

# Le particelle elementari

Masterclass Europea

in

*Fisica delle Particelle Elementari*

Students's day – Torino, 23 marzo 2012

# Cosa vuol dire studiare “Fisica delle Particelle Elementari” ?

Vuol dire cercare di rispondere a domande tipo:

Di cosa è fatta la materia che ci circonda?

Quale origine hanno le forze che tengono insieme i componenti della materia?

## Problema:

Quello che ci circonda è estremamente complesso, spesso la sovrapposizione di moltissime cose diverse.

Pensate a questa aula: ci sono moltissime cose che capitano in questo momento e scrivere le leggi fisiche per descriverle è praticamente impossibile.

## Soluzione: riduzionismo

Il **riduzionismo** è il processo fondamentale usato in fisica per la comprensione della realtà:

*Le proprietà dei sistemi complessi si possono interpretare in termini delle proprietà delle parti più semplici che li compongono e delle forze che intervengono a comporli*

## Comportamenti emergenti

Una **proprietà emergente** è una proprietà di qualche totalità complessa che non può essere spiegata nei termini delle proprietà delle sue parti.

“Senatores boni viri, senatus autem mala bestia”

*Comportamenti emergenti* sono spesso invocati in altre discipline tipo le scienze sociali o biologia

## Riduzionismo in altre scienze

In fisica delle particelle il “riduzionismo” è universalmente accettato.

In biologia (come in altre scienze) la situazione è molto meno chiara. Vi e' un dibattito molto intenso per capire se la soluzione a problemi complessi (cancro, schizofrenia, depressione..) sia trovabile attraverso lo studio del genoma (riduzionismo).

## La fisica delle particelle

L'approccio riduzionista in fisica delle particelle ha portato a moltissimi progressi.

Ogni ulteriore livello di "riduzione" porta con se' una grande quantita' di informazioni.

Il passaggio da un livello a quello successivo avviene attraverso lo studio di regolarita' che indicano la presenza di una sotto-struttura

# Sottostrutture

Periodic Table of the Elements

|    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    |    |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 2  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    | 10 |
| 3  | 4  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |    |    | 18 |
| 11 | 12 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | 13  | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |    |
| 19 | 20 | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |    |
| 37 | 38 | 39  | 40  | 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 |    |
| 55 | 56 | *La | 72  | 73  | 74  | 75  | 76  | 77  | 78  | 79  | 80  | 81  | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 |    |
| 87 | 88 | +Ac | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 |    |    |    |    |    |    |

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |

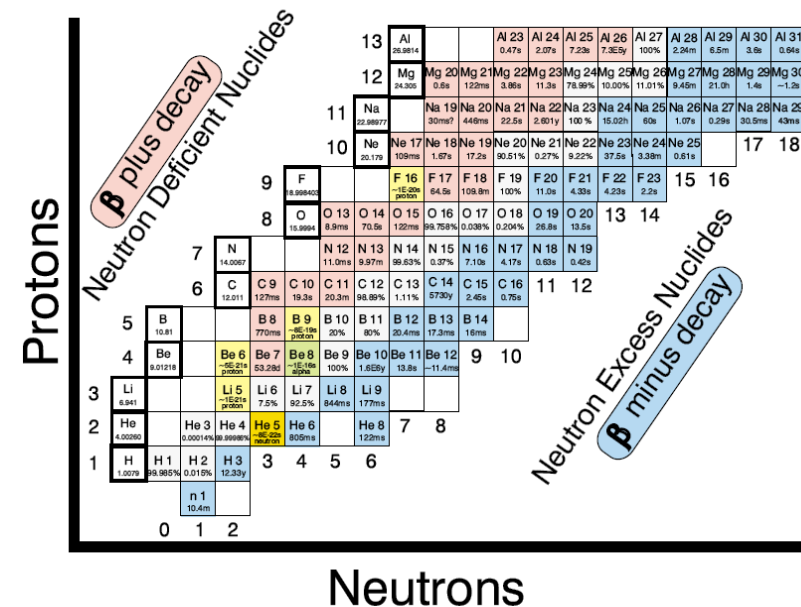
|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 |
| Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm  | Md  | No  | Lr  |

\* Lanthanide Series  
+ Actinide Series

Regolarita' negli atomi

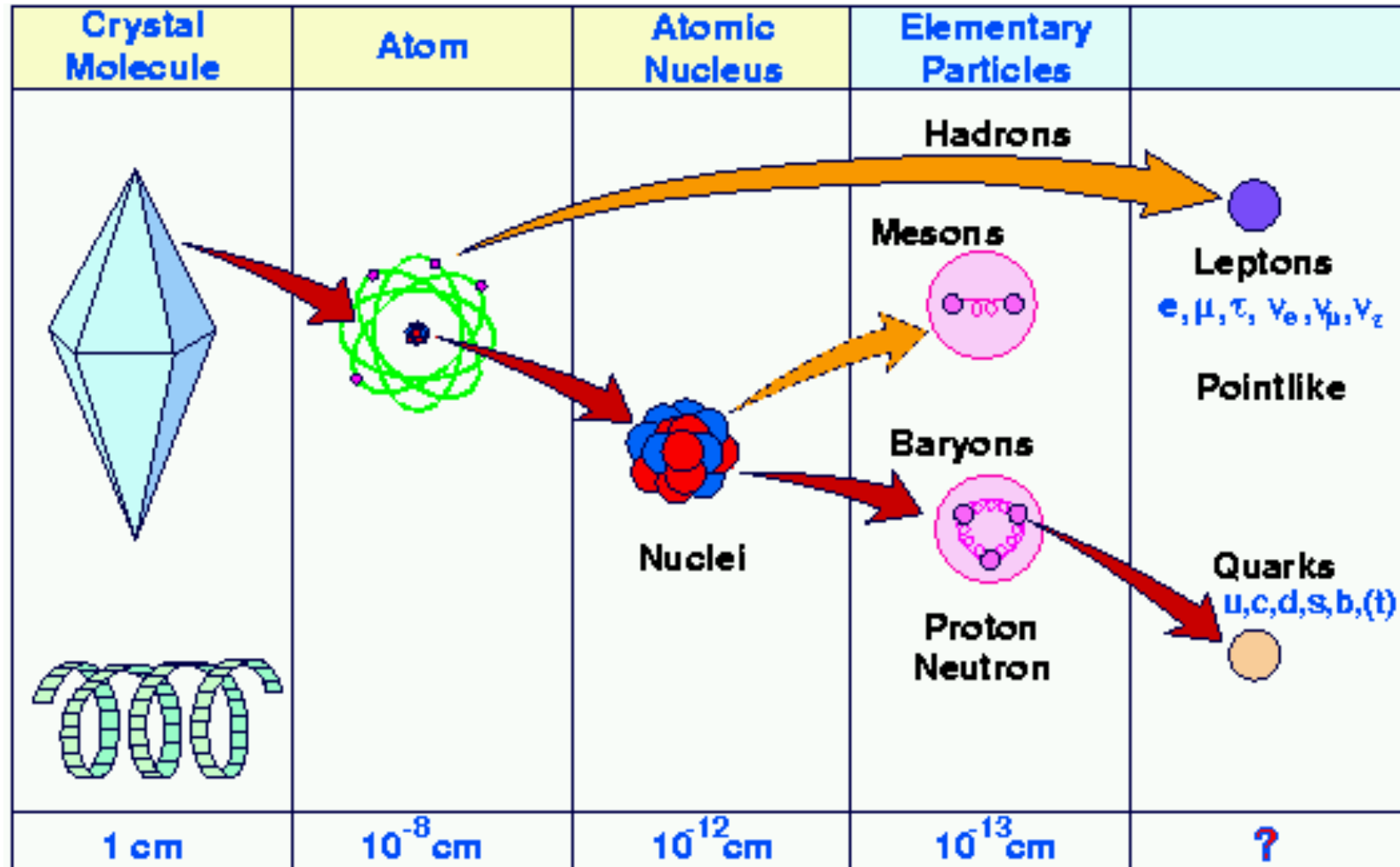
Regolarita' nei nuclei

## CHART OF THE NUCLIDES





# Il cammino degli ultimi 50 anni



## Definizione di particella elementare

Si possono distinguere due tipi di particella:

- Puntiformi, che non si possono più dividere (tipo l'elettrone)
- Composte, che contengono altre particelle (protone, neutrone)

Una particella può sembrare puntiforme ma non esserlo quando la si guarda meglio:  
=> particelle che oggi riteniamo puntiformi possono in realta' essere composte.



# Particelle puntiformi

Ci sono due generi di particelle:

- particelle che sono materia  
(i quark ed i leptoni, 12 in tutto)
- particelle che mediano le forze (i mediatori)  
(ogni tipo di interazione fondamentale agisce "mediante" una particella mediatrice di forza, 13 in tutto)

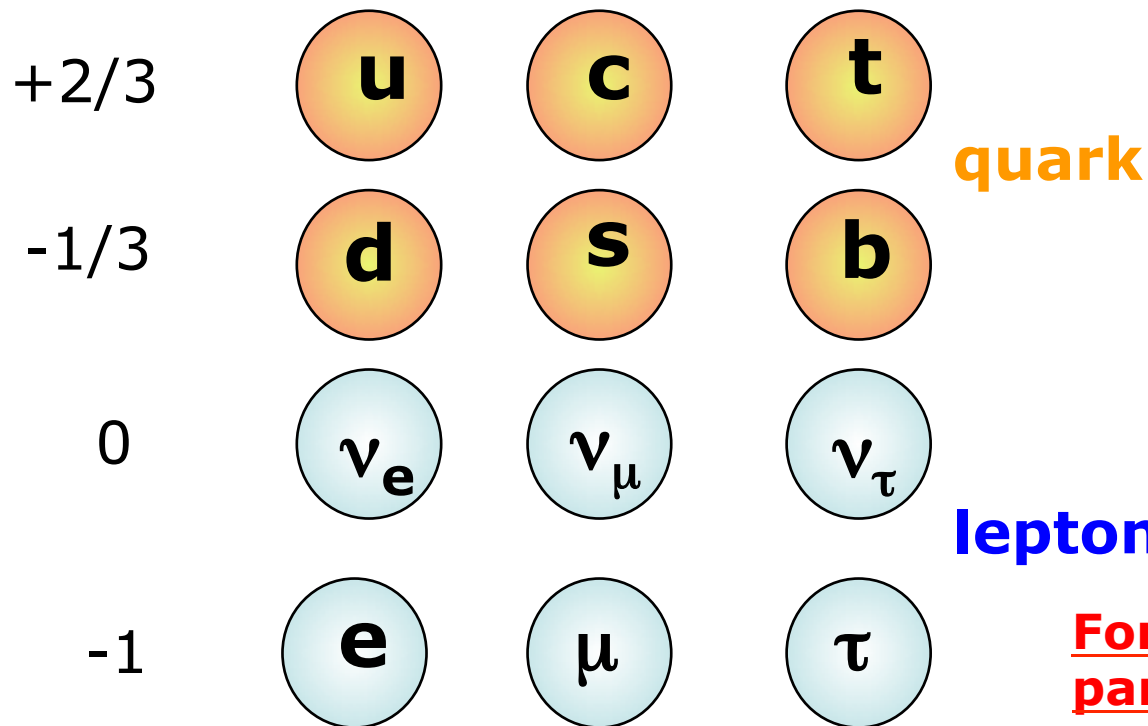
(Ci sono altre possibili particelle elementari, ma le ignoro)

# Le particelle

Carica elettrica

3 generazioni

→  
piu' pesante



I mediatori:

g gluoni (8)

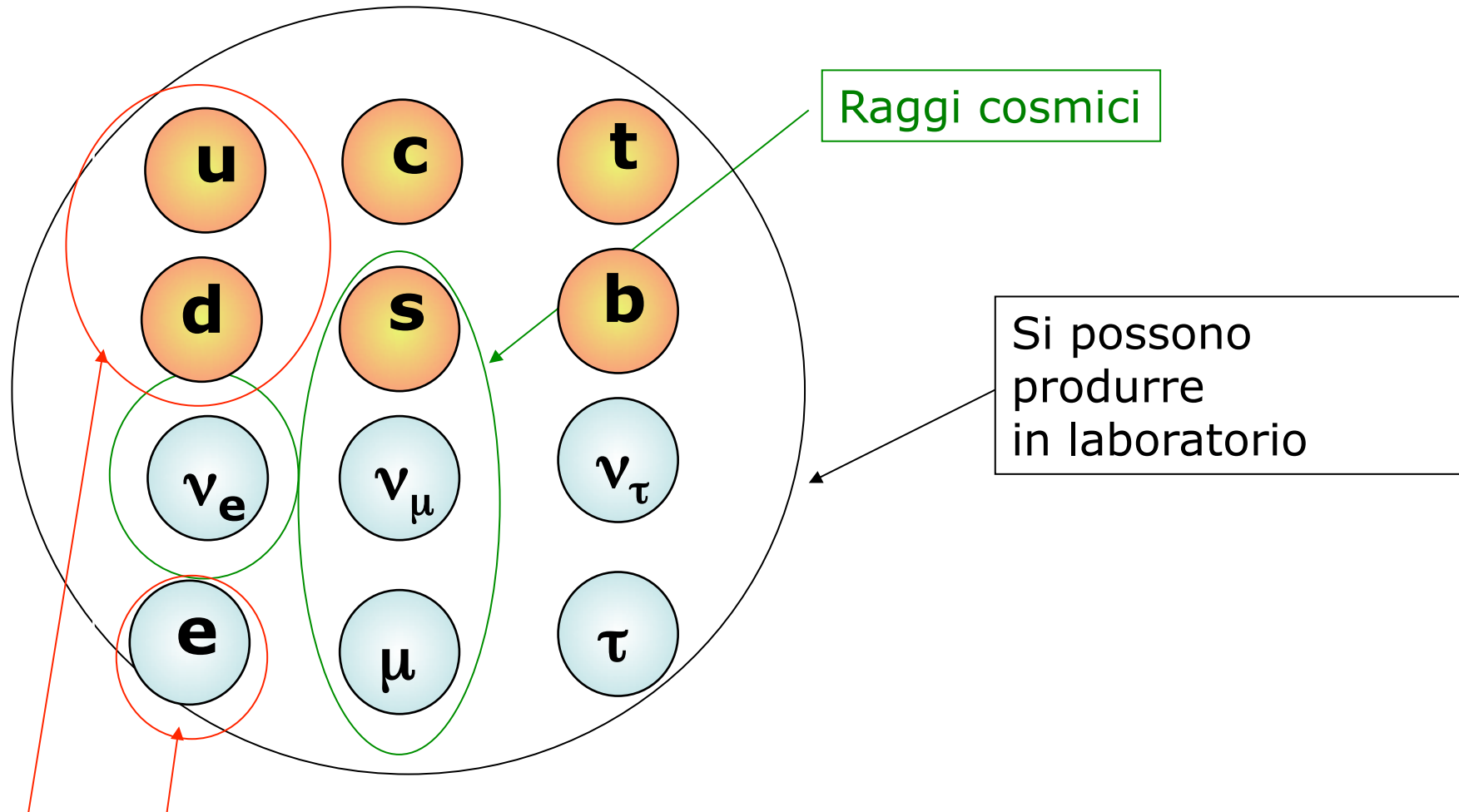
$\gamma$  fotone

$W^+, W^-, Z$  bosoni

gravitone

**Fondamentali: queste particelle sono ritenute senza struttura interna (anche se non e` esclusa)**

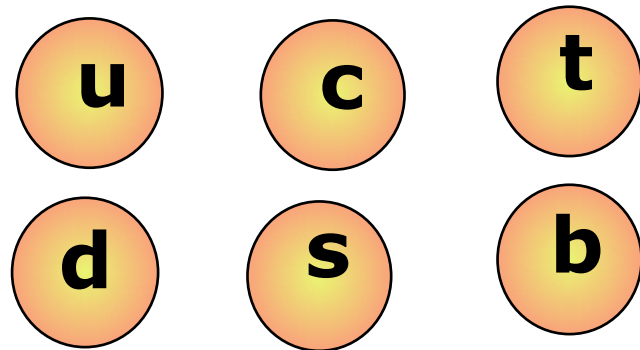
# Particelle: comuni e rare



Tutta la materia stabile dell'universo è fatta di queste 3 particelle

# Lo zoo delle particelle composte: adroni

I quark non sono mai liberi, ma vivono dentro altre particelle, tipo 'atomi' di quark



Barioni (qqq): p,n (cioè noi tutti)

Mesoni (q-anti q): p,K,w,r,y

| Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$                     |             |   |                 |                         |      |
|---|-------------|---|-----------------|-------------------------|------|
| Baryons are fermionic hadrons.<br>There are about 120 types of baryons. |             |   |                 |                         |      |
| Symbol  | Name        | Quark content                             | Electric charge | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Spin |
| <b>p</b>  | proton      | <b>uud</b>                                | 1               | 0.938                   | 1/2  |
| <b><math>\bar{p}</math></b>   | anti-proton | <b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b> | -1              | 0.938                   | 1/2  |
| <b>n</b>  | neutron     | <b>udd</b>                                | 0               | 0.940                   | 1/2  |
| <b><math>\Lambda</math></b>   | lambda      | <b>uds</b>                                | 0               | 1.116                   | 1/2  |
| <b><math>\Omega^-</math></b>  | omega       | <b>sss</b>                                | -1              | 1.672                   | 3/2  |

| Mesons $q\bar{q}$   |        |                              |                 |                         |      |
|---|--------|------------------------------|-----------------|-------------------------|------|
| Mesons are bosonic hadrons.<br>There are about 140 types of mesons. |        |                              |                 |                         |      |
| Symbol  | Name   | Quark content                | Electric charge | Mass GeV/c <sup>2</sup> | Spin |
| <b><math>\pi^+</math></b>   | pion   | <b><math>u\bar{d}</math></b> | +1              | 0.140                   | 0    |
| <b><math>K^-</math></b>   | kaon   | <b><math>s\bar{u}</math></b> | -1              | 0.494                   | 0    |
| <b><math>\rho^+</math></b>  | rho    | <b><math>u\bar{d}</math></b> | +1              | 0.770                   | 1    |
| <b><math>B^0</math></b>   | B-zero | <b><math>d\bar{b}</math></b> | 0               | 5.279                   | 0    |
| <b><math>\eta_c</math></b>  | eta-c  | <b><math>c\bar{c}</math></b> | 0               | 2.980                   | 0    |

# Materia ed anti-materia

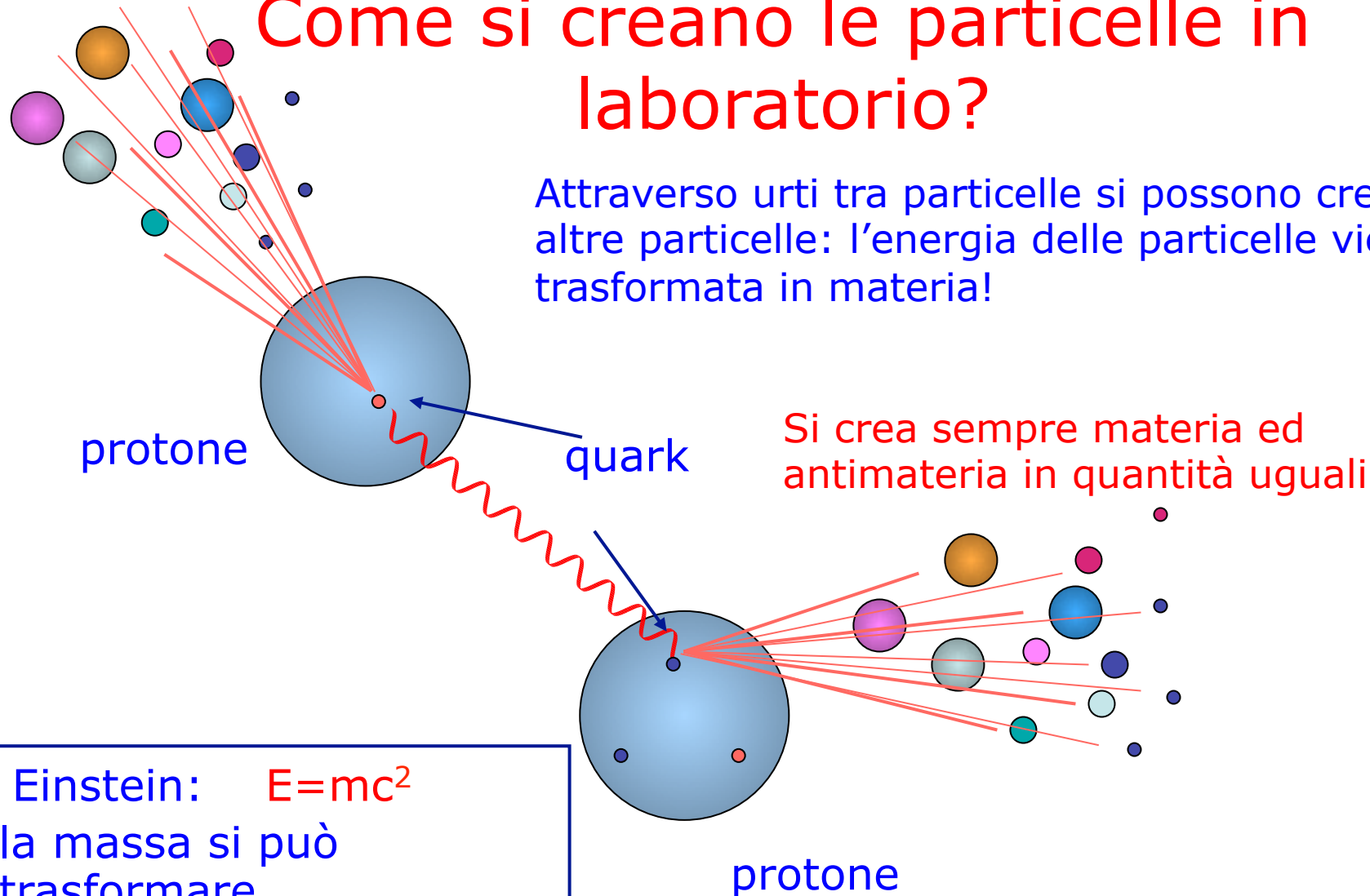
Ogni particella di materia ha la sua anti-particella.

- I mediatori non hanno le antiparticelle: non esistono gli anti-gluoni o gli anti-fotoni!
- Le anti-particelle hanno cariche opposte a quelle delle particelle



# Come si creano le particelle in laboratorio?

Attraverso urti tra particelle si possono creare altre particelle: l'energia delle particelle viene trasformata in materia!



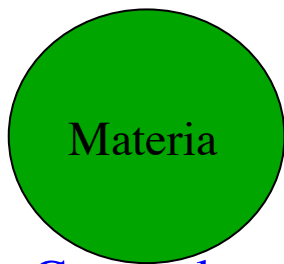
Einstein:  $E=mc^2$   
la massa si può trasformare in energia e viceversa.



# Antimateria...

L'antimateria è un concetto comune in fisica delle particelle, è come la carica negativa rispetto a quella positiva.

**Regola:** se si creano delle particelle in laboratorio si ottiene

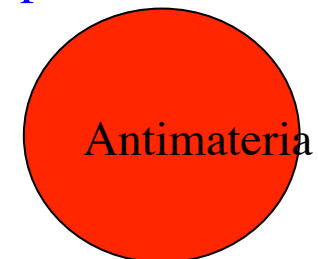


tanta materia quanto anti-materia,  
tante cariche positive tante negative.

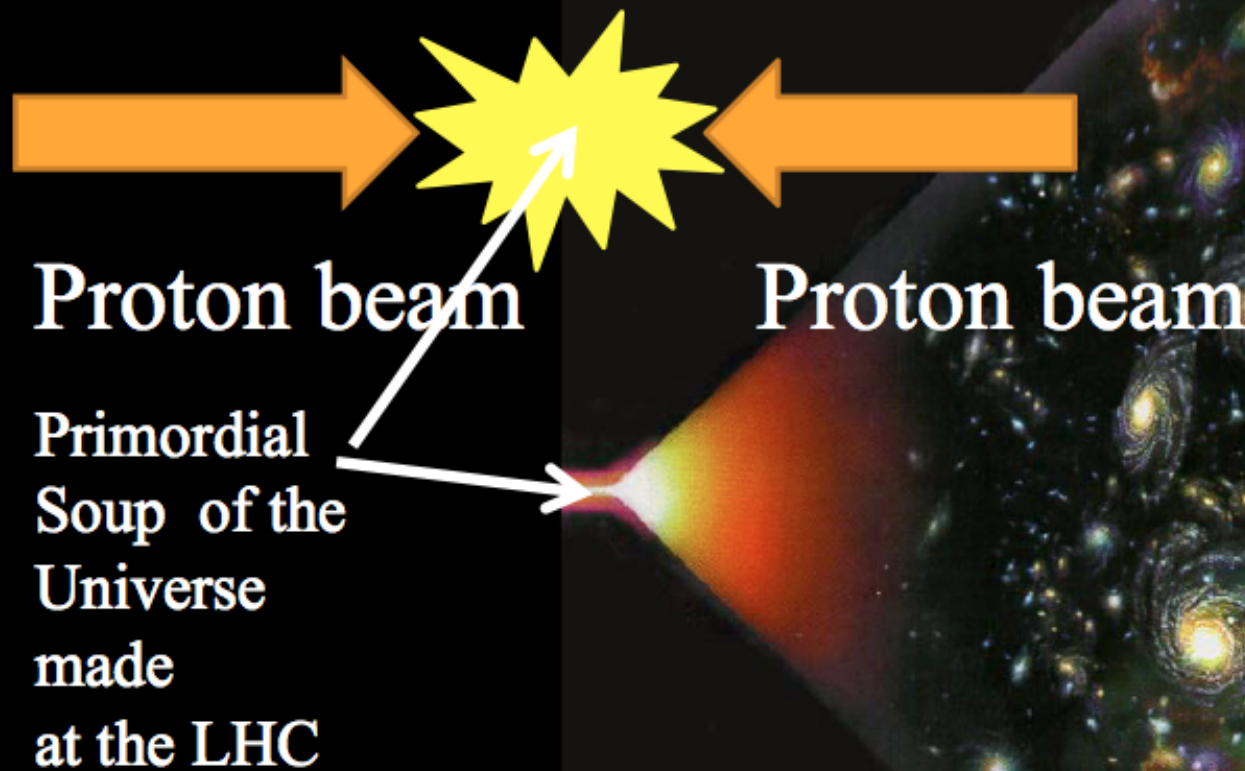
Come elementi, per ora sappiamo fare solo l'anti-idrogeno e l'anti-elio

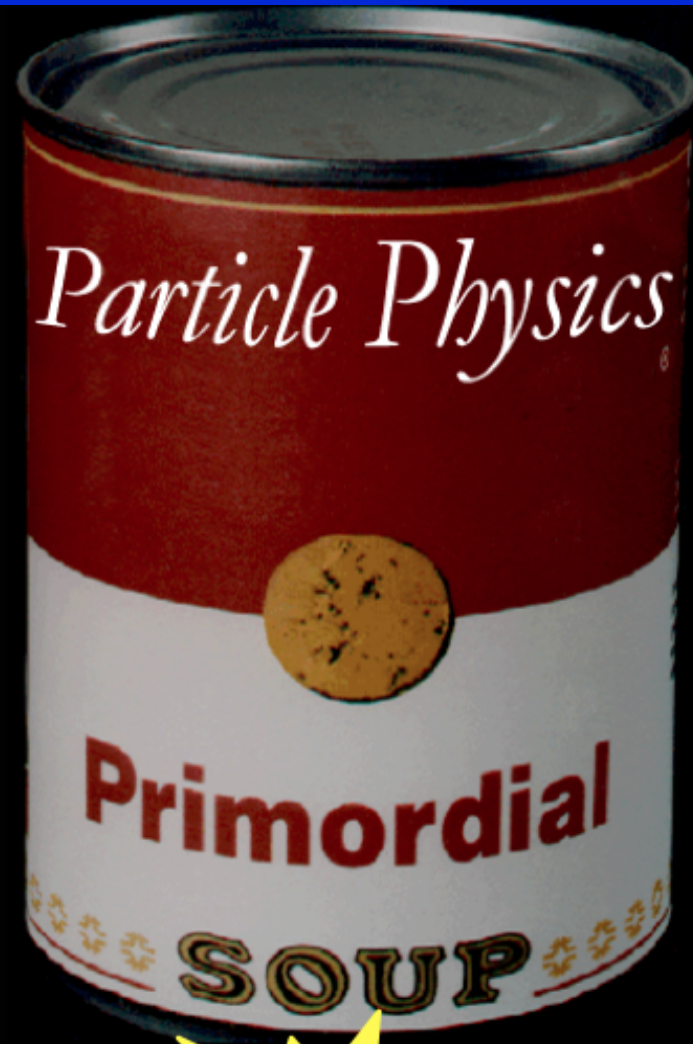
L'antimateria costa tantissimo: \$25 miliardi per un grammo di positroni (anti-elettroni) e \$62,5 trillioni per un grammo di anti-idrogeno...

Quando materia ed antimateria si incontrano, si annichilano (scompaiono in energia!)



# Quarks to the Cosmos





Proton beam

Proton beam

## Un problema ovvio

Durante il big bang, cioè il momento iniziale del nostro universo, si è creata tanta materia quanta anti-materia, tuttavia abbiamo un ovvio problema:

**Dove è finita l'anti-materia?**

**Imbarazzante: non abbiamo idea**

**=> Abbiamo perso il 50% delle particelle..**

**Nota:** materia ed anti-materia non sono esattamente uguali: se lo fossero sarebbero scomparse entrambe nello stesso modo ed adesso ci sarebbe solo energia (questo problema si chiama “CP violation”, è una violazione di simmetria)

## Due problemi connessi

1) I quark ed i leptoni sono ripetuti 3 volte, ci sono 3 generazioni simili (ma non identiche)

Non si sa perché...

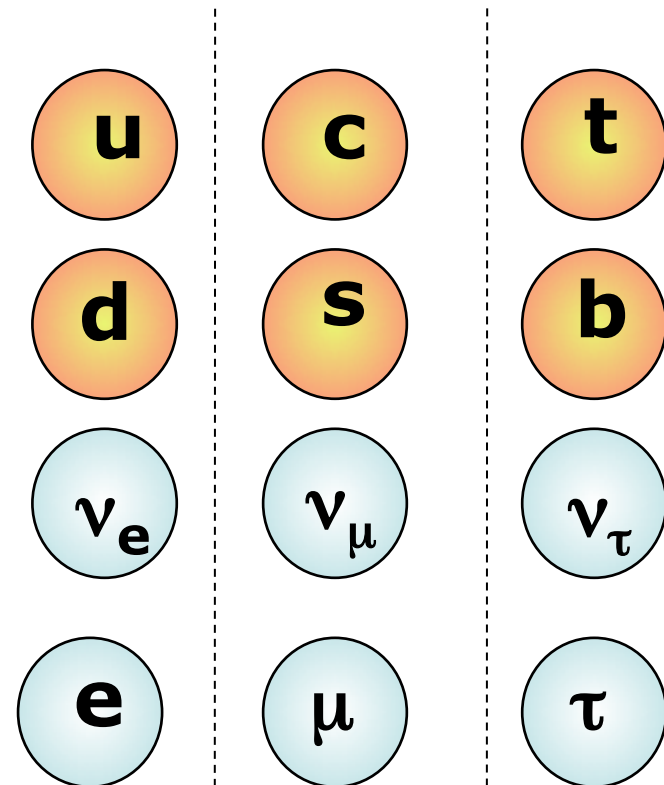
2) Tuttavia: 3 generazioni è il numero minimo per permettere una differenza tra materia ed anti-materia

**Quindi:**

Se ci fossero solo 2 generazioni non saremmo qui poichè tutta la materia ed anti-materia si sarebbero annichilate.

È la nostra esistenza una ragione sufficiente? Probabilmente no...

Dato che non sappiamo perché ci sono 3 generazioni, stiamo cercando la quarta



# Le forze ed i messaggeri

Le forze agiscono perchè sono trasmesse da una particella:

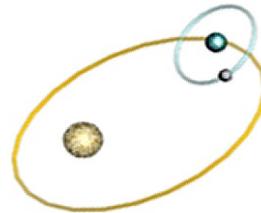
Non esistono forze "a distanza" ma affinchè una forza agisca il suo messaggero deve andare da una particella ad un'altra.

Il messaggero si accoppia ad una certa proprietà delle particelle (energia, carica elettrica, colore, carica debole)



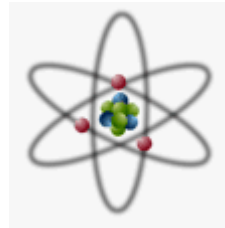
# Le forze

Forza gravitazionale:



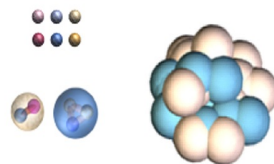
Caduta dei corpi, moto stellare...  
messaggero: **gravitone**  
carica: **Massa/energia**

Forza elettromagnetica:



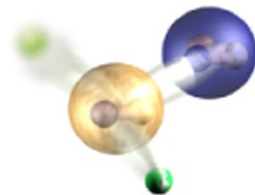
magneti, atomi, chimica...  
messaggero: **fotone**  
carica: **elettrica (1 tipo)**

Forza forte:



tiene uniti i protoni, i neutroni ed il  
nucleo anche se di carica uguale  
messaggero: **gluone**  
carica: **colore (3 tipi)**

Forza debole:

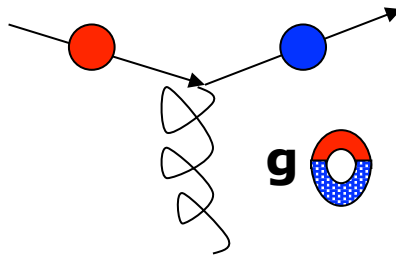


radioattività, attività solare ...  
messaggeri:  **$W^\pm$**  e la **Z**  
carica: **debole**

# La forza di colore: 3 cariche

La forza di colore è molto diversa dalle altre

- Ci sono 3 cariche (3 colori): ● ● ●
- Lo scambio di un gluone può cambiare il colore del quark.



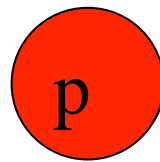
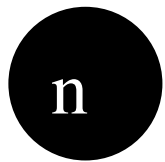
- I gluoni sono colorati, cioè sono carichi, e quindi interagiscono tra di loro





# La forza debole

È responsabile per il decadimento delle particelle

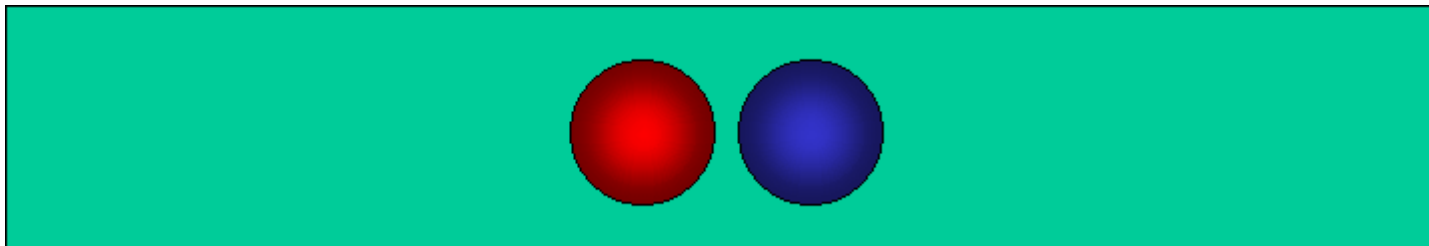


○ Antineutrino

● Electron

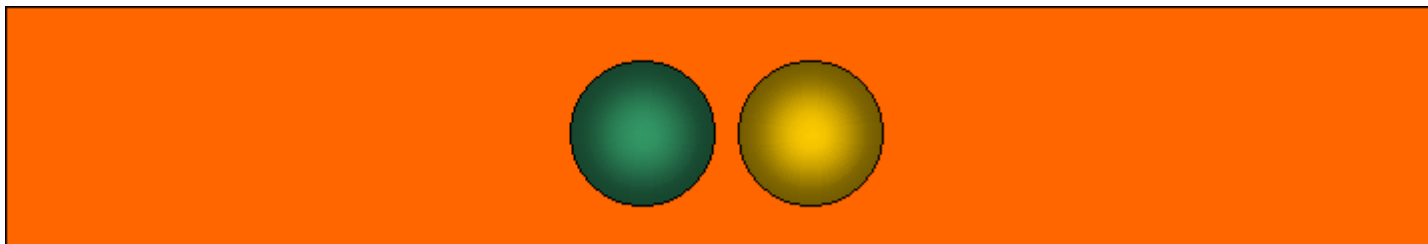
# Cosa capita quando due particelle si allontanano?

Forza di gravità ed elettromagnetica:



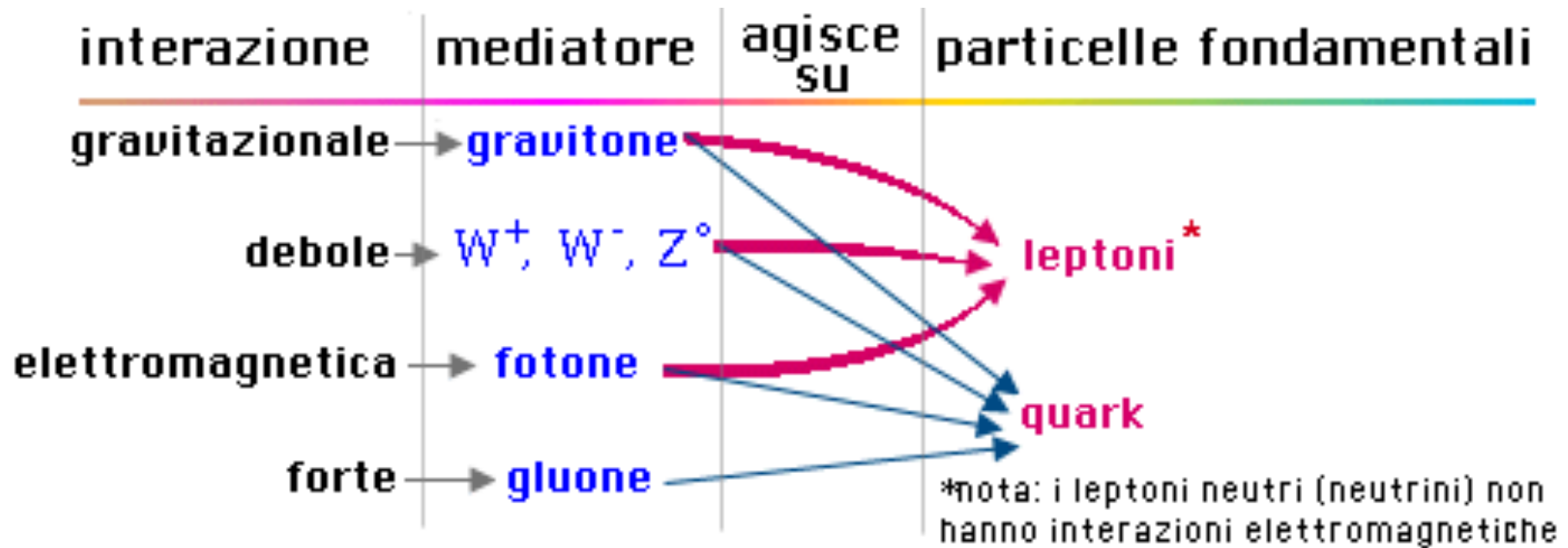
Diminuisce con la distanza

Forza di colore



Aumenta con la distanza

# Le forze non agiscono su tutte le particelle



# La massa delle particelle

Idea chiave:

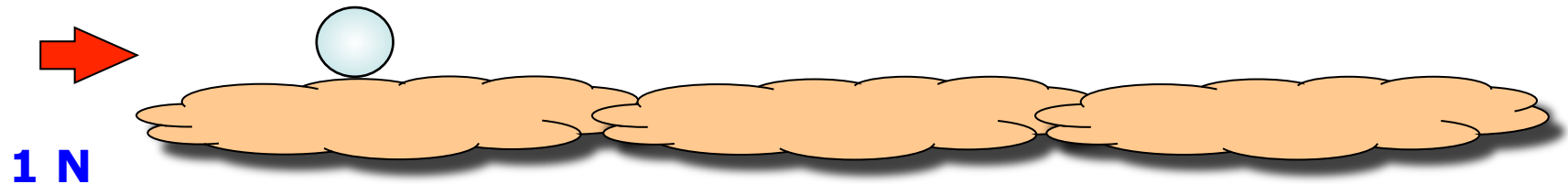
**Le particelle non hanno massa**

La massa è una proprietà che viene acquisita attraverso l'interazione con il bosone di Higgs: sembrano avere massa perchè interagiscono con il bosone di Higgs e diventano più difficili da spostare.

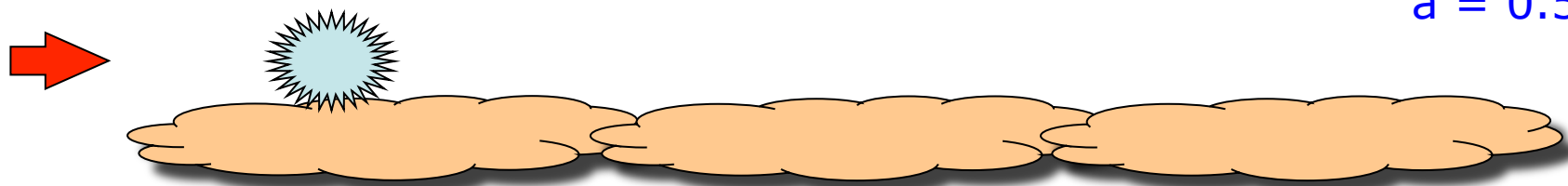
## La massa: una proprietà apparente

Colpiamo con la forza di 1 Newton due palle di massa uguale, una quasi liscia ed una rugosa, posate su di un tappeto soffice. Ne misuriamo l'accelerazione:



$$a = 1 \text{ m/s}^2$$



$$a = 0.5 \text{ m/s}^2$$



Calcoliamone la massa assumendo che non ci sia attrito:

|   |               |
|---|---------------|
|  | <b>= 1 Kg</b> |
|  | <b>= 2 Kg</b> |

Assunzione  
sbagliata  
(no attrito)



Risposta  
sbagliata  
(massa diversa)

## La massa (cont-)

Trasportiamo quest'esempio alle particelle elementari.  
Consideriamo il quark "top" e l'elettrone:

Il quark top pesa circa 300.000 volte più dell'elettrone.

Nel modello standard entrambe hanno massa nulla!

Sembrano che abbiano massa perché si muovono (con fatica) interagendo con il campo di Higgs



## Tutto assieme

Le particelle che avete visto fino ad adesso (quark, leptoni, messaggeri, stati legati) vengono descritte da un modello matematico chiamato

## Modello Standard

- Descrive moltissimi dati sperimentali con grande accuratezza
- Non si è ancora trovato il bosone di Higgs
- Non include la gravità
- Sicuramente incompleto
- Si sta cercando la teoria che sia in grado di includere tutto il resto

## Oltre il modello Standard

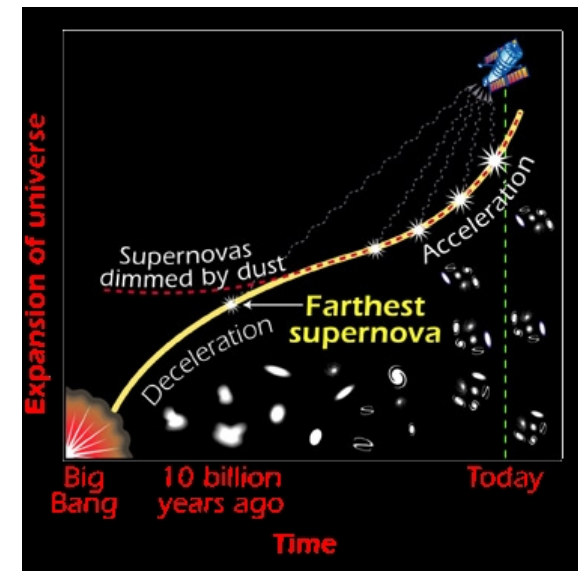
Adesso che sappiamo tutto di fisica possiamo affrontare argomenti veramente interessanti:

- Come si crea un universo
- Gli 'oscuri segreti' dell'universo
- La supersimmetria
- Quante sono le forze nell'universo?
- Ma ci sono davvero SOLO 3 dimensioni spaziali?
- Ma c'è davvero un solo universo?
  
- Ma perché non studiano tutti fisica?



## Come si crea un universo

1. Si comincia con un'enorme esplosione (Big-Bang, 13.7 miliardi di anni fa)
2. Dopo un paio di milionesimi di secondo i quark si aggregano in protoni e neutroni
3. Dopo 3 minuti si formano i nuclei
4. Si lascia espandere e raffreddare per 380.000 anni: a quel punto di formano H ed He
5. Dopo circa 1.6 milioni di anni la gravità comincia a prendere il sopravvento e forma soli e galassie
6. Atomi pesanti vengono formati all'interno delle stelle
7. Le stelle esplodono mandando nello spazio tutti gli elementi
8. Si formano i pianeti (tecnicamente siamo tutti fatti di polvere di stelle..)
9. Dopo circa 9 miliardi di anni l'universo ricomincia ad espandersi a causa della presenza di 'dark energy'
10. Il pianeta Terra si forma circa 4.5 miliardi di anni fa



# Oscuri Segreti - I

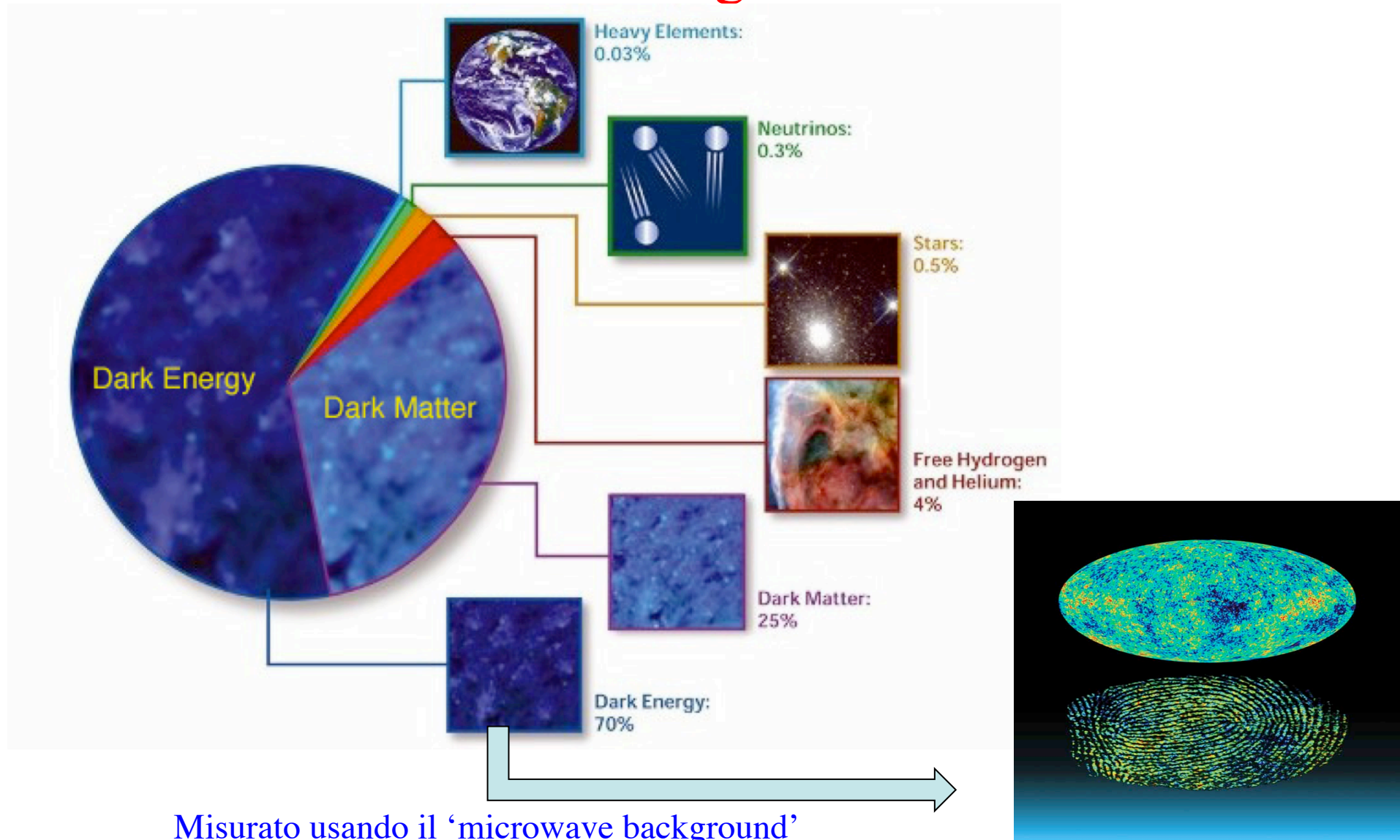
Tuttavia abbiamo un problema:

Quello che vi ho raccontato spiega solo il 5% dell'universo,  
questa volta abbiamo perso il 95% dell'universo

Cosa sappiamo del 96% dell'universo?

1. Sappiamo che c'è perché ne vediamo il suo effetto gravitazionale
2. Il 22-25% è costituito da 'Dark Matter':
  - I. Non emette nessun tipo di radiazione elettromagnetica.
  - II. Fa ruotare le galassie più velocemente
  - III. Una idea è che contenga 'particelle super-simmetriche'
3. Il 70 - 73% è composto da 'Dark Energy'
  1. Riempie uniformemente tutto lo spazio
  2. Aumenta la velocità di espansione dell'universo

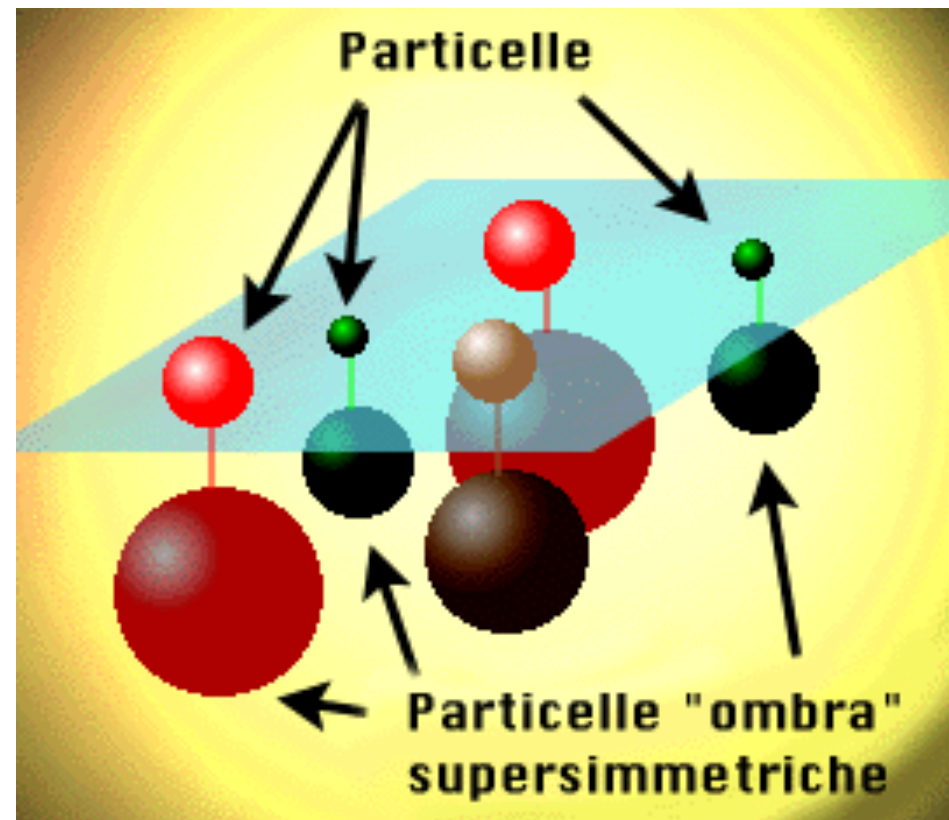
## Oscuri Segreti - II



# La Supersimmetria

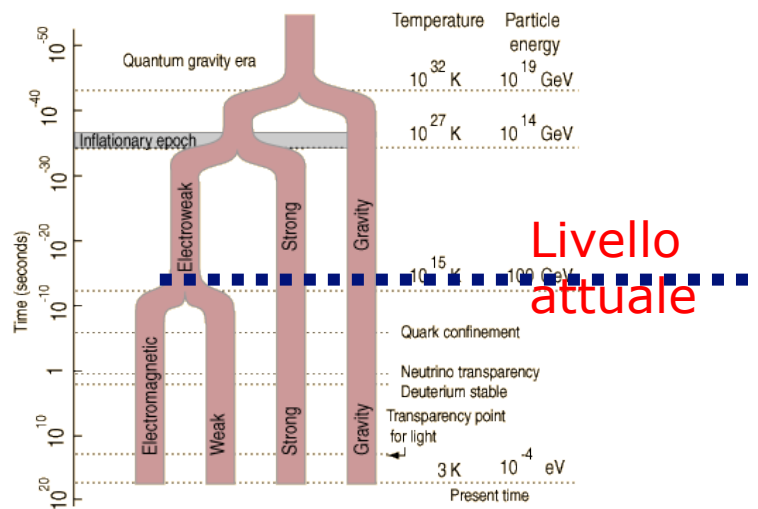
La “**Supersimmetria**” risolve molti problemi teorici ed introduce per ogni particella nota un compagno “supersimmetrico”

Putroppo fino ad adesso nessuna particella supersimmetrica e' stata trovata.....



# Quante sono le forze?

Nel mondo intorno a noi ve ne sono 4



Livello attuale



Elettromag.

Electro-debole

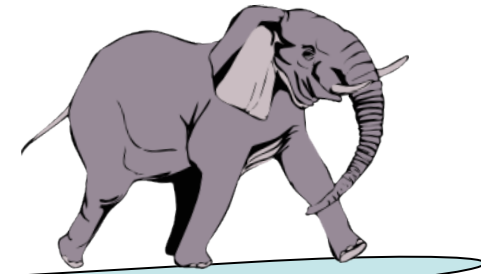
Debole

Forte

Tuttavia si crede che siano 4 manifestazioni di un'unica super-forza che diventa evidente ad alte energie

## Solo 3 dimensioni spaziali?

Ci sono molte idee che richiedono l'esistenza di ulteriori dimensioni. Queste dimensioni sono arrotolate, per cui non si vedono

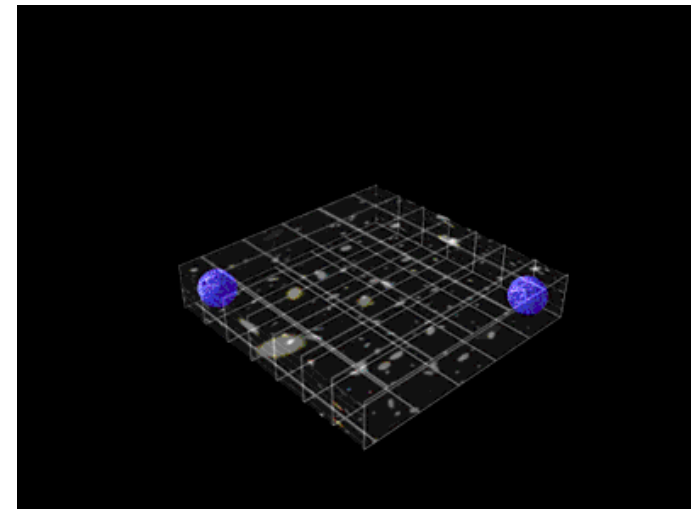


Dimensione molto piccola, non la si vede

Perché la gravità è così debole?

Idea: la gravità si espande in ulteriori dimensioni, quindi si diluisce (di dimensioni fino a  $\sim 100$  micron)

Animazione: due protoni si urtano e creano un gravitone che scompare fuori dalle nostre 3 dimensioni



## Solo un unico universo?

Nel nostro universo ci sono delle peculiarità che non si spiegano facilmente, quali il valore delle forze, che sembrano fatte apposta per creare il nostro universo.

Per esempio: se la gravità fosse un po' più forte tutte l'universo sarebbe collassato, se fosse più debole non si sarebbero formate le galassie.

È possibile che esistano infiniti altri universi in cui le leggi della fisica sono diverse e che non permettano lo sviluppo delle galassie:

**noi abbiamo la fortuna di stare in uno particolarmente ospitale**

## Conclusioni

La fisica delle particelle è basata su moltissimi esperimenti e spiega una vasta quantità di dati sperimentali

Ci sono domande fondamentali di cui non sappiamo la risposta

Venite ad aiutarci a trovare le risposte