



Introduzione alla Fisica delle
Particelle e al Modello Standard

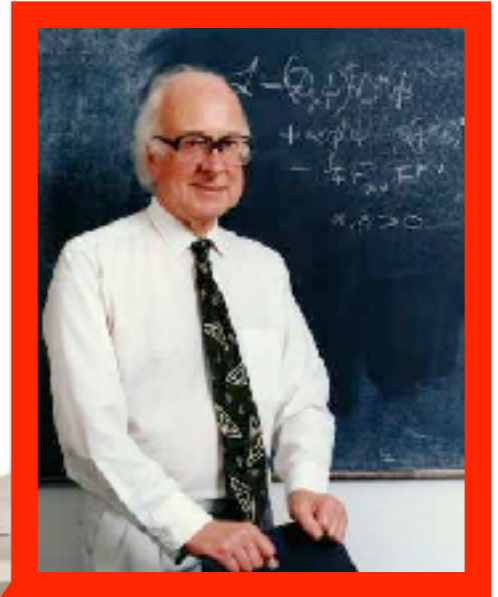
Lorenzo Bianchini
INFN, Sezione di Pisa

7 marzo 2018, Pisa

Il compleanno di una nuova particella

4 Luglio 2012: il **CERN** (*Conseil européen pour la recherche nucléaire*) annuncia la scoperta di una nuova particella

- identificata con la tanto attesa “**particella di Higgs**”



Forza, massa, spazio-tempo

1687:

Isaac **Newton** formula le leggi della moderna dinamica

- **forza, massa, e spazio-tempo** uniti in una legge universale

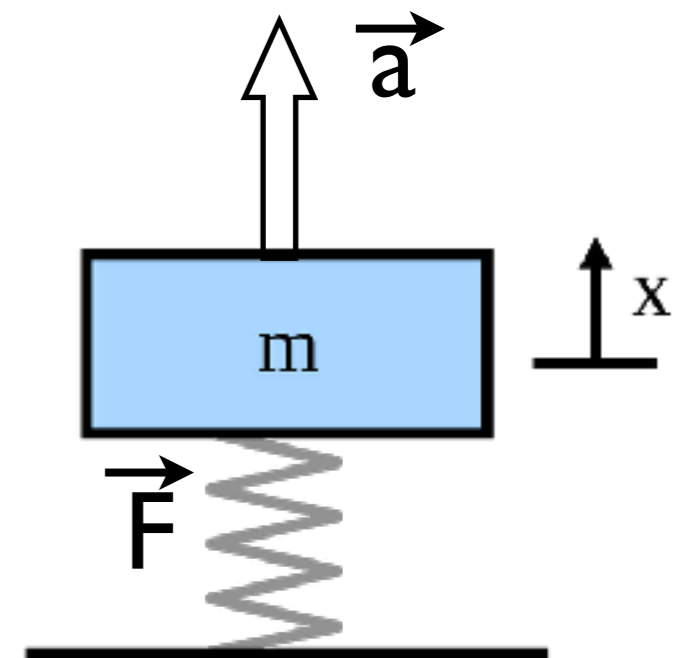


Cosa genera una forza?
Quante ne esistono?

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

Principio di equivalenza:
come si trasformano (t, \mathbf{x}) ?

Qual e' l'origine della massa?
Cosa e' la materia?

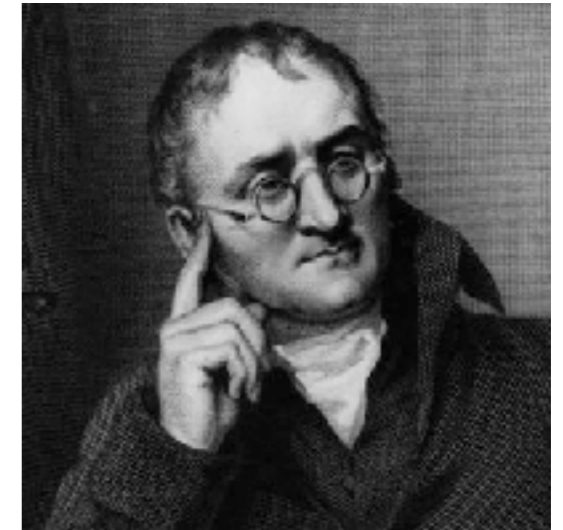
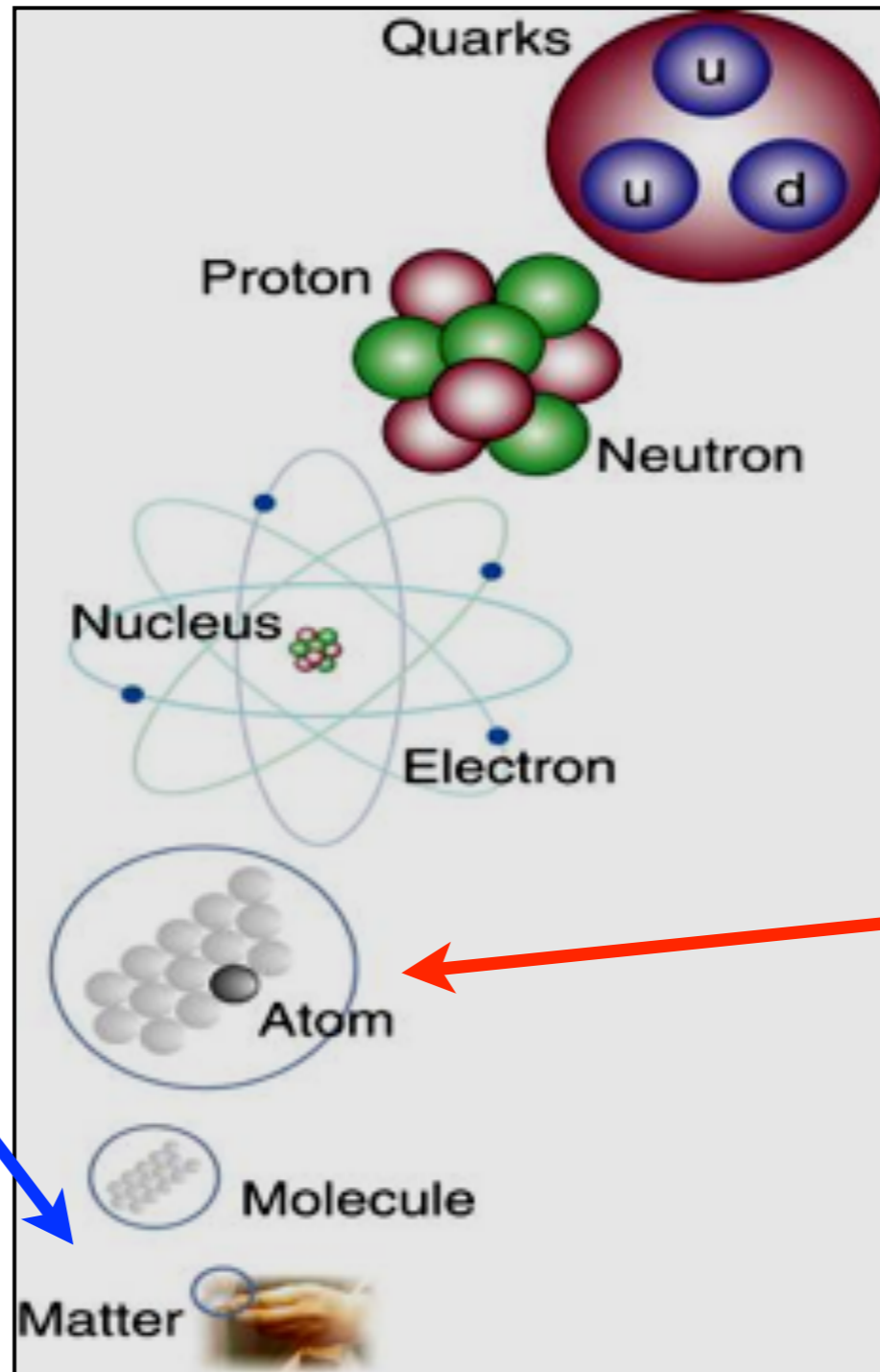


Teoria atomica



V sec a.C.:
Democrito formula
l'**ipotesi atomica**

ἄτομος
=
indivisibile

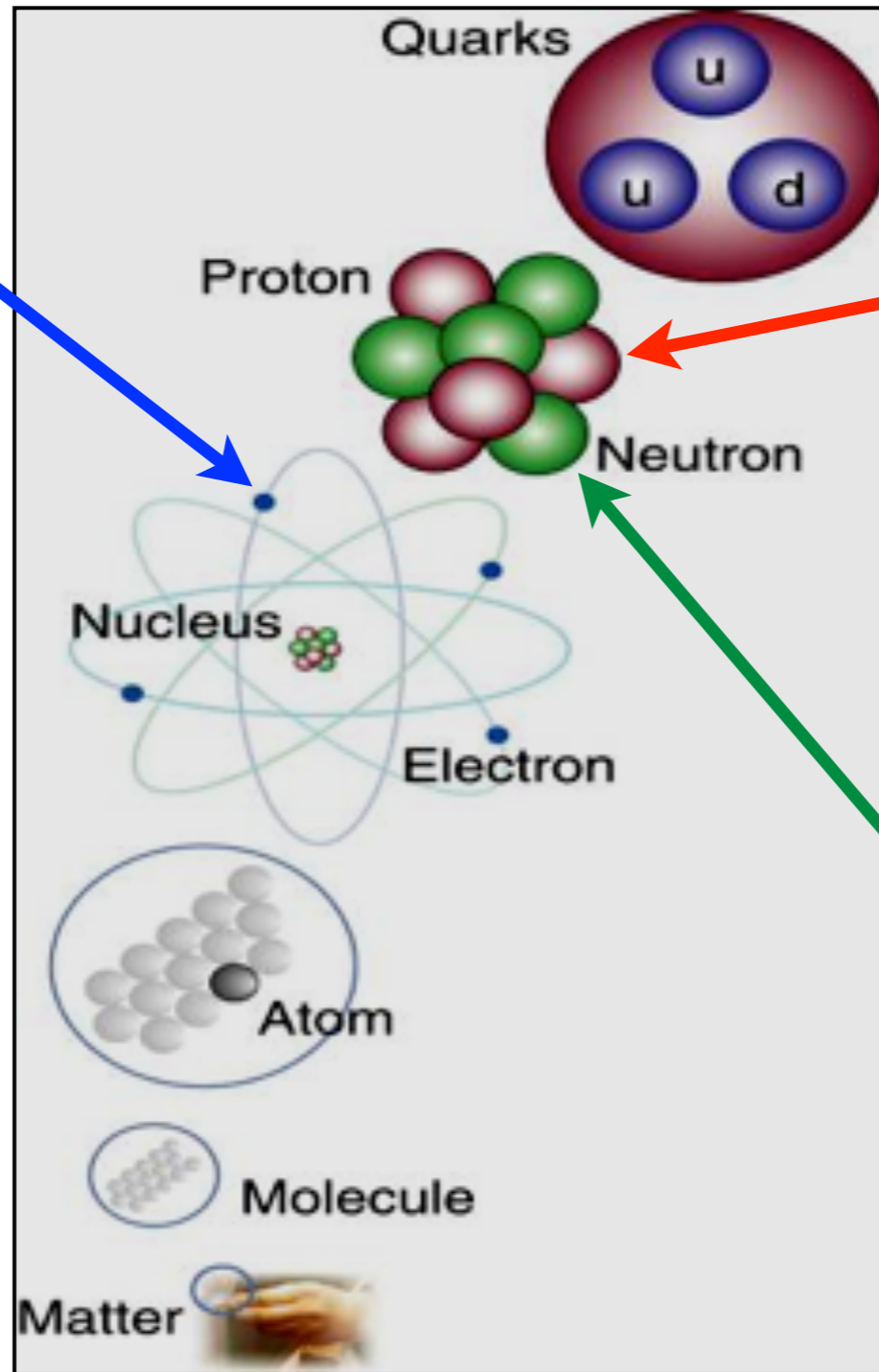


1808:
Dalton riformula la
moderna
teoria atomica

L'atomo si completa



1887:
Thompson
scopre
l'**elettrone**



1911:
Rutherford
scopre il
nucleo



1901:
Planck formula
la **teoria**
quantistica
che spiega
l'atomo

1932:
Chadwick
scopre il
neutrone

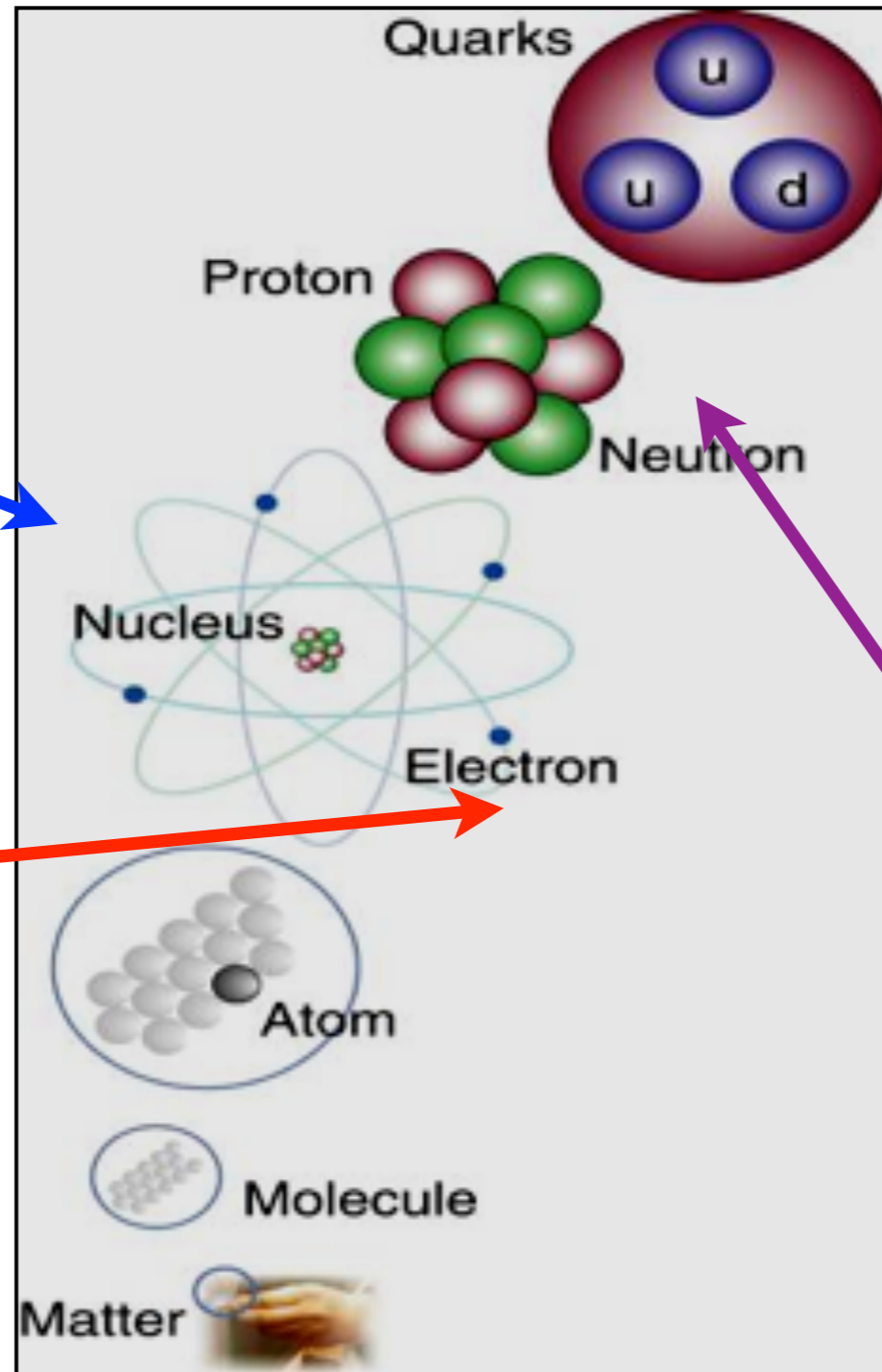


La concezione di materia cambia

1932-1936:
Anderson
scopre il
positrone e
il **muone**



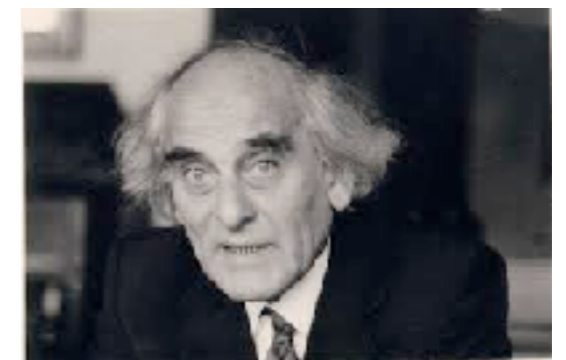
1956:
Raines e Cowan
scoprono i **neutrini
elettronici**



1960:
Gell-Man propone il
modello a **3 quark**
(**u,d,s**) per gli adroni



1947:
Occhialini scopre
nuove particelle
“nucleari” (**pioni**)

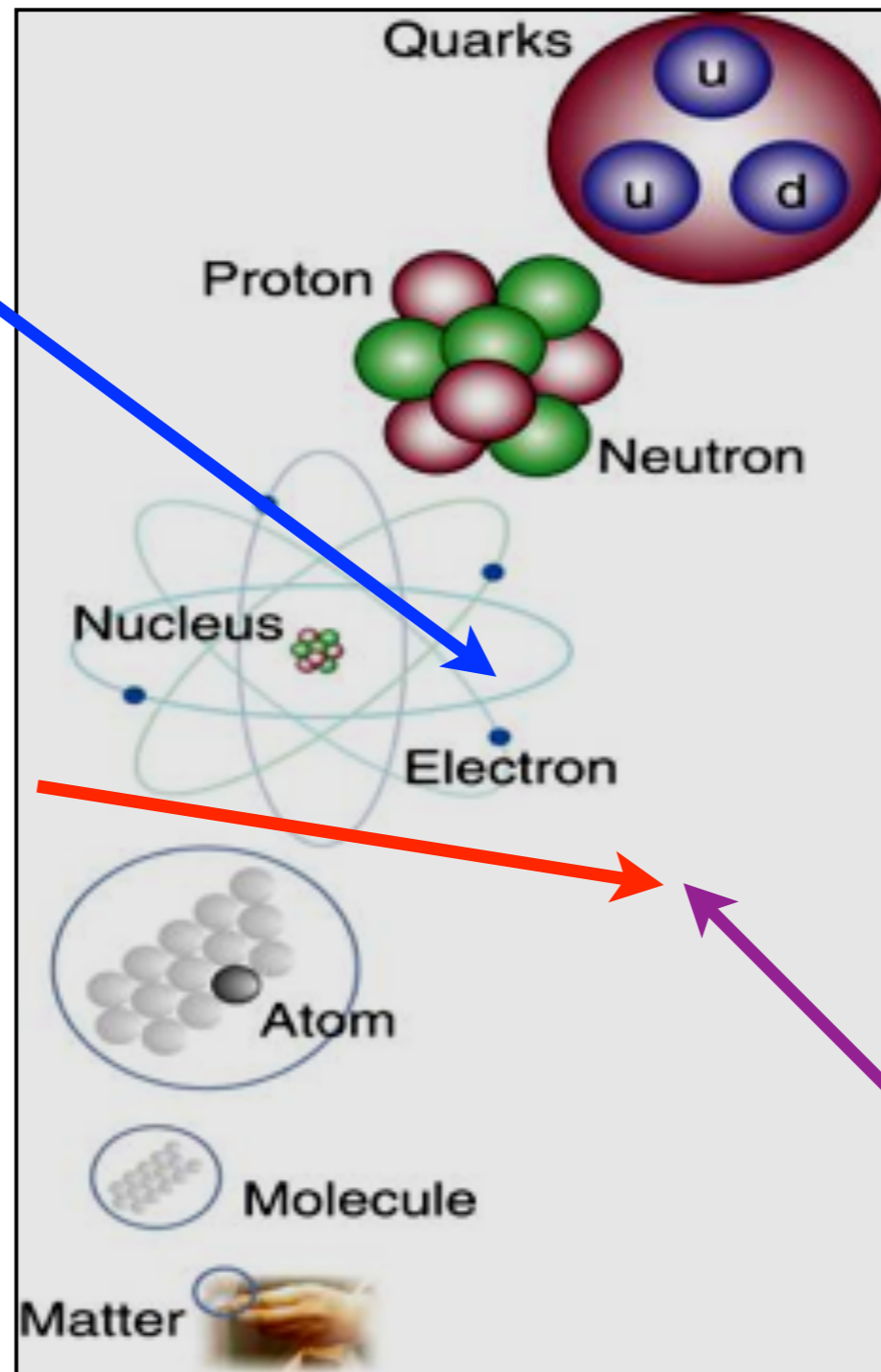


La concezione di materia cambia



1974:
Perl scopre il
lepton e **tau**

1962:
Steinberger et al.
scoprono il **neutrino
muonico**



1974:
Ting e Richter
scoprono un nuovo
quark (**charm**).

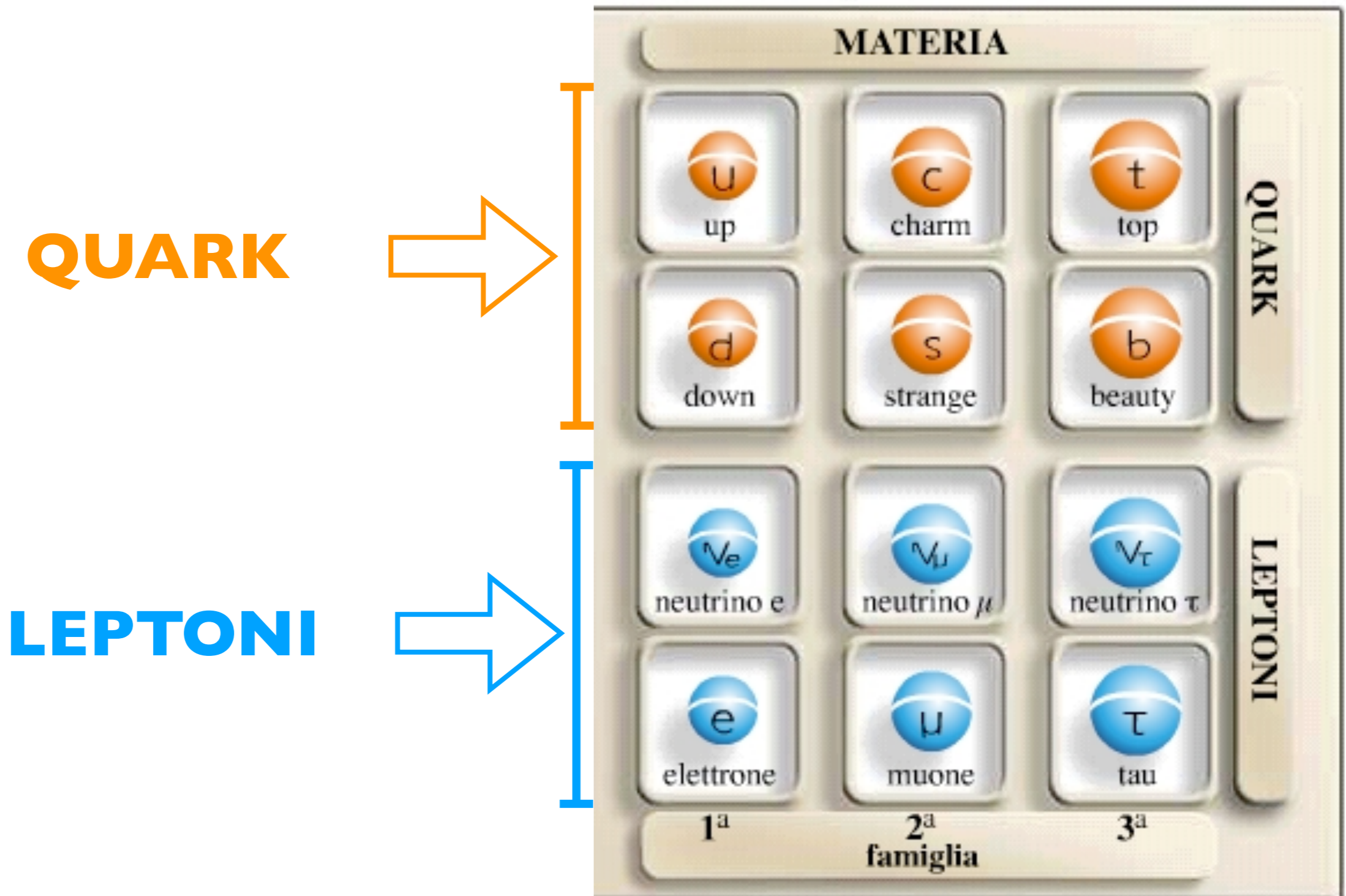


Seguirà la scoperta
del quark **bottom**
(1977) e del quark
top (1995)

2000:
L'esperimento
DOUNT rileva il
neutrino tau

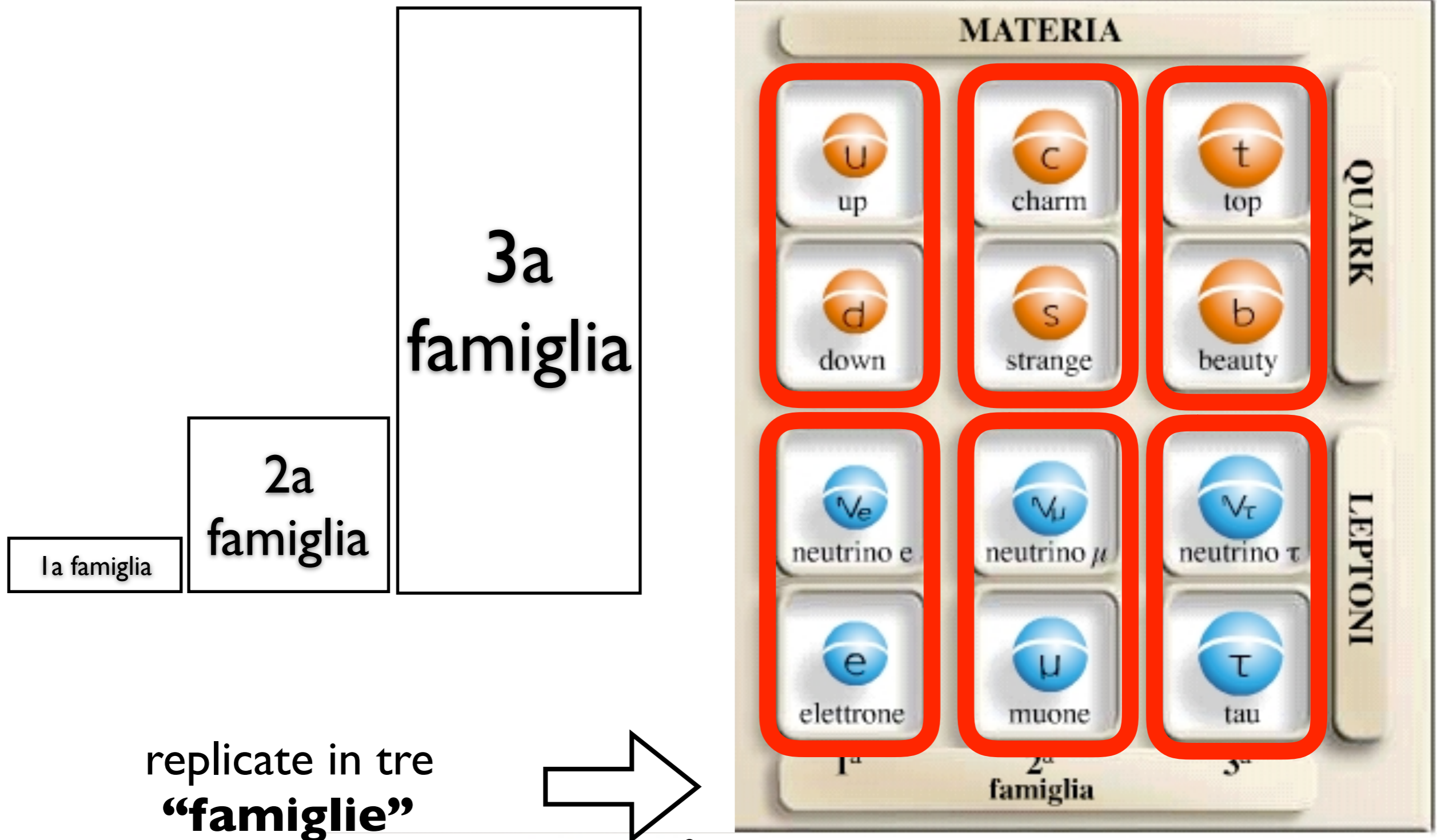
Dall'atomo alle particelle

Particelle sono dette i costituenti **fondamentali** della materia



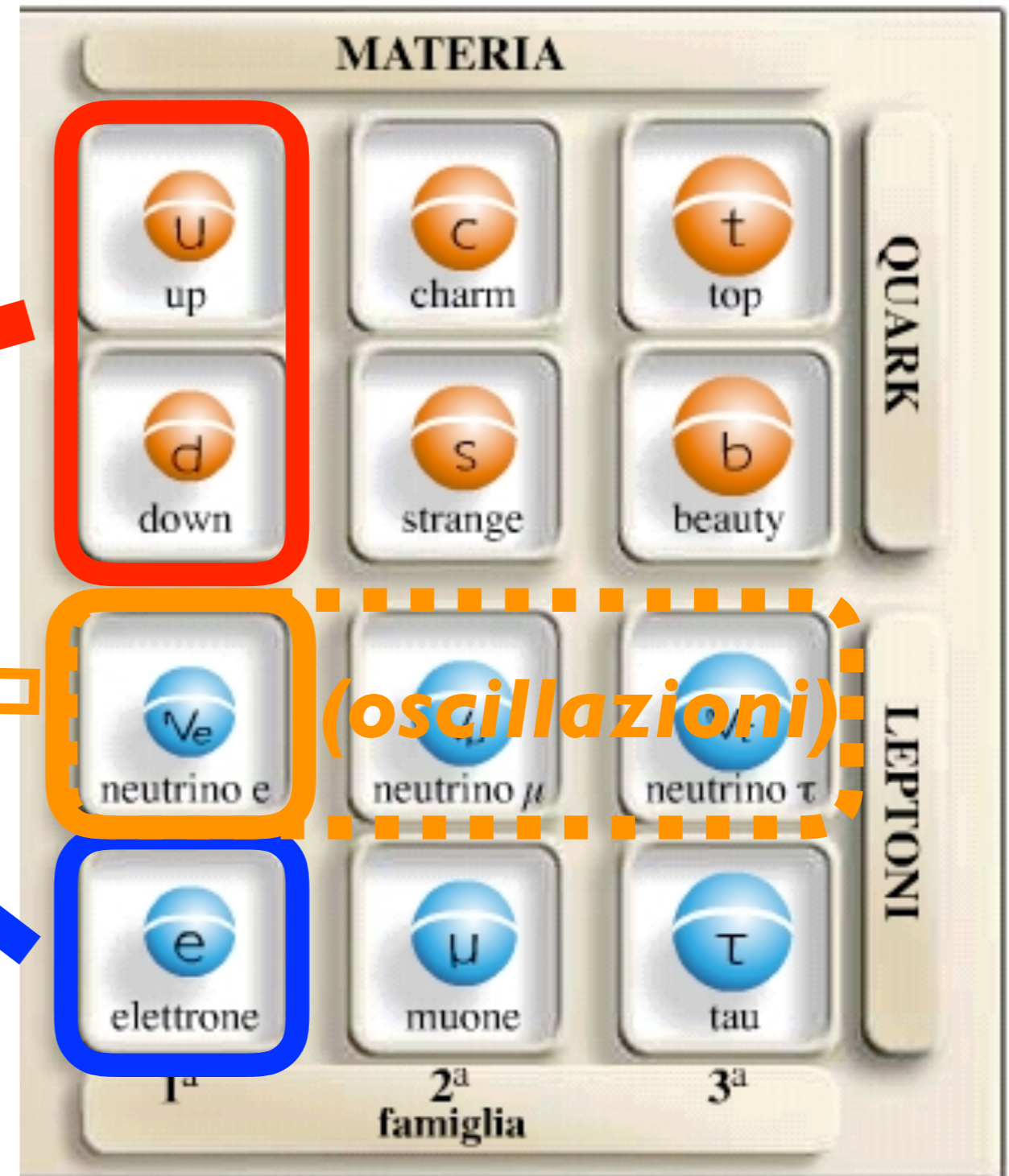
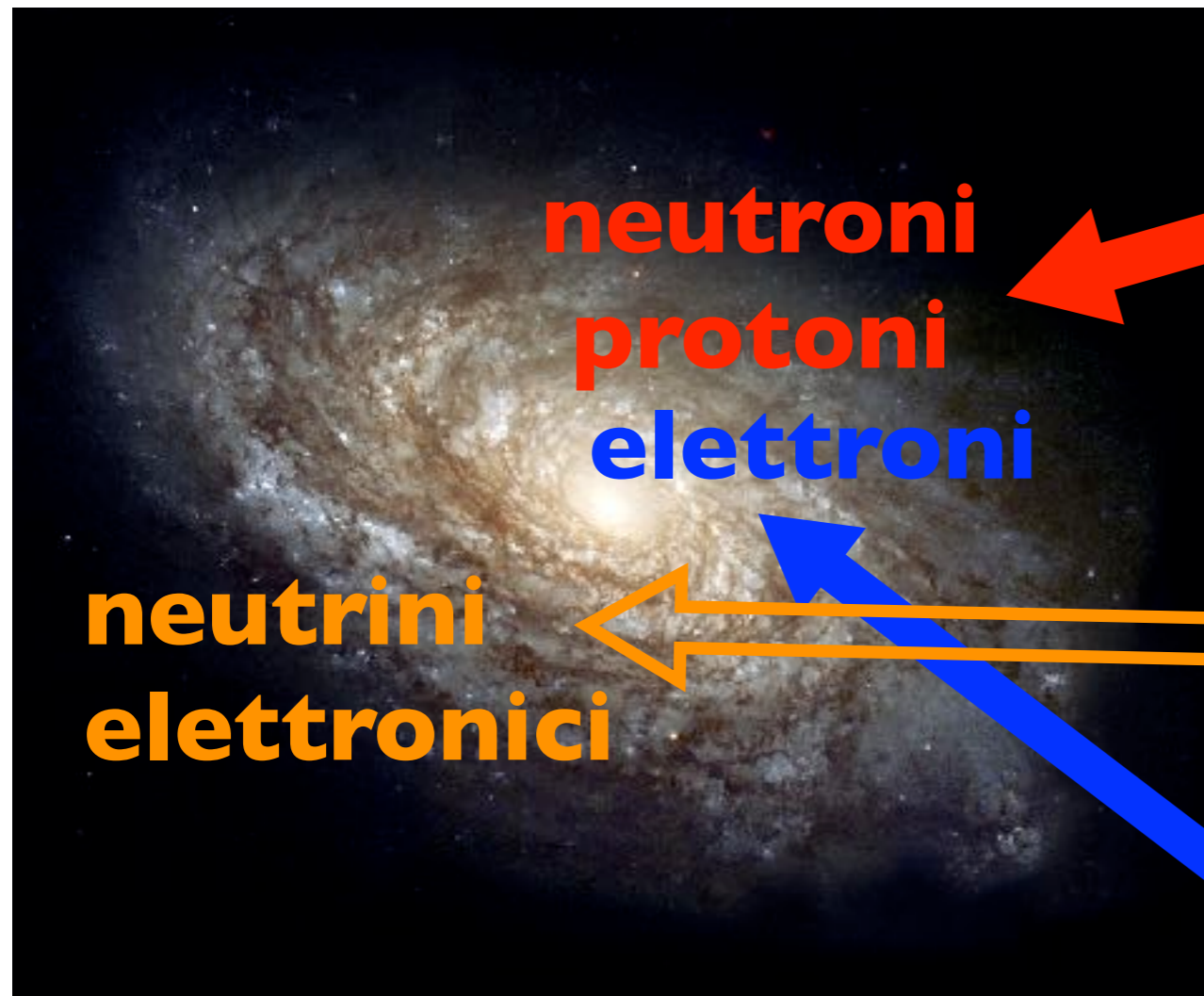
Dall'atomo alle particelle

Particelle sono dette i costituenti **fondamentali** della materia



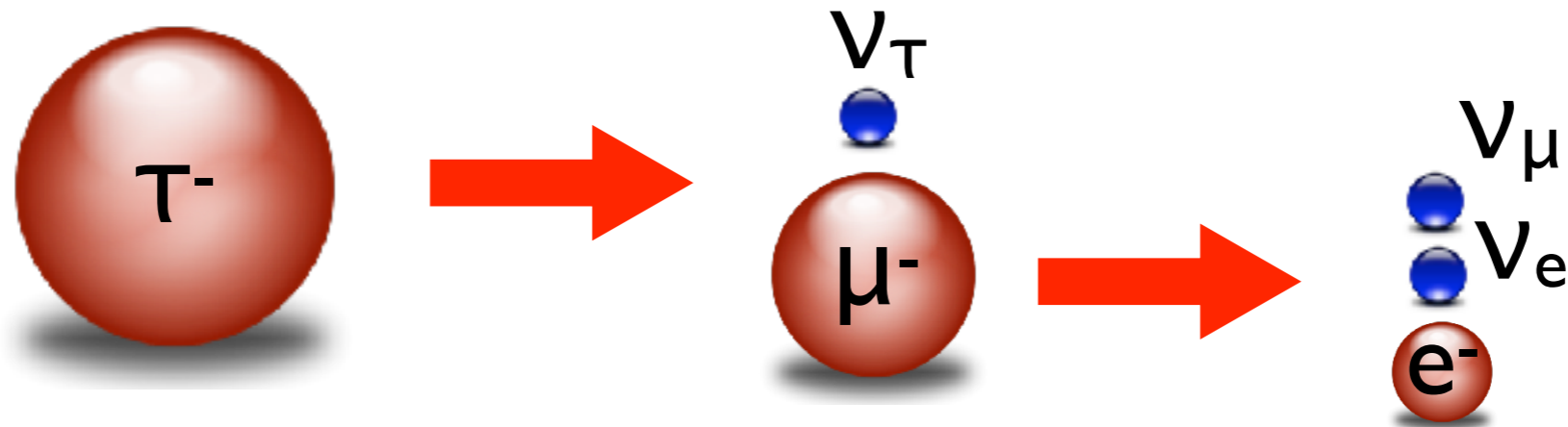
Dall'atomo alle particelle

Particelle sono dette i costituenti **fondamentali** della materia



Un inciso...

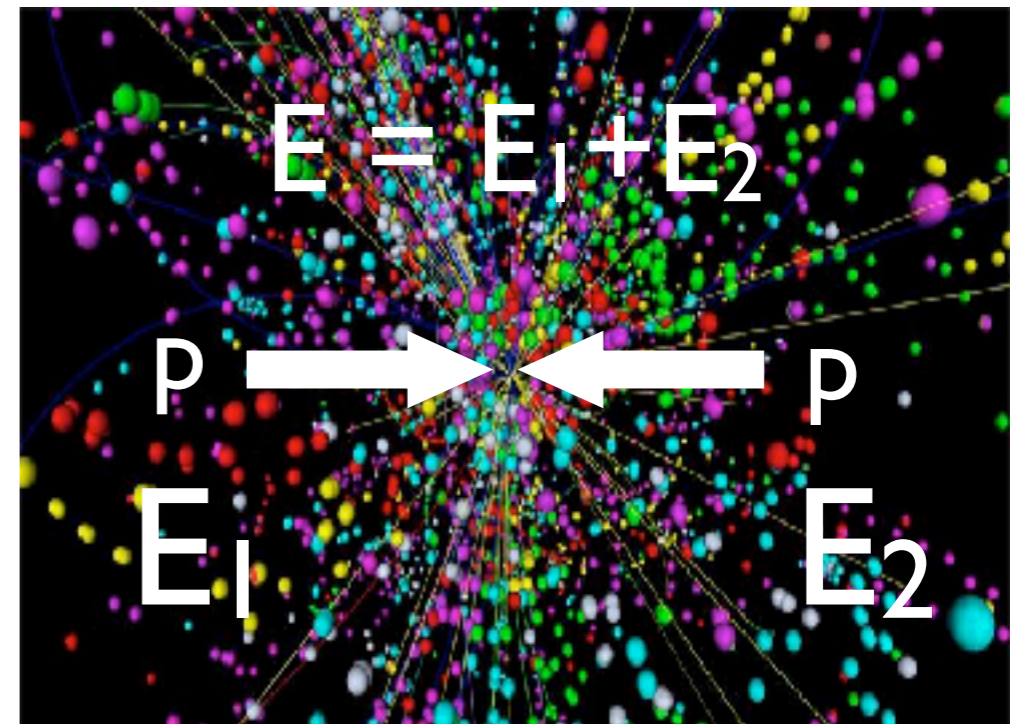
Particelle **pesanti** decadono in particelle piu' leggere. Per esempio:



Per poterle osservare, devono essere prima **prodotte**

Ricorda

Quando due particelle si scontrano, **nuove particelle** possono essere estratte dal vuoto, purché **energia** e **impulso** totali siano conservati



Vite medie

Esercizio

Quanto valgono le vite medie di:

- Elettrone
- Protone
- Neutrone
- Muone
- Pione neutro
- Risonanza “Delta” (stato legato protone-pione)

Vite medie

Esercizio: soluzione (<http://pdg.lbl.gov>)

Quanto valgono le vite medie di:

- Elettrone: *stabile* (esperimento: $\tau > 6.6 \times 10^{28}$ anni)
- Protone: *stabile* (esperimento: $\tau > 10^{29}$ anni)
- Neutrone: *instabile* ($\tau \sim 10^3$ sec.)
- Muone: *instabile* ($\tau \sim 10^{-6}$ sec.)
- Pione neutro: *instabile* ($\tau \sim 10^{-17}$ sec.)
- Risonanza "Delta": *instabile* ($\tau \sim 10^{-25}$ sec.)

La vita media delle particelle dipende dalla forza con cui interagiscono

Fenomenologia

Ciascun tipo di particella é caratterizzato da una **massa** e da un momento angolare intrinseco, detto **spin**



M



S = 0,
1/2,
1,
3/2, ...

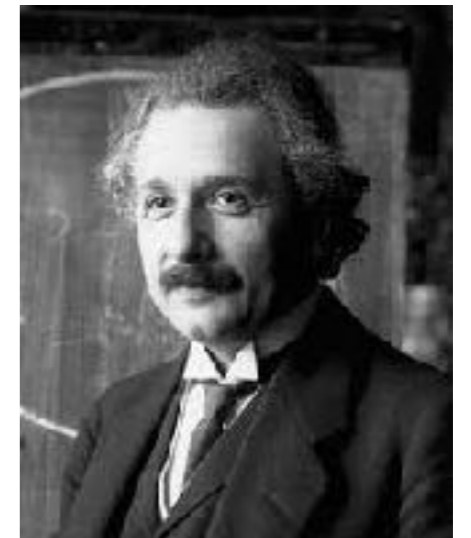
Tutte le particelle di una certa specie sono **copie identiche**, replicate su scala cosmica

“Principio di indistinguibilità”

E' alla base della classificazione in particelle di:

FERMI-DIRAC

BOSE-EINSTEIN

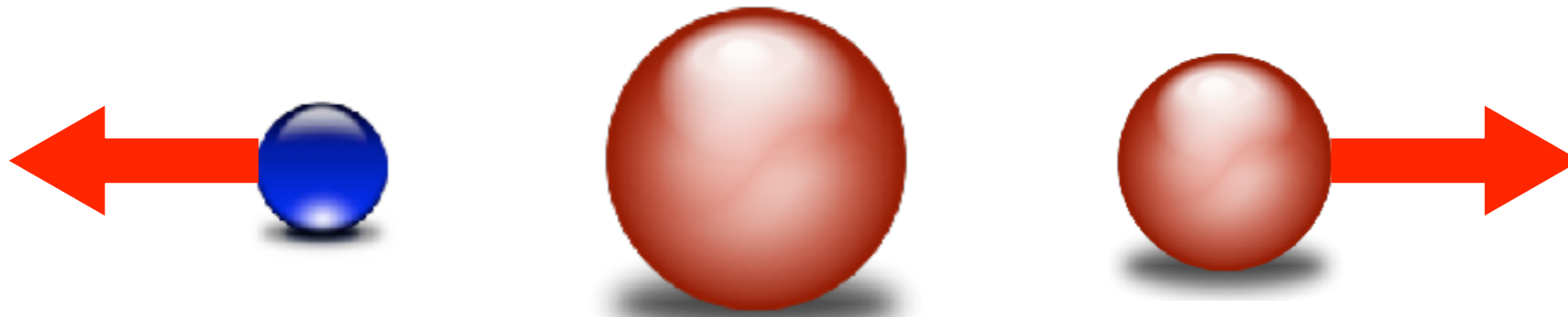


Massa, energia, impulso

La massa entra nel computo dell'energia.

Energia e impulso (quantità di moto) si conservano

$$Mc^2 = [m_1^2 c^4 + \mathbf{p}^2 c^2]^{1/2} + [m_2^2 c^4 + \mathbf{p}^2 c^2]^{1/2}$$

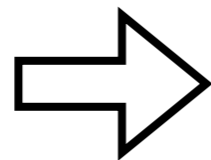


$$0 = -\mathbf{p} + \mathbf{p}$$

In generale: siano (E, \mathbf{P}) energia/impulso di particella di massa M :

$$E = E_1 + E_2 + \dots$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots$$



$$M^2 = E^2/c^4 - \mathbf{P}^2/c^2 =$$

$$[(E_1 + E_2 + \dots)^2/c^4 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots)^2/c^2]$$

Unità naturali

Per semplificare le formule, si esprimono tutte le grandezze dimensionali in unità di:

$$[\text{GeV}, \hbar, c]$$

$$eV \sim 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\hbar = \text{costante du Planck} \sim 10^{-34} \text{ J s}$$

$$c = \text{velocità luce} \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

e poi si pone $\hbar = c = 1$ (*unità naturali*). Per esempio:

$$\text{kg} = 0.56 \times 10^{27} \text{ GeV}, \quad m = 0.507 \times 10^{16} \text{ GeV}^{-1}, \quad s = 1.52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1}.$$

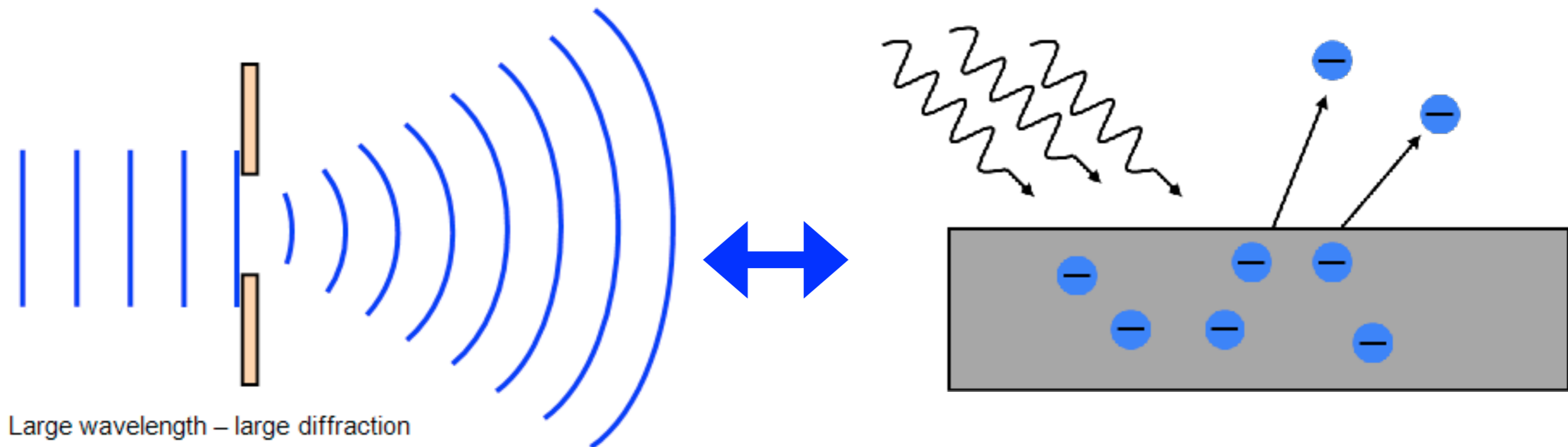
$$M^2 = [(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \dots)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots)^2]$$

(con E e \mathbf{p} espresse in GeV)

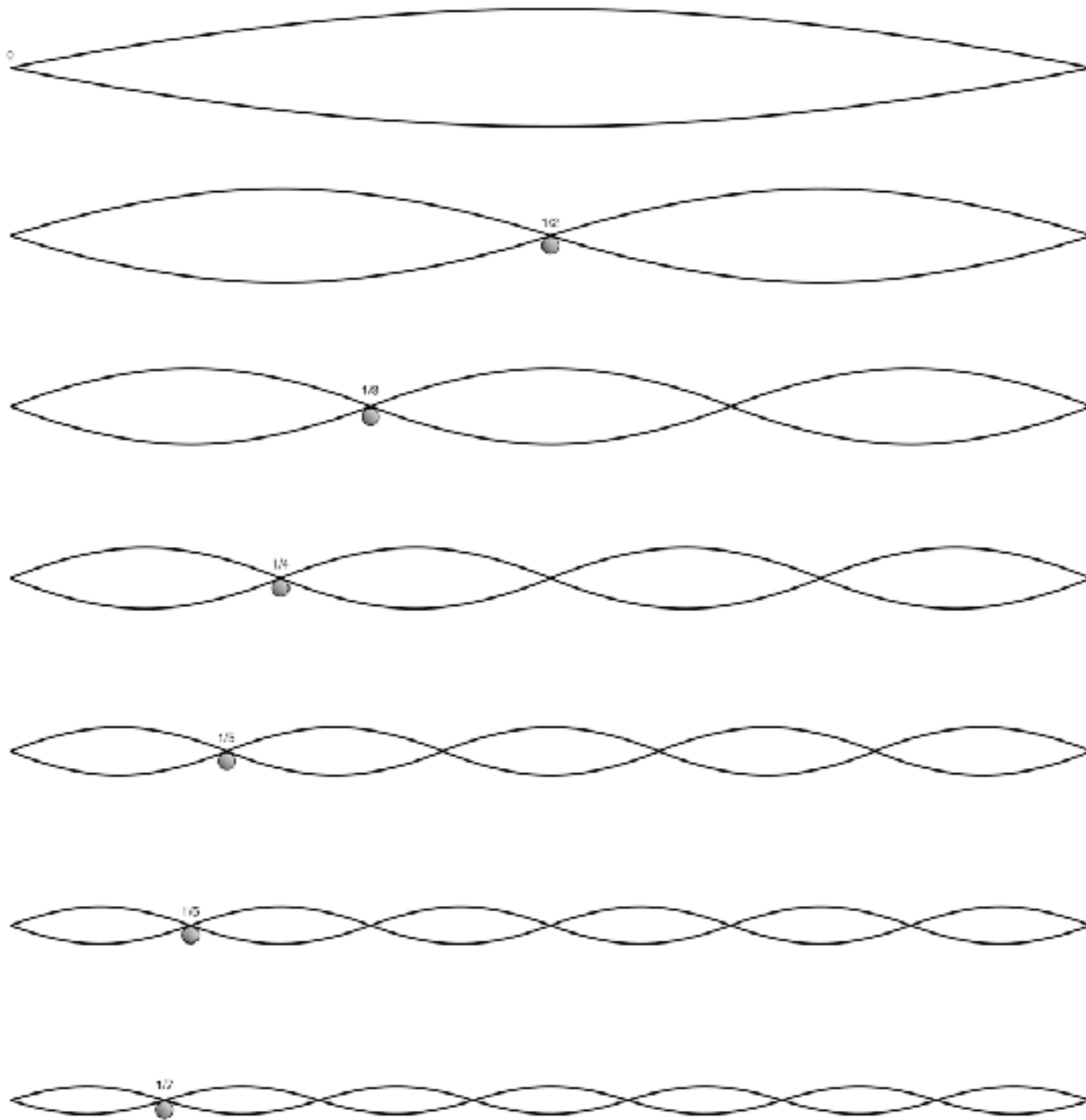
Onde ↔ particelle

La luce ha un doppio carattere:

- **ondulatorio**, nella propagazione
- **corpuscolare**, nella interazione con la materia:
 - **fotone** = **quanto** del campo elettromagnetico



Onde \longleftrightarrow particelle



0 quanti

1 quanto

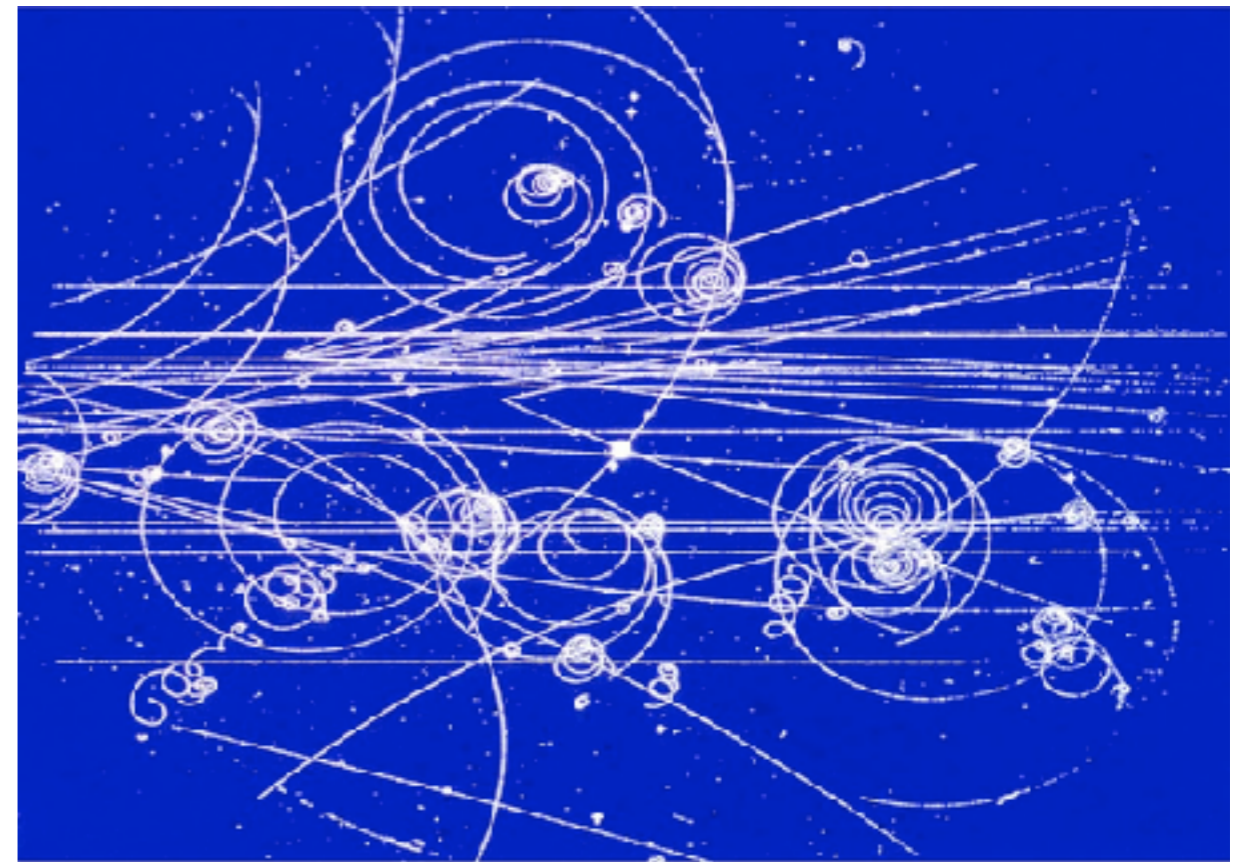
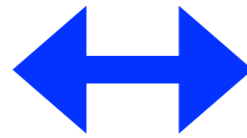
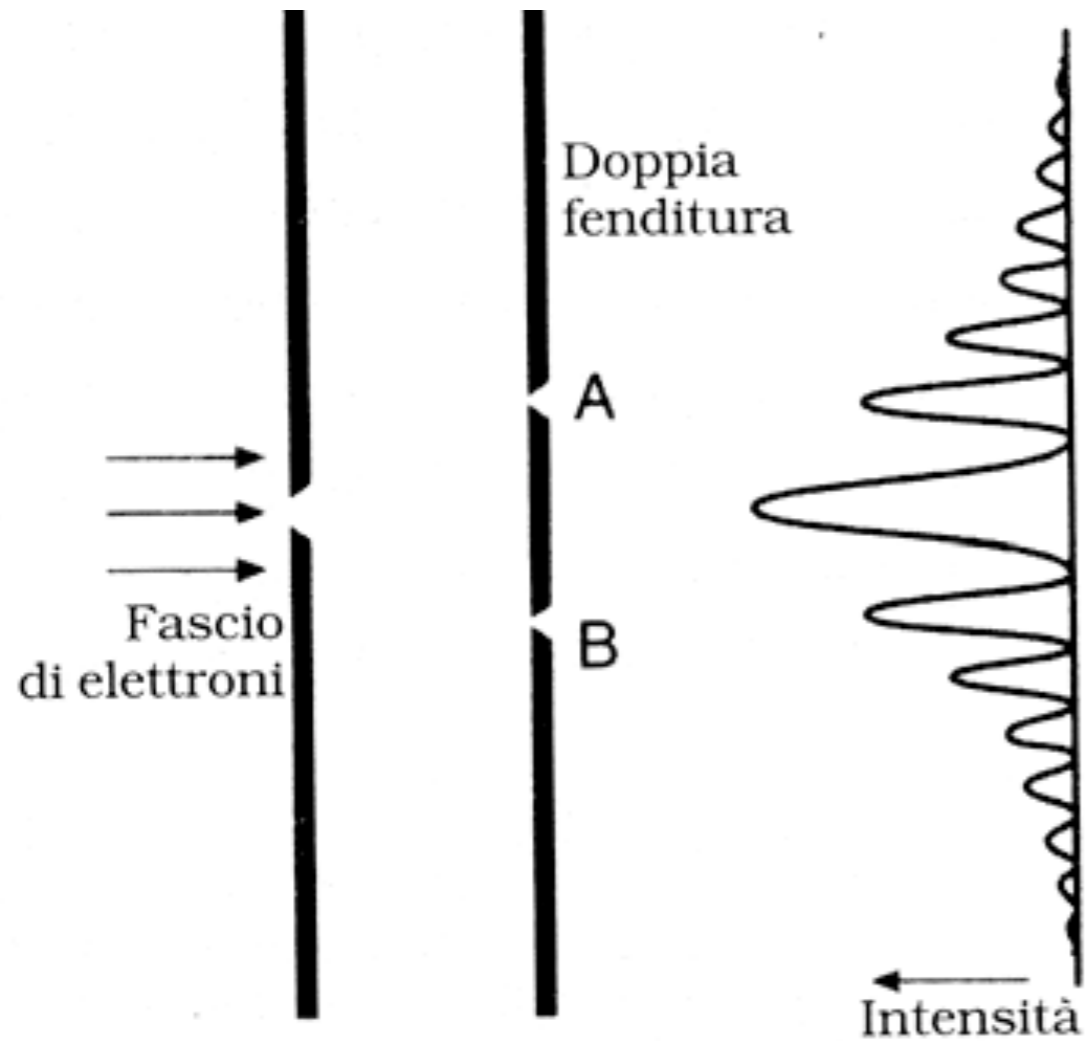
2 quanti

...

Einstein (1905)

Onde \longleftrightarrow particelle

Anche le **particelle di materia** hanno una doppia natura



Le forze

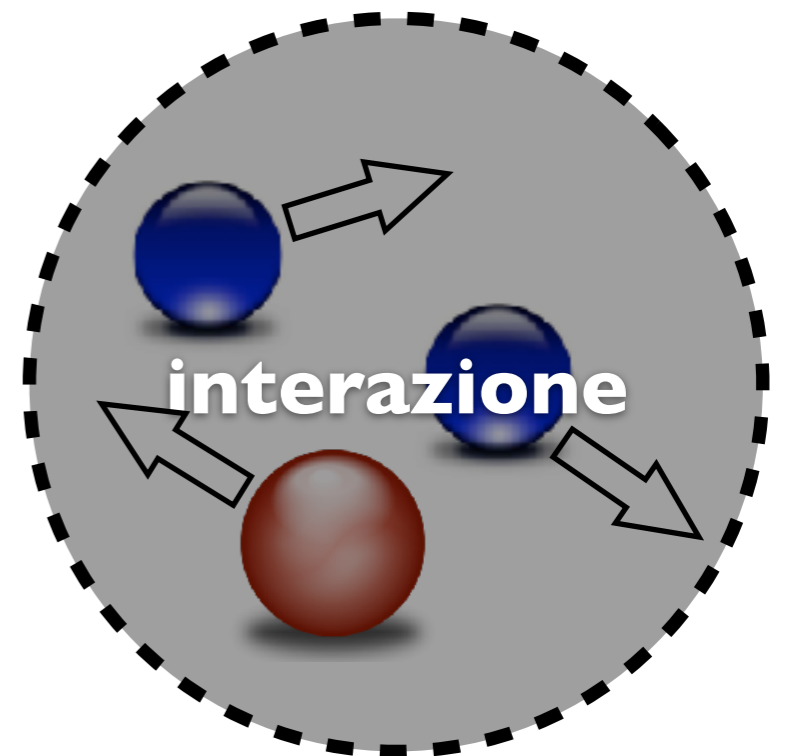
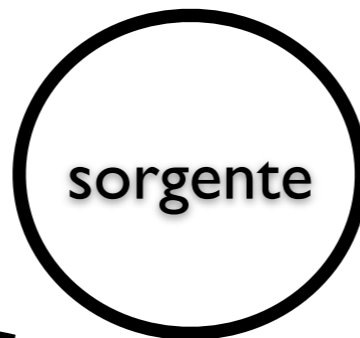
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Forza e' cio' che si scambiano corpi **interagenti**

- se non esistessero interazioni, ogni corpo manterrebbe **energia** e **impulso** inalterate nel tempo

diffusione
(scattering)

stato legato
(bound state)



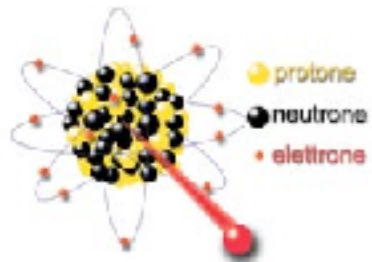
I tipi di forza

fondamentali

**Elettro-
magnetica**



Nucleare forte



Radiazione
Beta

Nucleare debole

Gravitazionale



derivate

elastica

attrito/viscosità

**tensione
superficiale**

“pressione”

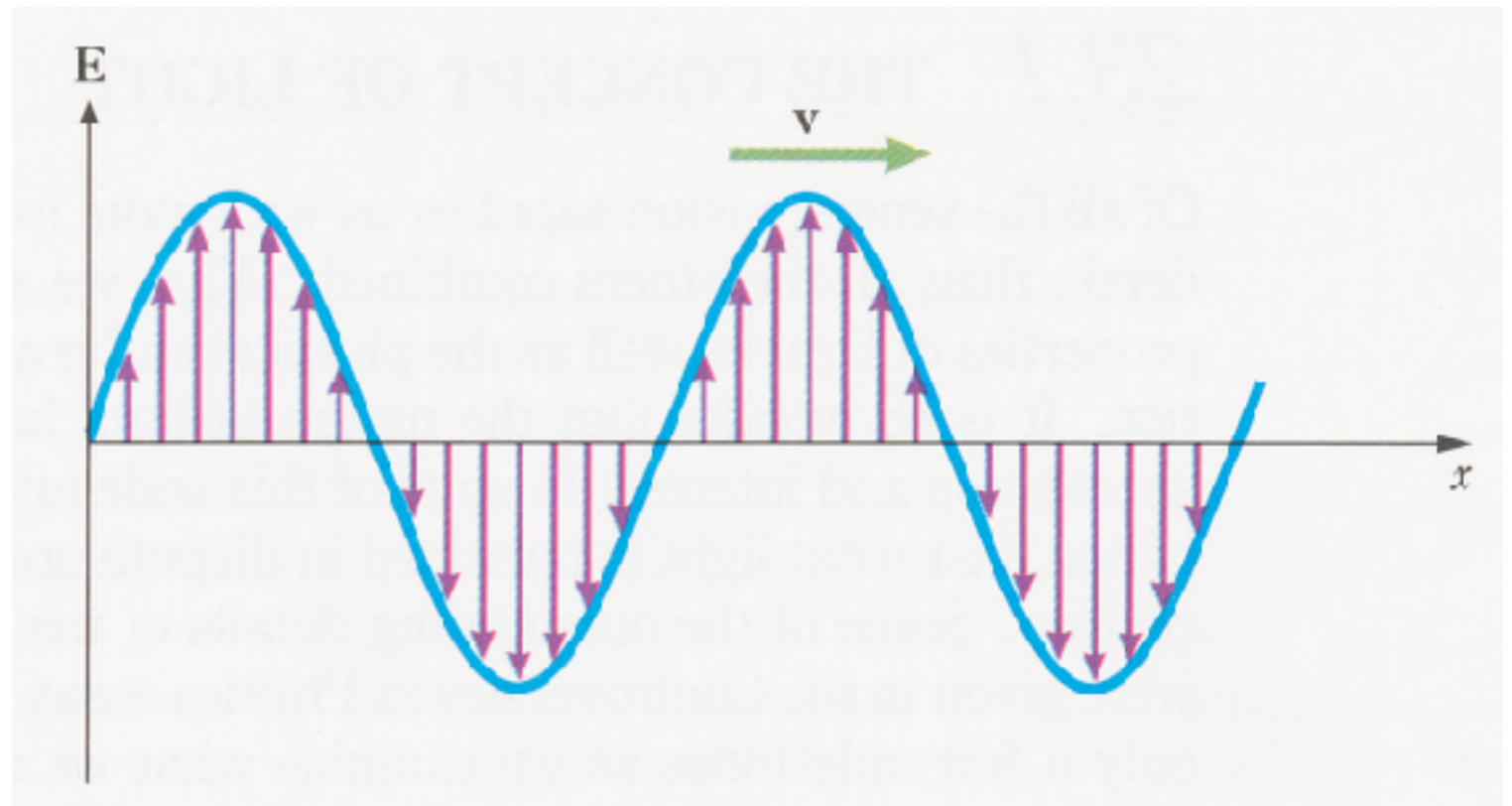
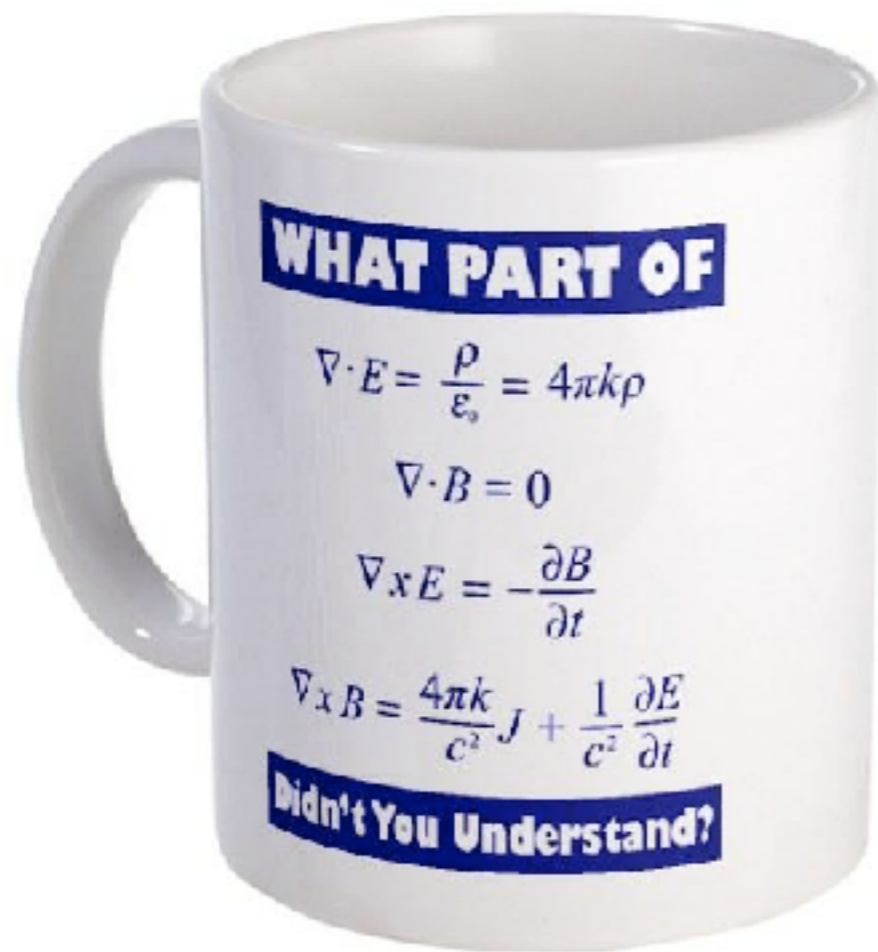
molecolari

(...)

Campi di forze

In analogia al campo EM, si descrivono le altre forze fondamentali in termino di **campi**

- Soddisfano **equazioni differenziali**, che ne descrivono l'evoluzione nel tempo e nello spazio
- i campi oscillano nel vuoto come **onde**, con velocità minore o uguale a c !



Dalla forza alla sua particella mediatrice

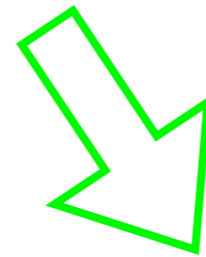
Forza



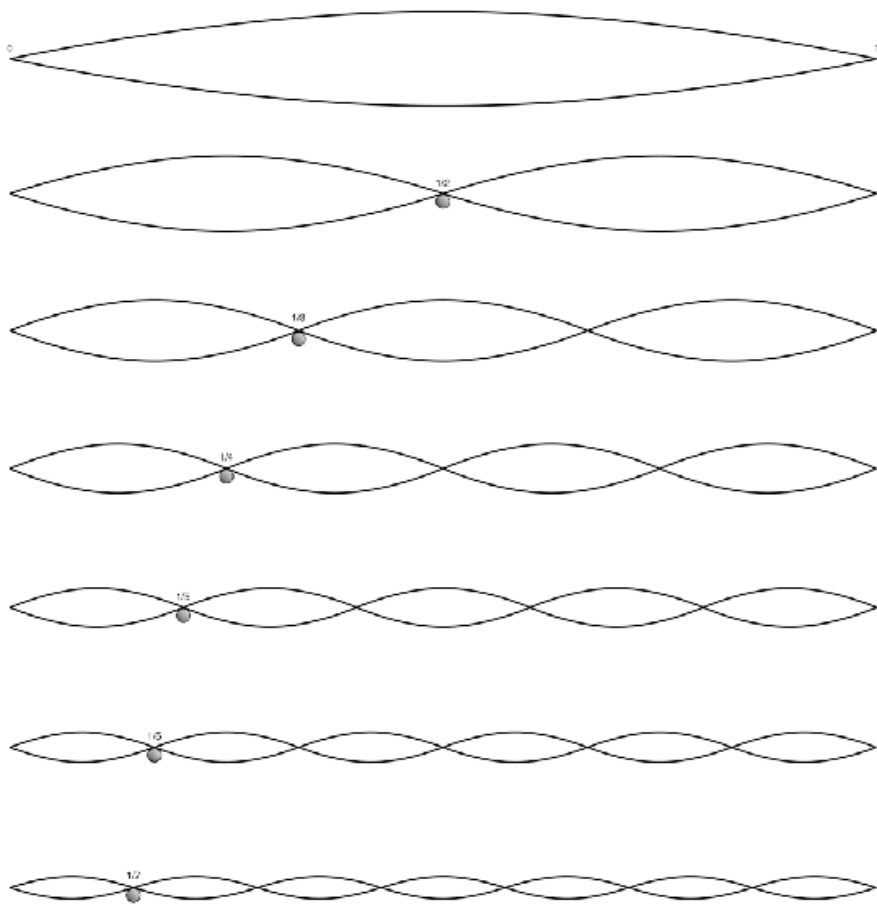
Campo



Oscillazione



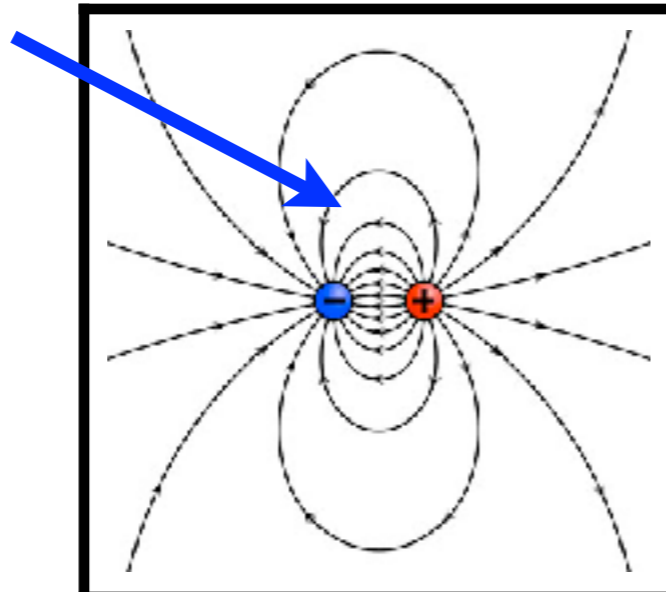
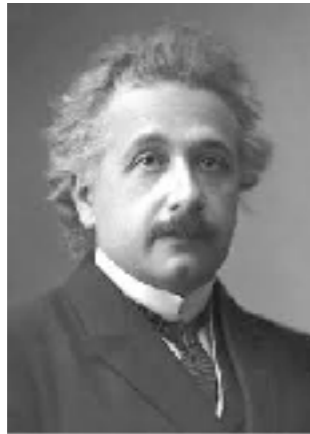
**Particella
mediatrice
(bosone, $S=1$)**



I mediatori delle forze

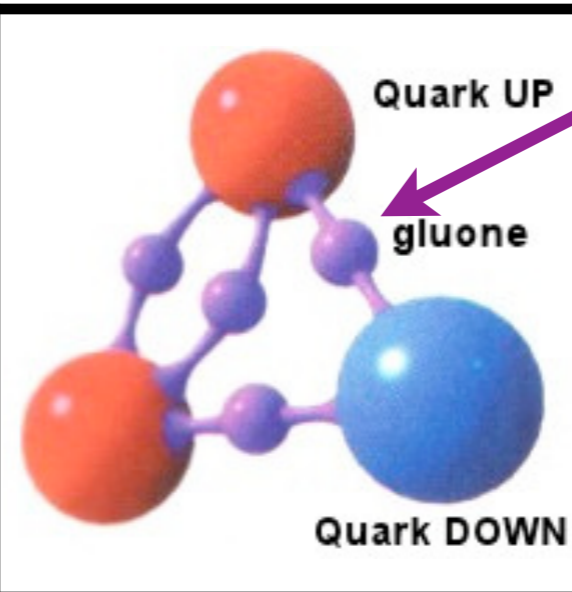
1905:

Einstein unifica forza elettrica e magnetica: **(fotone)**



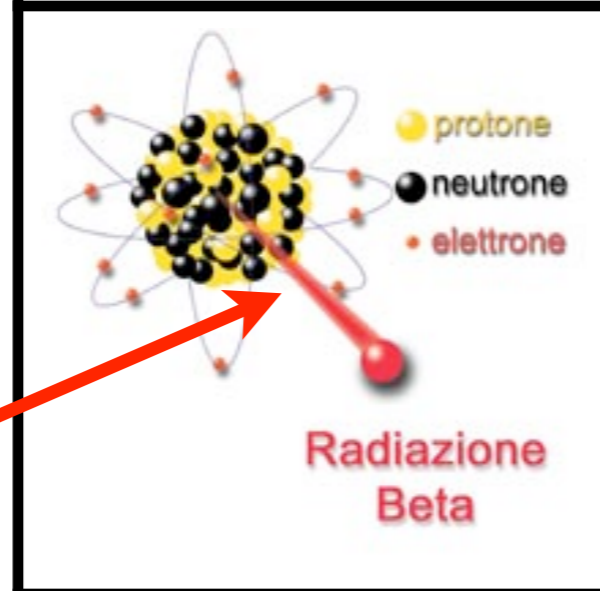
1978:

scoperto il mediatore della forza che tiene uniti i quark **(gluone)**



1984:

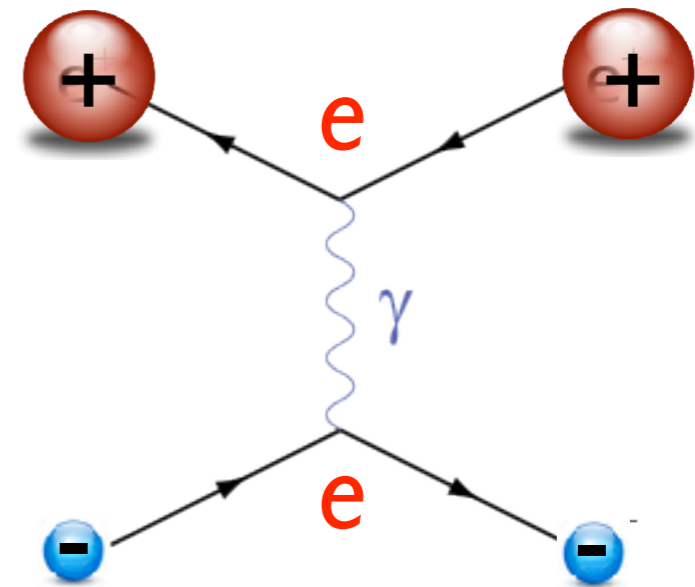
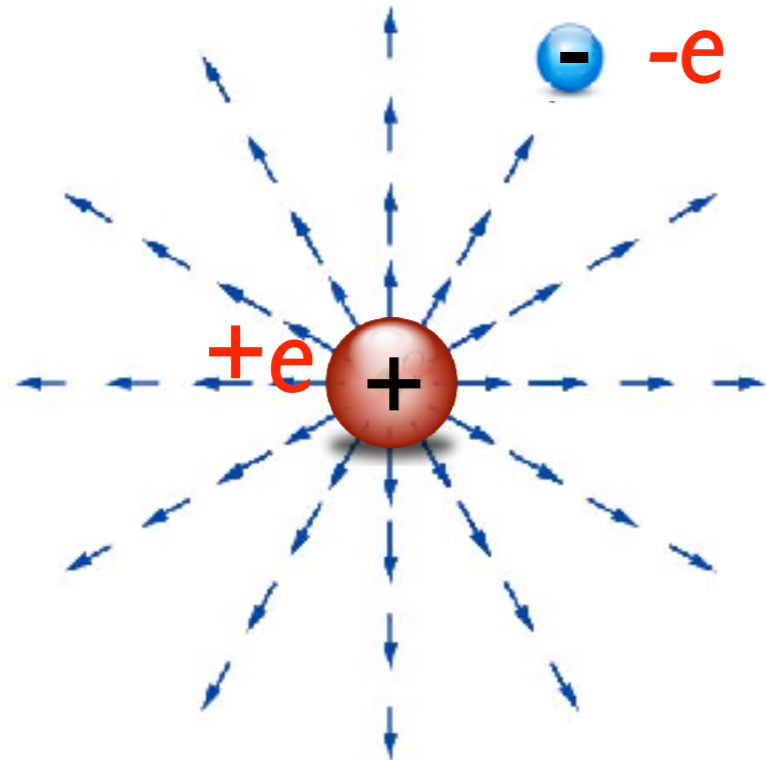
Rubbia scopre le particelle che veicolano la forza nucleare debole **(W,Z)**



gravitone
(non ancora scoperto)



Forze come scambio di mediatori



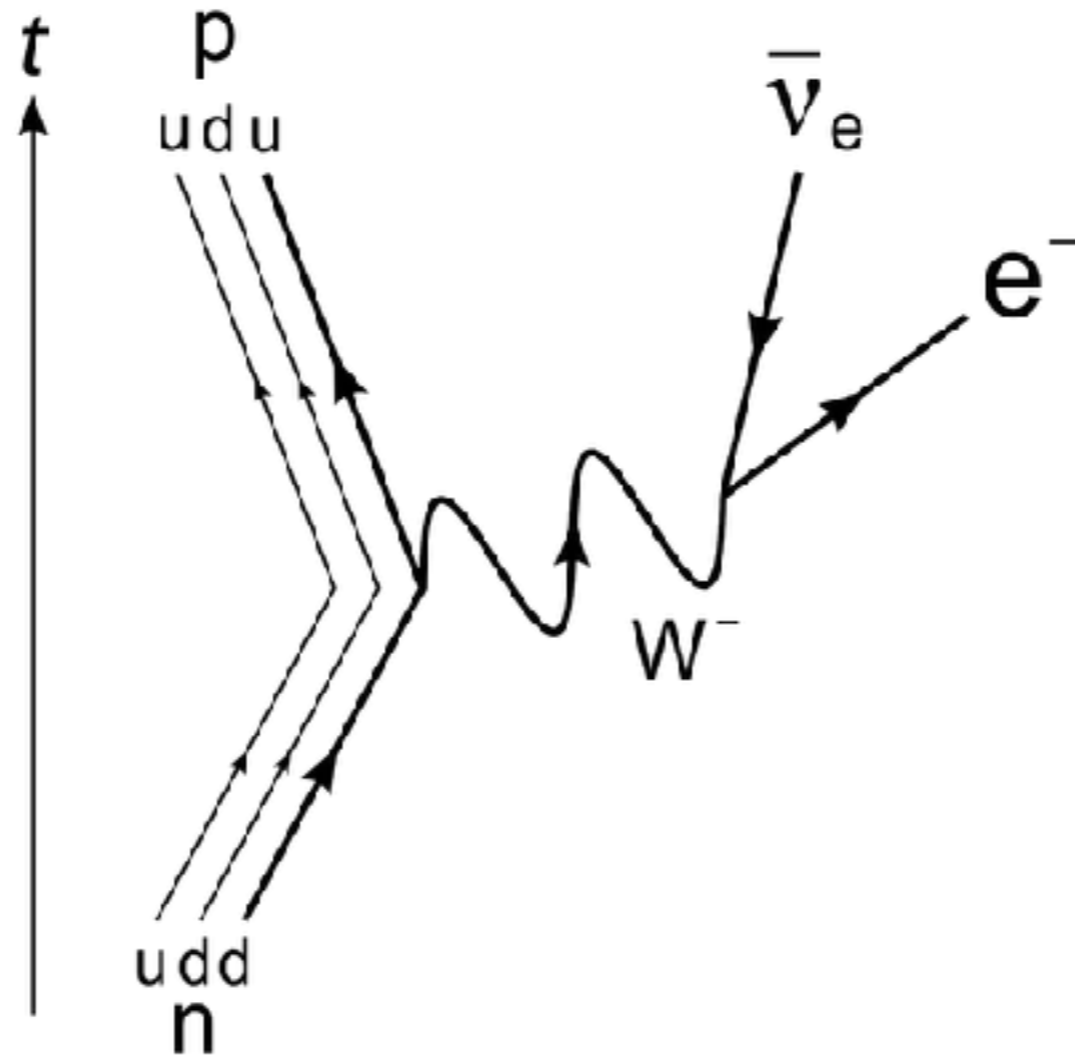
(Diagramma di Feynman)

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi} \frac{e^2}{r}$$



Scambio di un fotone
“virtuale”

Forze come scambio di mediatori

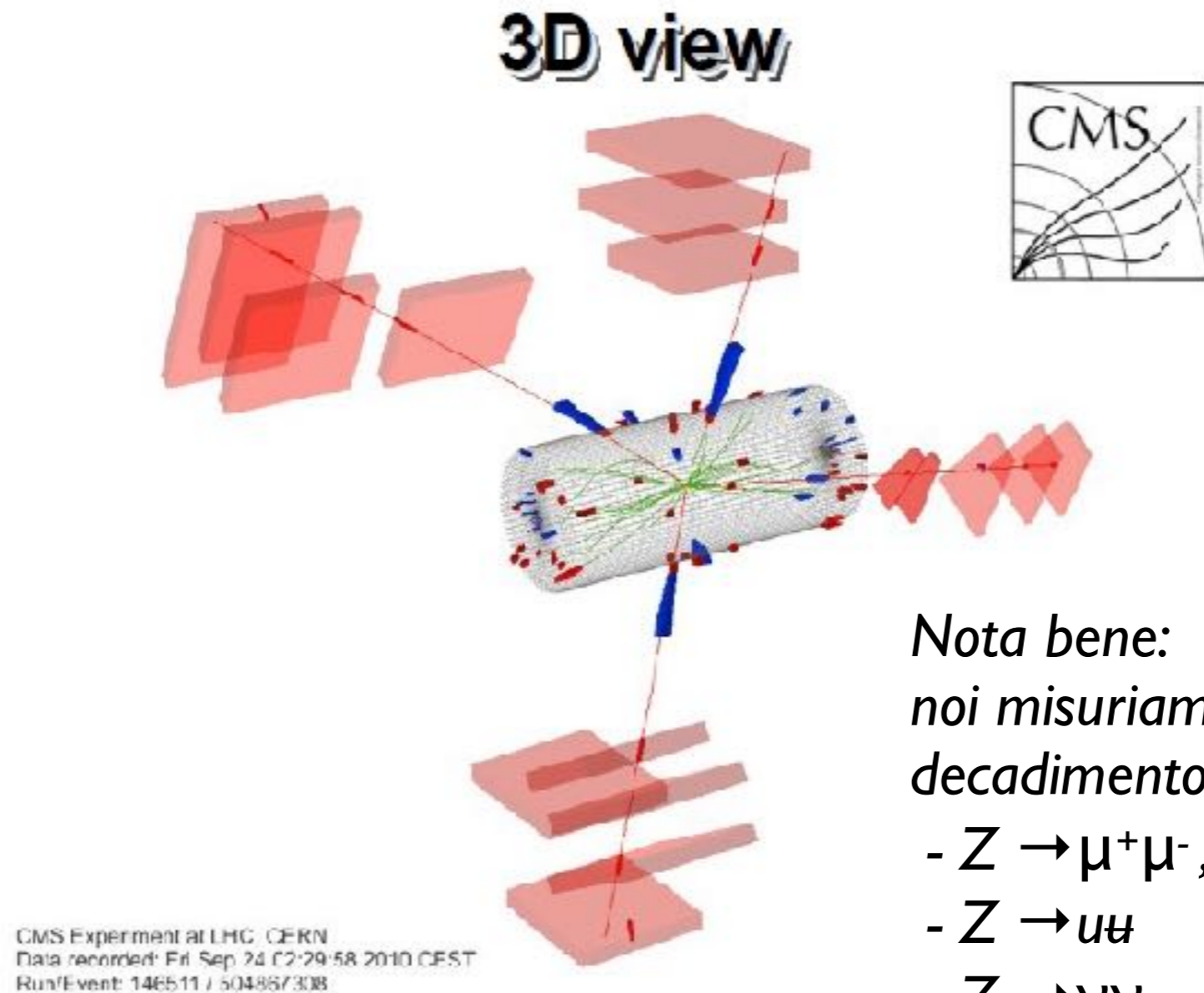


Decadimento **debole**
dei nuclei



Scambio di un W
“**virtuale**”

Forze come scambio di mediatori



*Nota bene:
noi misuriamo i prodotti di
decadimento. Ad esempio:*

- $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-, e^+ e^-$
- $Z \rightarrow u \bar{u}$
- $Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$

Ai collider, le energie di collisione superano le soglie per creare particelle pesanti \Rightarrow

Produzione di W/Z
“**reali**”

Mettendo tutto insieme

Come abbiamo visto, negli ultimi cento anni, **esperimento** e **teoria** sono progrediti di pari passo verso una comprensione profonda delle **interazioni fondamentali**

Un'unica teoria?



Materia

e (1887),
 μ (1937),
 ν_e (1956),
 c (1974),
...,
 ν_τ (2000)



Meccanica Quantistica (1901)
Relatività (1905)
Simmetrie ('60)



Forze

γ (1905),
gluone (1978)
 W^\pm/Z^0 (1984),

Il Modello Standard

A partire dagli anni '60, si formalizza un **modello** per unificare le tre forze, spiegando al contempo la loro **grande differenza**:

Interazioni deboli: a corto raggio!



W e Z hanno massa

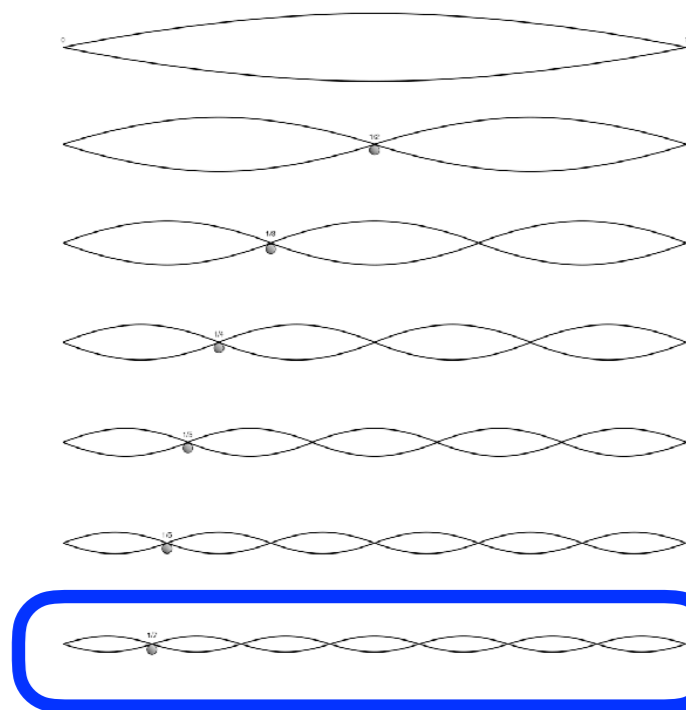
Possibile **postulando** l'esistenza di una nuova particella di spin-0 (quindi, un bosone):

il **bosone di Higgs**.

Il bosone di Higgs é il quanto del **campo di Higgs**.

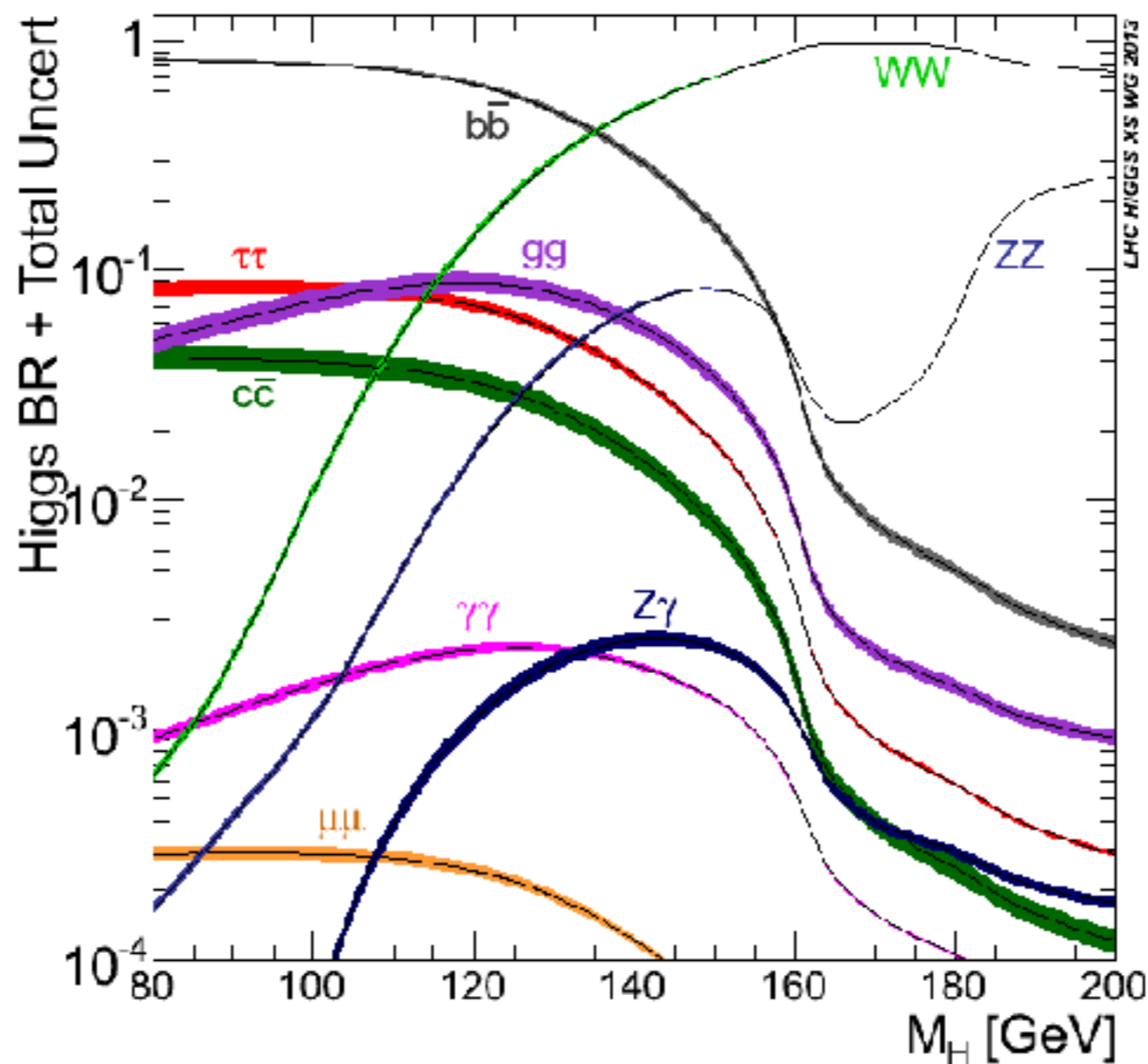
Per poter dare massa ai bosoni W e Z, il campo di Higgs nel vuoto deve essere in uno stato di **oscillazione**

(*condensato di Bose-Einstein*)



Energia del vuoto = \sum quanti

Decadimenti del bosone di Higgs



Può decadere in moltissimi modi



Preferenza per particelle “pesanti”

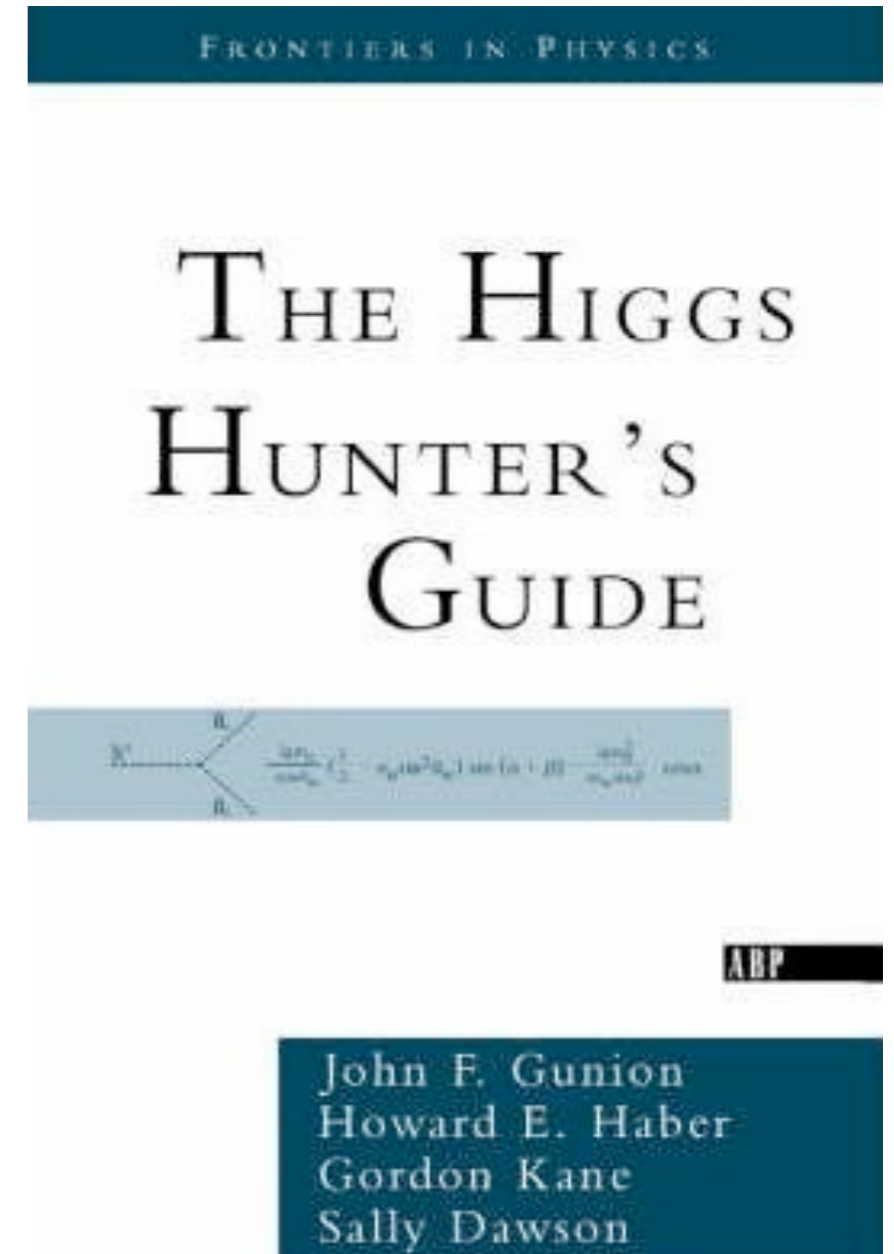
Higgs Hunting

Il modello *non* può predire la *massa* del bosone di Higgs, che resta da determinare sperimentalmente!

Per *trent'anni*, generazioni di esperimenti hanno ricercato questa *ipotetica* particella.

Nel 1994 il CERN approva la costruzione di un nuovo acceleratore (**LHC**) che avrebbe dovuto mettere fine alla questione sull'esistenza del bosone...

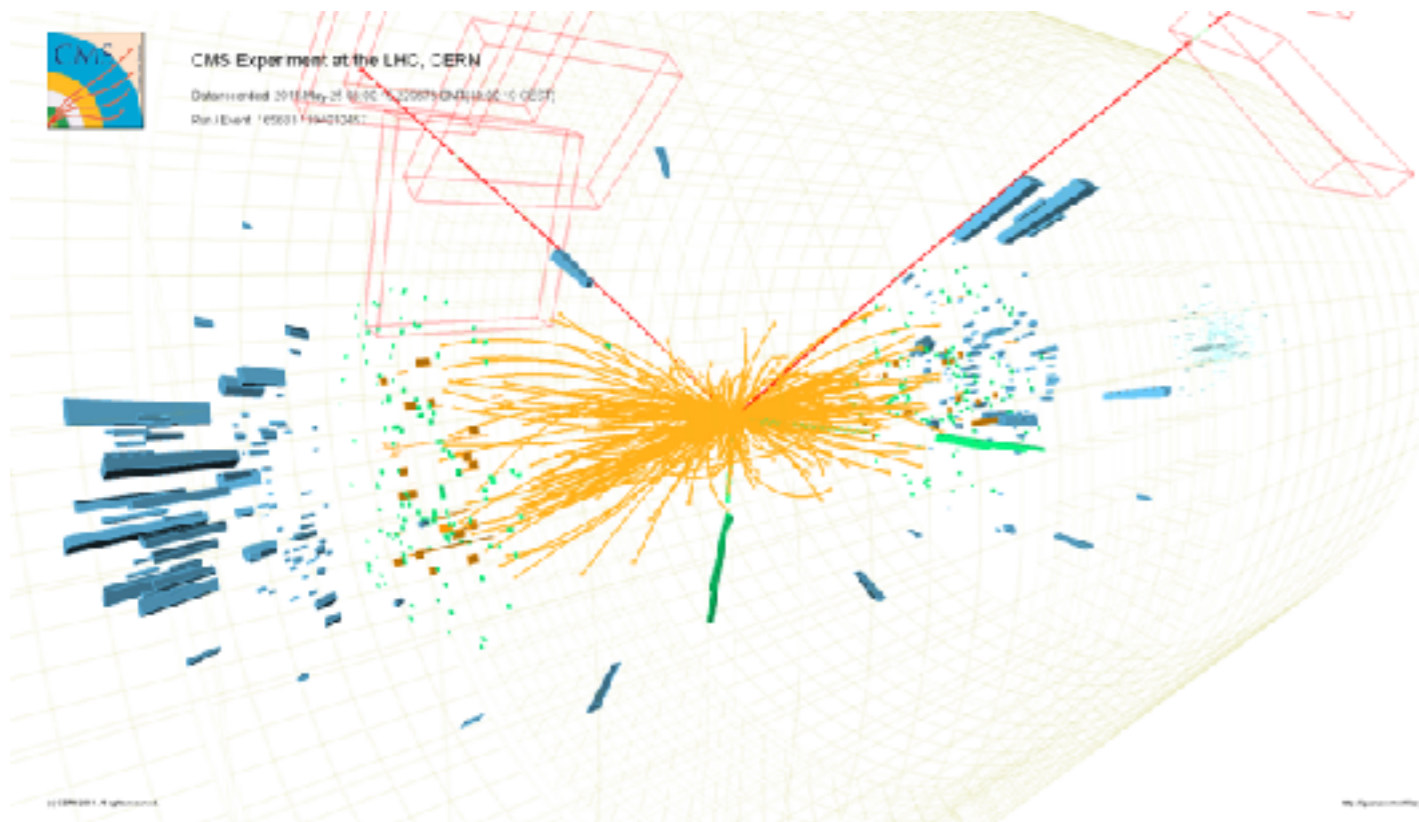
Dopo quasi vent'anni da allora...



Una caccia durata 40 anni finisce



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+\mu^- e^+e^-$$



The Review of Particle Physics (2017)

H^0

$J = 0$

Mass $m = 125.09 \pm 0.24$ GeV

Ricorda:

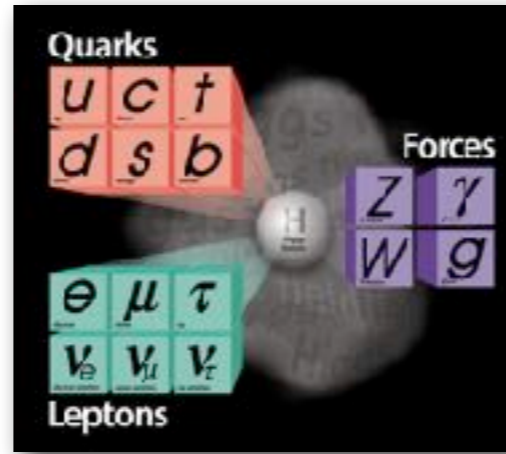
$m_{\text{elettrone}} \approx 0.5$ MeV

$m_{\text{protone}} \approx 1$ GeV

$m_{\text{iodio}} \approx 128$ GeV

Domande aperte

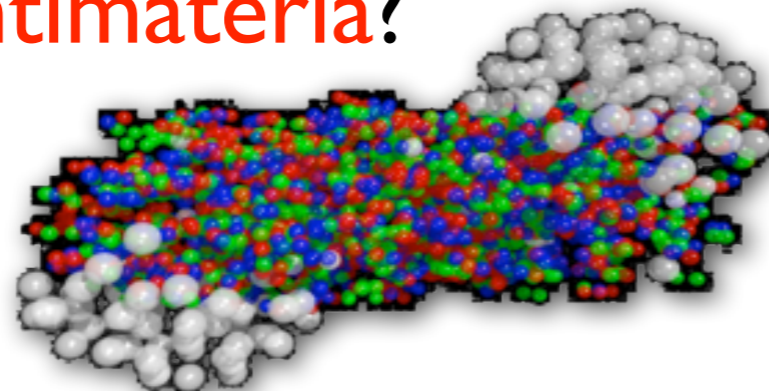
Quali sono le **proprietà**
del bosone di Higgs?
Perché la sua massa è 125
GeV?



Cosa è la **materia oscura**?
Cosa è la **costante cosmologica**
che accelera l'universo?



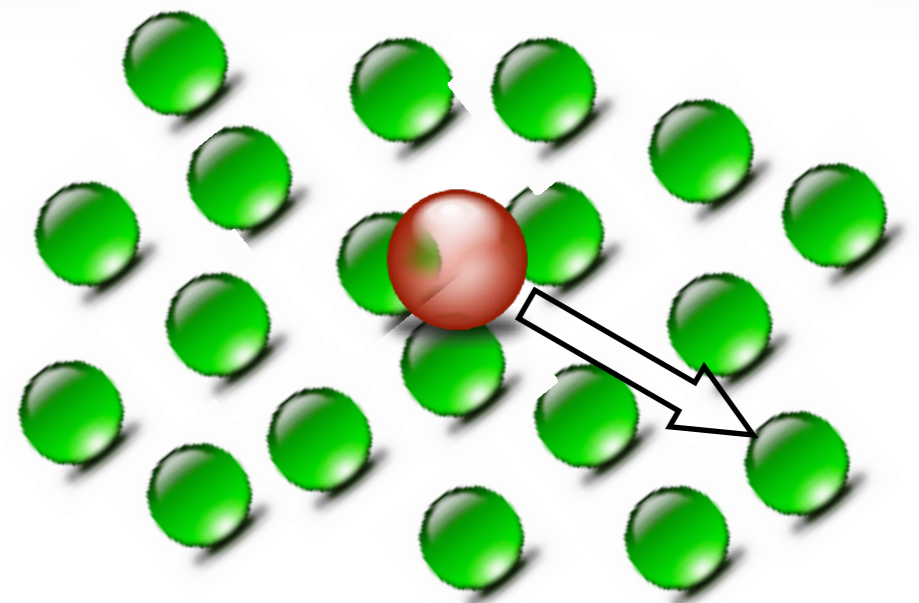
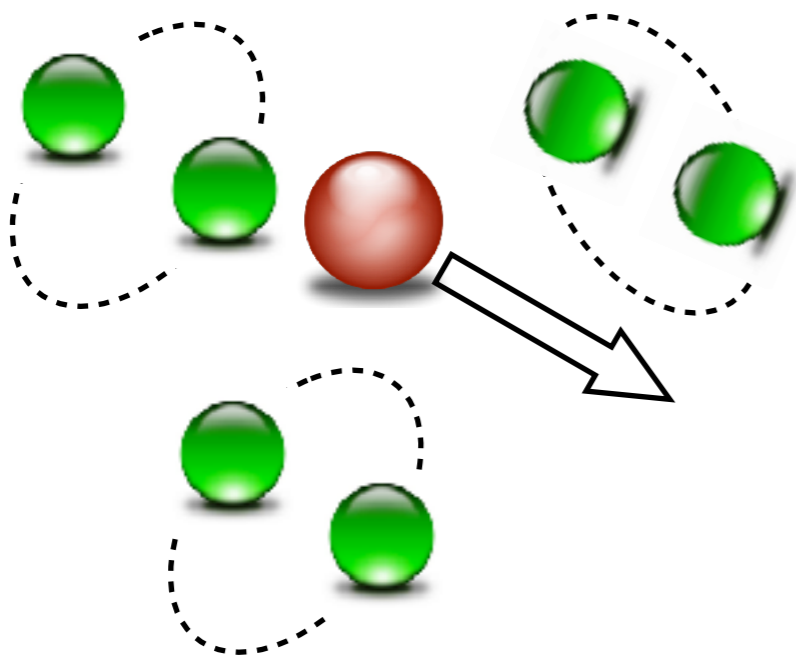
Perché c'è più materia
che **antimateria**?



Esistono altre **forze**?
Viviamo in uno di
molteplici **“universi”**?

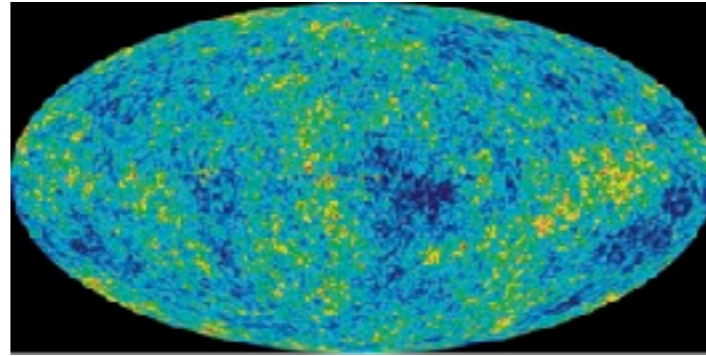
... ma tutto questo é per
un'altra volta!
Per ora, buon divertimento!





Universo

~ miliardi di parsec



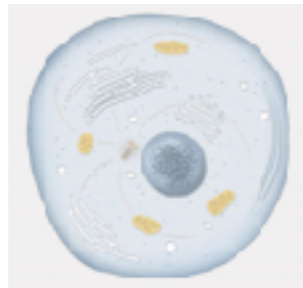
Galassie/Stelle

~100.000 -10 parsec



Terra/Uomo

~10,000 km - 1m

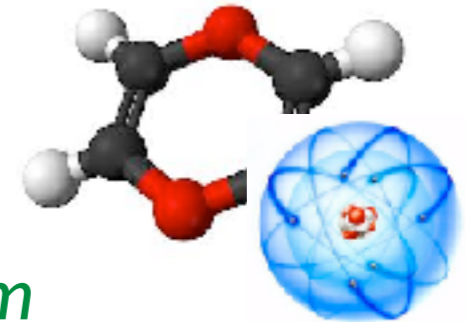


Cellula

~ 0.1m - 1 μm

Molecola/Atomo

~ 100 nm - 0.1 nm



Nucleo *~ 10 - 0.1 fm*

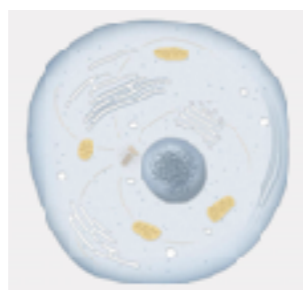
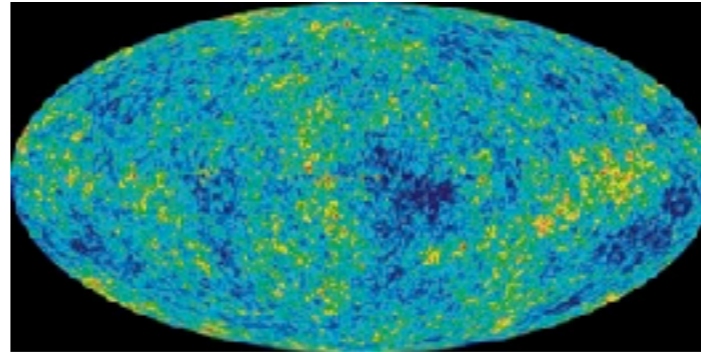


Sub-nucleare

<< 1 fm

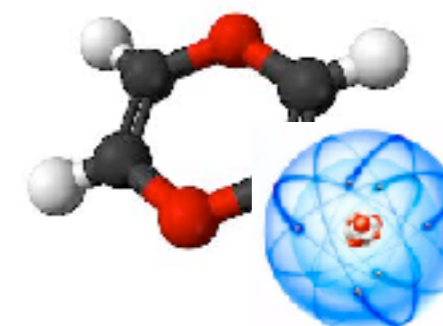
lunghezza

Radio-onde
Micro-onde

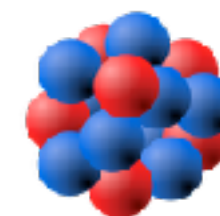


Visibile

Raggi-X



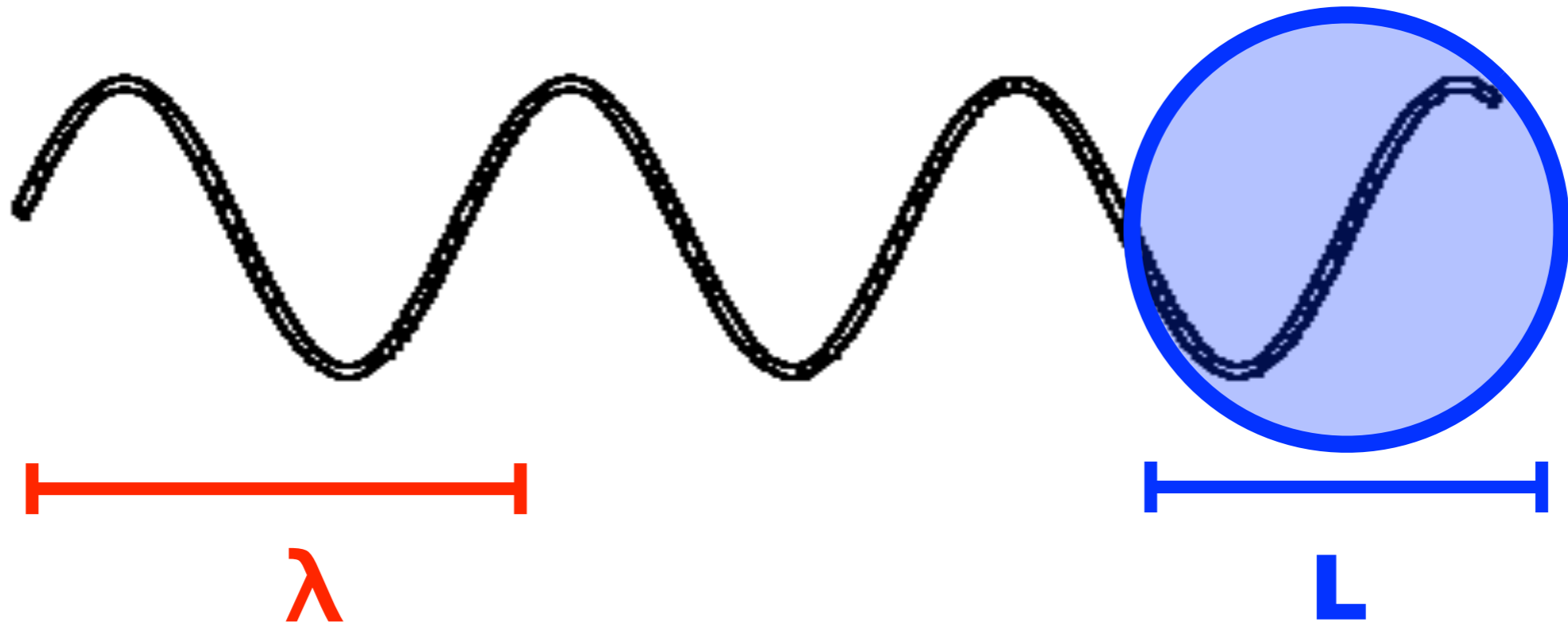
Raggi-γ



Sub-nucleare

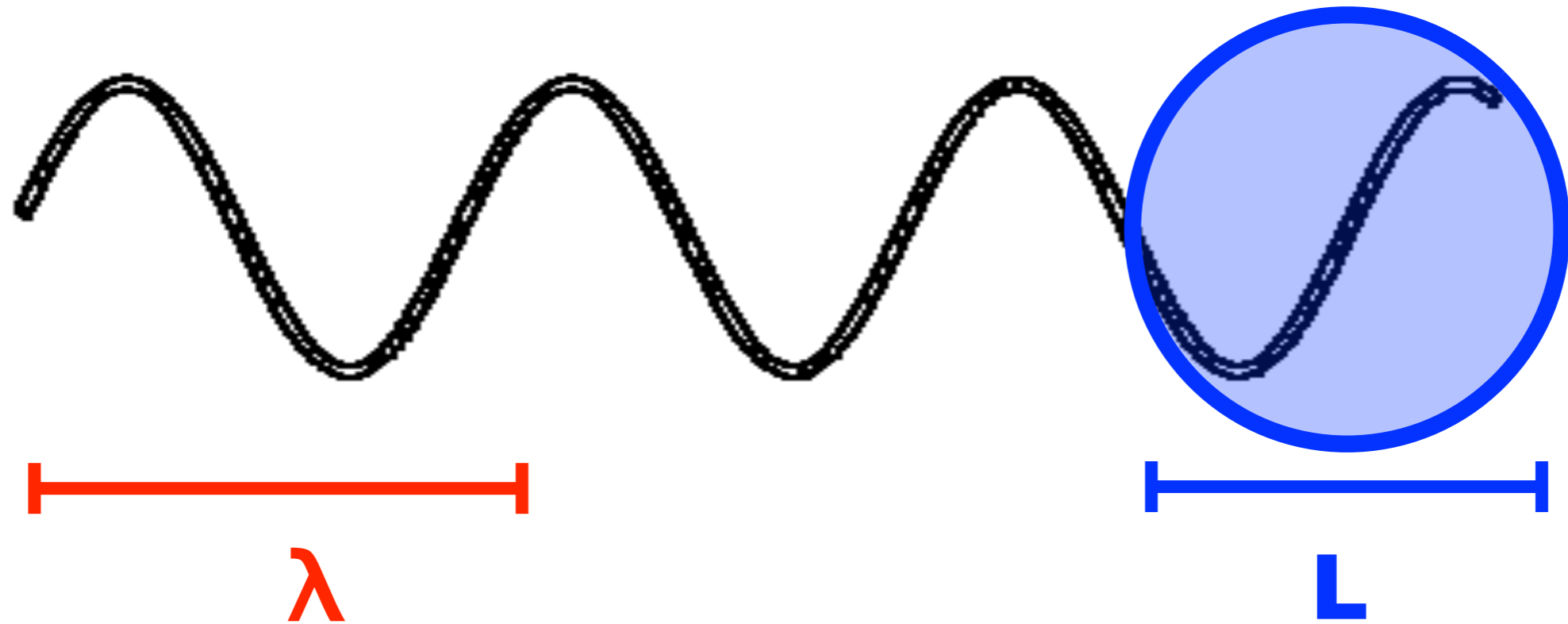
$\ll 1 \text{ fm}$

frequenza



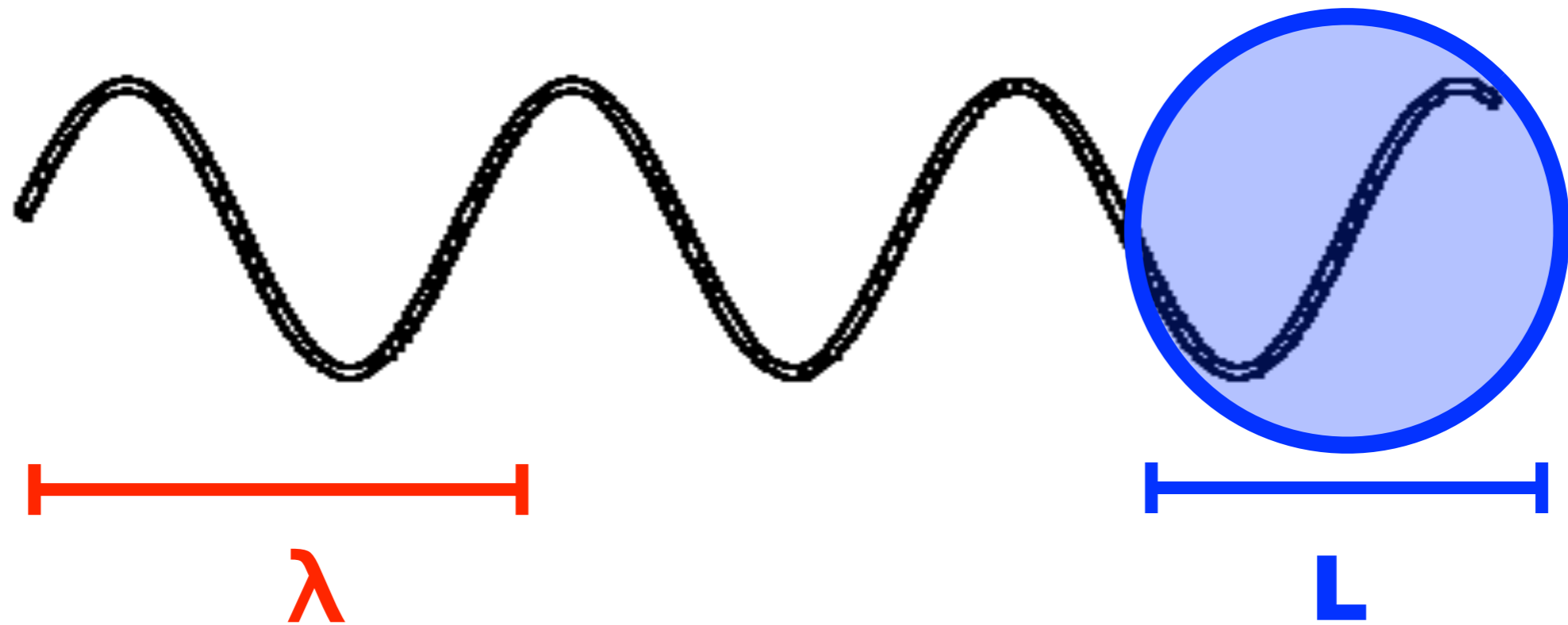
**Per poter “osservare” L
occorre una “sonda” con**

$$\lambda \approx L$$



Un quanto di energia **E ha una
lunghezza d'onda associata**

$$\lambda \propto 1/E$$



Un quanto di energia **E ha una
lunghezza d'onda associata**

$$\lambda \propto 1/E$$

Sondare **L sempre
minori...**

**... richiede energie
sempre maggiori!**

Per studiare la materia sub-nucleare occorre sondarla con particelle molto energetiche



$$\lambda \propto 1/E$$

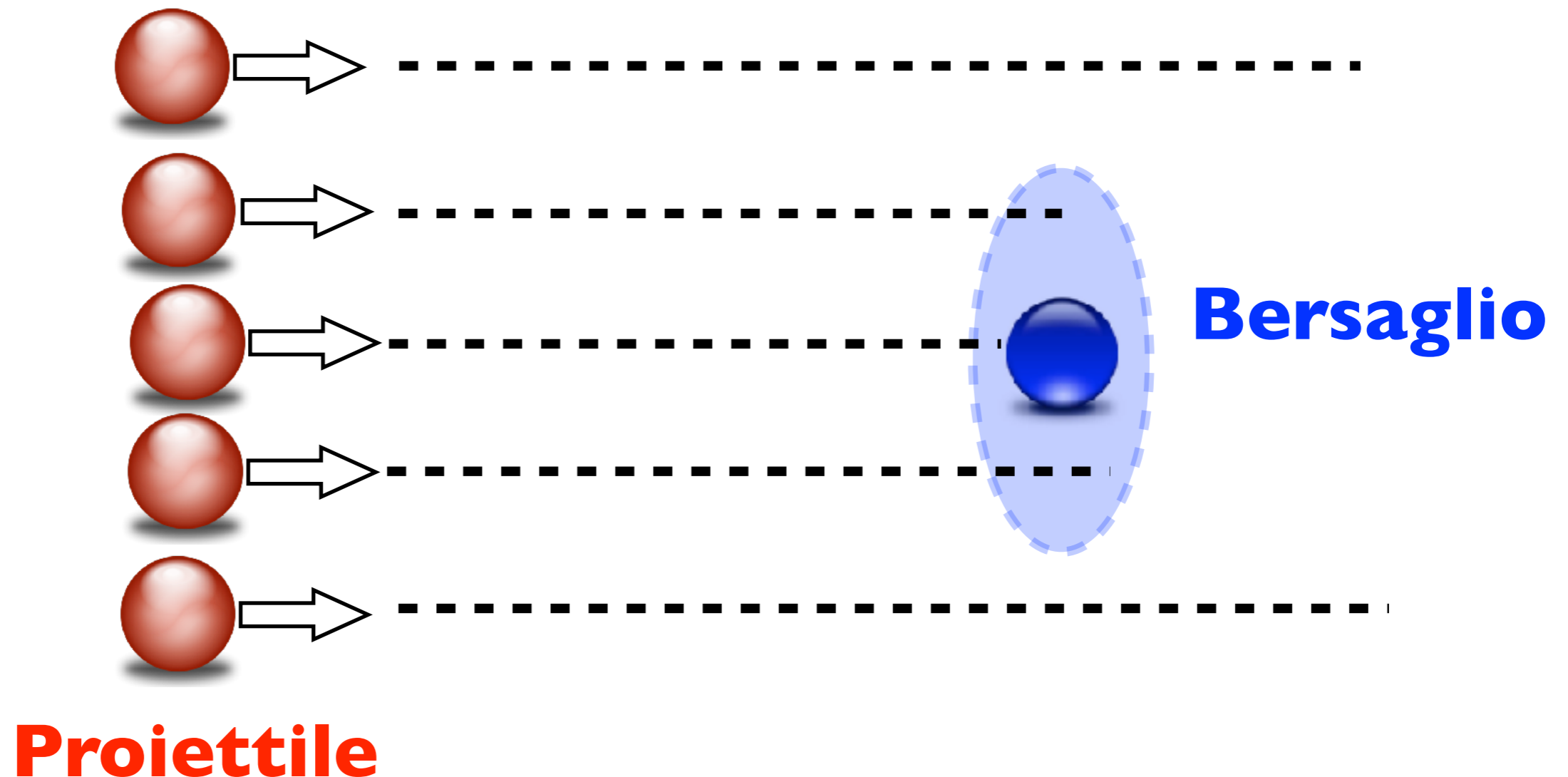
Sub-nucleare

$\ll 1 \text{ fm}$

Sezione d'urto

La probabilita' di interazione tra due particelle si misura in termini di una **superficie**, detta **sezione d'urto (σ)**

- valori tipici di sezioni d'urto sono 10^{-24} cm² (anche detto "barn")



Il vuoto quantistico



Il **vuoto** “quantistico” e’ un brulichio di particelle “**virtuali**”, cioe’ che possono esistere solo per un istante finito di tempo, per poi sparire nel nulla

Materia e antimateria

- Le particelle di materia esistono in due versioni speculari:
 - **stessa massa e stesso spin,**
 - carica elettrica **opposta.**
- Alla “versione” che compone l’universo che ci circonda e’ stato dato il nome di “materia”, all’altra “antimateria”
 - al Big-Bang, materia e antimateria ugualmente abbondanti
 - dove e’ finita l’antimateria? Non esiste una spiegazione

materia

elettrone

μ^-

neutrino

...



antimateria

positrone

μ^+

antineutrino

...

Bibliografia

- CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys. Lett. B 716 (2012)
- Atlas Collaboration, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B 716 (2012)
- F. Englert and R. Brout, “Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons”, Phys. Lett. 12 (1964)
- P.W. Higgs, “Broken symmetries, massless particles and gauge fields”, Phys. Lett. 12 (1964)
- P.W. Higgs, “Broken symmetries and the masses of gauge boson”, Phys. Lett. 13 (1964)