
Le Interazioni Fondamentali delle Particelle Elementari



Roberto Passante
**Dipartimento di Scienze Fisiche ed
Astronomiche, Università di Palermo**

ITI Mottura, Caltanissetta, 27 Marzo 2009

Struttura dell'atomo:

Nucleo dell'atomo:

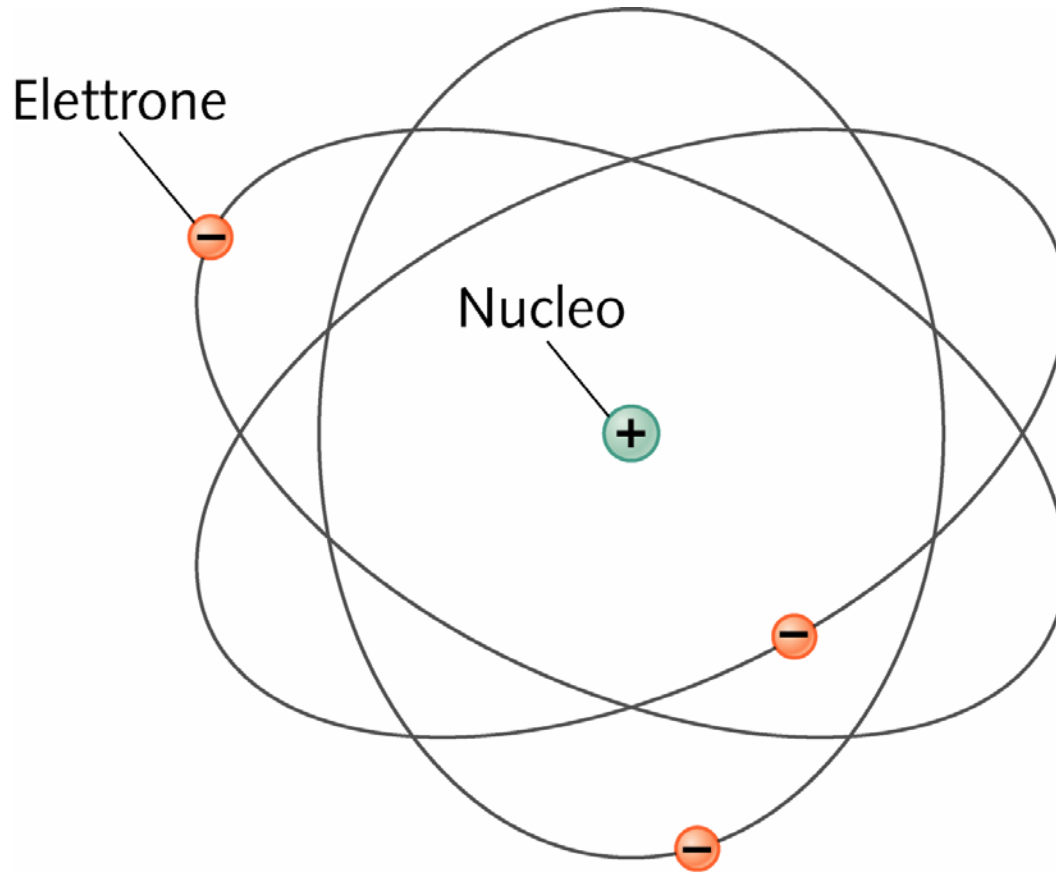
Nel nucleo è concentrata la quasi totalità della massa dell'atomo, e ha carica elettrica positiva.

Il nucleo è costituito da protoni (carica elettrica positiva) e neutroni (elettricamente neutri)

Elettroni:

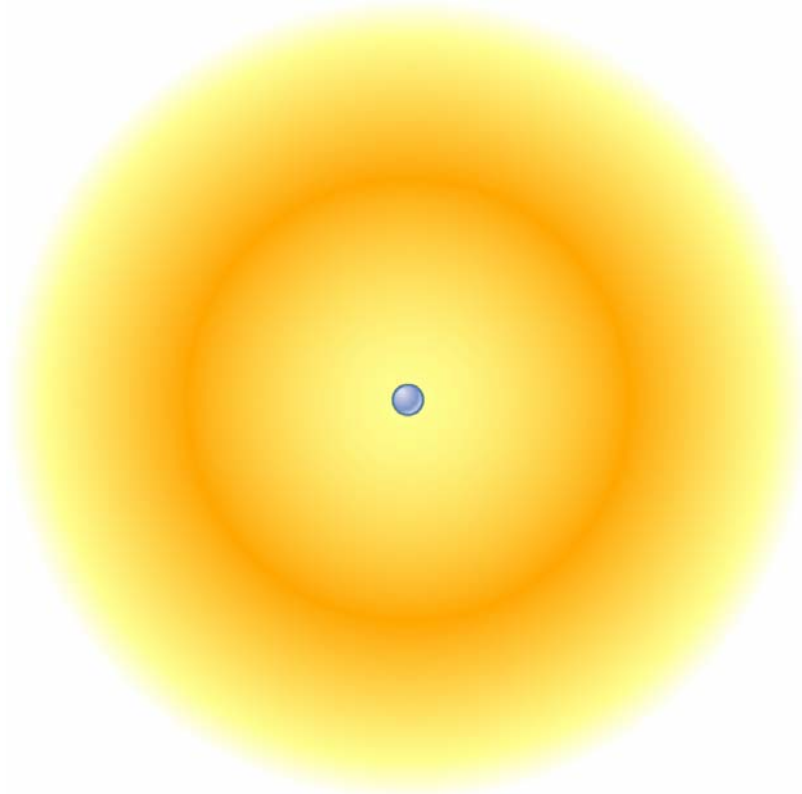
“Orbitano” attorno al nucleo, e hanno carica elettrica negativa.

In circostanza ordinarie l'atomo è elettricamente neutro, in quanto la carica positiva del nucleo è bilanciata dalla carica negativa degli elettroni.



Struttura di un atomo a tre elettroni secondo il modello di Rutherford

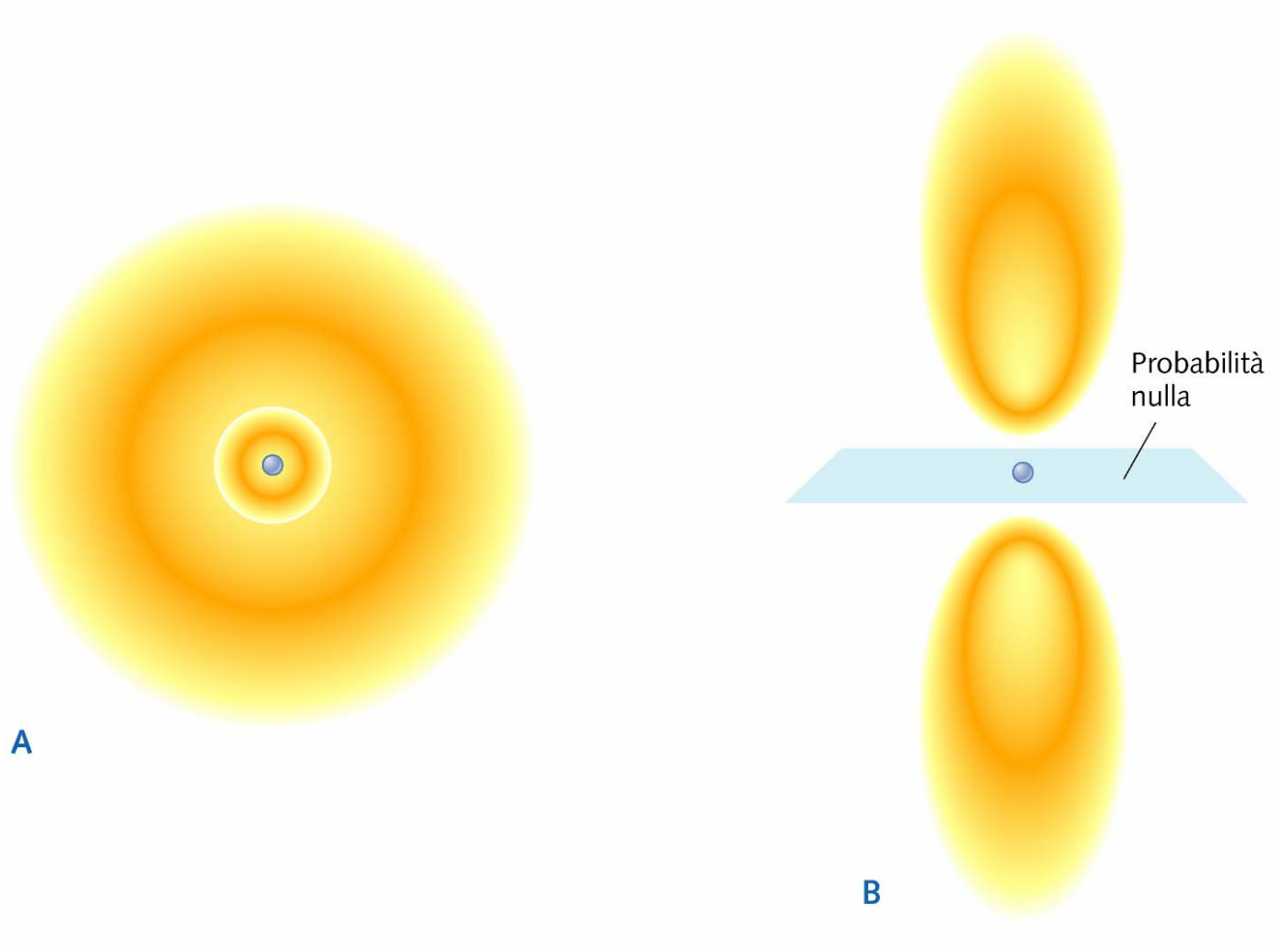
Nella teoria quantistica gli elettroni atomici sono descritti tramite un “nuvola di probabilità”, che fornisce la probabilità di trovare l’elettrone in una certa regione dello spazio attorno al nucleo.



Nube di probabilità per lo stato di più bassa energia (stato fondamentale) dell’atomo di idrogeno.

La densità della nuvola dà la probabilità di trovare l’elettrone in una data posizione.

L’elettrone può essere trovato a qualsiasi distanza dal nucleo.



Nuvola di probabilità dell'elettrone per alcuni stati eccitati (energia più alta) dell'atomo di idrogeno.

Queste “nuvole di probabilità” possono essere ricavate teoricamente risolvendo l’equazione di Schrodinger per gli elettroni soggetti alle forze elettriche dovute al nucleo e a tutti gli altri elettroni.

costante di Planck

potenziale elettrico cui è soggetto l’elettrone

energia dello stato stazionario

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + eV(x) \right) \varphi(x) = E\varphi(x)$$

carica dell’elettrone

funzione d’onda dell’elettrone

massa dell’elettrone

densità di probabilità di trovare l’elettrone nel punto x :

$$|\varphi(x)|^2$$

L'equazione di Schrodinger non soddisfa però i requisiti della teoria della relatività.

In particolare, non è valida quando la velocità delle particelle è vicina alla velocità della luce, o la loro energia è confrontabile con l'energia associata alla loro massa a riposo

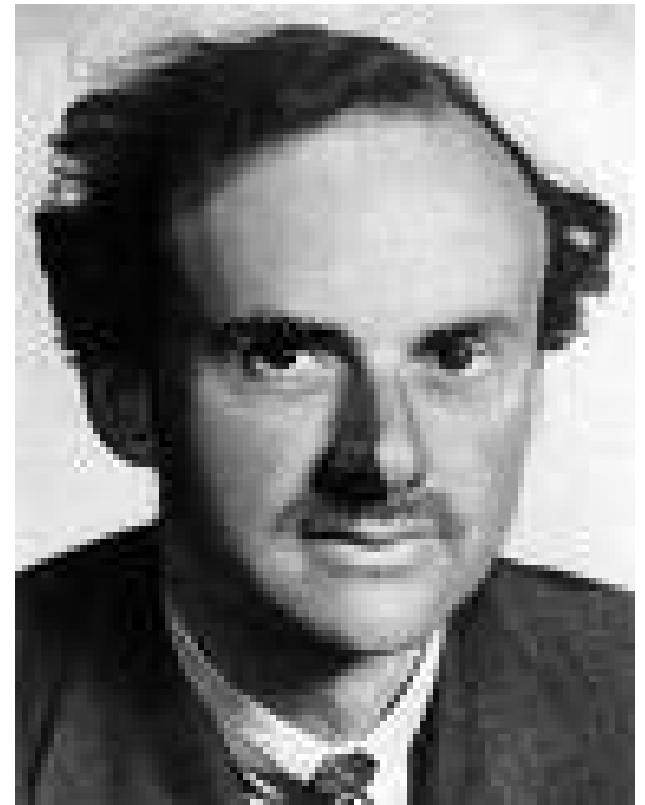
$$E = mc^2$$

In tali casi va usata l'equazione di Dirac.

Equazione di Dirac

$$\{-i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu + mc\}\psi(x) = \frac{e}{c}\gamma^\mu A_\mu\psi(x)$$

quadripotenziale
elettrico



Paul Adrien Maurice Dirac
(1902-1984)

I valori dei livelli di energia degli atomi, calcolati con l'equazione di Dirac, differiscono leggermente da quelli previsti dall'equazione di Schrodinger

→ **struttura fine dei livelli atomici** (confermata sperimentalmente con altissima precisione)

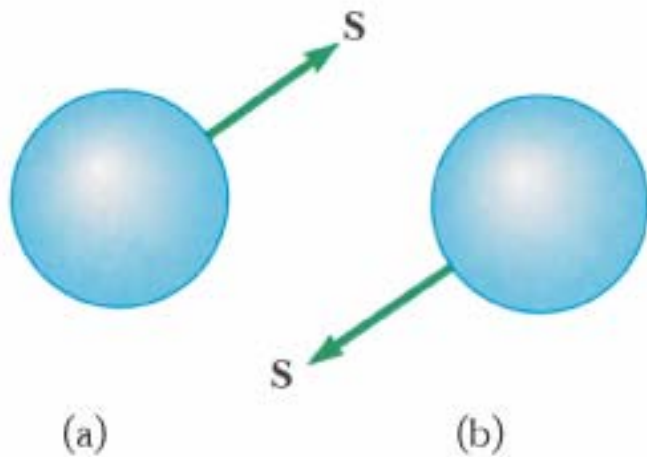
Altre previsioni fondamentali dell'equazione di Dirac:

Spin dell'elettrone, momento magnetico intrinseco e principio di esclusione di Pauli

Esistenza di stati con energia negativa → antiparticelle

(esempio di coppia particella antiparticella: **elettrone-positrone**)

Spin dell'elettrone



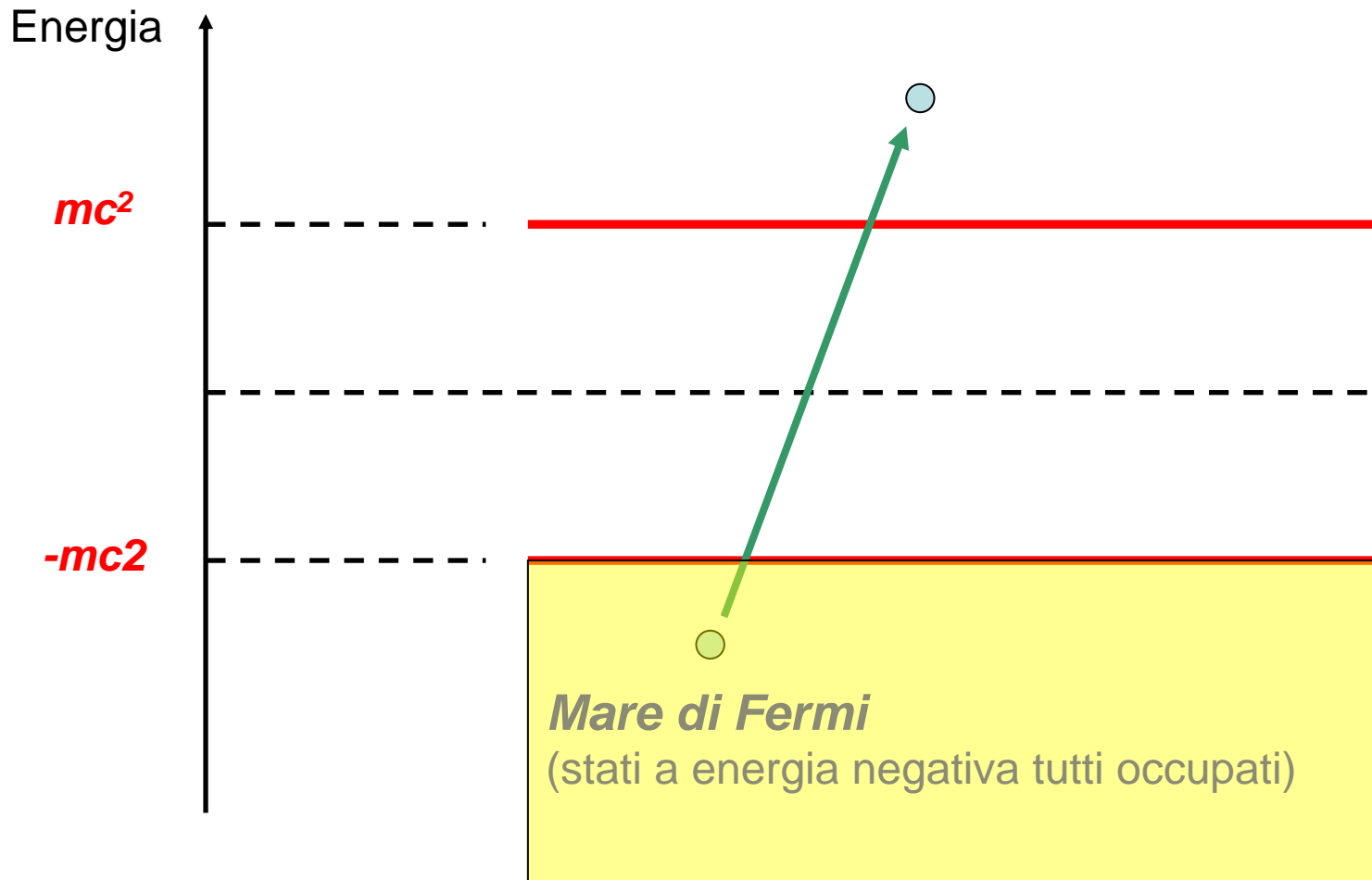
L'elettrone, pur essendo una particella puntiforme, possiede un momento angolare intrinseco e un momento magnetico intrinseco.

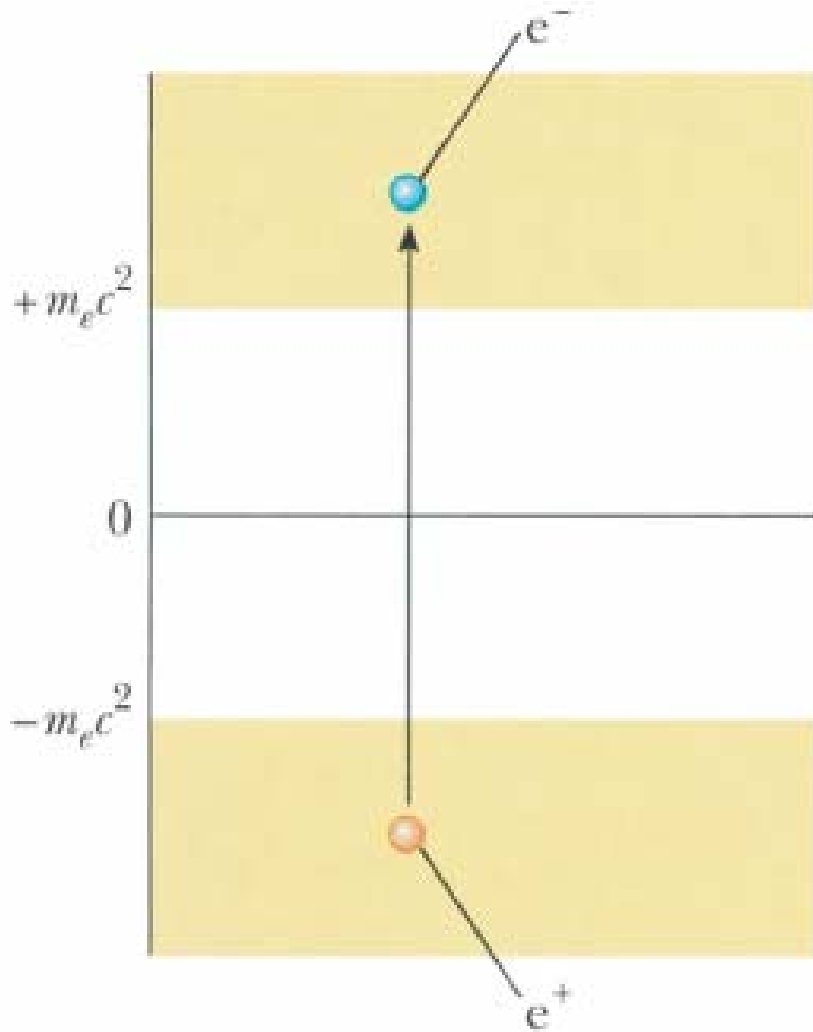
E' come se fosse una trottola che ruota su se stessa.

Lo spin dell'elettrone è quantizzato: rispetto ad una data direzione, può essere solo allineato (a) o anti-allineato (b).

Due elettroni non possono occupare lo stesso stato quantistico (principio di esclusione di Pauli).

Mare di Dirac ed esistenza delle antiparticelle





Passaggio di un elettrone con energia negativa ad uno stato con energia positiva

→ creazione di una particella con energia positiva (elettrone) e mancanza (lacuna) di una particella a energia negativa (antiparticella = positrone, con carica positiva esattamente opposta a quella dell'elettrone)

→ creazione di coppia particella - antiparticella.

Il processo di creazione di una coppia elettrone – positrone richiede una quantità di energia almeno pari a $2m_e c^2$.

Il positrone, cioè l'antiparticella dell'elettrone fu scoperto da Anderson nel 1932 (dopo la previsione teorica di Dirac).

Coppie particella - antiparticella, ad esempio elettrone (e^-) - positrone (e^+), possono essere generate inviando fotoni di altissima energia (raggi gamma) su nuclei atomici.

La soglia di energia per produrre coppie $e^- e^+$ è

$$E = 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$

Le particelle elementari all'inizio degli anni 30 del XX secolo:

<i>Particella</i>	<i>Massa (kg)</i>	<i>Massa (u)</i>	<i>Carica (C)</i>	<i>Simbolo</i>
Elettrone	$9.11 \cdot 10^{-31}$	$5.49 \cdot 10^{-4}$	$-1.6028 \cdot 10^{-19}$	e⁻
Protone	$1.673 \cdot 10^{-27}$	1.007	$+1.6028 \cdot 10^{-19}$	p
Neutrone	$1.675 \cdot 10^{-27}$	1.009	0	n

**u è l'unità di massa atomica: u =
1.66 · 10⁻²⁷ Kg
(la massa del carbonio 12 è pari a 12u)**

Nell'attuale **Modello Standard** delle particelle elementari si suppone che l'elettrone sia una particella veramente elementare (indivisibile), senza alcuna struttura interna.

E il nucleo?

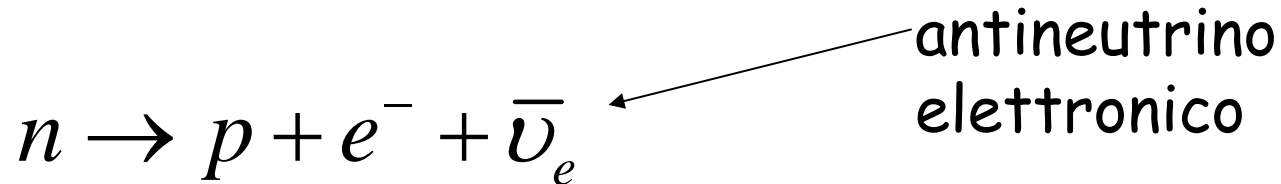
Si sa già, fin dai primi esperimenti sulla radioattività, che il nucleo atomico ha una struttura interna ed è divisibile. Esso è composto da protoni e neutroni.

I costituenti del nucleo, i protoni e i neutroni, sono particelle indivisibili o hanno una struttura interna, essendo a loro volta costituiti da altre particelle?

Esistono altre particelle elementari, oltre gli elettroni, i protoni e i neutroni?

L'elettrone e il protone sono particelle stabili.
Il neutrone è solitamente anch'esso una particella stabile, finché si trova in un nucleo atomico.

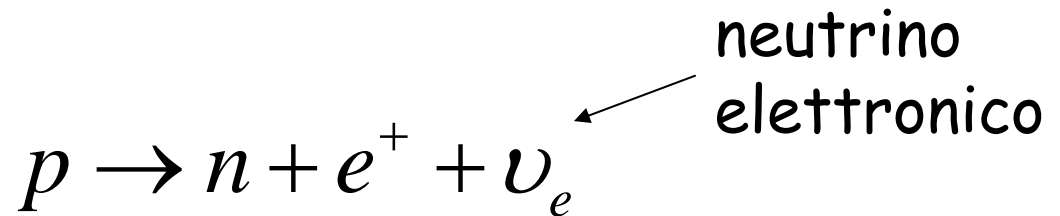
I neutroni liberi sono però instabili:



(decadimento beta)

Tempo di decadimento beta del neutrone: $\tau \sim 11$ minuti

Altro possibile decadimento beta (non è un processo spontaneo, ma richiede che venga fornita energia dall'esterno):



*Questi decadimenti indicano
che il protone e il neutrone
non sono elementari ma sono
costituiti da altre particelle?*



*Esistono altre
particelle elementari,
forse instabili?*



Altre particelle elementari entrano in scena

1937: Anderson scopre il muone (μ): $m_\mu = 207 m_e$
(Conversi, Piccioni e Pacini mostrarono nel 1945 che si tratta di una particella della stessa famiglia dell'elettrone)

1947: Powell e Occhialini scoprono il pione (π)
(particella della famiglia degli adroni)

Il pione esiste in tre stati di carica:

π^+ (carica positiva, massa 139.6 MeV/c²)

π^- (carica negativa, massa 139.6 MeV/c²)

π^0 (neutro, massa 135.0 MeV/c²)

Pioni e muoni sono particelle *instabili*

Vita media del pione negativo (π^-): $2.6 \cdot 10^{-8}$ s

Nel 1947, in sciame da raggi cosmici (il cui studio fu iniziato da Bruno Rossi) fu scoperta la particella K^0 , la prima particella “strana”, che successivamente decade in due pioni carichi.

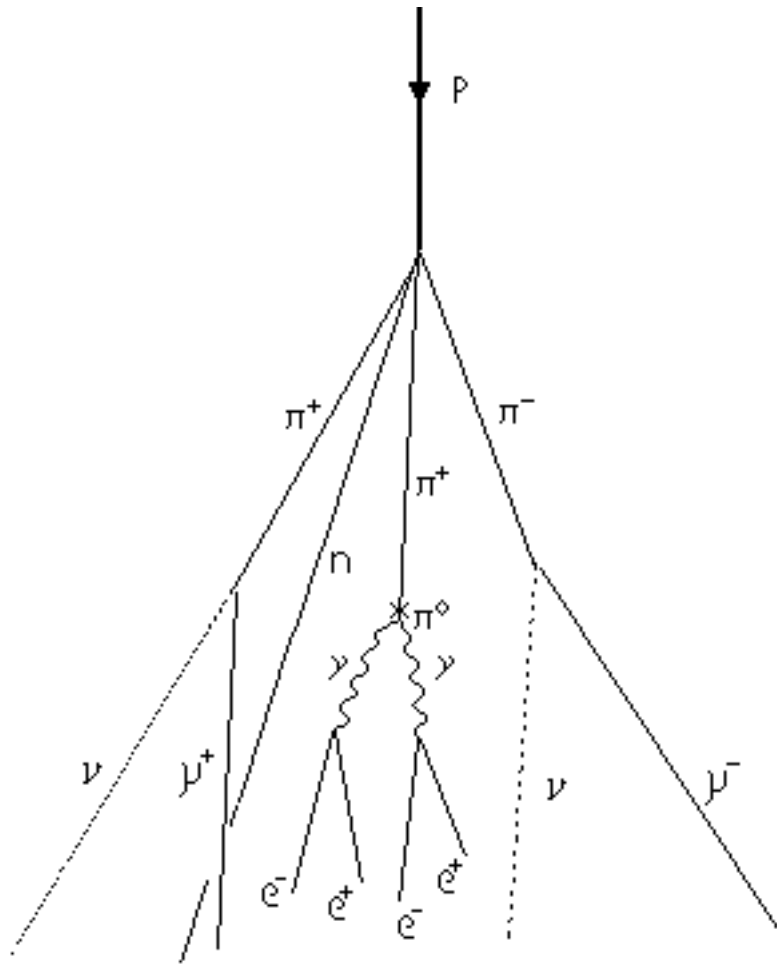
Esempi di decadimenti di particelle instabili:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

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

Moltissime altre particelle (centinaia) sono state trovate nei decenni successivi studiando i raggi cosmici e tramite gli acceleratori di particelle (facendo urtare particelle ad altissima energia se ne producono di nuove, che poi eventualmente decadono).

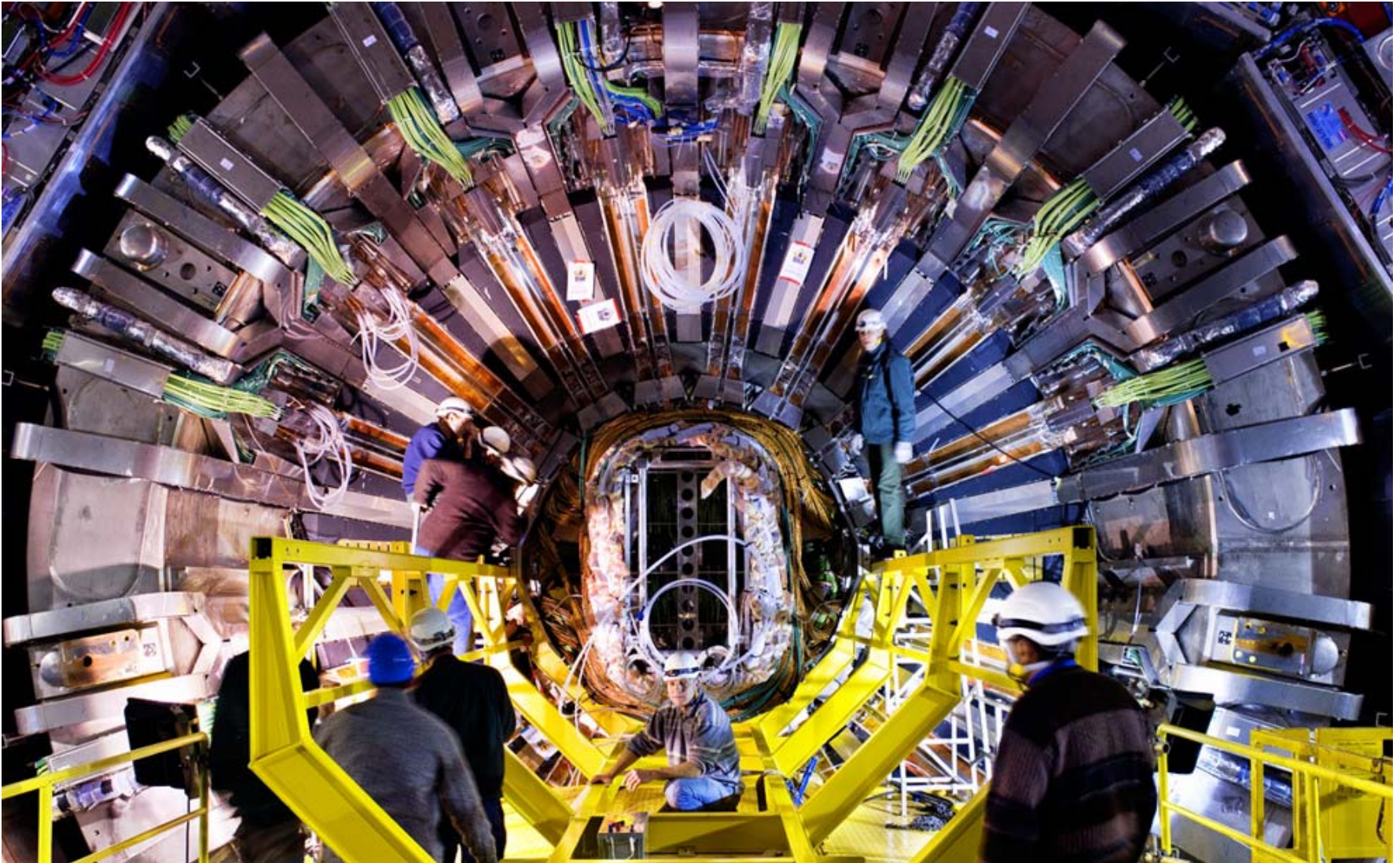
Sono state trovate particelle instabili per vivono per tempi brevissimi, anche dell'ordine di 10^{-23} s.



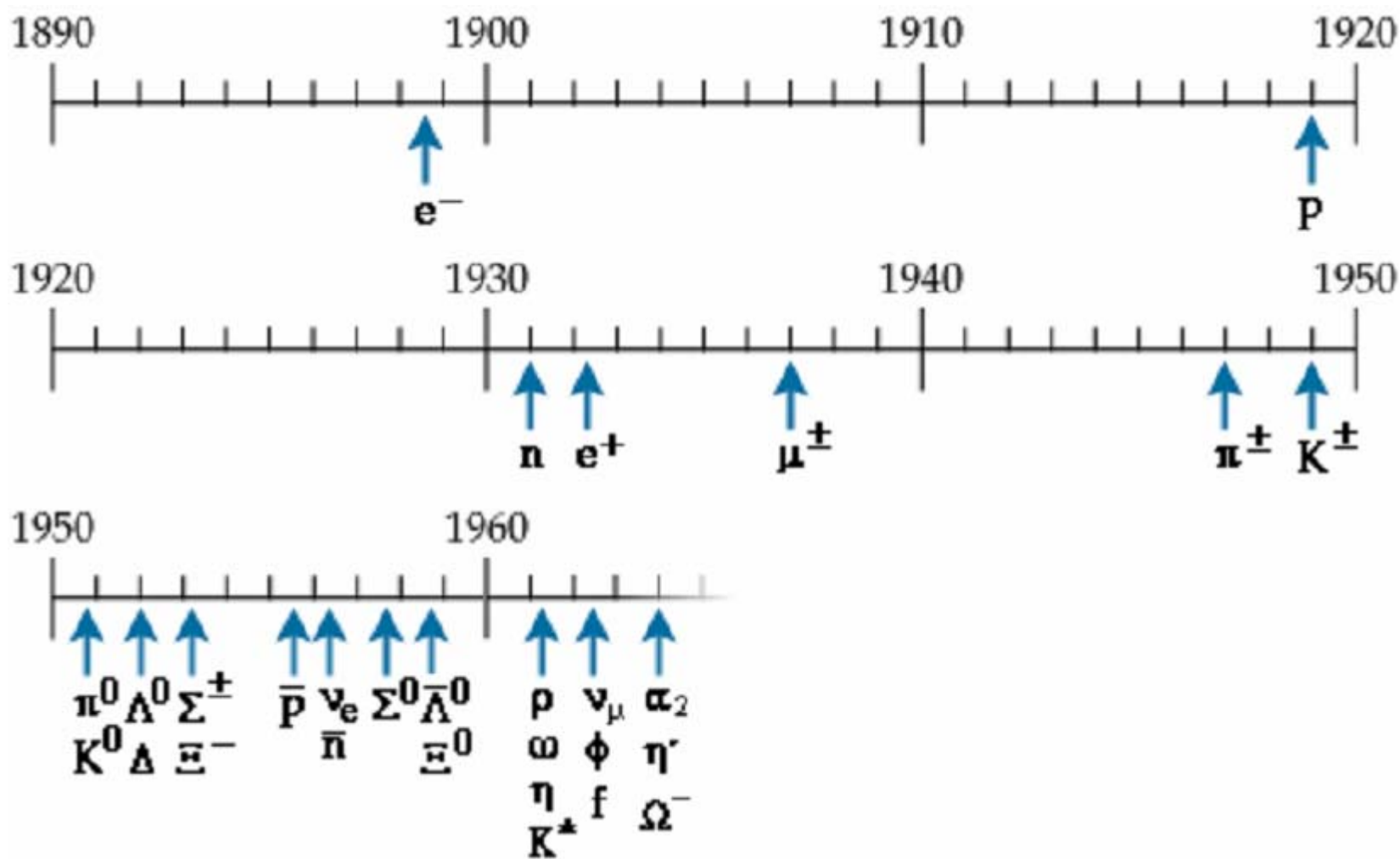
Sciame di raggi cosmici



LHC – Large Hadron Collider (CERN, Ginevra)



LHC – Large Hadron Collider (CERN, Ginevra)



Quali sono le forze con cui le particelle interagiscono tra loro?

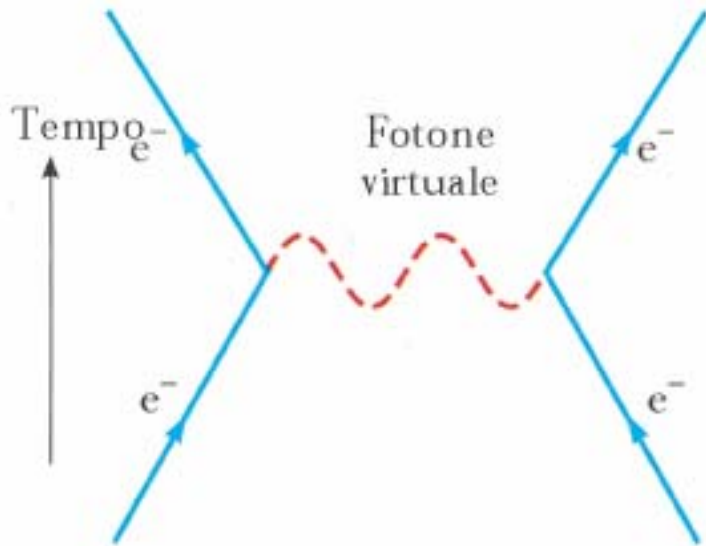
Quali forze tengono unite le particelle che hanno una struttura interna?

Quali forze determinano i decadimenti delle particelle?

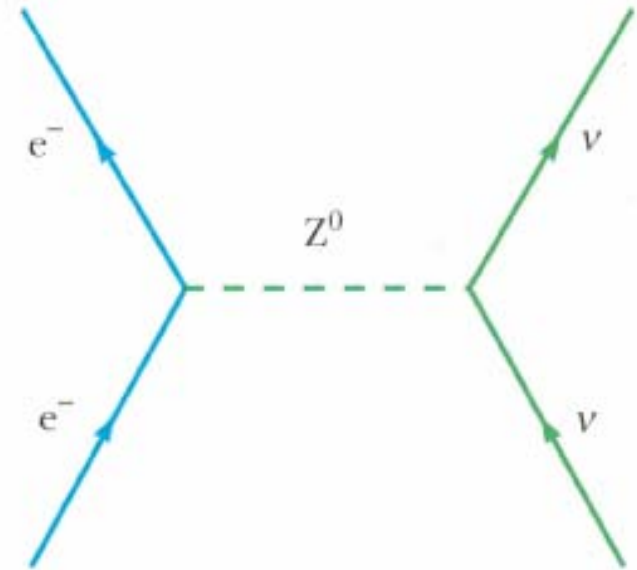
Quali tra le particelle note sono "elementari" e quali sono invece costituite da altre particelle?

Le forze fondamentali della natura

Forza	Intensità	Raggio d'azione	Quanto mediatore della forza
Nucleare forte	1	circa 1 fermi (decrece esponenzialmente)	Gluone
Elettromagnetica	10^{-2}	infinito (decrece con legge di potenza)	Fotone
Nucleare debole	10^{-13}	circa 10^{-3} fermi (decrece esponenzialmente)	Bosoni vettoriali W e Z
Gravitazionale	10^{-42}	infinito (decrece con legge di potenza)	Gravitone (?)



Interazione elettromagnetica tra due elettroni mediata da un fotone.

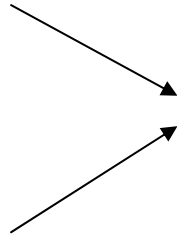


Interazione debole tra un elettrone e un neutrino mediata da un bosone Z.

Modello standard delle interazioni fondamentali

**Elettrodinamica
quantistica**

**Teoria delle
interazioni deboli**



**Teoria elettrodebole
(Glashow, Salam, Weinberg)**

**Simmetria di
Gauge $SU(2) \times U(1)$**

**Quanti del campo:
fotoni, bosoni
vettoriali**

**Cromodinamica
Quantistica
(interazioni forti)**

**Simmetria di
Gauge $SU(3)$**

**Quanti del campo:
Gluoni (cariche di colore)**

E la forza gravitazionale? → teoria delle superstringhe

Le particelle fondamentali del modello standard

Leptoni:

Interagiscono tramite la forza nucleare debole, ma non tramite la forza nucleare forte.

Si pensa siano particelle “elementari”, non costituiti da altre particelle.

Adroni:

Interagiscono sia tramite la forza nucleare debole sia tramite la forza nucleare forte.

Non sono particelle “elementari”, ma sono costituiti da quark.

Quanti delle forze fondamentali:

Sono le particelle responsabili delle forze fondamentali, cioè che “mediano” tali forze.

Esempi.

Leptoni: elettrone, muone, particella tau, neutrini (e relative antiparticelle)

Adroni: protone, neutrone, pioni, kaone, etc (gli adroni sono suddivisi in **mesoni**, che hanno spin intero, e in **barioni**, che hanno spin semintero).

Quanti delle forze: gluoni, fotone, bosoni vettori W^+ , W^- , Z , gravitone.

Quark

Antiquark

Nome	Simbolo	Massa (MeV/c ²)	Carica (e)	Simbolo	Carica (e)
Up	u	4.2	+2/3	\bar{u}	-2/3
Down	d	7.5	-1/3	\bar{d}	+1/3
Charm	c	150	+2/3	\bar{c}	-2/3
Strange	s	1100	-1/3	\bar{s}	+1/3
Top	t	173000	+2/3	\bar{t}	-2/3
Bottom	b	4200	-1/3	\bar{b}	+1/3

Modello a quark

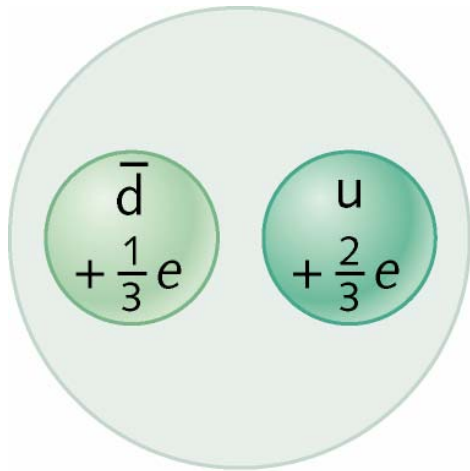
I **mesoni** sono costituiti da due quark (quark-antiquark).

I **barioni** sono costituiti da tre quark.

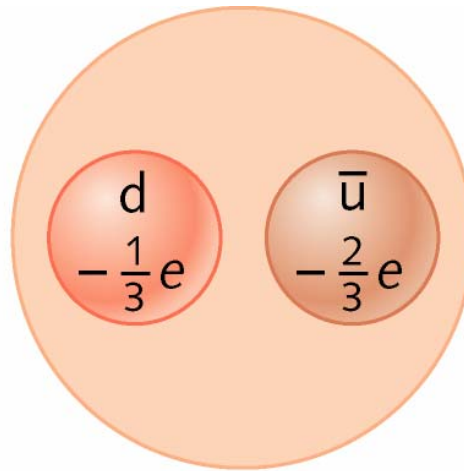
Negli adroni (mesoni e barioni), i quark sono tenuti assieme dalle forze nucleari forti, in cui quanti sono i **gluoni**.

Non sono mai stati osservati singolarmente quark liberi (confinamento), ma solo le loro combinazioni che danno luogo ai barioni e ai mesoni.

I quark hanno carica frazionaria, rispetto alla carica dell'elettrone. Non è mai stata osservata una particella con carica frazionaria.



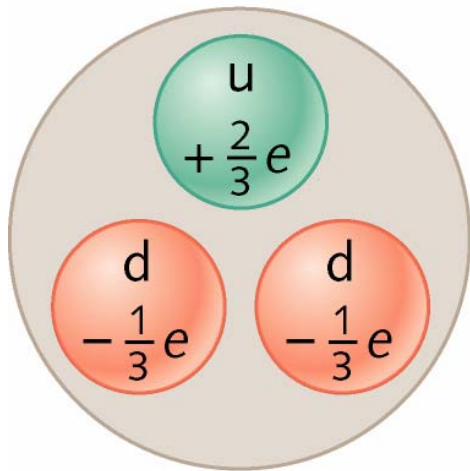
π^+



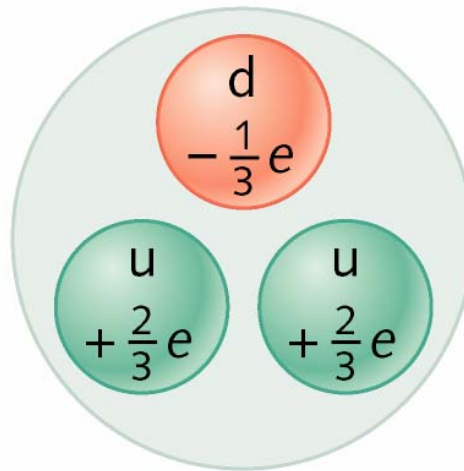
π^-

Mesoni

Struttura a quark
di alcuni adroni



Neutroni



Protoni

Barioni

$p = (uud)$

$n = (udd)$

Le tre famiglie di quark e di leptoni

Perchè 3 famiglie di fermioni?

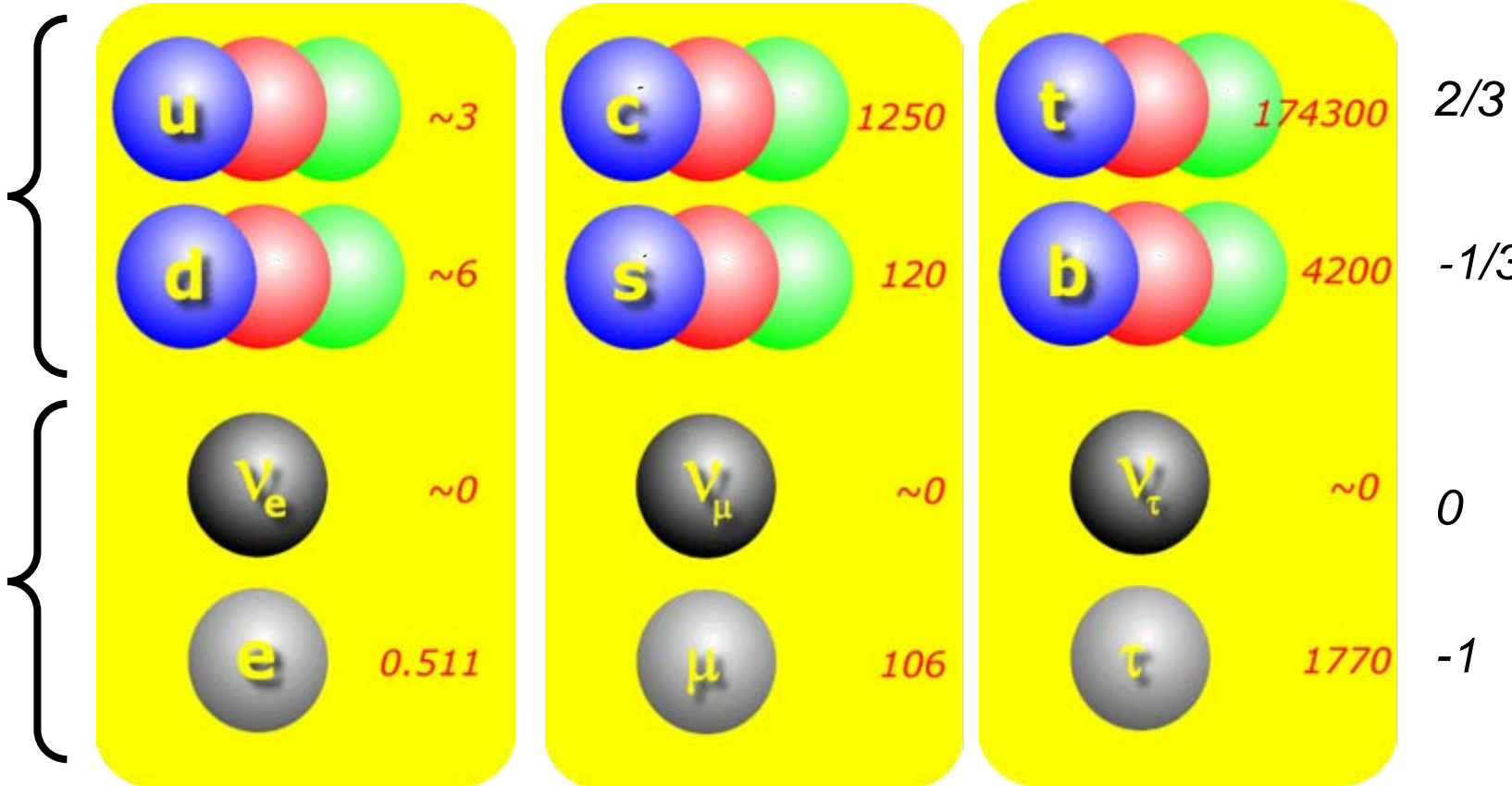
1a generazione

2a generazione

3a generazione

Quark

Leptoni



Ogni quark può esistere in tre differenti stati di “colore”:

rosso, blu, verde

Il colore di un quark è la sua proprietà che ne determina l'interazione nucleare forte (analogamente alla carica elettrica, che ne determina l'interazione elettromagnetica)

Le tre famiglie di leptoni e di quark hanno molte proprietà simili (passando da una generazione alla successiva la massa delle particelle aumenta però considerevolmente).

Ciò che differenzia le tre famiglie è essenzialmente la massa della particelle.

In qualche modo sono repliche l'una dell'altra.

Lo schema concettuale del modello standard è composto da un numero relativamente contenuto di particelle “elementari”:

- Particelle fondamentali: le tre generazioni di leptoni e le tre generazioni di quark (con le relative antiparticelle)
- Quanti di forza (interazioni elettrodeboli e interazioni forti)

Perché vi sono tre famiglie di quark e tre famiglie di leptoni?

Esistono altre generazioni di particelle (molto più massive, e che quindi richiedono energie ancora maggiori per essere generate), che ancora non sono state scoperte?

E' possibile costruire un quadro coerente e ancora più semplice per tutte le particelle note?

Il modello standard prevede l'esistenza di una nuova particella elementare, il bosone di Higgs, che ancora non è stata rivelata.

Inclusione della forza gravitazionale, descritta dalla teoria della relatività generale di Einstein.