

Breve introduzione alla Fisica delle particelle elementari

Fulvia De Fazio
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Bari



Bari, 11/03/2025

Cos'è la fisica delle particelle elementari?

Cos'è la fisica delle particelle elementari?

Studio dei costituenti elementari della materia e del modo in cui interagiscono fra di loro

Cos'è la fisica delle particelle elementari?

Studio dei costituenti elementari della materia e del modo in cui interagiscono fra di loro

- Che vuol dire elementari?
- Cosa sono le interazioni?
- Come si vedono le particelle elementari?

Tappe storiche nella comprensione della struttura elementare della materia

DEMOCRITO (470-370 a.C.):

La materia e' costituita da particelle eterne ed indistruttibili dette ATOMI, cioe' indivisibili

In natura ci sono solo ATOMI e VUOTO

Gli atomi si combinano A CASO per dare elementi diversi

Il risultato e' diverso quando la forma degli atomi e' diversa

Tappe storiche nella comprensione della struttura elementare della materia

DEMOCRITO (470-370 a.C.):

La materia e' costituita da particelle ~~etern~~ ~~ed indistruttibili~~ dette ATOMI, cioe' ~~indivisibili~~

In natura ci sono ~~sole~~ ATOMI e VUOTO

~~Gli atomi si combinano A CASO per dare elementi diversi~~

~~Il risultato e' diverso quando la forma degli atomi e' diversa~~

Tappe storiche nella comprensione della struttura elementare della materia

DEMOCRITO (470-370 a.C.):

La materia è costituita da particelle ~~etere ed indistruttibili~~ dette ATOMI, cioè ~~indivisibili~~

In natura ci sono ~~sole~~ ATOMI e VUOTO

~~Gli atomi si combinano A CASO per dare elementi diversi~~

~~Il risultato è diverso quando la forma degli atomi è diversa~~

DALTON (1766-1844):

Gli elementi sono formati da particelle microscopiche indivisibili e identiche, gli ATOMI.

I composti si ottengono combinando gli atomi secondo leggi ben precise

e in proporzioni stabilite: il risultato sono le MOLECOLE

Tappe storiche nella comprensione della struttura elementare della materia

DEMOCRITO (470-370 a.C.):

La materia è costituita da particelle eterne ed indistruttibili dette ATOMI, cioè indivisibili

In natura ci sono ~~sole~~ ATOMI e VUOTO

~~Gli atomi si combinano A CASO per dare elementi diversi~~

~~Il risultato è diverso quando la forma degli atomi è diversa~~

DALTON (1766-1844):

Gli elementi sono formati da particelle microscopiche indivisibili e identiche, gli ATOMI.

I composti si ottengono combinando gli atomi secondo leggi ben precise

e in proporzioni stabilite: il risultato sono le MOLECOLE

MENDELEEV (1834-1907):

Gli elementi sono formati da atomi con *pesi* differenti.

Una classificazione degli elementi si può formulare ordinandoli in base al peso degli atomi

Tavola Periodica degli Elementi

1 IA Nuovo Originale	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9 VIII	10	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 H Idrogeno 1.00794																	2 He Elio 4.002602
3 Li Litio 6.941	4 Be Berillio 9.012182											5 B Boro 10.811	6 C Carbonio 12.0107	7 N Azoto 14.00674	8 O Ossigeno 15.9994	9 F Fluoro 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodio 22.989770	12 Mg Magnesio 24.3050											13 Al Alluminio 26.981538	14 Si Silicio 28.0855	15 P Fosforo 30.973761	16 S Zolfo 32.066	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassio 39.0983	20 Ca Calcio 40.078	21 Sc Scandio 44.955910	22 Ti Titanio 47.867	23 V Vanadio 50.9415	24 Cr Cromo 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Ferro 55.8457	27 Co Cobalto 58.933200	28 Ni Nichel 58.6934	29 Cu Rame 63.546	30 Zn Zinco 65.409	31 Ga Gallio 69.723	32 Ge Germanio 72.64	33 As Arsenio 74.92160	34 Se Selenio 78.96	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidio 85.4678	38 Sr Stronzio 87.62	39 Y Ittrio 88.90585	40 Zr Zirconio 91.224	41 Nb Niobio 92.90638	42 Mo Molibdeno 95.94	43 Tc Technezio (98)	44 Ru Rutenio 101.07	45 Rh Rodio 102.90550	46 Pd Palladio 106.42	47 Ag Argento 107.8682	48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Stagno 118.710	51 Sb Antimonio 121.760	52 Te Tellurio 127.60	53 I Iodio 126.90447	54 Xe Xeno 131.293
55 Cs Cesio 132.90545	56 Ba Bario 137.327	57 to 71	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tantalio 180.9479	74 W Tungsteno 183.84	75 Re Renio 186.207	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.217	78 Pt Platino 195.078	79 Au Oro 196.96655	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Tallio 204.3833	82 Pb Piombo 207.2	83 Bi Bismuto 208.98038	84 Po Polonio (209)	85 At Astatio (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francio (223)	88 Ra Radio (226)	89 to 103	104 Rf Rutherfordio (261)	105 Db Dubnio (262)	106 Sg Seaborgio (266)	107 Bh Bohrio (264)	108 Hs Hassio (269)	109 Mt Meitnerio (268)	110 Ds Darmstadtio (271)	111 Rg Roentgenio (272)	112 Uub Ununbio (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Uuq Ununquadio (289)	115 Uup Ununpentio (288)	116 Uuh Ununhexio (292)	117 Uus Ununseptio	118 Uuo Ununoctio

Le masse atomiche tra sono quelle degli isotopi più stabili o più comuni.

Design Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com), <http://www.dayah.com/periodic/>

Nota: il sotto gruppo dei numeri 1-18 è stato adottato nel 1984 dalla International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). I nomi degli elementi 112-118 sono gli equivalenti latini di quei nomi.

57 La Lantanio 138.9055	58 Ce Cerio 140.116	59 Pr Praseodimio 140.90765	60 Nd Neodimio 144.24	61 Pm Promezio (145)	62 Sm Samario 150.36	63 Eu Europio 151.964	64 Gd Gadolinio 157.25	65 Tb Terbio 158.92534	66 Dy Disprosio 162.500	67 Ho Olmio 164.93032	68 Er Erbio 167.259	69 Tm Tulio 168.93421	70 Yb Itterbio 173.04	71 Lu Lutezio 174.967
89 Ac Attinio (227)	90 Th Torio 232.0381	91 Pa Protoattinio 231.03588	92 U Uranio 238.02891	93 Np Nettunio (237)	94 Pu Plutonio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Curio (247)	97 Bk Berkelio (247)	98 Cf Californio (251)	99 Es Einsteinio (252)	100 Fm Fermio (257)	101 Md Mendelevio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Laurenzio (262)

Gli atomi non sono eterni!
Si scopre la radioattività

1895-1900

Si scoprono vari tipi di *raggi* (raggi catodici, raggi X...)

Gli atomi si trasformano: non sono eterni ed indivisibili come si credeva

Gli atomi non sono eterni!
Si scopre la radioattività

1895-1900

Si scoprono vari tipi di *raggi* (raggi catodici, raggi X...)

Gli atomi si trasformano: non sono eterni ed indivisibili come si credeva

Grande contributo di Marie Curie !



Marie Curie was the first:

- The first woman of the degree in physics.
- The first woman to graduate in France.
- The first woman to obtain a Nobel Prize.
- The first woman to obtain a chair at the Sorbonne.
- The first scientist to obtain two Nobel Prizes



Gli atomi non sono indivisibili: come sono fatti?

THOMSON (1856-1940)

Modello *Plum Pudding* : gli elettroni sono immersi
in un gel di carica positiva come l'uvetta nel panettone



© 2006 Welsch & Partner, Tübingen
scientific multimedia

RUTHERFORD (1871-1937)

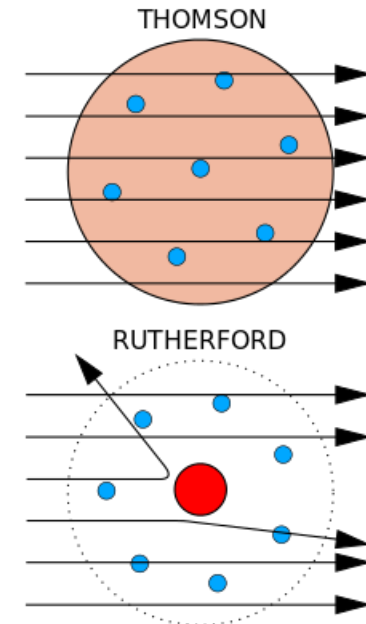
Esperimento:

si invia un fascio di particelle α (nuclei di He)

su una sottile lamina di oro

A seconda della distribuzione delle cariche

il risultato sarà diverso



L'atomo di Rutherford

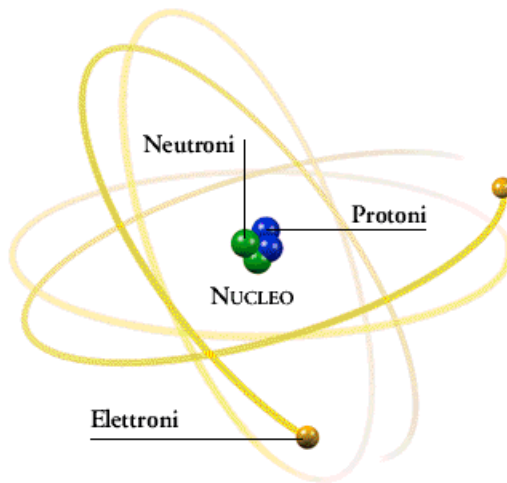
La carica positiva non è distribuita uniformemente
ma è concentrata in un **nucleo** centrale

La carica del nucleo è un multiplo intero della carica dell'elettrone

Modello Planetario dell'Atomo (1911)

Gli elettroni orbitano intorno al nucleo

In analogia ai pianeti che orbitano intorno al sole



Forza elettrica



Forza gravitazionale

L'atomo di Rutherford

Rutherford ripete l'esperimento con atomi diversi capendo che:

- la classificazione di Mendeleev corrisponde ad ordinare gli elementi secondo la carica elettrica dei nuclei
- Un nucleo con carica elettrica Z volte la carica dell'**elettrone** contiene Z **protoni**.

Per spiegare la differenza tra la massa dell'atomo e quella del nucleo, Rutherford postula l'esistenza di particelle neutre di massa circa uguale a quella del protone.

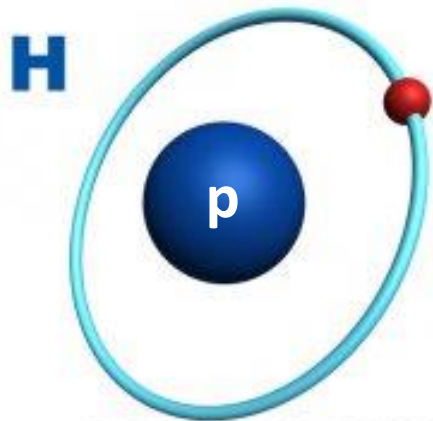
Nel 1932 CHADWICK scopre il neutrone

La materia ordinaria è composta da atomi.

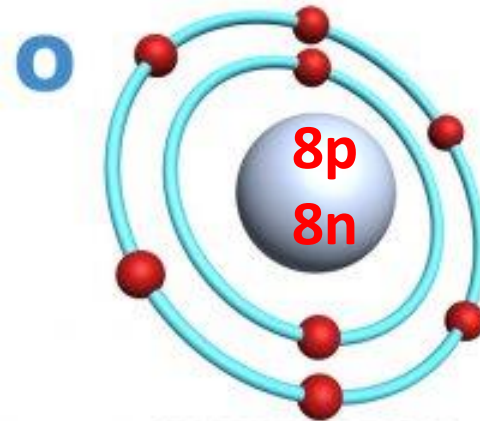
L'atomo ha un nucleo composto da neutroni e protoni (**nucleoni**) intorno al quale orbitano gli elettroni.

I diversi elementi chimici corrispondono a diverse composizioni del nucleo.

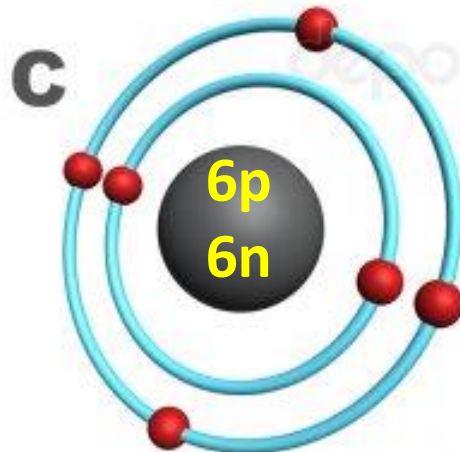
Una ricetta semplice...



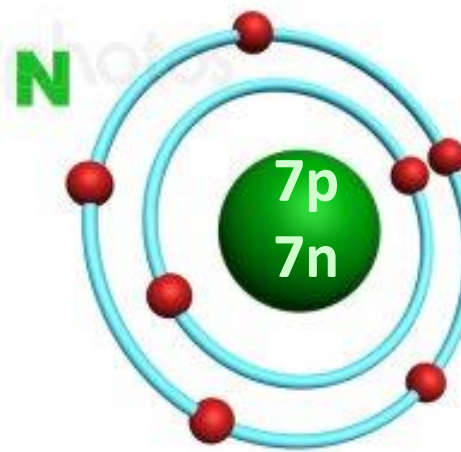
HYDROGEN ATOM



OXYGEN ATOM



CARBON ATOM



NITROGEN ATOM

Sono questi i veri costituenti elementari della materia?

Lo zoo delle particelle elementari

Dagli anni 30 in poi si scoprono moltissime altre particelle.
Si può mettere ordine come aveva fatto Mendeleev con gli elementi chimici?

GELL-MANN postula che anche i nucleoni siano costituiti da costituenti più piccoli:
i quark

Evidenze dell'esistenza dei quark si hanno con esperimenti tipo Rutherford
Le particelle bersaglio sono i nucleoni e i proiettili sono elettroni

La classificazione attuale

Le particelle si dividono in **adroni** e **leptoni**
Riteniamo che i leptoni siano *elementari*,
mentre gli adroni siano costituiti da quark

3 famiglie



Carica elettrica $+2/3 e$

Carica elettrica $-1/3 e$

Carica elettrica $0 e$

Carica elettrica $-1 e$

$$e = 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

La classificazione attuale

Le particelle si dividono in **adroni** e **leptoni**
Riteniamo che i leptoni siano *elementari*,
mentre gli adroni siano costituiti da quark

3 famiglie



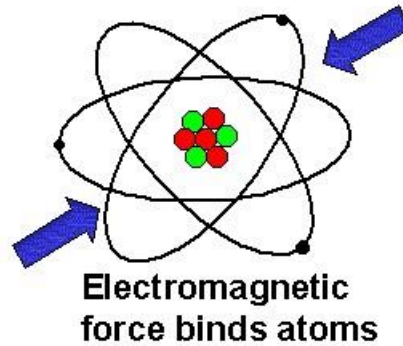
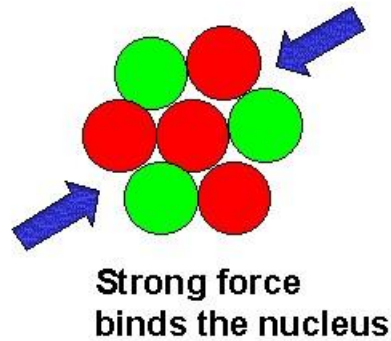
Compongono la materia ordinaria

Le interazioni fondamentali

Tutte le forze che conosciamo si possono ricondurre a 4 tipi di interazioni fondamentali

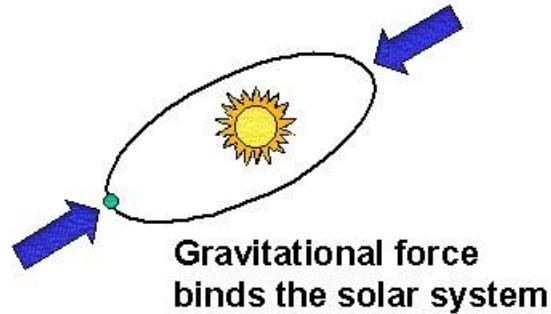
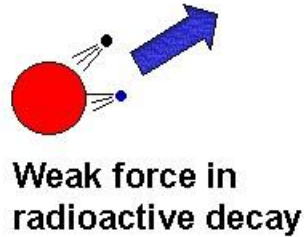
Intensita' relativa

1



$10^{-2}=1/100$

$10^{-7}=1/10000000$



10^{-39}

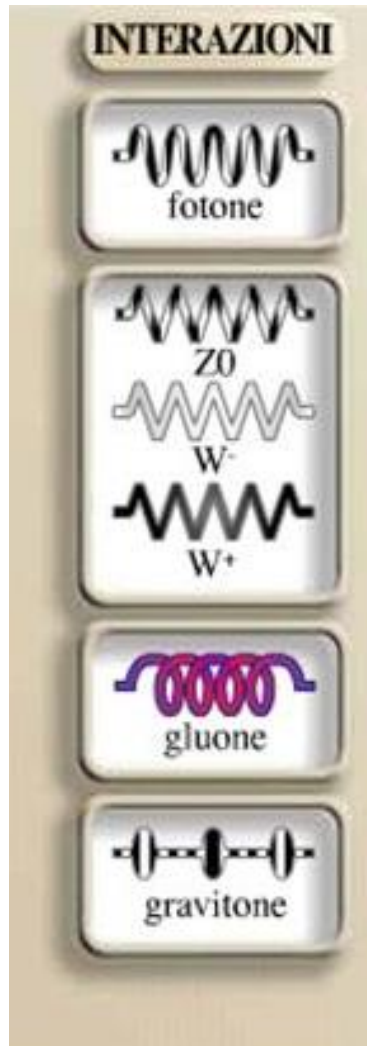


La forza fa l'unione!

Le interazioni fondamentali

Le forze si servono di
messaggeri di interazione

Interazione tra particelle : scambio di messaggeri



interazione elettromagnetica



interazione debole



interazione forte



interazione gravitazionale

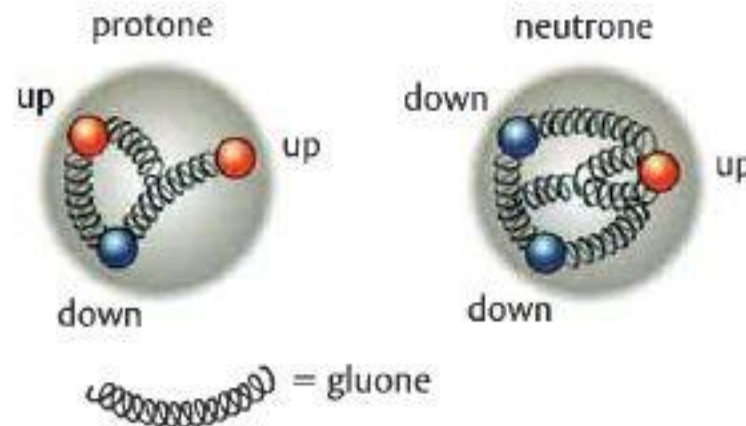
Differenze tra le interazioni fondamentali

La forza tra due cariche elettriche diminuisce se le allontaniamo

- si può ionizzare un atomo fornendogli energia sufficiente per *estrarre* un elettrone

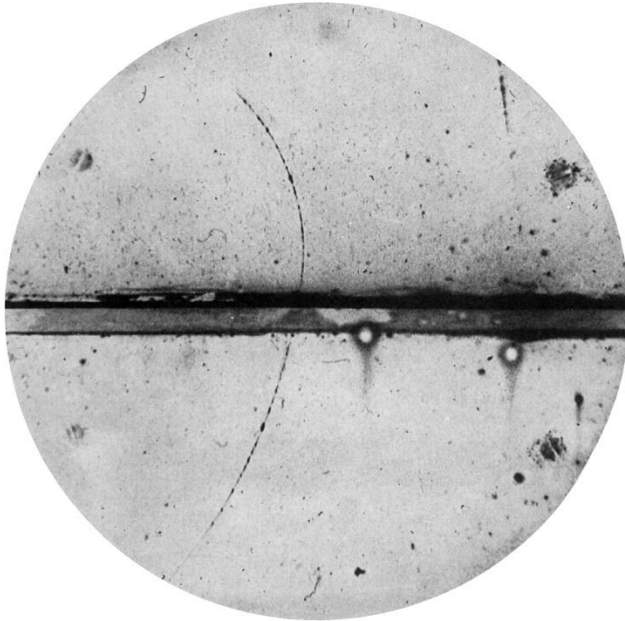
La forza tra due quark aumenta sempre più se cerchiamo di allontanarli:

- i quark sono *confinati* all'interno degli adroni



L'antimateria

Nel 1932 Anderson scopre una particella identica all'elettrone, ma con carica opposta
Il **positrone** (elettrone positivo)



Nel 1936 Anderson ottiene
il premio Nobel per
questa scoperta

Moto di una carica in un campo magnetico

La forza di Lorentz che agisce su una carica puntiforme q in moto in un campo magnetico \mathbf{B} è

$$\mathbf{F}_q = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

quindi è sempre perpendicolare alla velocità

Se \mathbf{B} è uniforme, la carica si muove di **moto circolare uniforme**

Il verso del moto dipende dal **segno della carica**

Usiamo la definizione di forza centripeta:

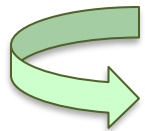
$$F_c = m \frac{v^2}{r}$$

e uguagliamola al modulo della forza di Lorentz

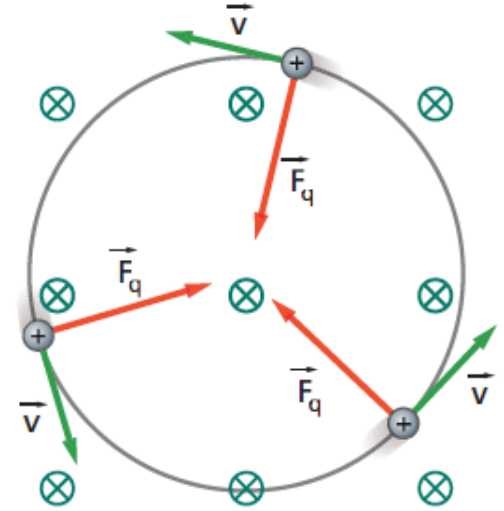
$$F_q = qvB$$

troviamo il raggio della traiettoria

$$r = \frac{mv}{qB}$$

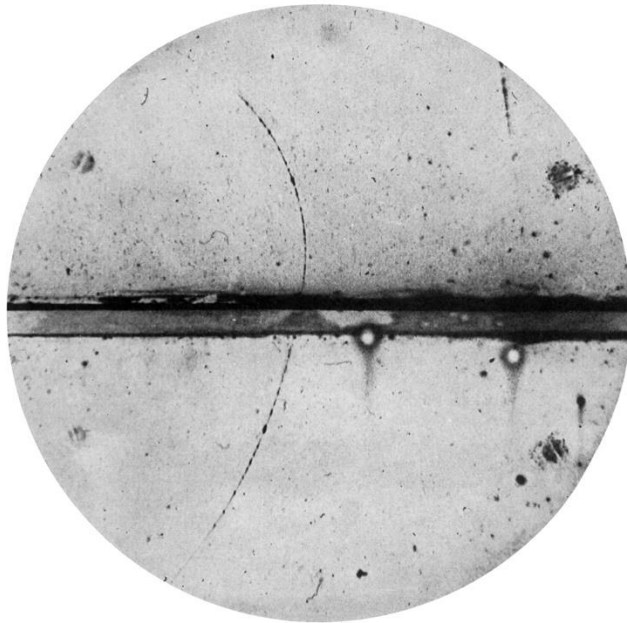


il raggio dipende dal rapporto m/q
se v diminuisce, r diminuisce



Particella & Antiparticella: l'Antimateria

Nel 1932 Anderson scopre una particella identica all'elettrone, ma con carica opposta
Il **positrone** (elettrone positivo)



Il positrone si sta muovendo in una camera a nebbia contenente un gas sovrassaturo con vapore acqueo. Al passaggio di una carica elettrica il vapore condensa le goccioline d'acqua che si formano segnano la **traccia** del positrone.

Al centro c'è una lastra di piombo che rallenta il positrone.

Poiché il raggio di curvatura sopra la lastra è minore di quello al di sotto si deduce che la velocità della particella è più piccola sopra che sotto la lastra

→ il positrone viaggia dal basso verso l'alto

→ ha carica positiva

La classificazione attuale

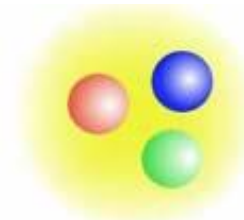
Le particelle si dividono in **adroni** e **leptoni**
Riteniamo che i leptoni siano *elementari*,
mentre gli adroni siano costituiti da quark

3 famiglie

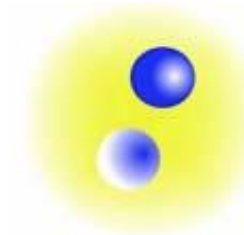


I quark non si osservano mai isolati
ma solo legati a formare adroni.
Solo gli adroni interagiscono fortemente

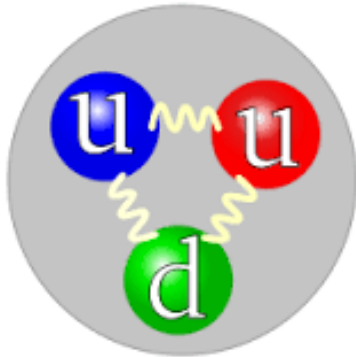
Chiamiamo:
adroni costituiti da 3 quark -> **BARIONI**



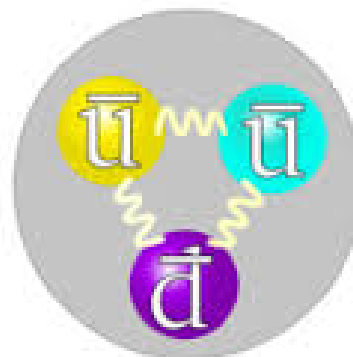
adroni costituiti da un quark e un antiquark
-> **MESONI**



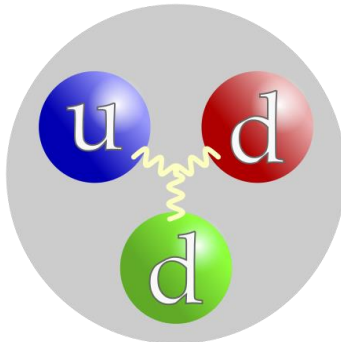
Esempio:
il protone & l'antiprotone



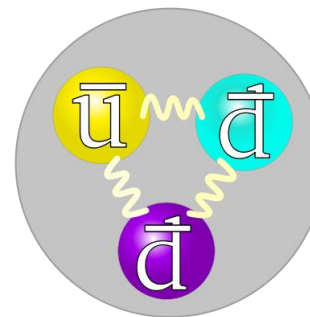
protone



antiprotone



neutrone



antineutrone

Il Modello Standard

Fermions

matter particles

Quarks



Leptons



Gauge bosons

force carriers



Higgs boson

origin of mass



Il bosone di Higgs

La sua esistenza viene teorizzata nel **1964** da **Higgs, Englert, Brout, Guralnik, Hagen e Kibble**

Scoperto nel **2012** dagli esperimenti ATLAS e CMS al CERN di Ginevra

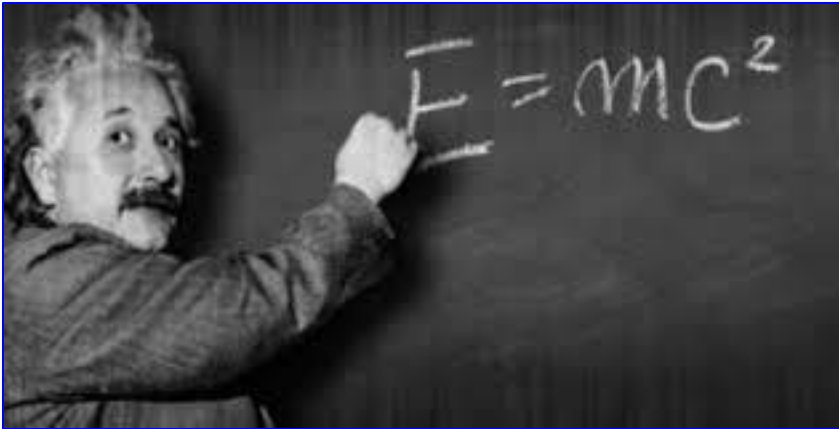
Se i mediatori delle forze fondamentali sono responsabili delle interazioni tra le particelle fra di loro,

l'Higgs è responsabile delle interazioni di alcune particelle con se stesse.

Ad ogni interazione è associata una energia

All'interazione con l'Higgs è associata la massa

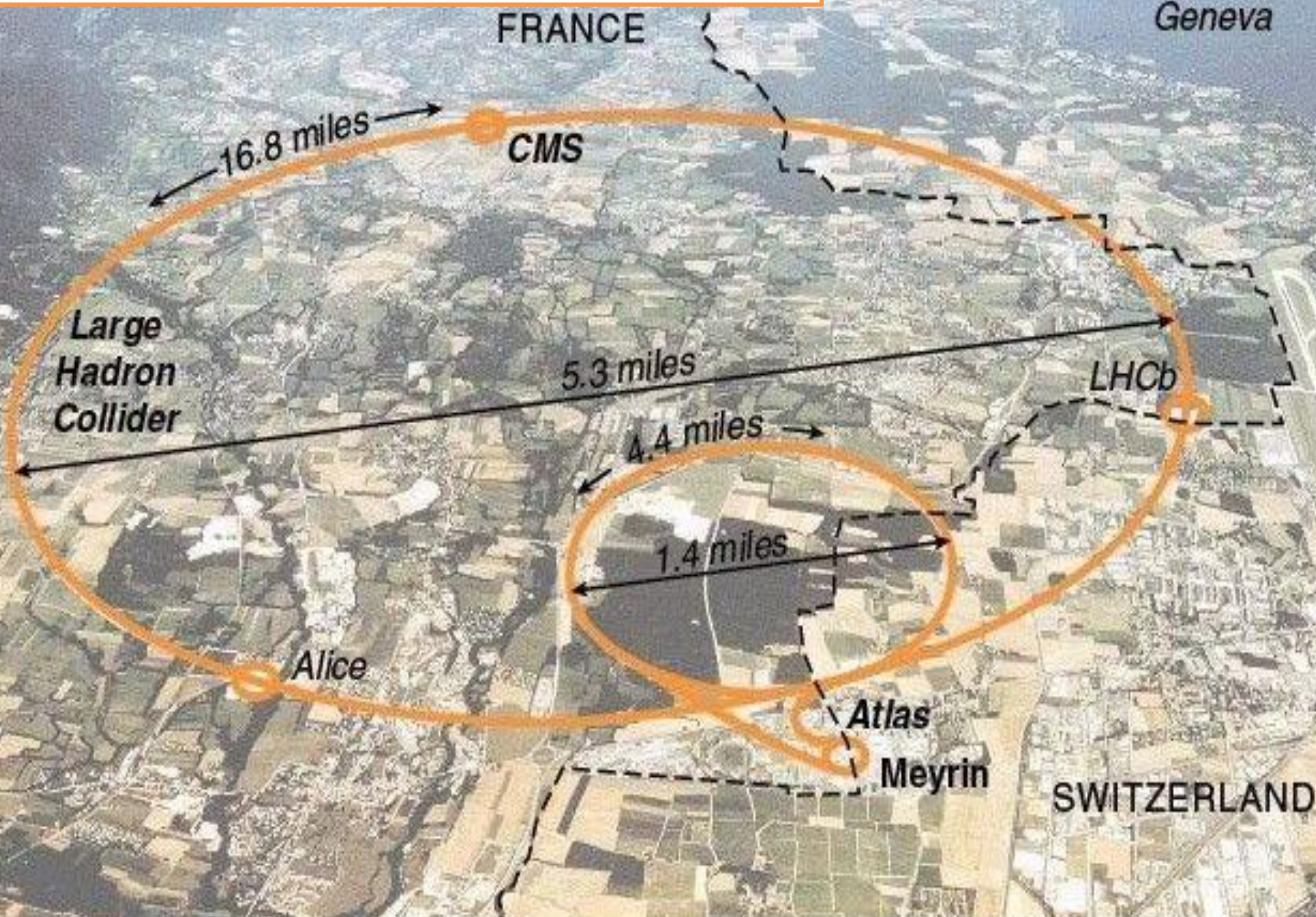
Come si creano nuove particelle?



L'energia si può convertire in massa!
(e viceversa)

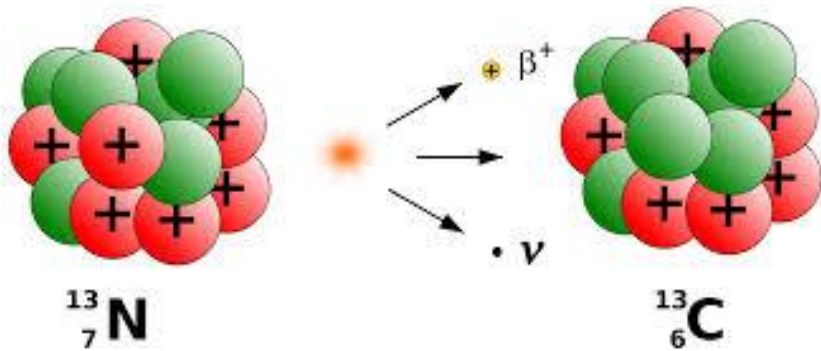
- Nei grandi acceleratori si realizzano urti fra particelle a grande energia
- L'energia si trasforma in massa:
- Si crea la materia!

Large Hadron Collider (LHC) al CERN di Ginevra
Circonferenza=27 Km



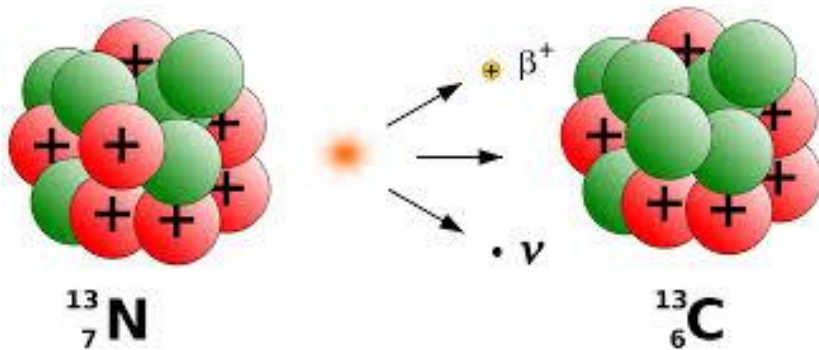
Come decadono le particelle?

I decadimenti



Decadimento β :
un nucleo si trasforma in un altro
emettendo un positrone e un neutrino

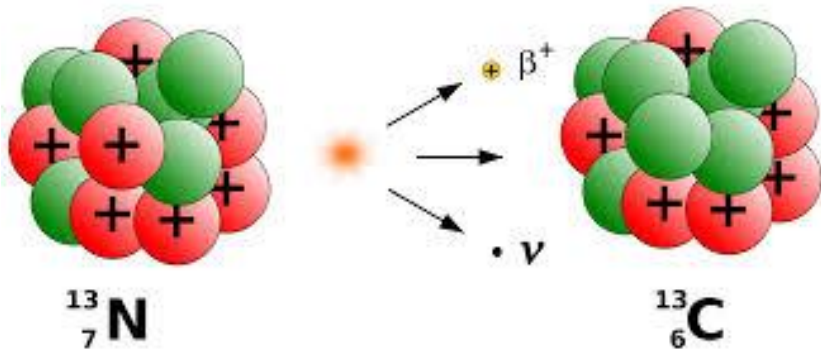
I decadimenti



Decadimento β :
un nucleo si trasforma in un altro
emettendo un positrone e un neutrino

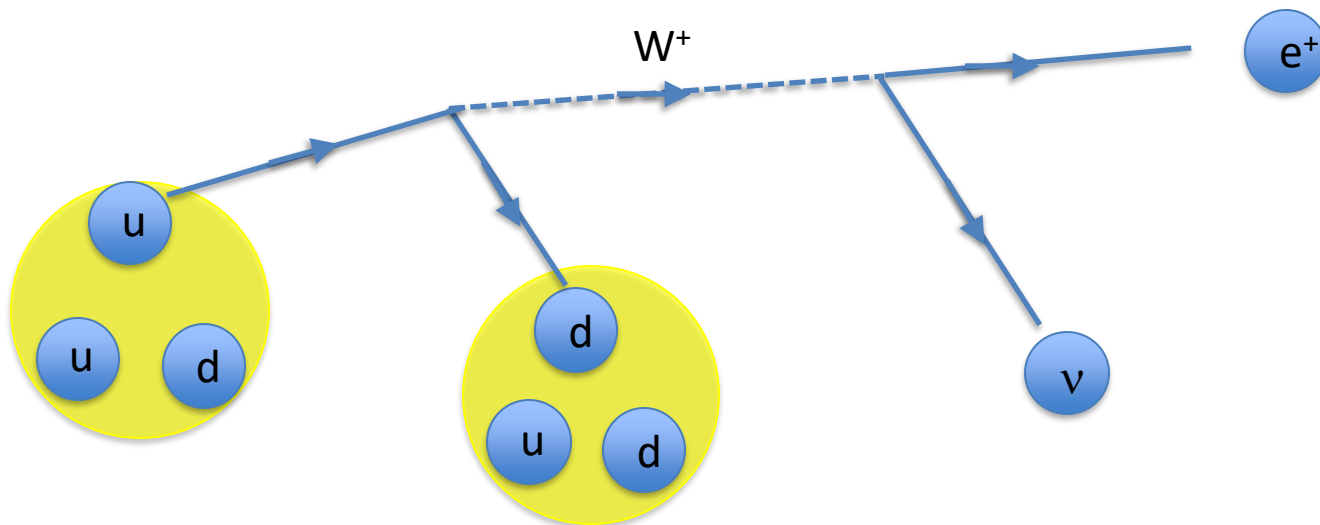
cosa è accaduto a livello più elementare?

I decadimenti



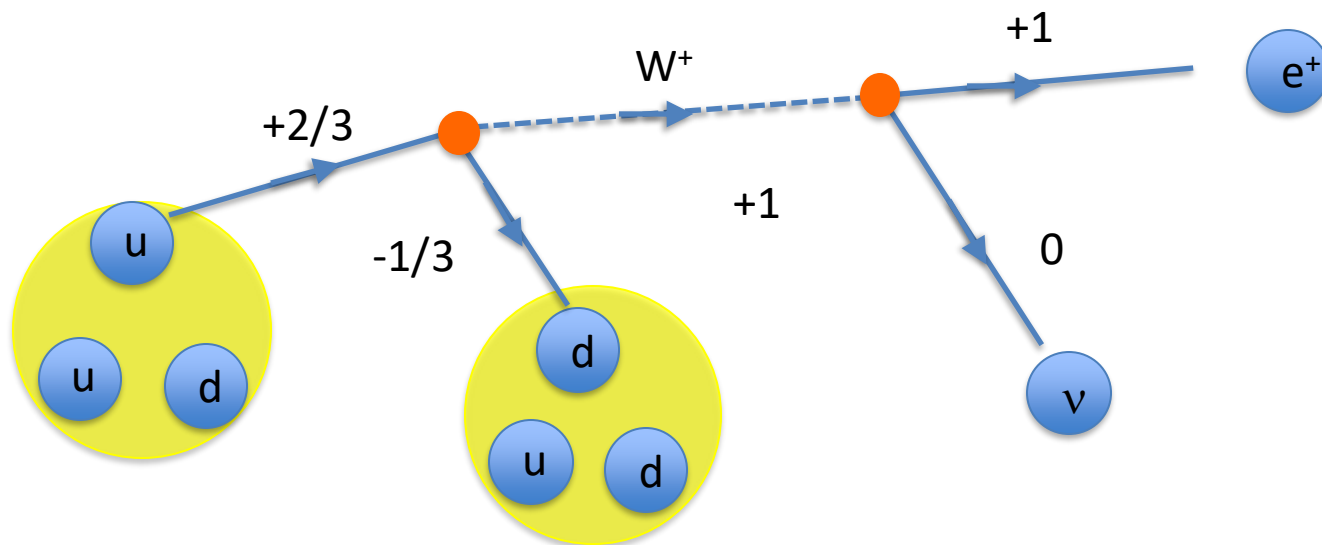
Decadimento β :
un nucleo si trasforma in un altro
emettendo un positrone e un neutrino

cosa è accaduto a livello più elementare?



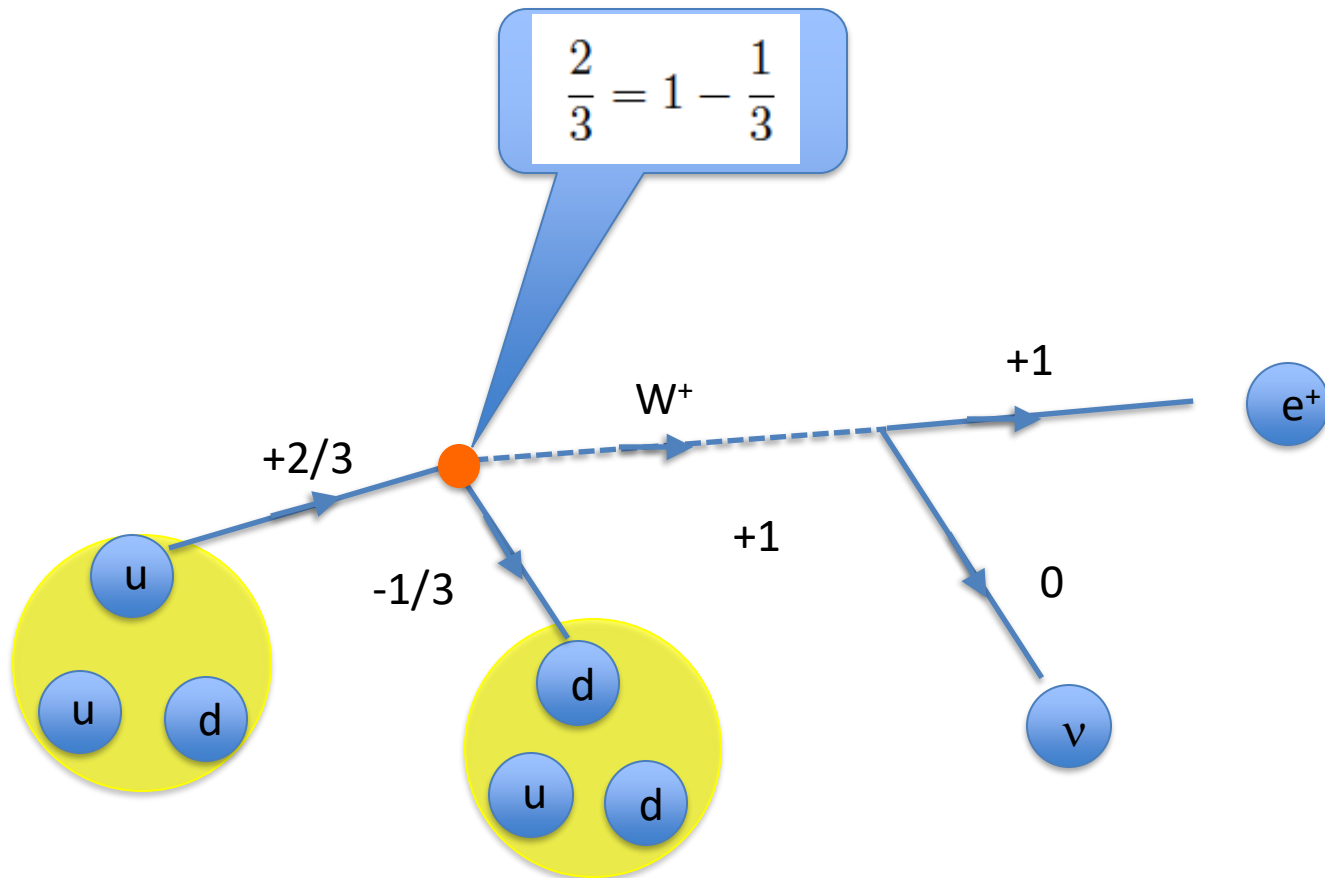
I decadimenti

La carica elettrica si conserva ad ogni *vertice d'interazione*



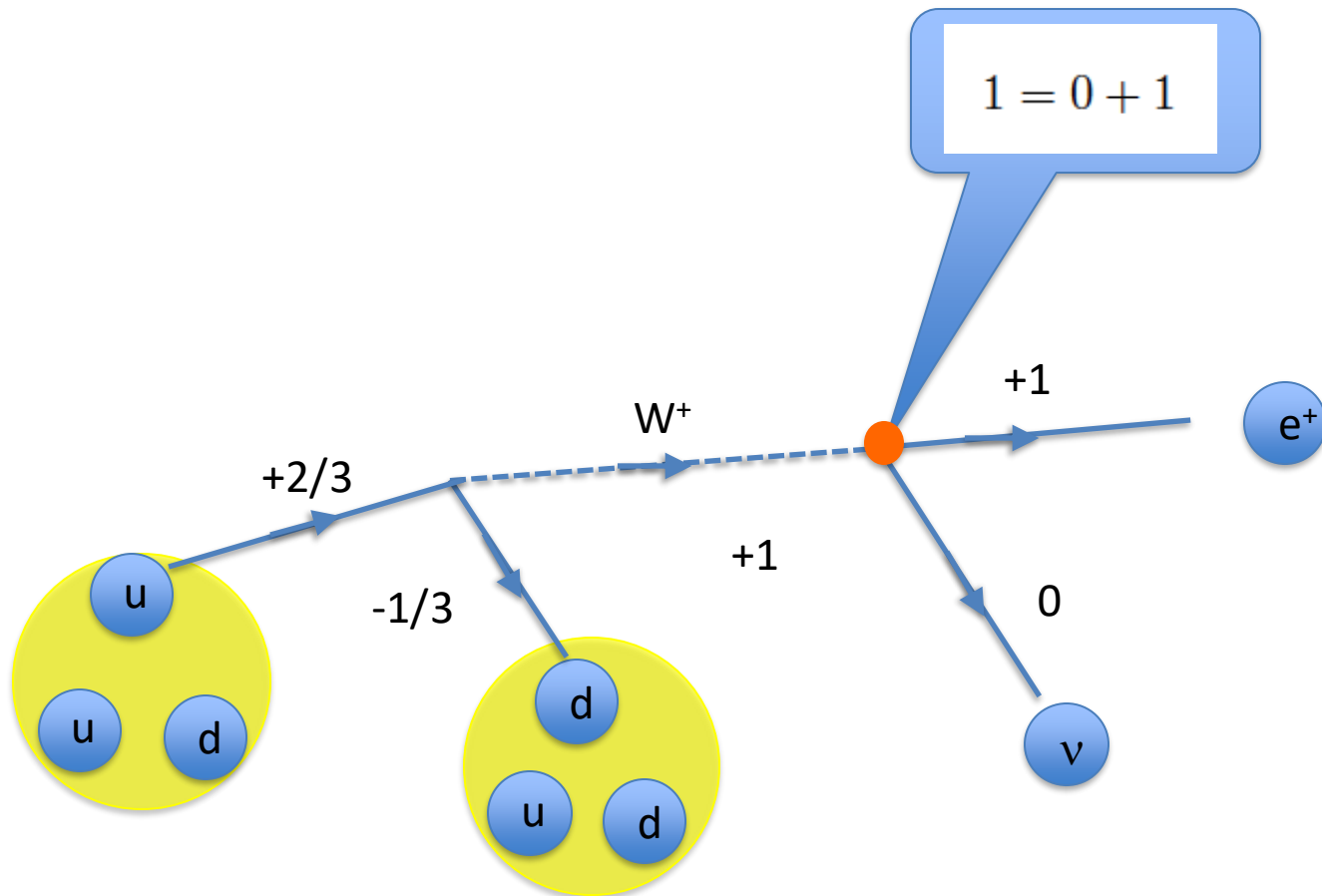
I decadimenti

La carica elettrica si conserva ad ogni *vertice d'interazione*



I decadimenti

La carica elettrica si conserva ad ogni *vertice d'interazione*



Spieghiamo i decadimenti nel Modello Standard

Tutti i processi di decadimento si possono spiegare a livello elementare a partire da un certo numero di vertici di interazione.

Il Modello Standard ci dice quali vertici sono possibili e quali no.

I processi più complicati si descrivono combinando i vertici elementari

Vertici con il fotone

Il fotone media l'interazione elettromagnetica quindi i vertici col fotone possono contenere solo particelle cariche

Vertici con il fotone

Il fotone media l'interazione elettromagnetica quindi i vertici col fotone possono contenere solo particelle cariche

Quarks



Leptons



Vertici con il fotone

Il fotone media l'interazione elettromagnetica quindi i vertici col fotone possono contenere solo particelle cariche

Quarks

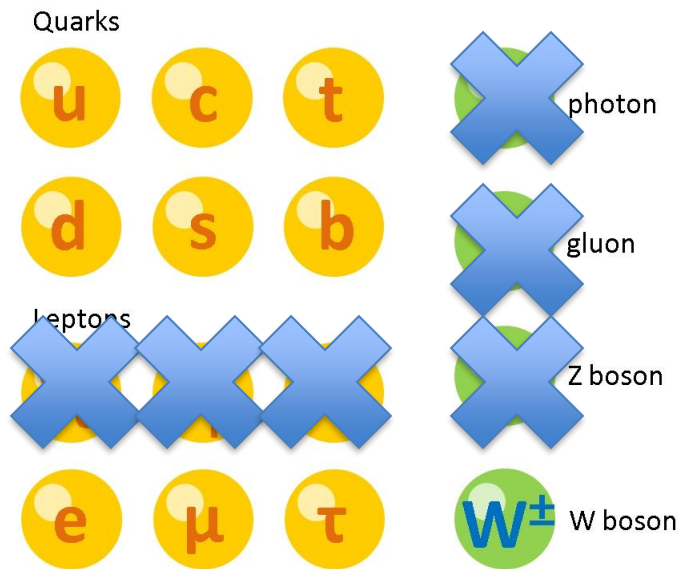


Leptons



Vertici con il fotone

Il fotone media l'interazione elettromagnetica quindi i vertici col fotone possono contenere solo particelle cariche (eccezione: vertici con più bosoni intermedi)

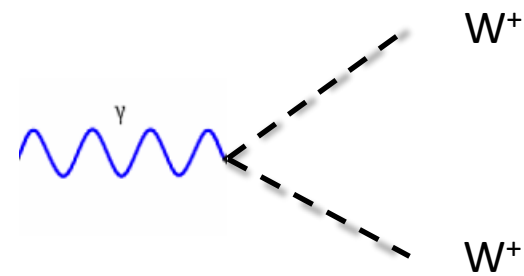
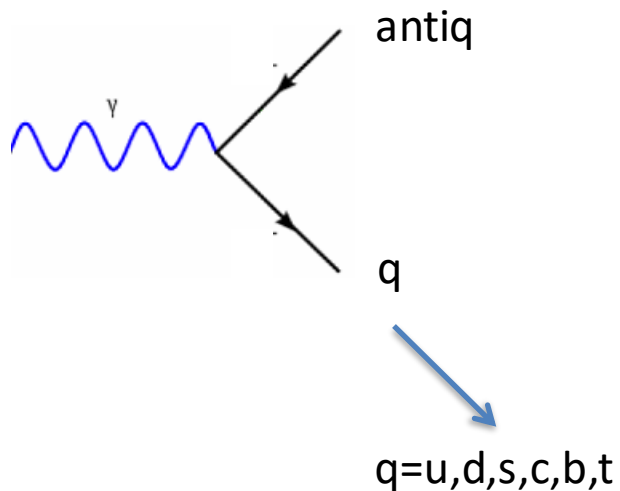
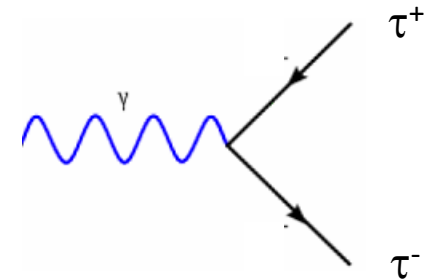
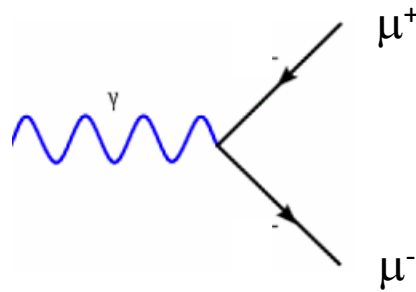
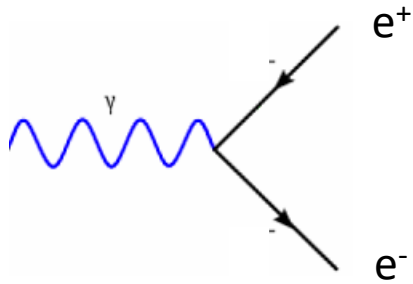


Vertici con il fotone

Dobbiamo sempre conservare la carica elettrica
Inoltre il fotone non trasforma una particella in una diversa
es. un quark u non può diventare un quark c

Vertici con il fotone

Dobbiamo sempre conservare la carica elettrica
Inoltre il fotone non trasforma una particella in una diversa
es. un quark u non puo' diventare un quark c



Vertici con l'Higgs

Esistono solo i vertici che accoppiano l'Higgs alle particelle con massa
Anche l'Higgs non cambia l'identità delle particelle

Vertici con l'Higgs

Esistono solo i vertici che accoppiano l'Higgs alle particelle con massa
Anche l'Higgs non cambia l'identità delle particelle

Quarks

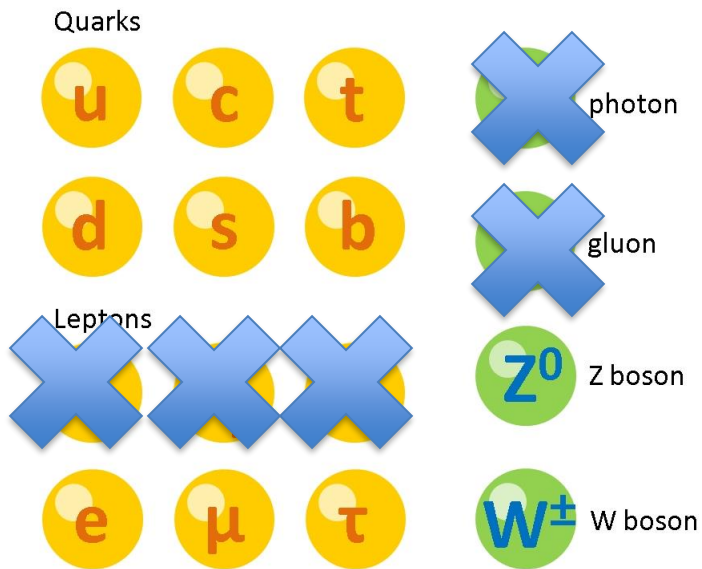


Leptons



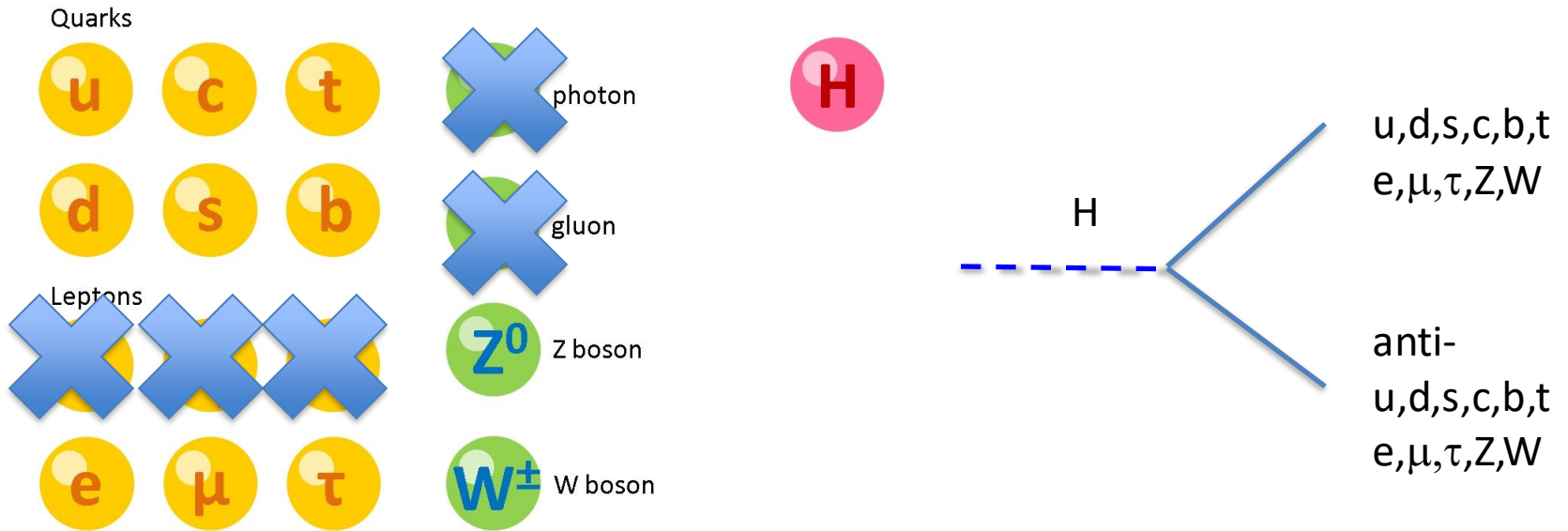
Vertici con l'Higgs

Esistono solo i vertici che accoppiano l'Higgs alle particelle con massa
Anche l'Higgs non cambia l'identità delle particelle

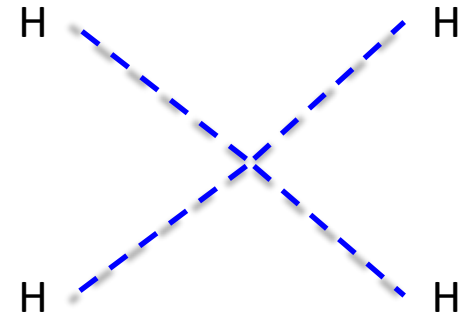
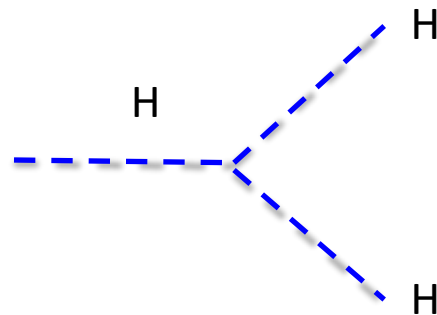


Vertici con l'Higgs

Esistono solo i vertici che accoppiano l'Higgs alle particelle con massa
Anche l'Higgs non cambia l'identità delle particelle

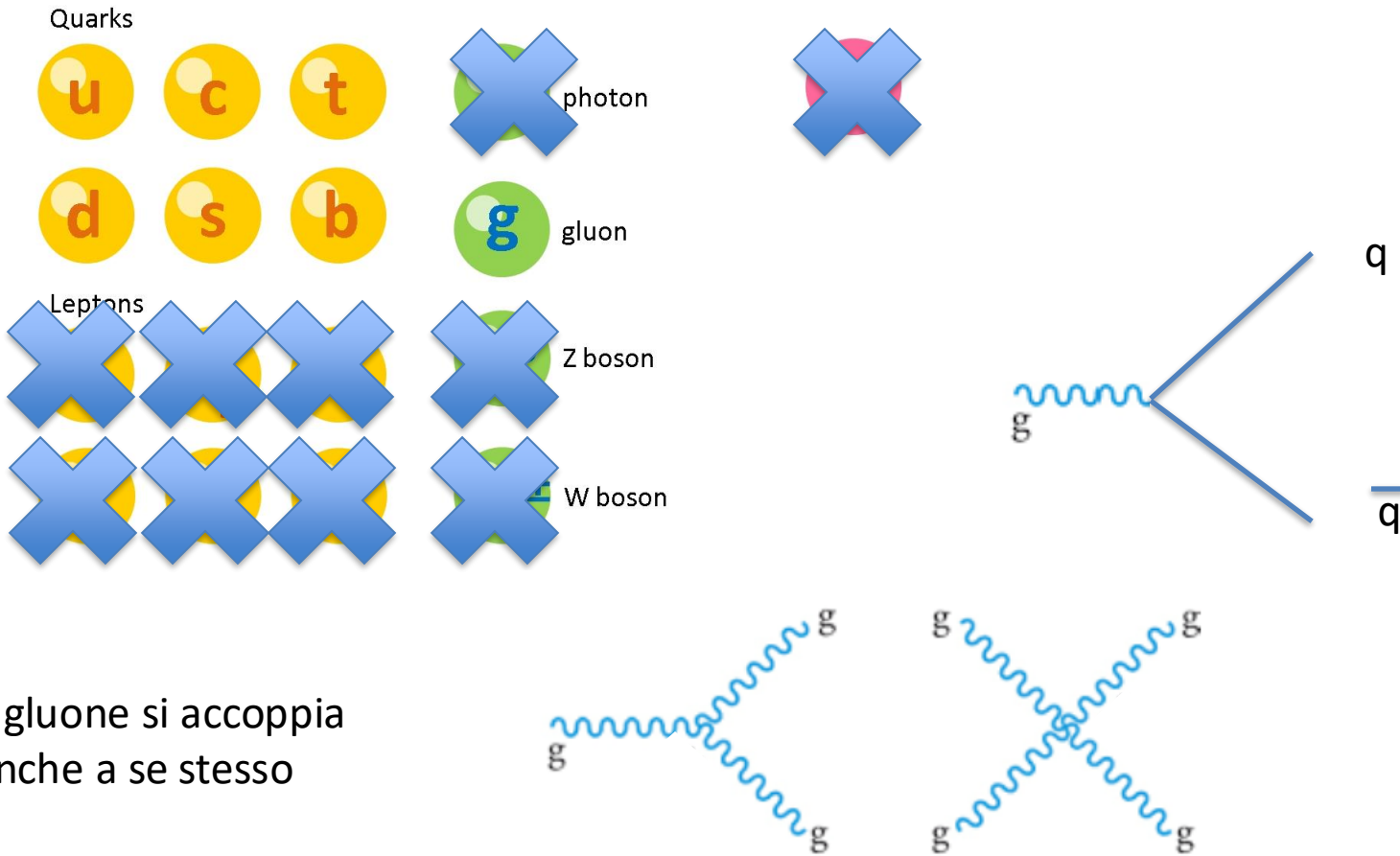


l'Higgs si accoppia
anche a se stesso



Vertici con il gluone

Il gluone si accoppia solo alle particelle con interazione forte
Anche il gluone non cambia l'identità delle particelle



il gluone si accoppia
anche a se stesso

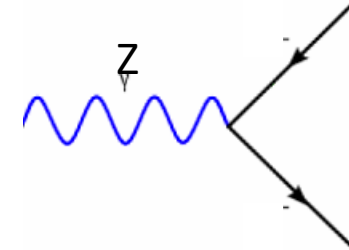
Vertici con la Z^0

La Z^0 si accoppia a tutte le particelle eccetto il gluone
Anche la Z^0 non cambia l'identità delle particelle

Quarks

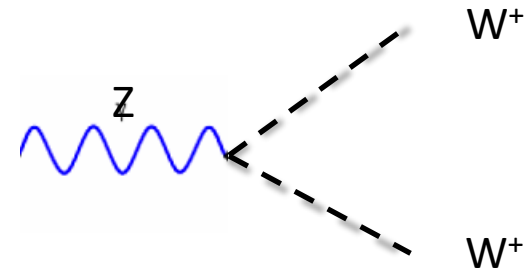


Leptons



u, d, s, c, b, t
 $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

anti-
 u, d, s, c, b, t
 $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$



Vertici con W^\pm

I W^\pm si accoppiano a tutte le particelle eccetto il gluone

I W^\pm **cambiano** l'identità delle particelle

Quarks



photon



gluon

Leptons



Z boson

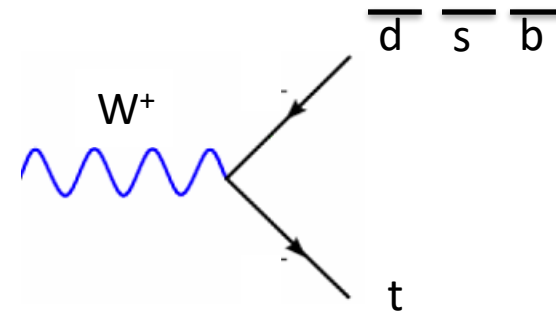
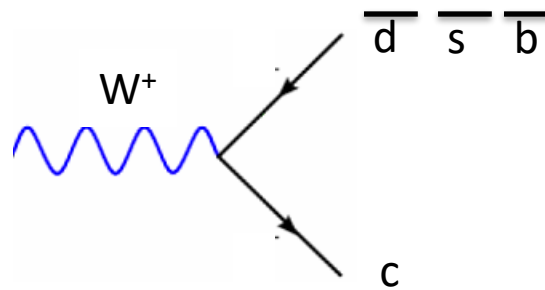
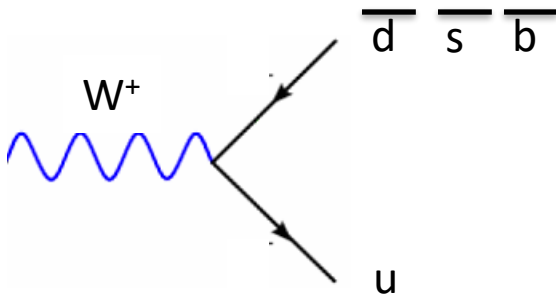
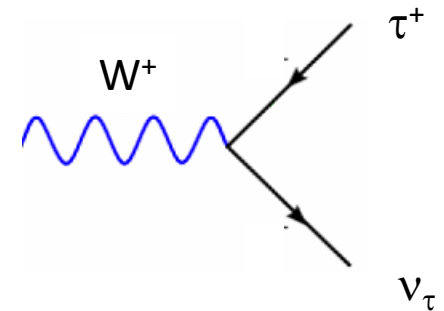
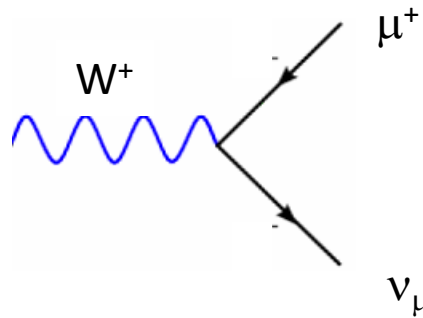
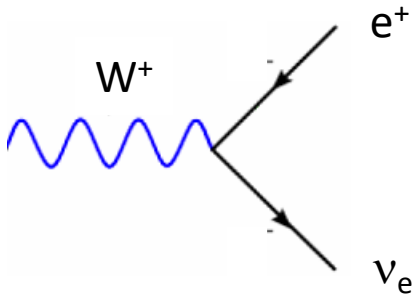


W boson

Vertici con W^\pm

I W^\pm si accoppiano a tutte le particelle eccetto il gluone

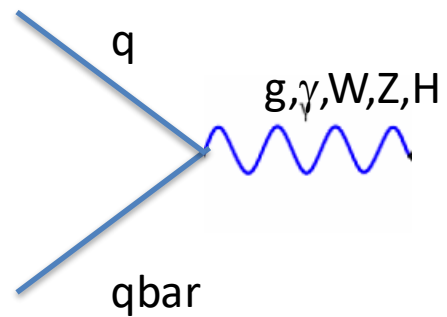
I W^\pm **cambiano** l'identità delle particelle



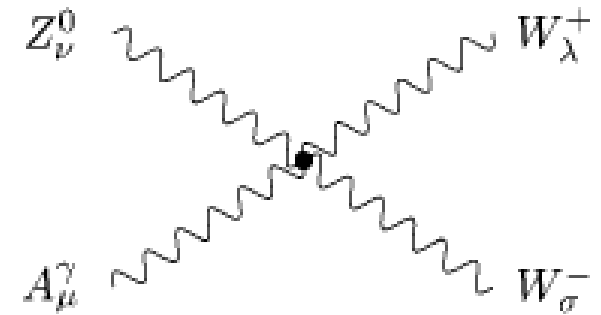
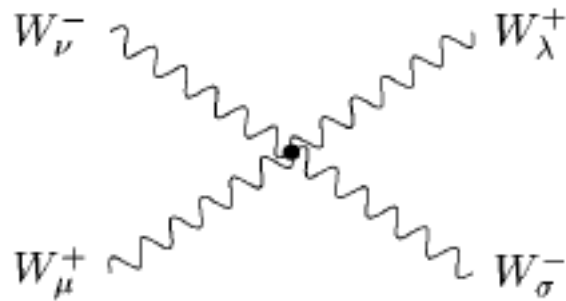
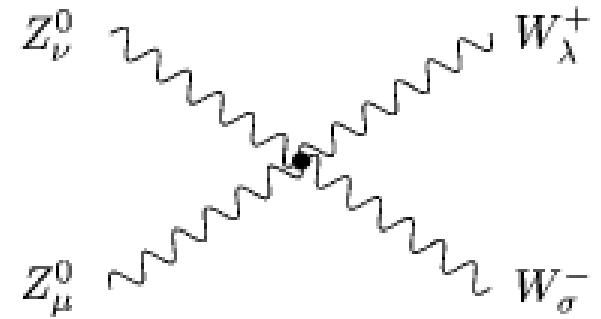
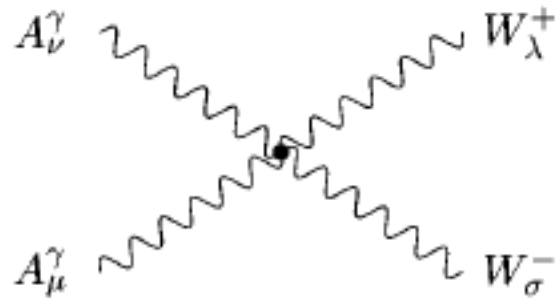
annichilazioni

I vertici si possono vedere anche “al contrario”:
Corrispondono al processo fisico dell’annichilazione

Esempio:



Vertici con più bosoni intermedi



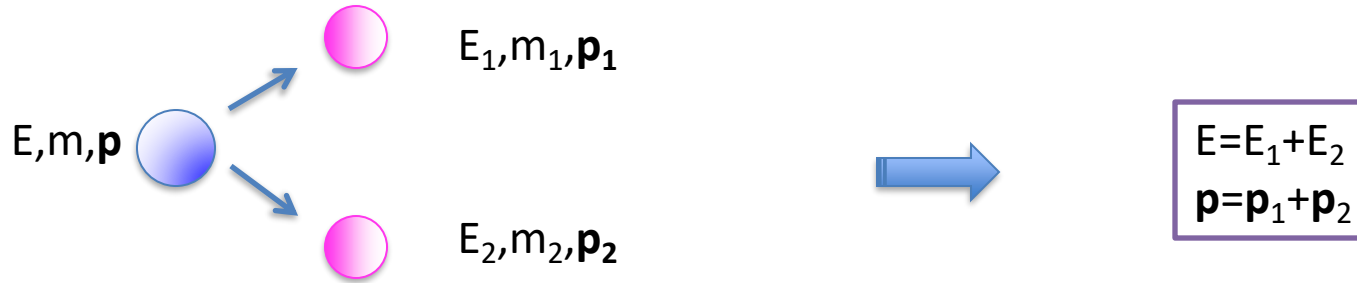
La visualizzazione dei processi elementari tramite grafici si deve a Richard P. Feynman



Cosa si conserva in un decadimento?

Dipende dall'interazione.

Sempre: Energia & quantità di moto



Per ogni particella vale la relazione: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$ che diventa a riposo ($p=0$): $E = mc^2$

Spesso noi usiamo $c=1$: $E^2 = \mathbf{p}^2 + m^2$

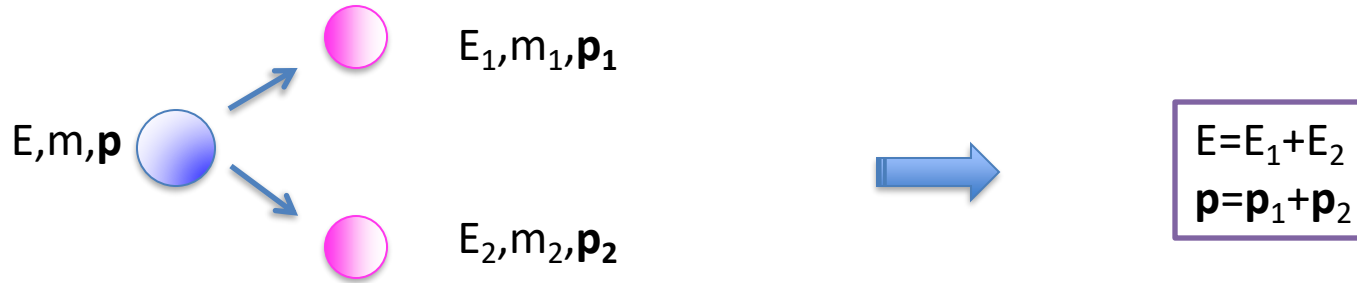


Conoscendo m e p delle particelle finali posso conoscere m della particella che decade

Cosa si conserva in un decadimento?

Dipende dall'interazione.

Sempre: Energia & quantità di moto



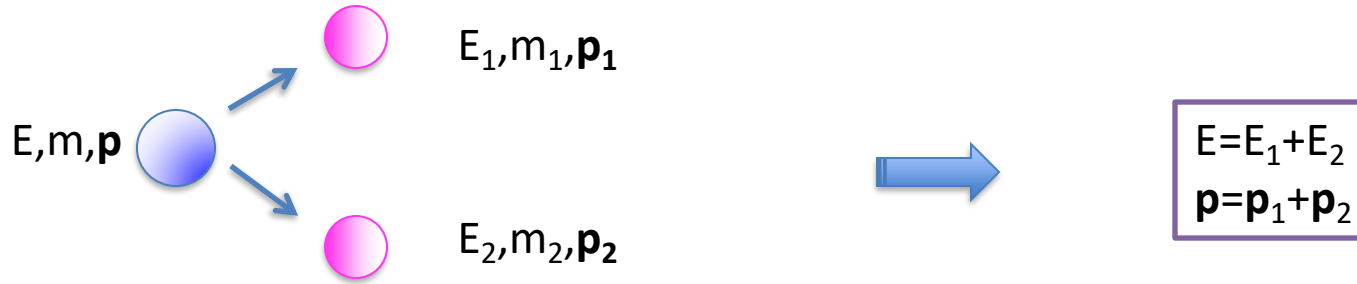
Applichiamo la relazione: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

alla particella 1: $E_1^2 = m_1^2 c^4 + \mathbf{p}_1^2 c^2$ e alla 2: $E_2^2 = m_2^2 c^4 + \mathbf{p}_2^2 c^2$

Cosa si conserva in un decadimento?

Dipende dall'interazione.

Sempre: Energia & quantità di moto



Applichiamo la relazione: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

alla particella 1: $E_1^2 = m_1^2 c^4 + \mathbf{p}_1^2 c^2$ e alla 2: $E_2^2 = m_2^2 c^4 + \mathbf{p}_2^2 c^2$

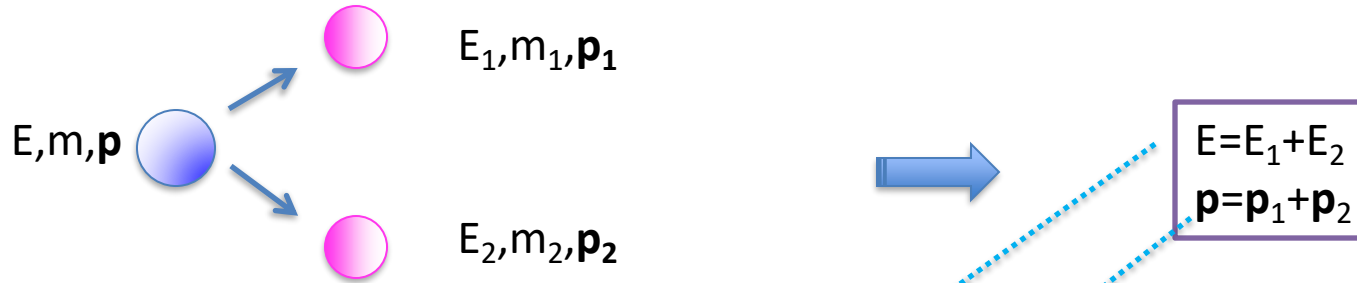
Applichiamola alla particella che decade

$$m^2 c^4 = E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$$

Cosa si conserva in un decadimento?

Dipende dall'interazione.

Sempre: Energia & quantità di moto



Applichiamo la relazione: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

alla particella 1: $E_1^2 = m_1^2 c^4 + \mathbf{p}_1^2 c^2$ e alla 2: $E_2^2 = m_2^2 c^4 + \mathbf{p}_2^2 c^2$

Applichiamola alla particella che decade

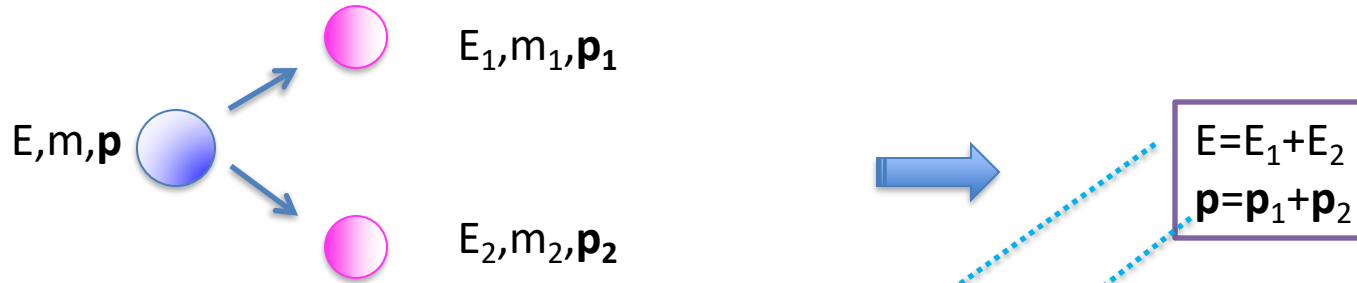
$$m^2 c^4 = E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$$

$$= (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 c^2 = m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2E_1 E_2 - 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 c^2$$

Cosa si conserva in un decadimento?

Dipende dall'interazione.

Sempre: Energia & quantità di moto



Applichiamo la relazione: $E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$

alla particella 1: $E_1^2 = m_1^2 c^4 + \mathbf{p}_1^2 c^2$ e alla 2: $E_2^2 = m_2^2 c^4 + \mathbf{p}_2^2 c^2$

Applichiamola alla particella che decade

$$m^2 c^4 = E^2 - \mathbf{p}^2 c^2$$

$$= (E_1 + E_2)^2 - (\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2)^2 c^2 = m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2E_1 E_2 - 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2 c^2$$

Alcuni numeri

ν_e ν_μ ν_τ

$$m \approx 0$$

e^-

$$m \approx 0.51 \text{ MeV}/c^2 \quad \text{per capirci: } 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

μ^-

$$m \approx 105.65 \text{ MeV}/c^2$$

τ^-

$$m \approx 1776.86 \text{ MeV}/c^2$$

γ

$$m = 0$$

W

$$m \approx 80.385 \text{ GeV}/c^2$$

Z

$$m \approx 91.1876 \text{ GeV}/c^2$$

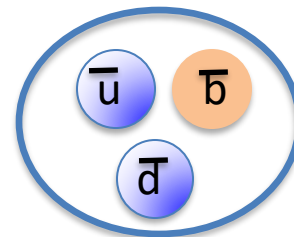
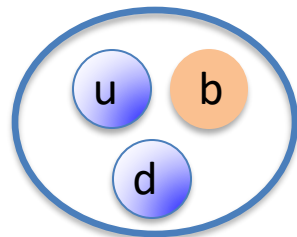
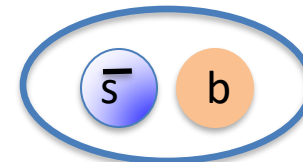
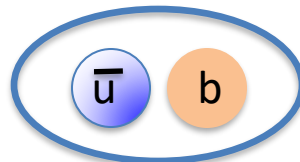
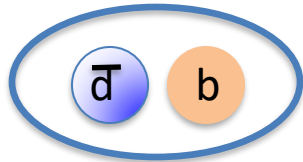
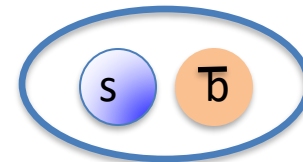
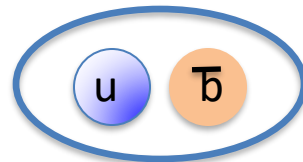
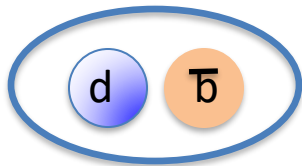
H

$$m \approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$$

Le particelle più belle

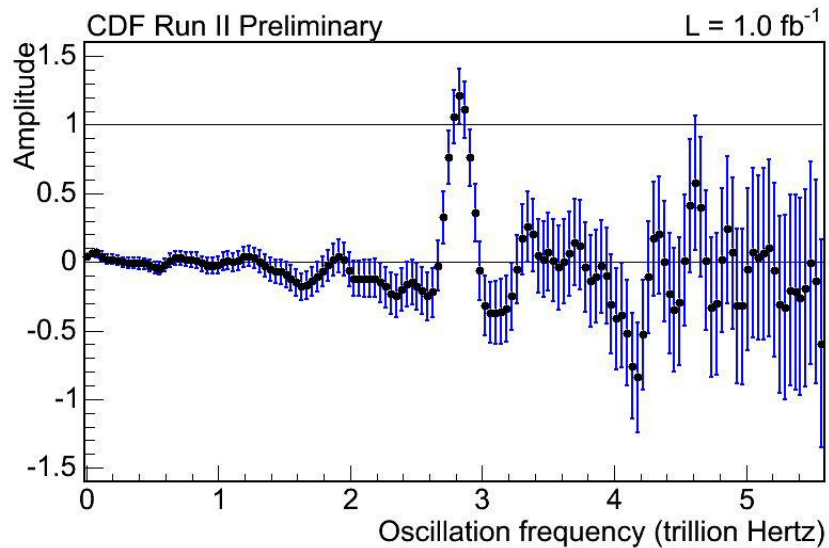
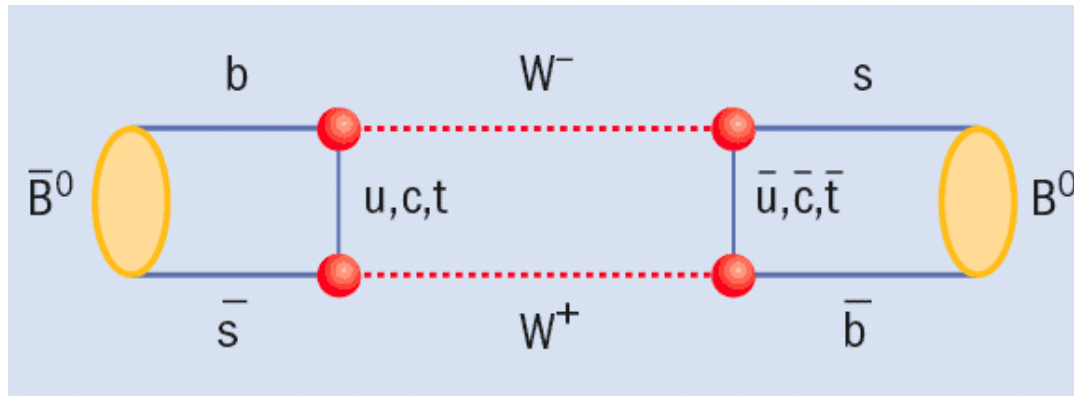


Contengono almeno un quark beauty (o un antibeauty).
Ci interessano in particolare:



Le oscillazioni di particelle neutre

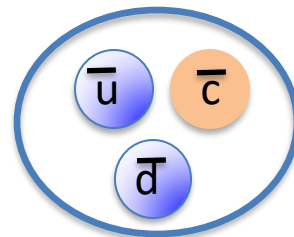
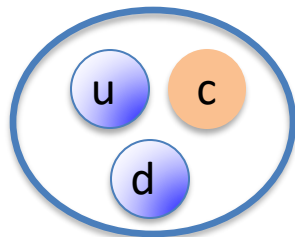
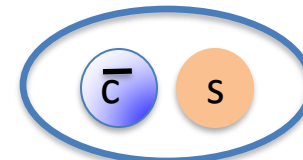
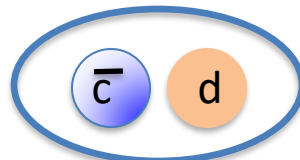
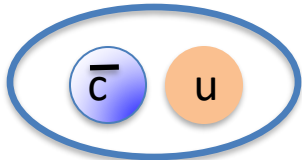
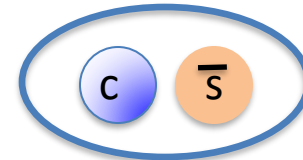
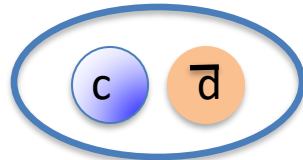
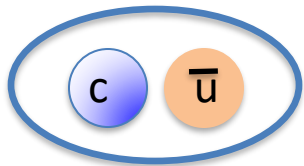
Le particelle possono trasformarsi l'una nell'altra: *oscillano*



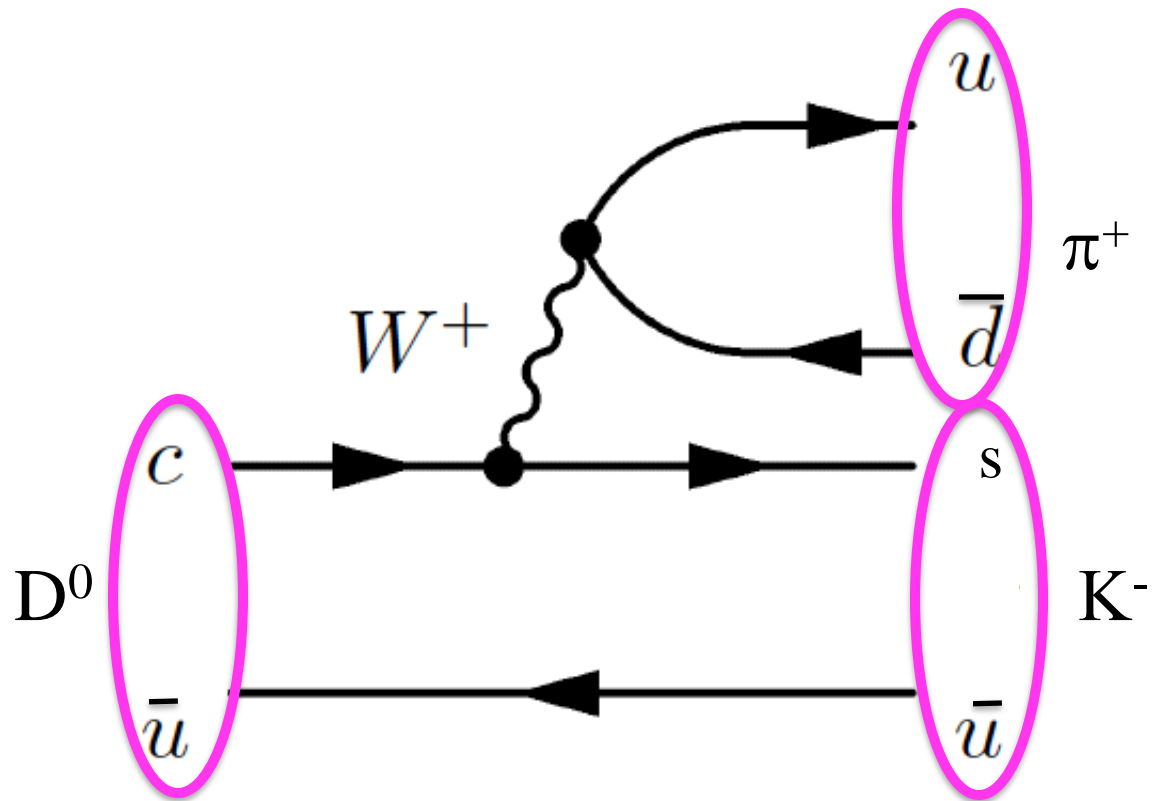
Le particelle più affascinanti



Contengono almeno un quark charm (o un anticharm).
Ci interessano in particolare:



Anche le particelle più affascinanti possono decadere...



Cosa (spero) abbiate imparato

Il Modello Standard ci dice

- quali crediamo siano i costituenti elementari della materia
- quali sono i messaggeri di interazione
- come avvengono a livello elementare le interazioni e cosa si conserva

Ma adesso i fisici cosa fanno?

Il Modello Standard NON ci dice

- perche' le famiglie sono solo 3?
- perche' c'e' tanta differenza tra le masse delle particelle ?
- perche' l'intensita' delle interazioni e' cosi' diversa?
- Il 95% dell'Universo e' costituito da *materia oscura*: quali particelle la compongono?

...E allora...

- cerchiamo nuove particelle
- cerchiamo nuove interazioni
- cerchiamo nuove geometrie