b>	<b>W<sup>-</sup> W<sup>+</sup> Z<sup>0</sup></b>	<b>Fotone (γ)</b>	<b>Gluone (g)</b>
Particelle coinvolte	tutte	Leptoni e quarks	Particelle cariche	Quark e gluoni

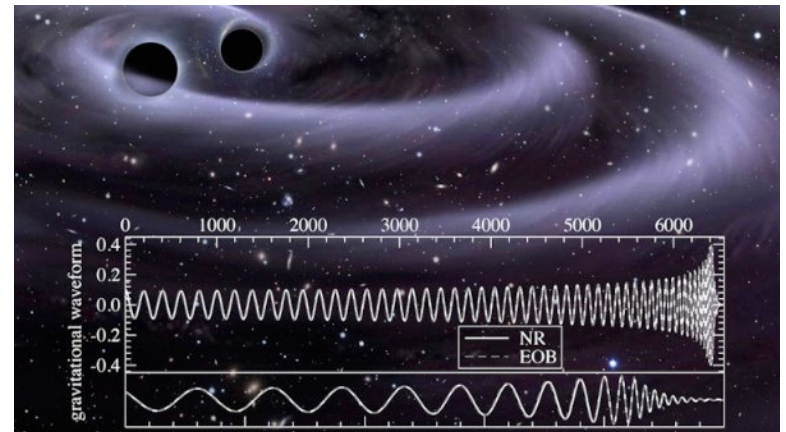


# Una parentesi: la Gravita'

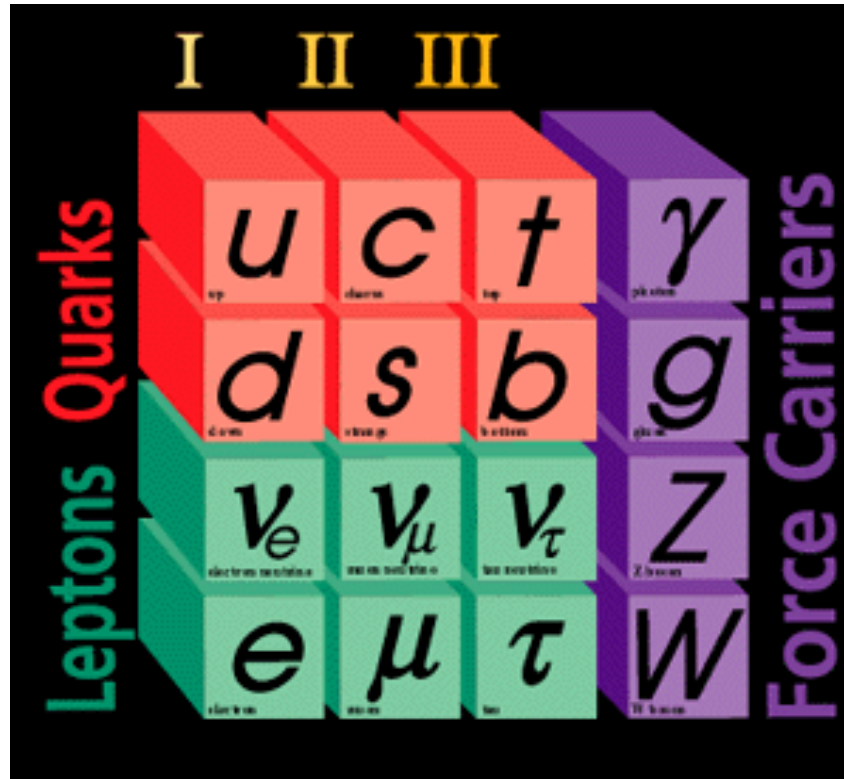


- Una (grande) massa in una regione dello spazio-tempo lo perturba come un sasso lanciato in uno stagno
- tale perturbazione si propaga come un'onda
  - debole e difficile da rivelare

- L'onda si propaga anche nel vuoto (=Universo), perche' e' proprio lo spazio 4-D che oscilla!
- Fenomeno predetto da Einstein nel **1916**, dimostrato sperimentalmente dopo 100 anni
- **Ma la questione se la gravita' e' quantistica (gravitone) rimane aperta**



# Il Modello Standard (MS) delle particelle elementari



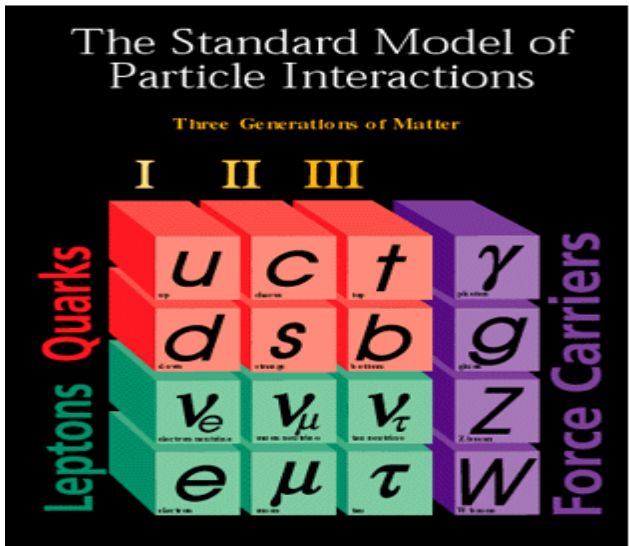
Le forze sono mediate dallo scambio di bosoni (spin 1)

La materia e' composta da particelle di fermion (spin 1/2) divisi in **leptoni** e **quarks** a seconda delle forze cui sono soggetti.

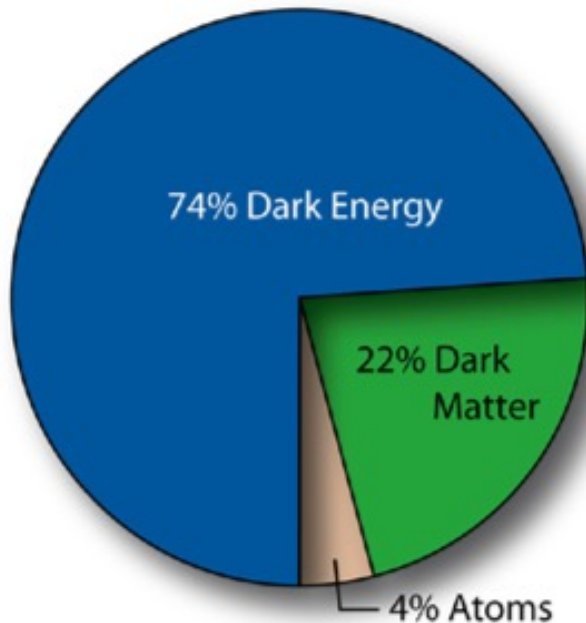
I quark non possono esistere come particelle libere ma possono solo formare particelle piu' pesanti (protone, neutrone, ...)

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

# Problemi col modello standard...



✘ Descrive con successo le nostre osservazioni



✘ Ma deve necessariamente essere esteso!

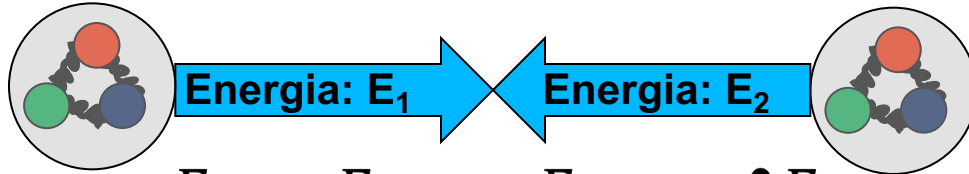
- Per spiegare l'eccesso di materia sull'antimateria
- Per spiegare da cosa sia fatta l'energia del nostro universo:
  - ✓ la materia nota ne rappresenta solo il 4%
  - ✓ cos'è il restante 96%?

# Produrre nuove particelle con gli acceleratori

Prima della collisione

Protone 1

Protone 2



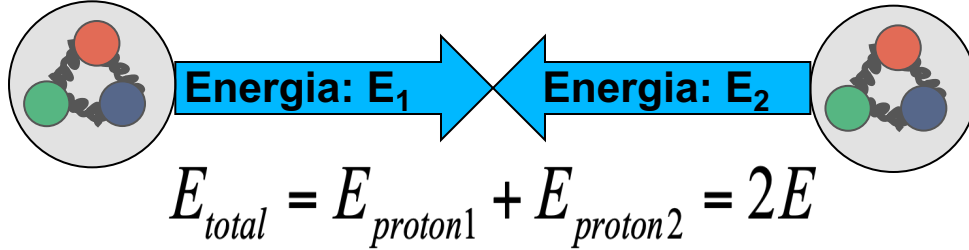
$$E_{total} = E_{proton1} + E_{proton2} = 2E$$

# Produrre nuove particelle con gli acceleratori

Prima della collisione

Protone 1

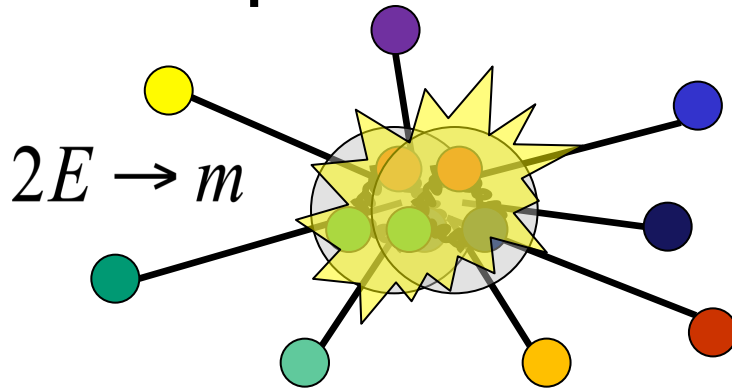
Protone 2



Dalla famosa  
relazione di  
Einstein

$$E = mc^2$$

Dopo la collisione



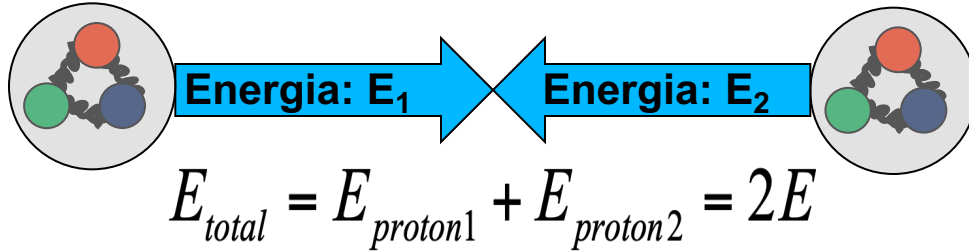
...con l'energia disponibile  
vengono create nuove particelle  
(note o sconosciute)

# Produrre nuove particelle con gli acceleratori

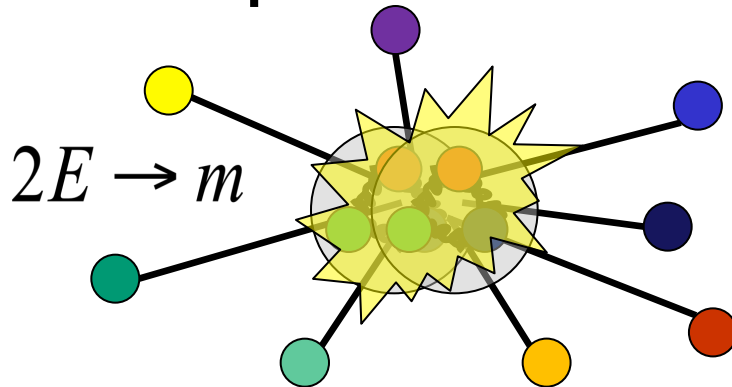
Prima della collisione

Protone 1

Protone 2



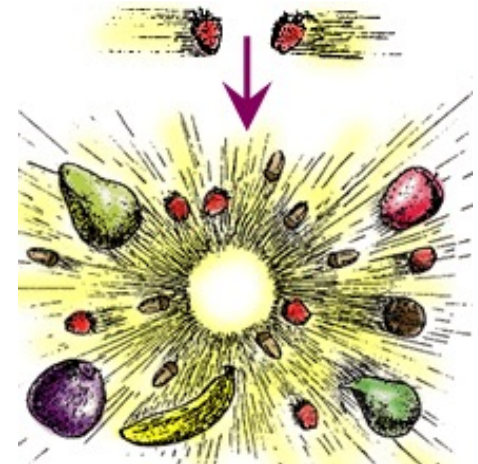
Dopo la collisione



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

Dalla famosa relazione di Einstein

$$E = mc^2$$

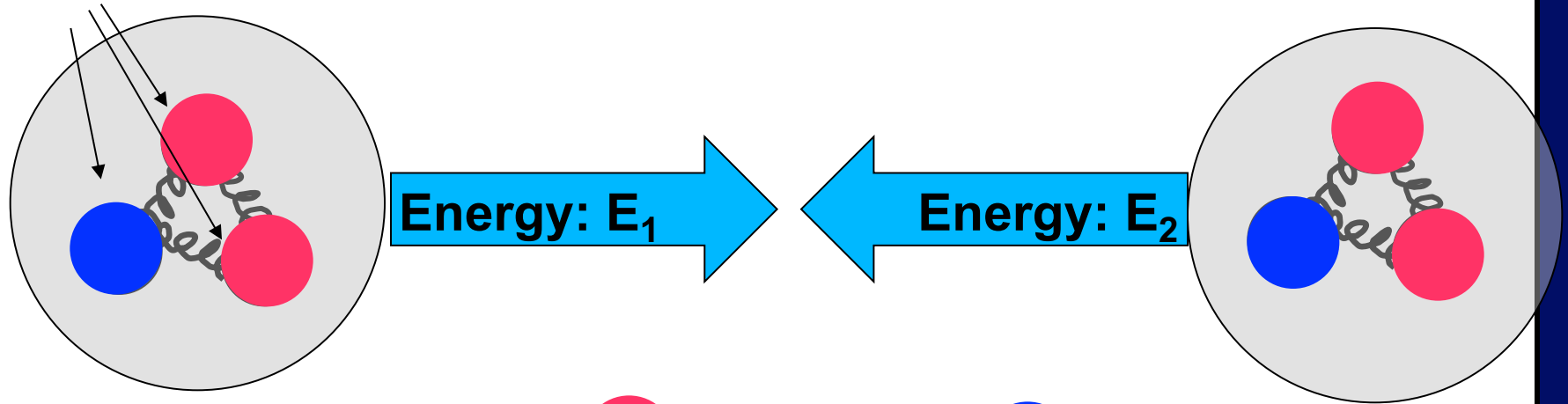


... maggiore e' l'energia, maggiore la probabilita' di produrre nuove particelle "pesanti"



# PRODUZIONE di bosoni $W^+$ e $W^-$

quarks di valenza



protone

up



down



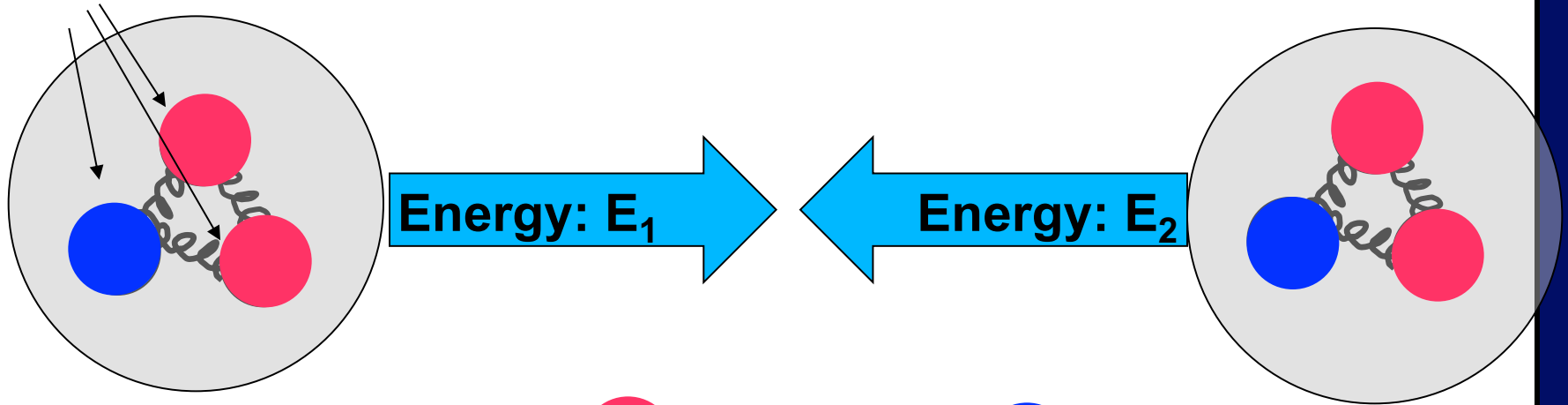
protone

carica elettrica  $+2/3$

$-1/3$

# PRODUZIONE di bosoni $W^+$ e $W^-$

quarks di valenza



protone

up



down



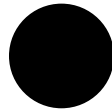
protone

carica elettrica  $+2/3$

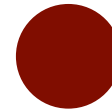
$-1/3$

Dobbiamo produrre carica  $+1$  e  $-1$

anti down



anti up



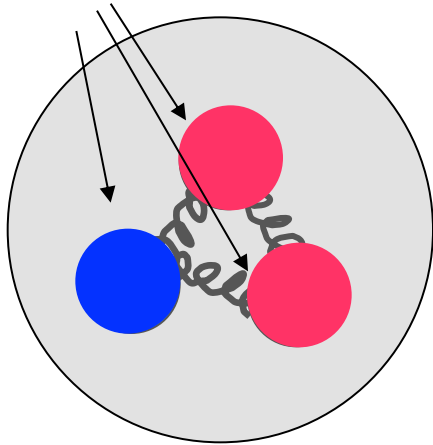
dove li prendiamo ?

carica elettrica  $+1/3$

$-2/3$

# PRODUZIONE di bosoni $W^+$ e $W^-$

quarks di valenza



protone

up

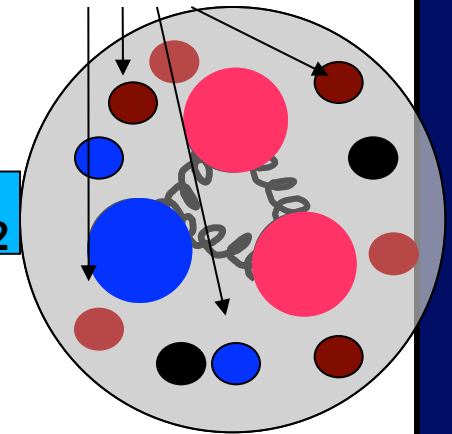


down



protone

quarks del mare



Energy:  $E_1$

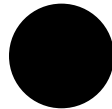
Energy:  $E_2$

carica elettrica  $+2/3$

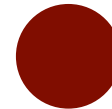
$-1/3$

Dobbiamo produrre carica  $+1$  e  $-1$

anti down



anti up



carica elettrica  $+1/3$

$-2/3$

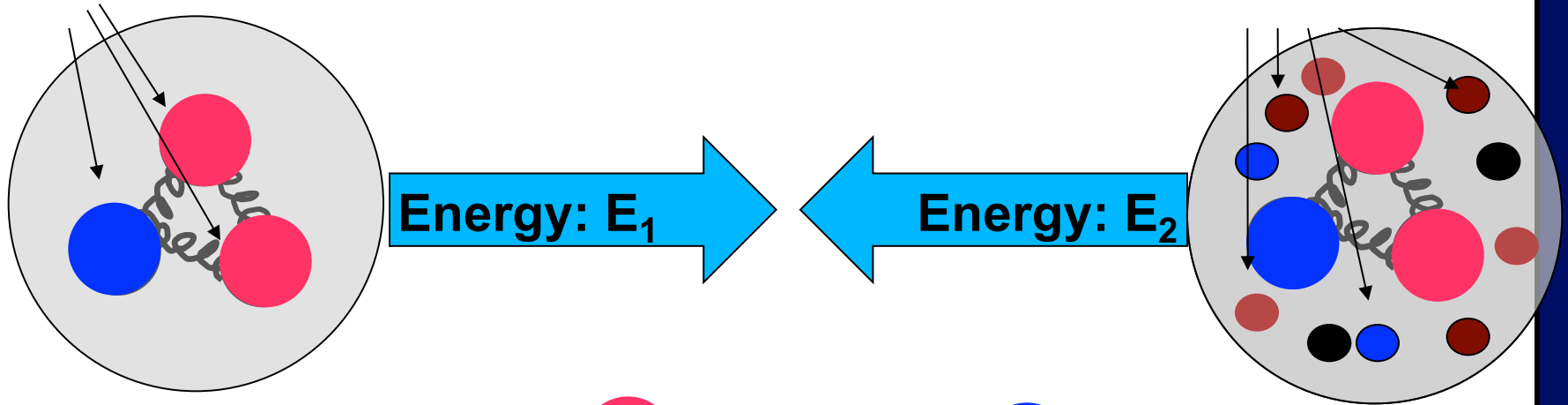
dove li prendiamo ?

?

# PRODUZIONE di bosoni $W^+$ e $W^-$

quarks di valenza

quarks del mare



protone

up



down



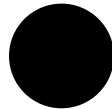
protone

carica elettrica

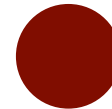
$+2/3$

$-1/3$

anti down



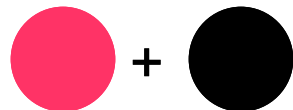
anti up



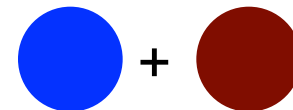
carica elettrica

$+1/3$

$-2/3$



$= W^+$



$= W^-$

carica

$+2/3$

$+1/3$

$+1$

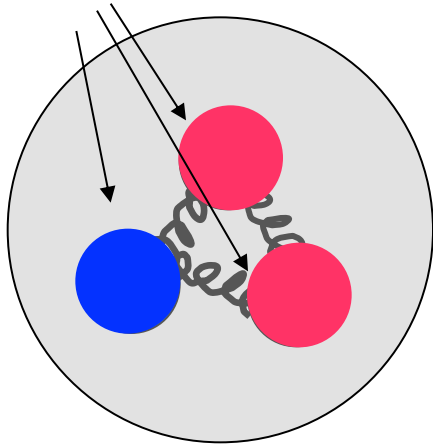
$-2/3$

$-1/3$

$-1$

# PRODUZIONE di bosoni $W^+$ e $W^-$

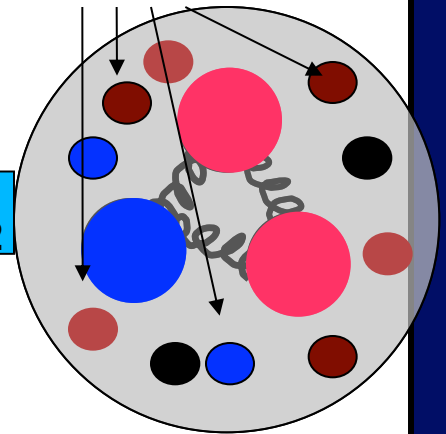
quarks di valenza



protone

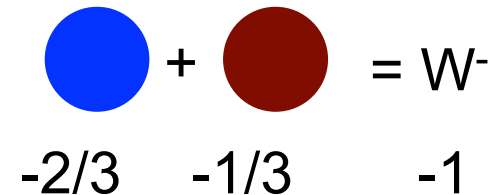
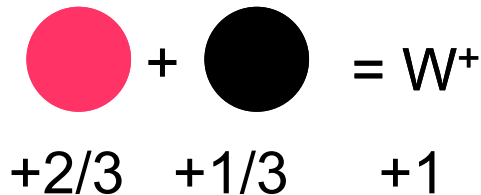
Energy:  $E_1$

quarks del mare



protone

Energy:  $E_2$

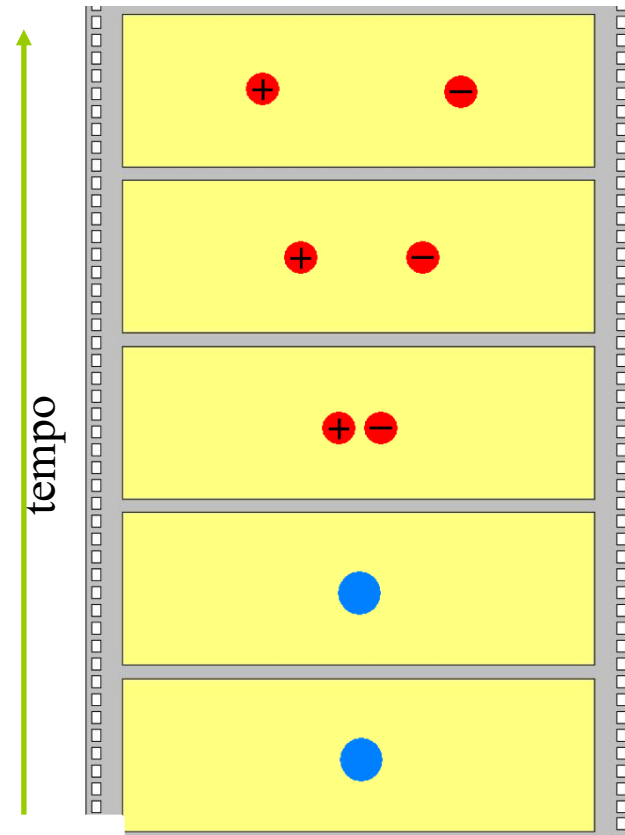
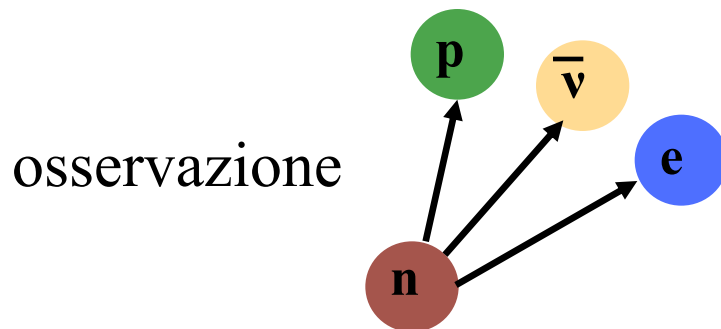


Il numero di quark up e' maggiore del numero di quark down

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





# 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:

- Un elettrone e il suo neutrino ( $W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e$ )  $\sim 11\%$
- ✗ Un muone e il suo neutrino ( $W^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ )  $\sim 11\%$
- Un tau e il suo neutrino ( $W^\pm \rightarrow \tau^\pm + \nu_\tau$ )  $\sim 11\%$
- due quark ( $W^\pm \rightarrow q + \bar{q}$ ) ( $q=u,d,c,s,b$  ma non t che è troppo pesante)  $\sim 67\%$

# Il Bosone di Higgs

Il campo di Higgs dà massa alle particelle e mantiene tutte gli aspetti positivi del Modello Standard precedenti.

Interazione con il campo di Higgs ↔ Interazione con un liquido viscoso



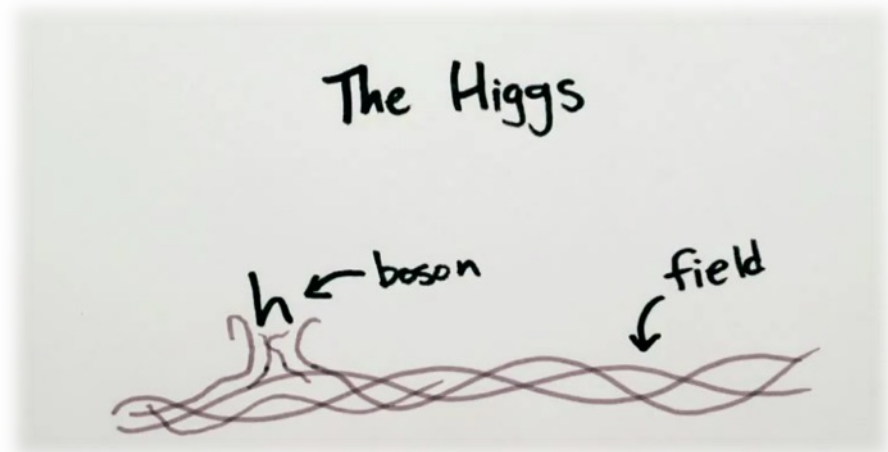
Le particelle hanno massa perché "rallentate" dall'interazione col campo

Le masse sono diverse perché ogni particella interagisce diversamente col campo

# Il Bosone di Higgs

Il campo di Higgs da' massa alle particelle e mantiene tutte gli aspetti positivi del Modello Standard precedenti.

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 che doveva essere trovata

**Altrimenti tutto il meccanismo non sta in piedi!**

4 Luglio 2012

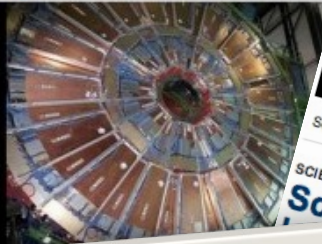
BBC

News Sport Weather Travel

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'U

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

NOKIA LUMIA 900

SCIENZA

Scoperto il Bosone di Higgs la particella di Dio esiste davvero

Genevra 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 professore al CERN, Peter Higgs. La scoperta è stata annunciata al piano al piano dalla standing ovation che gli hanno riservato (foto 1). Per lui si profila il premio Nobel per la fisica.

SCOPRI

+1 86

Tweet 277

LE FIGARO.fr

ACTUALITÉ ÉCONOMIE CULTURE

Le Cern devoue 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)





4 Luglio 2012

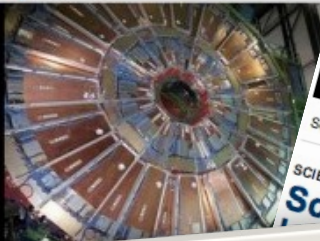
BBC

News Sport Weather Travel

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

NOKIA LUMIA 900

SCIENZA

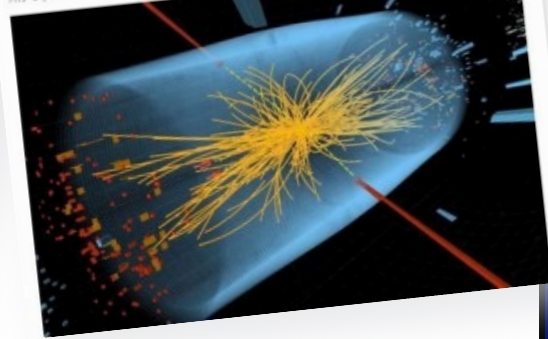
Scoperto il Bosone di Higgs la particella di Dio esiste davvero

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.

LE FIGARO.fr ACTUALITÉ ÉCONOMIE CULTURE

Le Cern dévoile le boson de Higgs

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



2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs



8 Ottobre 2013



# 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 calcolo per l’analisi dei dati

Sappiamo:

- che può essere prodotto a LHC
- che è 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.

Il vostro compito sarà cercare H in decadimenti di questo tipo:



# Cosa impariamo oggi?

- ✘ 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 cercare eventi nei quali sono stati prodotti dei bosoni  $W$
- ✘ Cercherete di identificare gli eventi nei quali questi  $W$  vengono dal decadimento di un bosone di Higgs

**Buon proseguimento!**



# Conversione tra “massa” e “energia”

energia a riposo

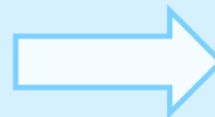
energia cinetica

$$E = E_0 + E_k$$

$$E_0 = mc^2$$

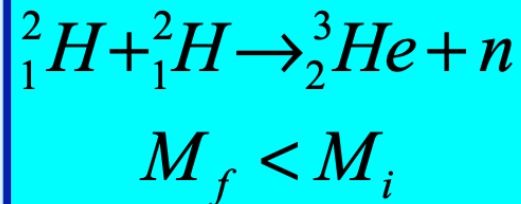
$$E_k = (\gamma - 1)mc^2$$

L'energia totale si conserva

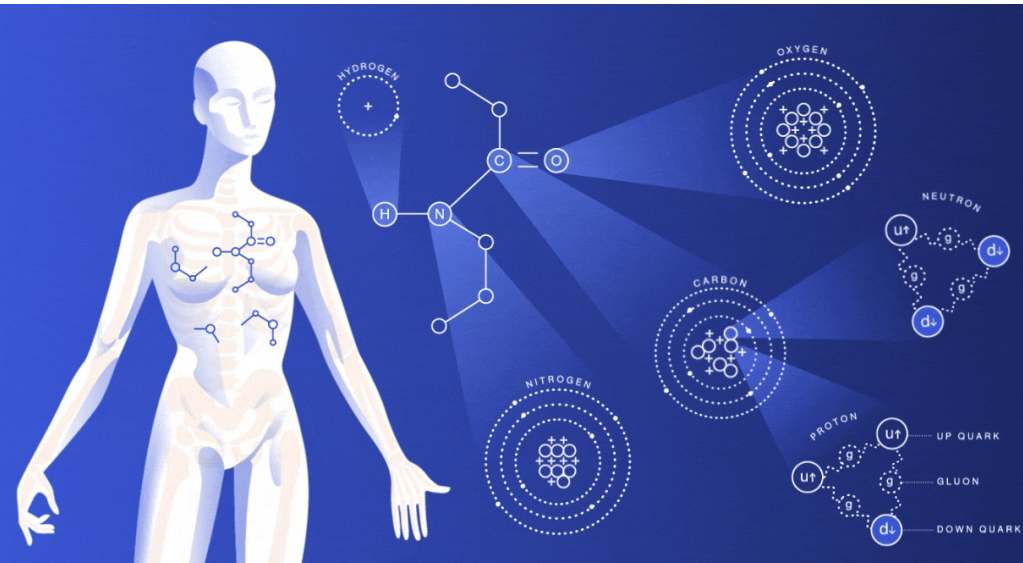


La massa non si conserva

**Evidenza sperimentale:**  
reazioni nucleari



# Anche noi siamo fatti di particelle e energia...



Circa il 99 % del tuo corpo è composto da atomi di idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno.

I tuoi atomi di idrogeno sono stati prodotti durante il Big Bang e quelli di carbonio, azoto e ossigeno sono stati generati all'interno di stelle ardenti.

I nuclei sono 100000 volte più piccoli degli atomi che li ospitano. Se perdessimo tutto lo spazio vuoto presente all'interno dei nostri atomi, l'intera razza umana occuperebbe il volume di una zolletta di zucchero!

la tua massa non deriva dalle masse dei quark di cui sei fatto ma dall'energia cinetica dei quark e dall'energia che li tiene vincolati nel nucleo (forza forte).