

# La “statistica” delle particelle elementari

Eq. Klein-Gordon per particelle di spin 1

Eq. Dirac per particelle di spin 1/2

produzione in coppia di particelle e antiparticelle

## Statistica di Bose-Einstein: bosoni

per i bosoni non vale il principio di esclusione di Pauli: bosoni identici possono coesistere in numero arbitrario nello stesso stato quantistico, realizzando quello che si dice un condensato di Bose-Einstein

## Statistica di Fermi-Dirac: fermioni

per i fermioni vale il principio di esclusione di Pauli: due fermioni identici non possono condividere lo stesso stato quantistico

è possibile produrre o assorbire un singolo bosone

non è possibile produrre o assorbire un singolo fermione

⇒ le interazioni devono essere mediate da bosoni

# mediatori delle interazioni

azione a distanza e azione a contatto

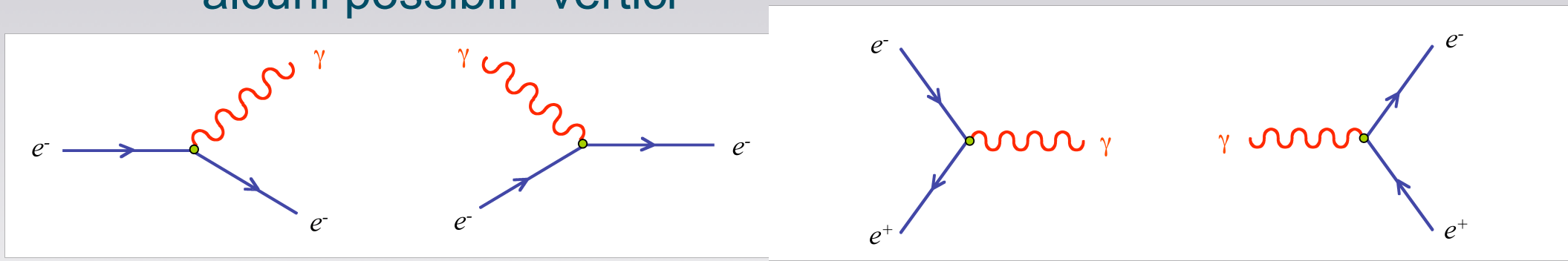
“the great absurdity” newtoniana

i campi di forza

il fotone come mediatore delle interazioni  
elettromagnetiche

rappresentazione con i “grafici di Feynman”

alcuni possibili “vertici”



La rappresentazione delle antiparticelle e la regola della  
“rotazione” dei rami

# i grafici di Feynman

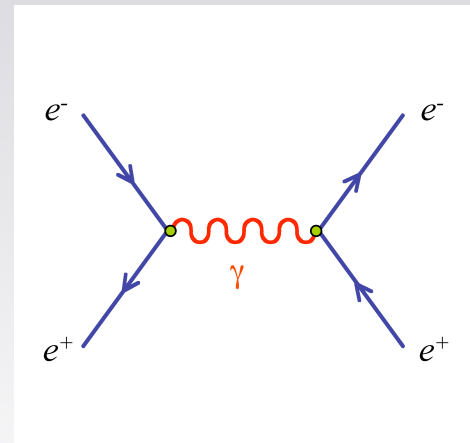
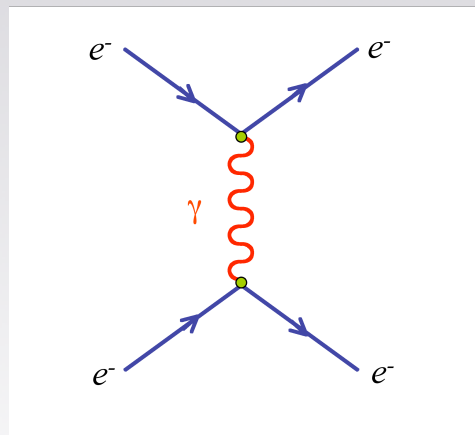
Per un mediatore a massa nulla, la conservazione della massa invariante impedisce che i processi con un solo vertice coinvolgano tre particelle reali

Una delle particelle deve essere virtuale o “off mass shell”

Combinando almeno due vertici, si possono invece ottenere le interazioni tra particelle reali

la diffusione (o scattering)

l'annichilazione o la creazione di coppie



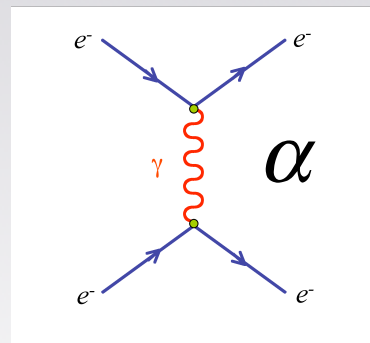
# I grafici di Feynman come regole di calcolo

L'ampiezza di una reazione si calcola assegnando ad ogni vertice un peso pari alla radice della costante di accoppiamento, per l'elettrodinamica  $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$

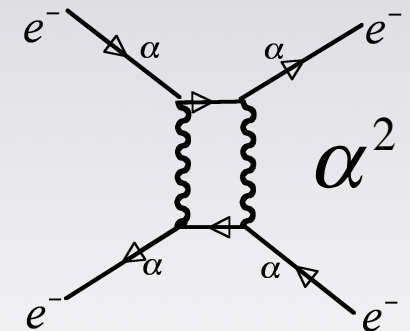
I rami interni contribuiscono con il "propagatore", che dipende dal quadrimpulso trasferito (o trasportato) e dalla massa del mediatore coinvolto

L'ampiezza è data dal prodotto dei vertici e del propagatore

grafici del primo ordine

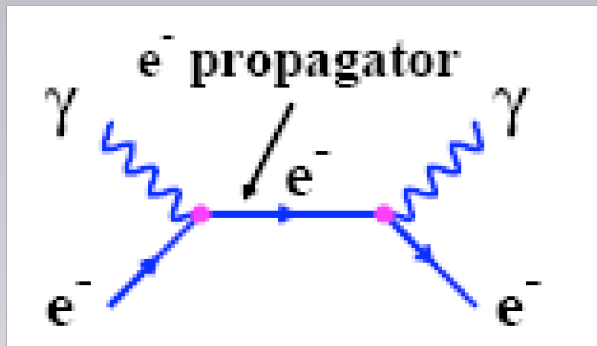


grafici di ordine superiore

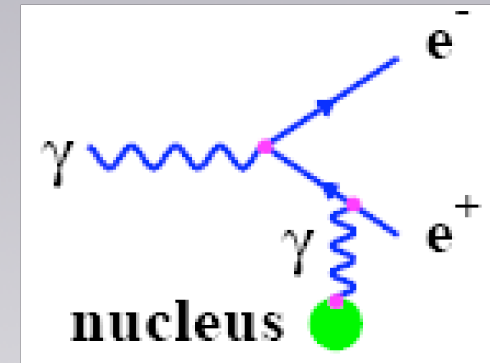


# alcuni processi elettromagnetici

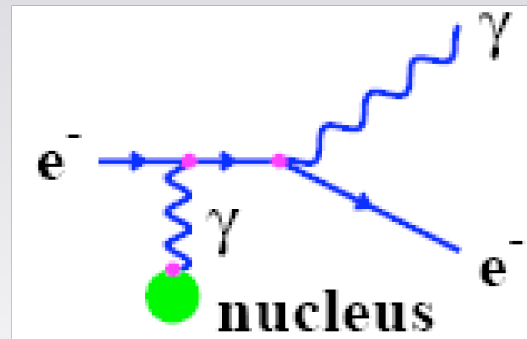
effetto Compton



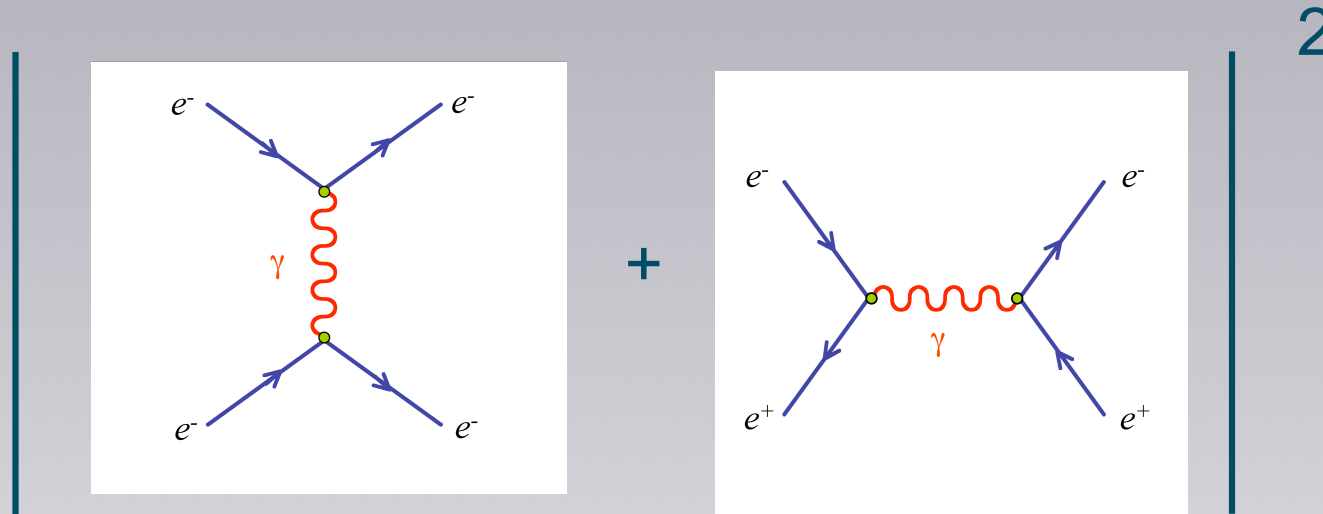
produzione di coppie



irraggiamento



# Interferenza tra grafici



I due processi differiscono solo per la parte “virtuale”, che per definizione non può essere osservata

Quindi per la meccanica quantistica non sono distinguibili  
(non sono separabili da un punto di vista osservativo)

Per calcolare le probabilità si devono sommare le ampiezze (complesse) e poi farne il quadrato

# le interazioni nucleari

Forza molto più intensa di quella repulsiva tra le cariche elettriche dei protoni, capace di tenere insieme i nucleoni in una regione spaziale di qualche fm di raggio.

Per distanze dell'ordine del fm, la formula di Rutherford non riproduce i dati sperimentali.

Ipotesi di Yukawa (1935):

interazione forte ma a corto range, scambio di una particella pesante tra nucleoni.

il range della forza di Coulomb è infinito: la dipendenza del campo e.m. dall'inverso del quadrato della distanza è legata alla massa nulla del fotone.

un mediatore dotato di massa ha un range che diminuisce esponenzialmente con la distanza

chi fornisce l'energia per generare la massa del mediatore?

$$R \simeq c\Delta t, \quad \Delta E = Mc^2$$

$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar \rightarrow Mc^2 \simeq \frac{\hbar c}{R} = 100 - 200 \text{ MeV}$$

# il mediatore delle interazioni forti

Yukawa chiama “mesotrone” questa particella, che deve avere una massa intermedia tra quella dell’elettrone e del protone

Fine anni '30: osservazione in camera a nebbia di una particella di massa di circa  $100 \text{ MeV}/c^2$

E' il mesotrone di Yukawa?

Per confermarlo, questa particella deve interagire forte con la materia nucleare

Come è possibile mettere in luce questo comportamento?



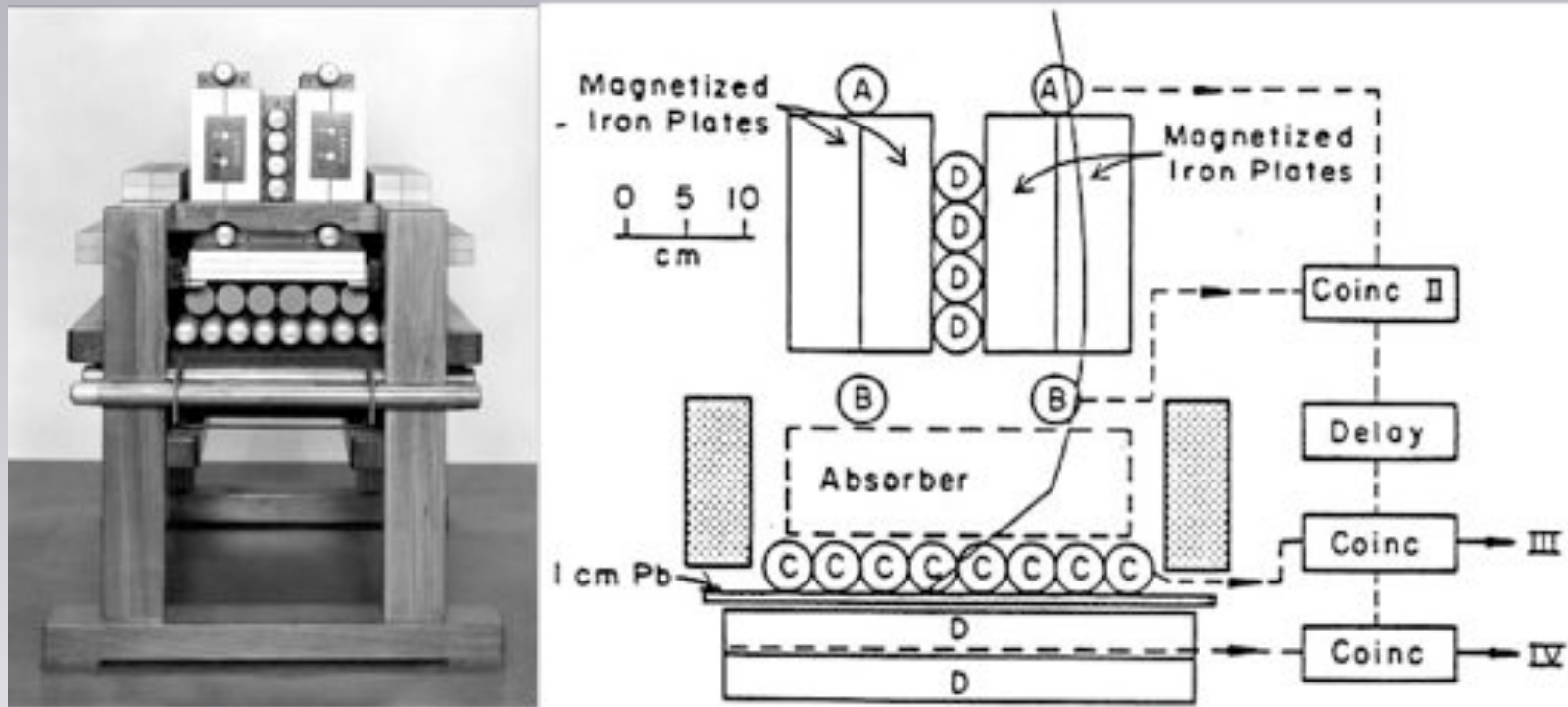
# Ipotesi di Tomonaga e Araki

Comportamento a fine percorso dei mesotroni positivi o negativi:

- i mesotroni negativi orbitano intorno ai nuclei ad un raggio di Bohr molto minore degli elettroni, e possono quindi interagire forte col nucleo ed essere assorbiti come previsto dalla teoria di Yukawa
- i mesotroni positivi non possono avvicinarsi ai nuclei, e quindi rallentano attraverso una serie di interazioni repulsive fino a fermarsi. Essendo particelle instabili, devono decadere.

Le prime osservazioni sperimentali sembrano confermare questa ipotesi

# L'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni



l'esperimento smentisce il comportamento previsto da T-A:  
con assorbitori a basso Z (carbonio) si osservano i  
decadimenti dei mesotroni di entrambi i segni

# il mediatore delle interazioni forti

La vera particella di Yukawa viene identificata poco dopo e chiamato pione.

Viene osservata in emulsioni fotografiche l'intera catena di decadimento: il pione decade in un muone (e un neutrino). Il muone decade a sua volta in un elettrone (e due neutrini).

il muone è in realtà una replica pesante dell'elettrone

E' la prima manifestazione del "problema delle famiglie"

# La zoologia delle particelle

Con la scoperta del vero mediatore, il pione, poco più pesante del muone (140 vs 105 MeV), si avrebbe la auspicata “chiusura” della fisica subnucleare:

3 particelle di materia (protone, neutrone, elettrone) e le interazioni e.m. e forte (mediate da fotone e pione) bastano a spiegare tutta la fisica della materia che possiamo osservare nel mondo in cui viviamo

Ma la scoperta della prima replica pesante (a che serve?) non rimane una curiosità isolata. Presto anche nuove particelle adroniche instabili (dette “strane”) vengono osservate, prima nei raggi cosmici, poi nei nuovi potenti acceleratori.

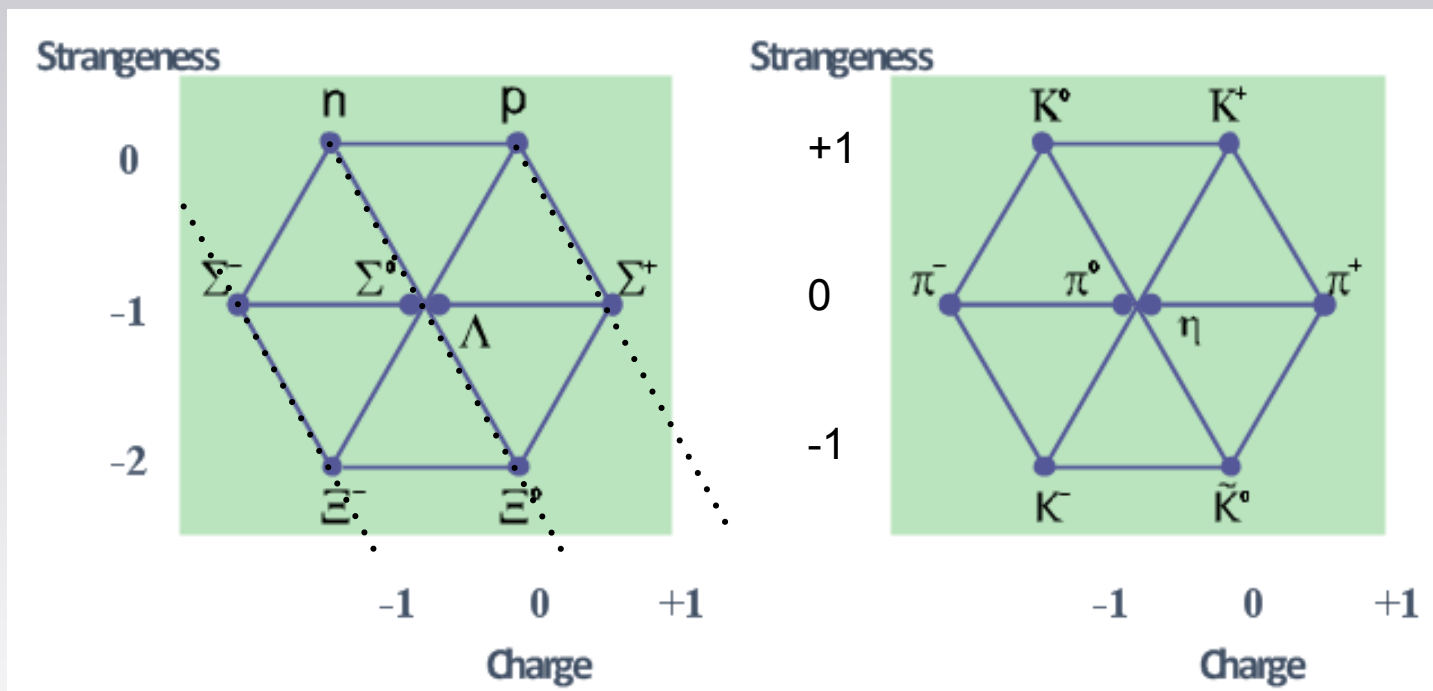
Nasce una zoologia di particelle adroniche che non sembra avere una spiegazione logica.

# Gli ottetti

Si cominciano però ad evidenziare delle strutture, degli “ottetti”

Barioni: particelle (fermioni) più pesanti del protone

Mesoni: particelle (bosoni) di massa intermedia



# Un gruppo di algebra astratta...

Gell-Mann si accorge che la struttura ad ottetti si può ottenere a partire da un gruppo di trasformazioni algebriche,  $SU(3)$  o gruppo Speciale Unitario di grado 3

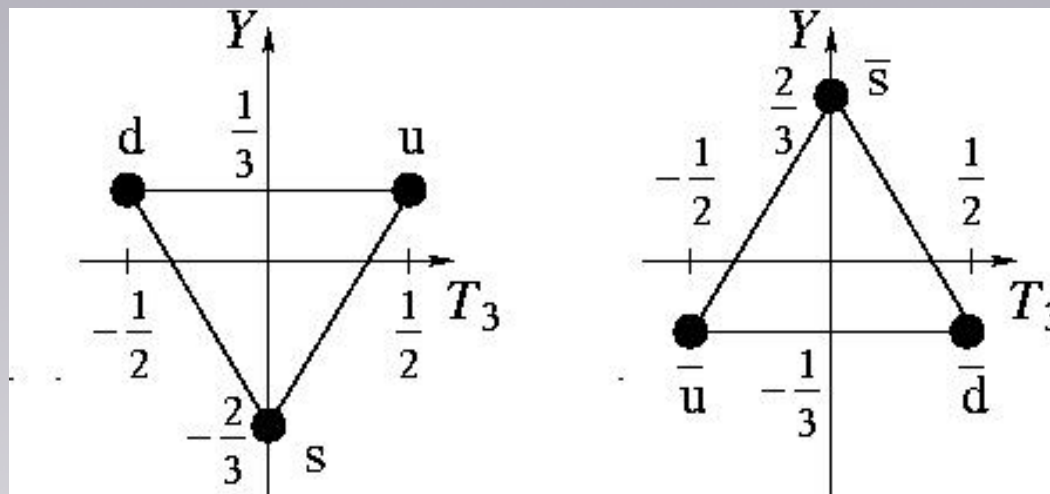
Il trionfo del modello di Gell-Mann si ha con la predizione e la seguente scoperta di una particolare particella, l'Omega, di cui Gell-Mann è in grado di prevedere con impressionante accuratezza la massa, oltre che gli altri numeri quantici (carica, spin, stranezza)

La rappresentazione fondamentale di questo gruppo è però costituita da 3 soli oggetti (assieme ai loro coniugati) nei quali non rientrano le particelle osservate

Se la Natura ha deciso di utilizzare questa struttura algebrica (o simmetria), dove si nascondono questi sei oggetti?

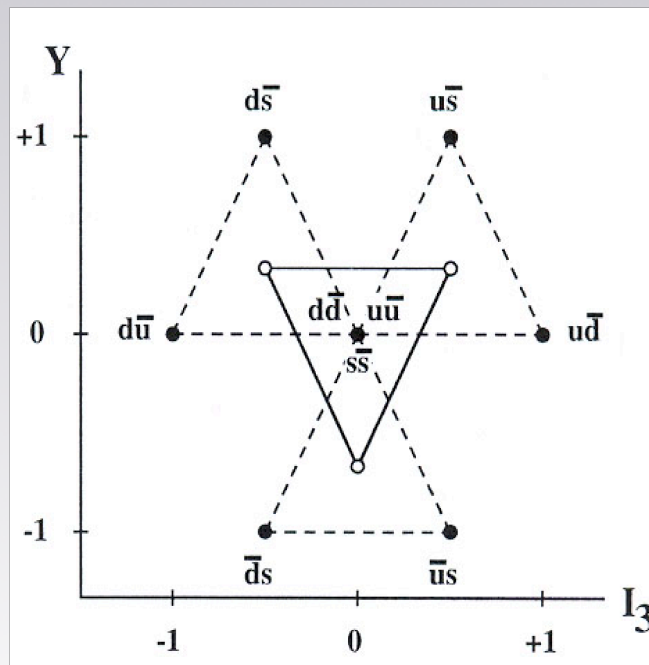
Gell-Mann e Zweig identificano questi oggetti come i costituenti elementari degli adroni, i quark.

# il modello a quark

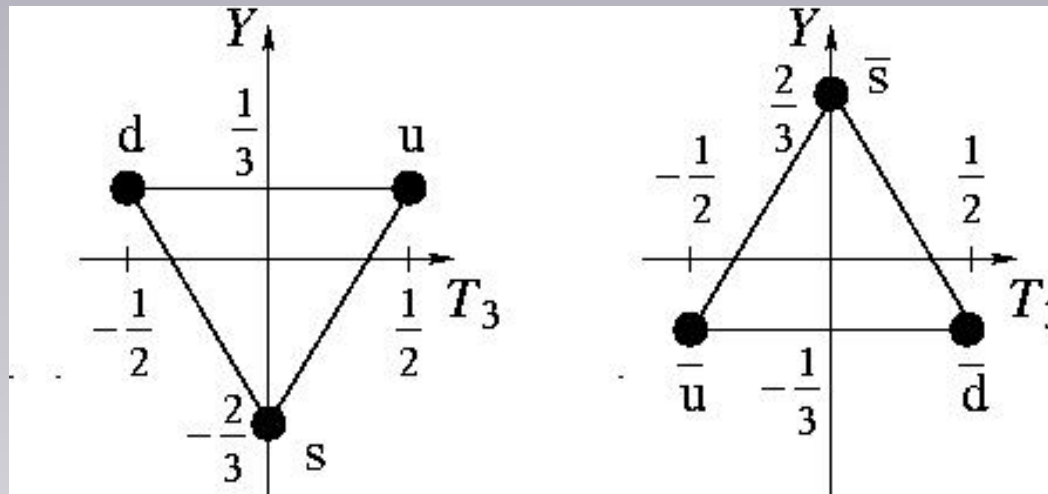


mesoni

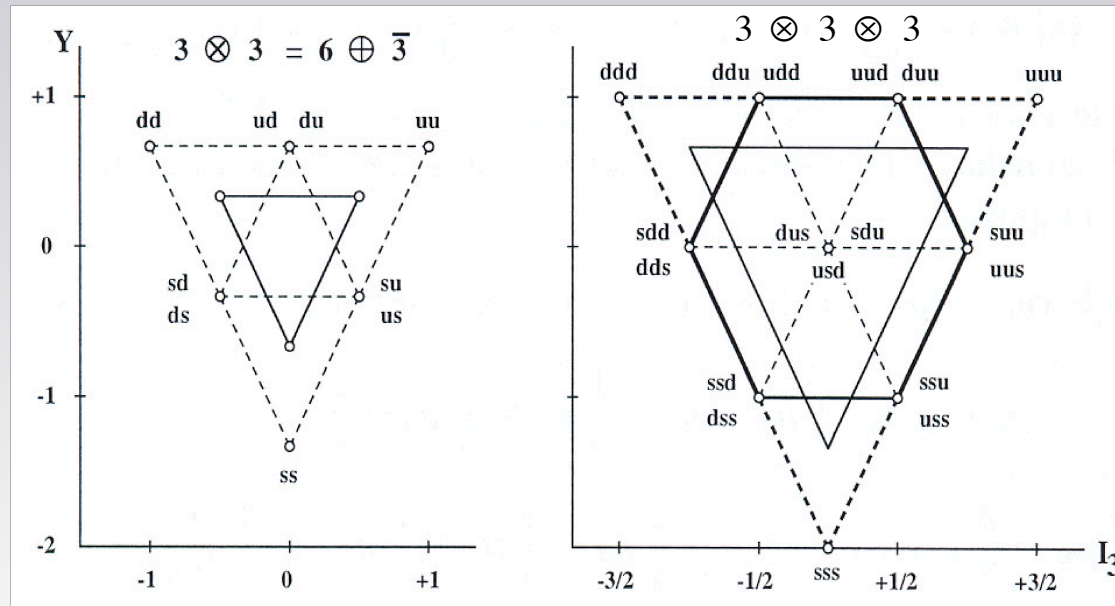
$$3 \otimes \bar{3}$$



# il modello a quark



barioni





# quark e partoni

Ma i quark hanno una realtà fisica o si tratta solo di un artificio matematico?

In altre parole, si possono osservare i quark isolati?

I quark devono avere carica frazionaria e non sono mai stati osservati (né lo saranno mai, se la QCD è corretta)

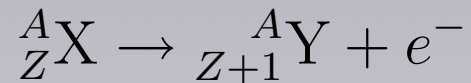
Feynman e Bjorken però trovarono il modo di evidenziarli sperimentalmente anche all'interno degli adroni

Lo scattering profondamente anelastico (SLAC - 1969), una replica moderna dell'esperimento di Rutherford

Il modello a quark-partoni

Il gluone, mediatore “elementare” dell'interazione forte, la forza di “colore” o cromodinamica quantistica.

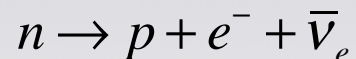
# i decadimenti beta e i neutrini



$$E_e = \sqrt{(p_e c)^2 + m_e^2 c^4} \simeq (M_X - M_Y) c^2$$

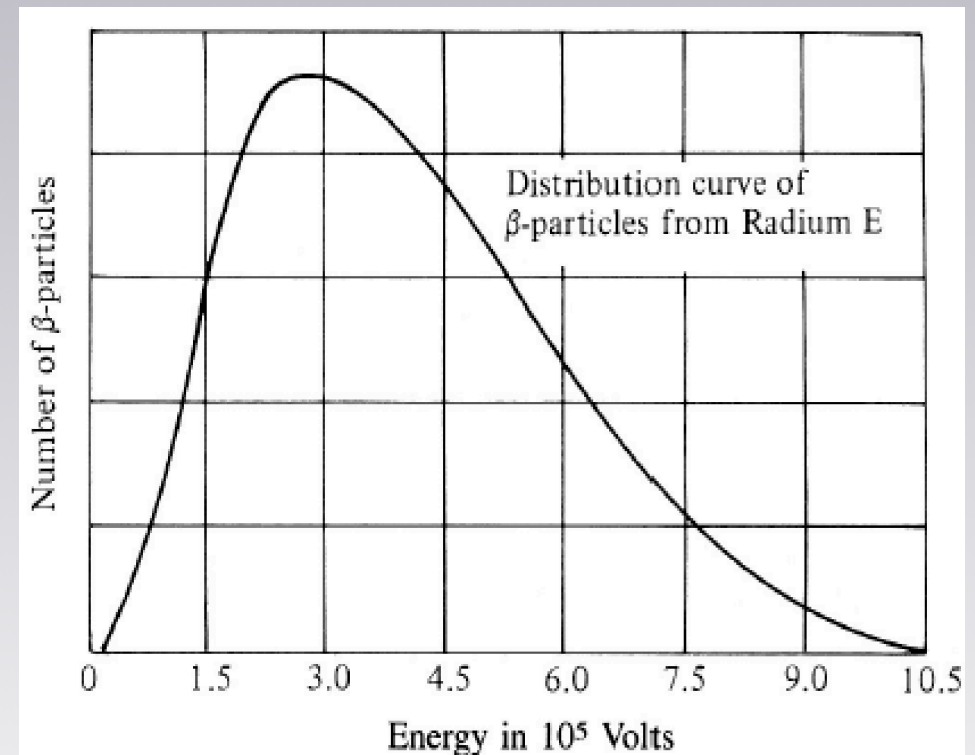
l'elettrone emesso dovrebbe essere monoenergetico, ma ha invece uno spettro continuo

Ipotesi di Pauli (1930): nel decadimento beta viene emessa anche una particella leggera, neutra, poco interagente che sfugge all'identificazione



a cui viene dato il nome di neutrino.

A causa delle sue proprietà, Pauli si rende conto che questa particella sarà molto difficile da osservare sperimentalmente...



# Le interazioni deboli e la scoperta dei neutrini

La teoria di Fermi dei decadimenti beta: universalità delle interazioni deboli

La violazione della parità nelle interazioni deboli

L'esperimento di Madame Wu

Negli anni 50 i reattori nucleari forniscono un flusso gigantesco di neutrini

L'esperimento di Reines e Cowan

Pontecorvo e le famiglie di neutrini

L'esperimento di Lederman e Steinberger

Le oscillazioni (ancora Pontecorvo) e la massa dei neutrini

Chi media le interazioni deboli?

Il modello Standard e i mediatori delle interazioni deboli

Il problema delle masse

# Il modello standard e le masse

Il modello standard è una teoria molto elegante che mette insieme l'elettromagnetismo e le interazioni deboli, derivando tutte le interazioni da una Lagrangiana invariante per  $SU(2) \times U(1)$ , nella quale si possono incorporare molto facilmente le interazioni forti, invarianti per  $SU(3)$  di colore (la QCD o CromoDinamica Quantistica)

Tuttavia in questa simmetria tutte le particelle (sia i fermioni che i bosoni mediatori) devono avere massa nulla (!?)

Nel 1964 Higgs e indipendentemente Englert e Brout individuano un meccanismo che rompe “spontaneamente” la simmetria, dando massa a tutte le particelle attraverso l'interazione di un campo che “riempie il vuoto”

Il Bosone di Higgs viene scoperto solo 50 anni dopo, nel 2012

# il modello standard

mesoni: spin 0 o 1  
bosoni

barioni: spin 1/2  
fermioni

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III		
mass	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> Higgs boson
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
Leptons	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson	

Gauge bosons

# I problemi aperti

## La simmetria materia-antimateria

dove è finita l'antimateria?

tracce di violazione: la simmetria CP

il teorema CPT e la reversibilità microscopica

## La materia oscura

l'evidenza sperimentale astrofisica

materia oscura particellare?

la supersimmetria e la sua ricerca ad LHC

## La riconciliazione della relatività generale e della gravità quantistica