

Fisica Nucleare e Subnucleare II

Lezioni n. 1, 2

- Descrizione del corso e del programma
- Richiami di argomenti da considerare già noti:
 - Particelle elementari
 - Interazioni

http://www.roma1.infn.it/people/capone/FNS_II/FNS_II.htm

Dipartimento di Fisica - Universita' La Sapienza A.A. 2009-2010

Corso di Laurea Magistrale in Fisica

curricula: Elettronico, Storico epistemologico e didattico,
Teorico (ma non "Teorico in Fisica delle Particelle Elementari")

Corso: Fisica Nucleare e Subnucleare II (6 cfu)

Prof. Antonio Capone

Orario : martedi' e giovedi' ore 11:00-13:00

Aula: 3

Inizio del corso 9/3 - Termine previsto 3/6

Scopo del corso, che presuppone la conoscenza degli argomenti trattati nel corso "Fisica Nucleare e Subnucleare I" del terzo anno della laurea triennale, e' approfondire lo studio delle particelle elementari, delle loro interazioni, delle tecniche sperimentali di rivelazione.

Programma del corso

Calendario degli esami

Calendario delle lezioni, argomenti trattati ed eventuali dispense

Dipartimento di Fisica - Universita' La Sapienza A.A. 2009-2010

Corso di Laurea Magistrale in Fisica

Curricula: Elettronico, Storico epistemologico e didattico, Teorico
(ma non "Teorico in Fisica delle Particelle Elementari")

Corso: Fisica Nucleare e Subnucleare II (6 crediti)

Prof. Antonio Capone

Orario : martedi' e giovedi' 11:00-13:00

Aula : 3

Programma

- 1) Interazioni tra adroni a basse energie ed il modello statico a quark, spin isotopico, sezione d'urto per interazione forte, collisioni adrone-adrone a basse energie, risonanze, formula di Breit-Wigner, classificazione degli adroni come composti da quarks u, d ed s.
- 2) Caratteristiche delle interazioni deboli, la teoria di Fermi del decadimento β . Universalita' delle interazioni deboli, transizioni alla Fermi, transizioni alla Gamow-Teller. Famiglie di leptoni, violazioni di parita' nel decadimento β , teoria a due componenti del neutrino, decadimento dei pioni carichi, decadimenti delle particelle strane. L'angolo di Cabibbo.
- 3) Interazioni deboli di neutrini: a corrente carica e corrente neutra, elicitita' del neutrino e teoria V-A, il meccanismo GIM. Interazioni puramente leptoniche e semileptoniche.
- 4) QCD: sezione d'urto elettrone-positrone, le risonanze nelle collisioni $e^+ e^-$, il colore.
- 5) Interazioni leptone-nucleone ad alta energia, diffusione $e-p$, diffusione anelastica di neutrini su nucleone, funzioni di struttura dei nucleoni.
- 6) Cenni sul Modello Standard: limite di unitarieta' e le divergenze, Bosoni di Gauge, scoperta del W e dello Z. Cenni sulla ricerca del Bosone di Higgs.

http://www.roma1.infn.it/people/capone/FNS_II/programma_FNS_II.htm

 continua

7) Oscillazioni di neutrini. Studio delle "oscillazioni di neutrini":
neutrini solari, spettro dei neutrini solari, esperimento "Homestacke Mine" di Davis
neutrini atmosferici, SuperKamiokande
esperimenti con neutrini da reattori nucleari, (KAMLAND, . . .)
esperimenti con neutrini da acceleratori (OPERA, . . .)
Oscillazioni di neutrini "nel vuoto e nella materia": l'effetto MSW.

8) Raggi cosmici, composizione e spettro. Interazione di raggi cosmici di altissima energia.

Per una piu' dettagliata descrizione del programma svolto e dei capitoli/paragrafi del libro di testo discussi a lezione sara' possibile consultare la pagina web:

http://www.roma1.infn.it/people/capone/FNS_II/Calendario.htm

Libri di testo consigliati:

S. Braibant, G. Giacomelli, M. Spurio
"Particelle e interazioni fondamentali" (Springer)

B. R. Martin, G. Shaw
"Particle Physics" (Ed. John Wiley & Sons)

B. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche
"Particelle e Nuclei" (Bollati Boringhieri)

http://www.roma1.infn.it/people/capone/FNS_II/Calendario.htm

Corso di Laurea Magistrale in Fisica
Corso: *Fisica Nucleare e Subnucleare II* –6 cfu
A.A. 2009-10
Prof. Antonio Capone

09/03/2010 - Lezioni n. 1 e 2

Introduzione al corso, finalità, [programma e libri di testo](#). . . .

Conoscenze di base necessarie

**Gli argomenti trattati nel corso "Fisica Nucleare e Subnucleare I"
(E. Longo, III anno Corso di Laurea triennale)**

- 1. La fisica subatomica: la radioattivit  e l'elettrone**
- 2. Esperimenti di diffusione. Sezione d'urto**
- 3. La scoperta del nucleo atomico, del protone e del neutrone**
- 4. Il passaggio della radiazione nella materia**
- 5. Rivelatori di particelle**
- 6. Interazioni e particelle**
- 7. Potenziale di Yukawa**
- 8. I raggi cosmici e la scoperta del positrone**
- 9. Pioni e muoni**
- 10. Particelle strane**
- 11. Gli acceleratori di particelle**
- 12. La scoperta dell'antiprotone**
- 13. I neutrini**
- 14. La parit . Simmetrie C e T**
- 15. Violazione della parit **
- 16. Isospin**
- 17. Risonanze adroniche**
- 18. Il modello a quark**
- 19. Propriet  generali dei nuclei**
- 20. Decadimenti alfa, beta e gamma**
- 21. Modelli nucleari**

sono da considerare gi  noti.

Interazioni radiazione/particelle \Leftrightarrow materia

Radiazione $\Rightarrow \gamma$ (fotoni) \Rightarrow energia elettromagnetica $E=h\nu$

h =costante di Planck= $6.626 \cdot 10^{-34}$ J \cdot s; ν = frequenza

QED: permette di descrivere l'interazione fra/con particelle cariche

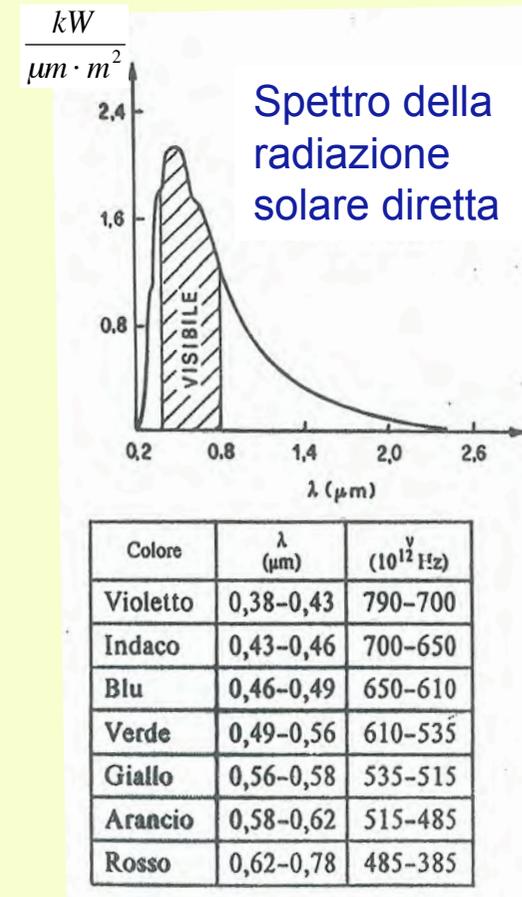
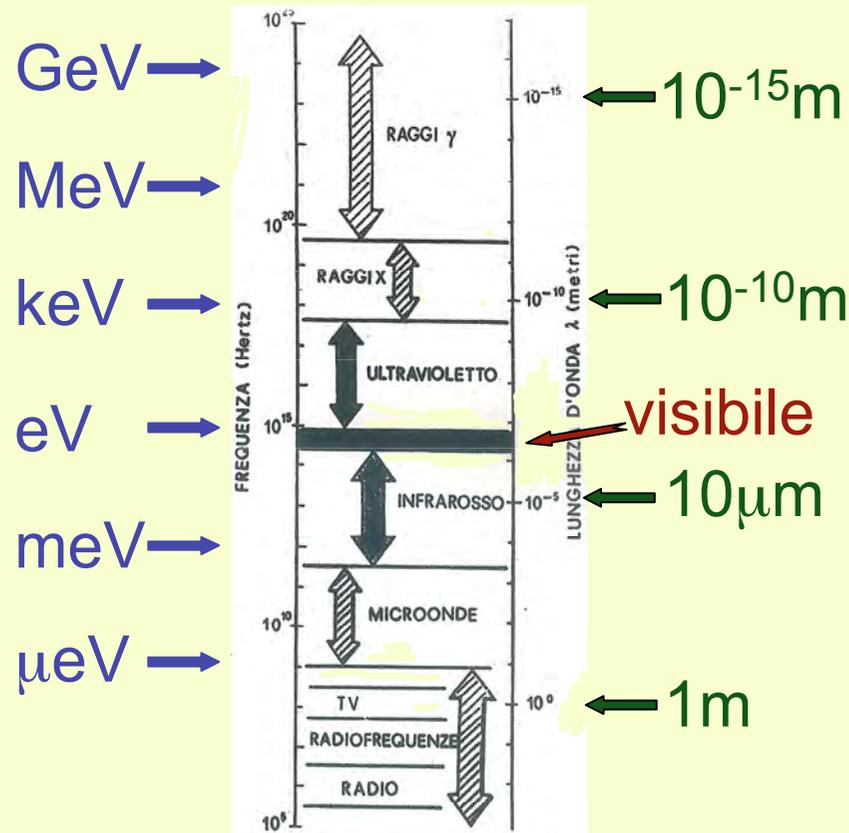
Particelle \Rightarrow caratterizzate da:

m_0	massa a riposo
q	carica
s	spin
τ	vita media
μ	momento magnetico
...

leptoni	\Rightarrow	$e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$
adroni	\Rightarrow	mesoni: $\pi, \rho, \omega, \phi, \kappa, \dots$; barioni: p, n, Δ, \dots
nuclei	\Rightarrow	α (nucleo di He), \dots , ioni pesanti

Tali “entità” interagiscono fra loro tramite FORZE che dipendono dalle loro stesse caratteristiche (massa, carica, ...)

La radiazione elettromagnetica



$$E = h\nu$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4.13 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

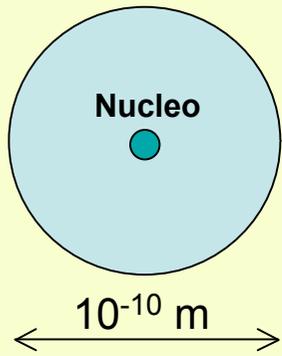
I costituenti fondamentali della materia

- Alla fine del XIX secolo si pensava che la materia fosse composta da atomi ma, visto che si conoscevano ~100 elementi, con proprietà ricorrenti, si poteva supporre che potessero essere formati da oggetti più elementari opportunamente combinati.
 - Con gli esperimenti di Rutherford, all'inizio del XX secolo, si dimostrò l'esistenza del nucleo, circondato da una densa nuvola di **elettroni**.
 - Nel 1932, con la scoperta del neutrone, fu chiaro che il nucleo è composto da **protoni e neutroni** (nucleoni).
 - Negli stessi anni, per giustificare la conservazione dell'energia, del momento angolare e dell'impulso nei decadimenti β , si ipotizzò l'esistenza del **neutrino**.
- p , n , e^- , ν** permettevano di descrivere tutti i fenomeni noti della fisica atomica e nucleare
- Gli esperimenti agli acceleratori, negli anni 1950-60, hanno mostrato l'esistenza di una numerosa famiglia di particelle (gli **adroni**) comprendente protoni e neutroni. Oggi sappiamo che i ~100 adroni noti, con proprietà ricorrenti, sono formati da oggetti più elementari (**quarks**) opportunamente combinati. Il modello a quarks, alla fine degli anni '60, permise di descrivere tutti gli adroni conosciuti come combinazione di due (mesoni) o tre (barioni) quarks.

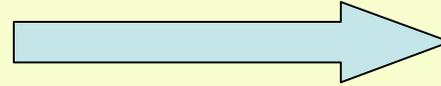
Dimensioni

... ordini di grandezza ...

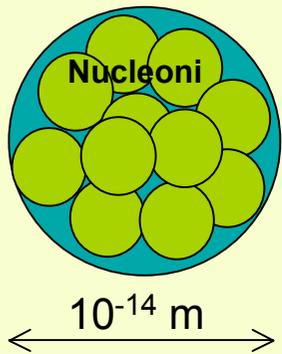
Energie



Atomo



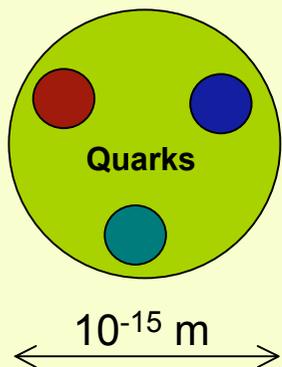
~ eV



Nucleo



~ MeV



Nucleone



~ GeV

Unità di misura in fisica subnucleare

1 fermi: 10^{-15}m (fermi: F oppure femtometro: fm)

1 eV: energia acquisita da un elettrone quando è accelerato da un campo elettrico fra due punti con d.d.p. = 1V

1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J

KeV= 10^3 eV, MeV= 10^6 eV, GeV= 10^9 eV, TeV= 10^{12} eV, PeV= 10^{15} eV, EeV= 10^{18} eV

Massa a riposo di una particella m_0 [eV/c²] (essendo $E = m_0 \cdot c^2$)

1 [eV/c²] = $1.78 \cdot 10^{-36}$ Kg

Quantità di moto (momento) di una particella può essere espressa in eV/c

[essendo $E_{\text{totale}} = (p \cdot c + m_0 \cdot c^2)^{0.5}$] \rightarrow 1 eV/c = $0.535 \cdot 10^{-27}$ Kg \cdot m/s

Unità di misura “Naturali”

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \cdot 10^{-34} \quad J \cdot s$$

$$c = 2.998 \cdot 10^8 \quad m/s$$

Scegliamo per semplicità $\hbar = 1$ $c = 1$

Se ora scegliamo anche di esprimere l'energia E in eV (ad esempio GeV, una energia $\sim m_p c^2$) abbiamo:

Massa	m	} [GeV]
Momento	mc	
Energia	mc ²	

Lunghezze $= \hbar / mc$ [GeV⁻¹]

Tempo $= \hbar / mc^2$ [GeV⁻¹]

Distanze anche in F (fermi) = 10^{-15} m; $1F = 5.07 \text{ GeV}^{-1}$

Particelle ed interazioni

- Interazioni forti: caratterizzano gli "adroni"
 - **ADRONI:**
 - Barioni ($p, n, \Lambda, \Sigma, \dots$)
 - Numero barionico = 1
 - Numero leptonico = 0
 - sono composti da 3 quarks: $p=(uud)$, $n=(udd)$, ...
 - Mesoni: ($\pi, \kappa, \eta, \omega, \dots$)
 - Numero barionico = 0
 - Numero leptonico = 0
 - sono composti da quark ed antiquark $\pi^+=(u\bar{d})$, $\pi^-=(\bar{u}d)$, ...
- Elettroni, muoni, tau e relativi neutrini sono caratterizzati dalle interazioni deboli, non partecipano a quelle "forti" e sono classificati come "leptoni":
 - **LEPTONI**
 - Neutrini: solo interazioni deboli (carica nulla, massa ~ 0)
 - e^\pm, μ^\pm, τ^\pm interazioni deboli ed elettromagnetiche (trascurando l'interazione gravitazionale)
- Tutte le particelle dotate di carica elettrica, ovviamente, interagiscono anche tramite interazioni elettromagnetiche con costante di accoppiamento minore della costante di accoppiamento "forte"
- Tutte le particelle dotate di massa, ovviamente, interagiscono con la interazioni gravitazionali, ma in modo irrilevante

Descrizione delle interazioni

- Q.E.D (elettrodinamica quantistica) fornisce uno strumento completo di calcolo delle "interazioni elettromagnetiche" anche relativistiche (teoria quantizzata ed invariante relativisticamente).
- Q.E.D. è un particolare esempio di una teorica dei campi relativistica, il più semplice esempio di una "teoria di gauge".
- Le "interazioni deboli" e le "interazioni forti" possono essere descritte con teorie di gauge: il "modello elettro-debole (EW)" e la "cromo-dinamica quantistica (QCD)"

Adroni: combinazione di quarks

- Quarks (fermioni $S=1/2$, $Q=1/3$ o $2/3$, $B=1/3$, $L=0$)
 - Q (carica), B (num. barionico), L (num. leptonic) sono numeri quantici additivi conservati:

$$\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$$

$$Q: -1 + 1 \rightarrow 0 + 0$$

$$B: 0 + 1 \rightarrow 0 + 1$$

$$L: 0 + 0 \rightarrow 0 + 0$$

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$$

$$Q: 0 \rightarrow +1 -1 0$$

$$B: +1 \rightarrow +1 0 0$$

$$L: 0 \rightarrow 0 +1 -1$$

- I quarks sono le entità fondamentali descritte dalla teoria quantistica (descrive particelle puntiformi, dimensioni $< 10^{-18}$ m. I protoni hanno dimensioni $\sim 10^{-15}$ m)

S = spin, Q = carica elettrica in unita' della carica di un elettrone
 B = numero "barionico", L = numero "leptonico"

Adroni

Per lo studio della “spettroscopia degli adroni” è sufficiente considerare il semplice modello statico a quarks degli adroni

- Mesoni = adroni con Spin “intero”, composti da una coppia quark-antiquark
- Barioni = adroni con Spin “semintero”, composti da tre quarks (o antiquarks)
- Iperoni = sono Barioni “strani” cioè con numero quantico di “stranezza” diverso da 0

Il modello di Yukawa (~1930)

Descrive l'interazione tra nucleoni nei nuclei in analogia con l'interazione elettromagnetica

Per una particella (bosone) di massa m vale $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$, rimpiazzando le grandezze E e \vec{p} con i rispettivi operatori $E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ e $\vec{p} \rightarrow i\hbar \nabla$ agenti su una funzione d'onda ψ si ottiene l'equazione di Klein-Gordon:

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \hbar^2 c^2 \nabla^2 \psi = m^2 c^4 \psi$$

che nel caso statico da l'equazione $\nabla^2 \psi = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 \psi \rightarrow \psi = \frac{K}{r} e^{-r \frac{mc}{\hbar}}$.

Yukawa propose che il nucleone potesse interagire con un campo bosonico caratterizzato da un raggio d'azione $\alpha = \hbar/mc$ con potenziale $U(r) = \frac{K}{r} e^{-r/\alpha}$.

Se $\alpha \approx 2 \text{ fm} \rightarrow m \sim 100 \text{ MeV}/c^2$, il π venne quindi proposto come il "mediatore" delle interazioni forti. Oggi sappiamo che tali interazioni avvengono tra quarks e non tra nucleoni

Simmetria protone-neutrone: lo spin isotopico (1)

- n e p hanno simili comportamenti per quanto riguarda l'interazione forte per tale motivo Heisenberg (1932) suggerì di considerarli come due diversi stati del nucleone N.
- n e p sono così distinti da un numero quantico: lo spin isotopico forte $I=1/2$. (grandezza adimensionale)
- Lo spin isotopico forte è definito in uno spazio fittizio tridimens. (con assi I_x, I_y, I_z) in cui la conservazione di spin isotopico corrisponde all'invarianza del modulo del vettore I per rotazioni attorno ad un asse.
- L'autovalore dell'operatore $I^2 = I_x^2 + I_y^2 + I_z^2$ è pari a $I(I+1)$, il modulo del vettore I è pari a $I = \sqrt{I(I+1)}$
- L'operatore Hamiltoniana, responsabile dell'interazione forte, è invariante per tutte le rotazioni/trasformazioni nello spazio dell'isospin: livelli energetici del sistema degeneri
- Ad ogni valore di I corrisponde un multipletto con $2I+1$ autostati di H con stessa energia ma con valori diversi di I_z

Simmetria protone-neutrone: lo spin isotopico (2)

- Possibili valori di I sono $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$
- La “terza componente dello spin isotopico forte” I_z caratterizza n ($I_z = -1/2$) e p ($I_z = +1/2$)
- L'interazione forte dipende da I e non da I_z pertanto neutroni e protoni sono due stati degeneri per l'interazione forte
→ l'interazione forte è indipendente dalla carica elettrica.
- Lo spin isotopico permette di classificare gli adroni in multipletti.

Spin isotopico del mesone π

- Anche i mesoni π^0 π^+ π^- si comportano similmente per quanto riguarda l'interazione forte. Sono la stessa particella (π) che si presenta in tre stati diversi.
- In generale se I è il valore dell'isospin forte il numero di stati con diverso valore di I_z è dato da $N_I = (2I + 1)$. Per i pioni quindi deve essere $I_\pi = 1$:
 - $I_z = 0 \rightarrow \pi^0$
 - $I_z = +1 \rightarrow \pi^+$
 - $I_z = -1 \rightarrow \pi^-$
- In generale vale la relazione $Q = I_z + B/2$ dove B (il numero barionico) vale $B_\pi = 0$ e $B_N = 1$ (per n e p)

Interazione forte e conservazione dello spin isotopico

- L'interazione forte dipende solo dall'isospin totale I (e non da I_z nè dalla carica Q)
- Lo spin isotopico totale I è conservato nei processi dovuti all'interazione forte

- Nei processi $p + p \rightarrow d + \pi^+$ e $p + n \rightarrow d + \pi^0$
 $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \rightarrow 0 + 1$ $\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \rightarrow 0 + 1$
 $I_{tot} = 1 \rightarrow I_{tot} = 1$ $I_{tot} = 0,1 \rightarrow I_{tot} = 1$

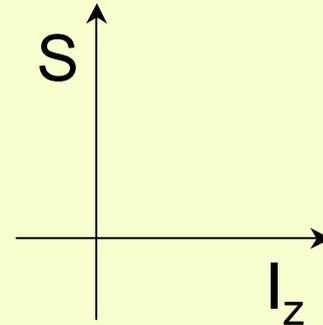
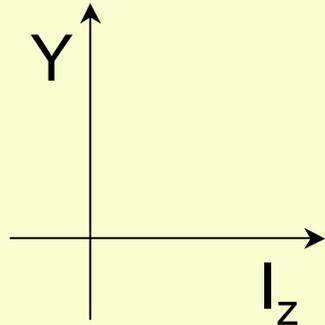
si nota che $\sigma(p + p \rightarrow d + \pi^+) = 2\sigma(p + n \rightarrow d + \pi^0)$ visto che solo il 50% degli stati iniziali (con $i=1$) della seconda reazione contribuiscono allo stato finale

Spin Isotopico dei quarks

- La simmetria di isospin per **n** e **p** (costituiti solo dai *quarks di valenza* **u**, **d**) implica una simmetria anche per i quarks costituenti
- I quarks **u**, **d** hanno
 - $I=1/2$ con $I_z(u)=+1/2$ e $I_z(d)=-1/2$
- I quarks **s**, **c**, **b**, **t** (*quarks di mare*) hanno tutti $I=0$ (*singoletti di isospin forte*)

Ipercarica

- Per adroni e quarks si definisce l'*Ipercarica forte* $Y=B$ (*num. barionico*) $+S$ (*stranezza*)
- Adroni con stesso *spin* e la stessa *parità* possono essere rappresentati in diagrammi



ricordando che il numero barionico per i quarks vale $+1/3$, per gli antiquarks vale $-1/3$, che i barioni sono qqq (antibarioni $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) ed i mesoni $q\bar{q}$

Numeri quantici di quarks ed antiquarks leggeri

- B = numero barionico
- J = spin
- I = Spin isotopico forte o isospin
- I_3 = terza componente dell'isospin
- S = stranezza
- Q = carica

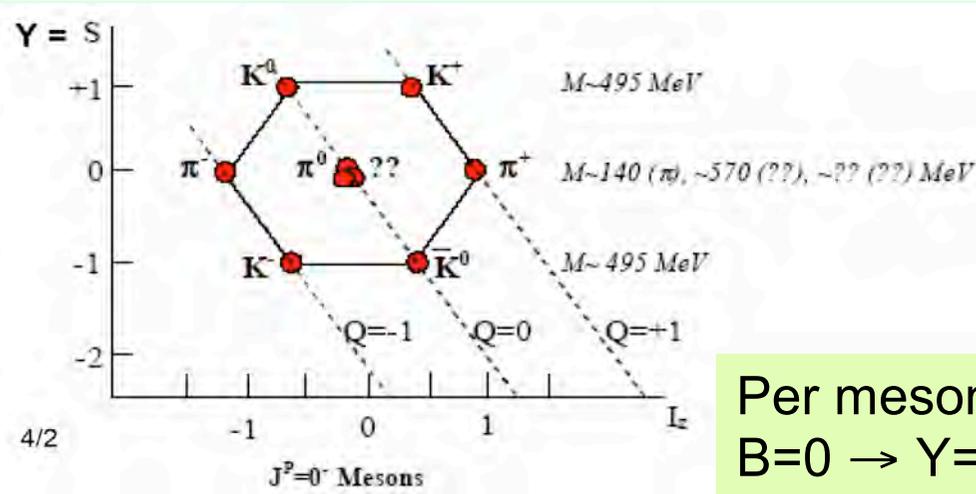
	B	J	I	I_3	S	Q/e
u	$+1/3$	$1/2$	$1/2$	$+1/2$	0	$+2/3$
d	$+1/3$	$1/2$	$1/2$	$-1/2$	0	$-1/3$
s	$+1/3$	$1/2$	0	0	-1	$-1/3$
\bar{u}	$-1/3$	$1/2$	$1/2$	$-1/2$	0	$-2/3$
\bar{d}	$-1/3$	$1/2$	$1/2$	$+1/2$	0	$+1/3$
\bar{s}	$-1/3$	$1/2$	0	0	$+1$	$+1/3$

Spettroscopia delle particelle con interazione forte

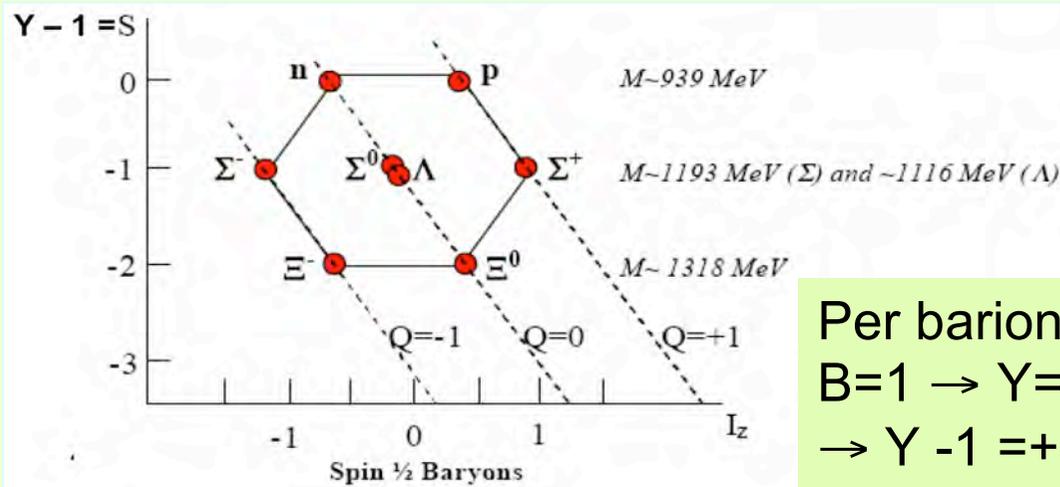
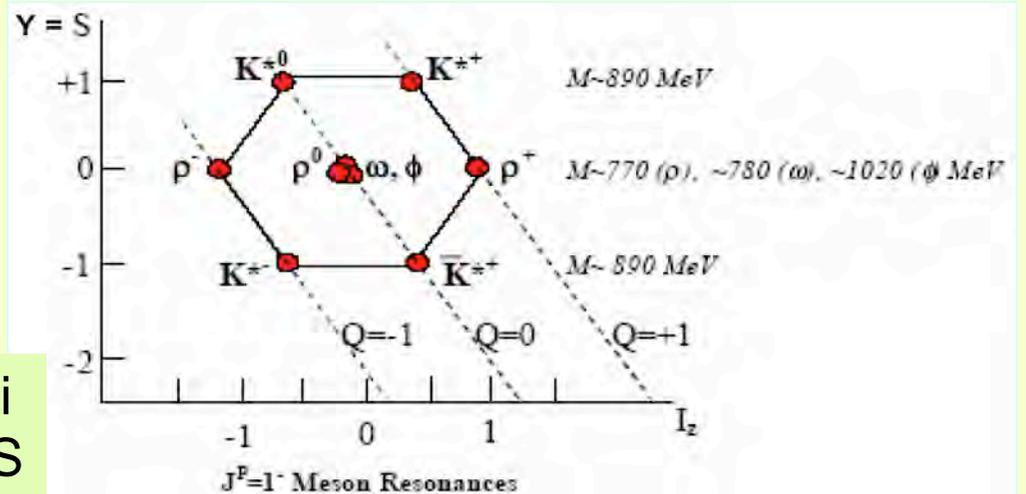
Negli anni '60 Gell-Mann e Zweig suggerirono di classificare gli **adroni** in **gruppi** con molteplici **regolarità**.

Rappresentazione con **ottetti** nel gruppo di simmetria **SU3**

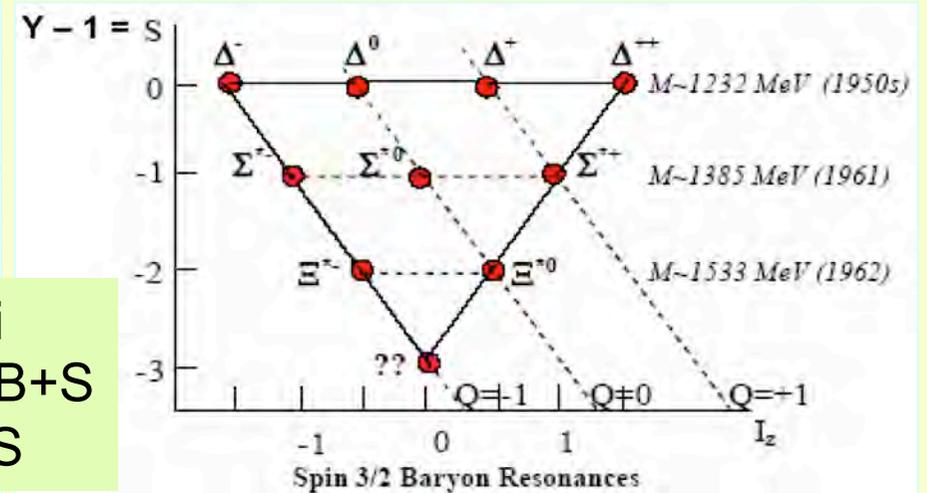
Y = hypercharge, I = isospin, $I_3 = I_z$ = terza componente dell'isospin Q = carica, P = parità



Per mesoni
 $B=0 \rightarrow Y=S$

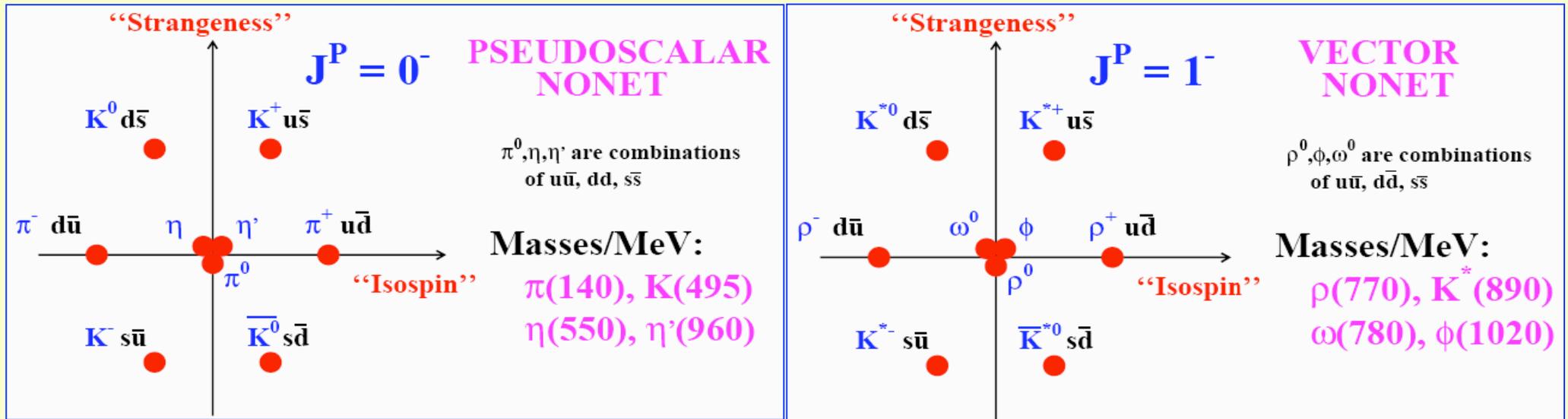
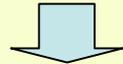


Per barioni
 $B=1 \rightarrow Y=B+S$
 $\rightarrow Y - 1 = +S$



I mesoni leggeri

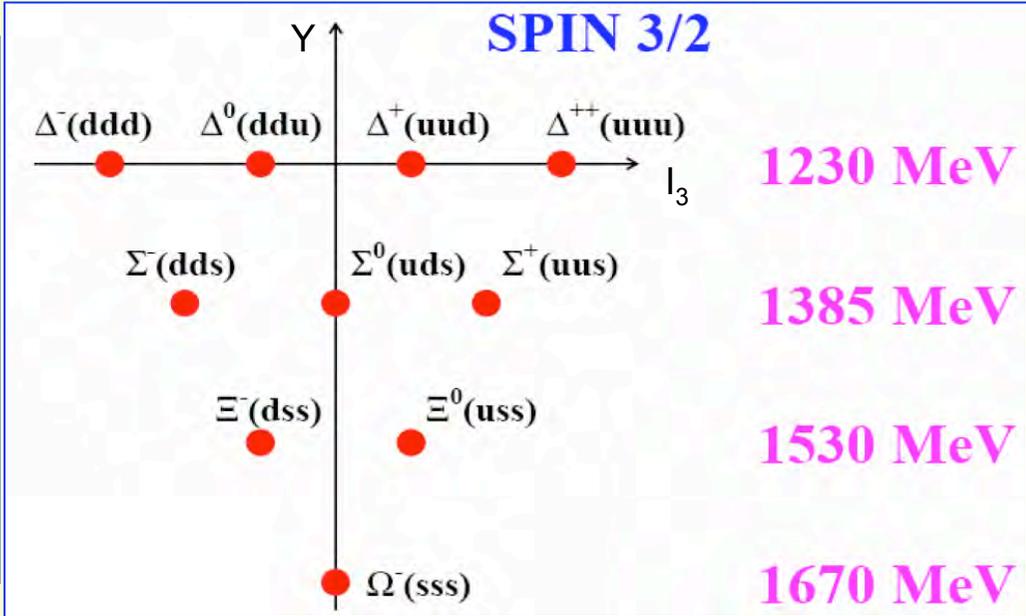
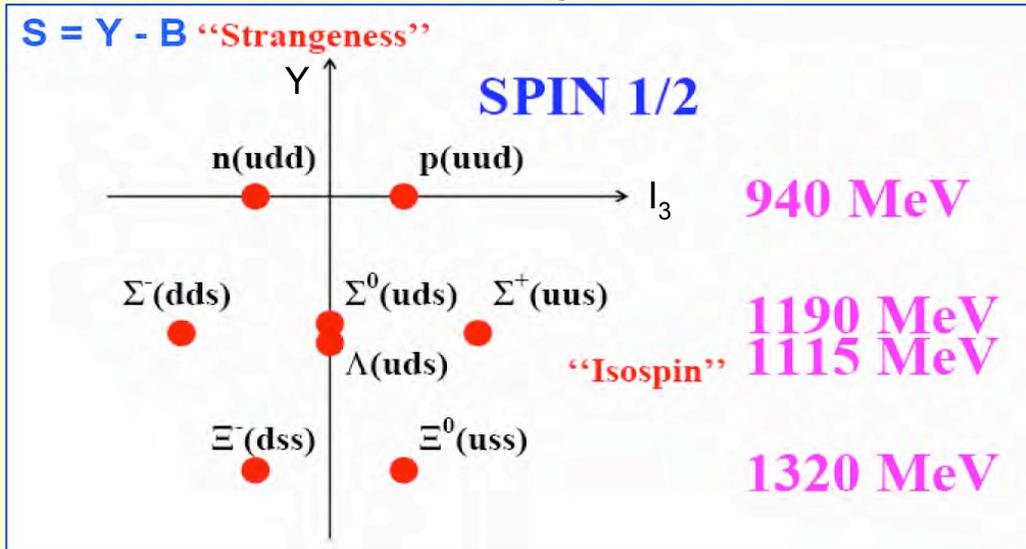
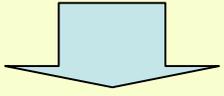
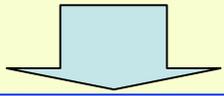
I mesoni pseudoscalari ($J^P=0^-$) hanno quark-antiquark accoppiati in onda s e con spin opposti : $J=0$



I mesoni vettori ($J^P=1^-$) hanno quark-antiquark con spin concordi : $J=1$

I Barioni

I tre quarks possono avere somma degli spin = 1/2 $\uparrow\downarrow\uparrow$ o, se gli spin sono concordi $\uparrow\uparrow\uparrow$ lo spin totale = 3/2



Un nuovo numero quantico: il colore

- Secondo quanto già descritto $p= uud$, $n= udd$. E' stata osservata sperimentalmente anche $\Delta^{++}=uuu$ (la risonanza π^+p)
 - $Q=2$ ($2/3+2/3+2/3$)
 - $J = 3/2$ combinando 3 quarks (fermioni) u identici
 - la Δ^{++} viola la statistica di Fermi: non dovrebbe esistere !!
 - qualche altro numero quantico deve distinguere i quarks che altrimenti sarebbero identici: il colore R, G e B. In tal modo la $\Delta^{++}=u_R u_G u_B$ può esistere ed è fatta in un solo modo ma allora ...
- In quanti modi si può fare il protone ?
 - C'è differenza fra $u_R u_G d_B$; $u_R u_G d_G$; $u_R u_G d_R$; ... ??? NO !
 - Tutte le particelle in natura sono "SENZA COLORE", invarianti per rotazione nello spazio di R,G,B: ciò si ottiene con:
 - miscela in equal misura di R, G, B
 - miscela in equal misura di \bar{R} , \bar{G} , \bar{B}
 - miscela in equal misura di $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$
 - Nella funzione d'onda che descrive il protone gli stati con i diversi numeri quantici "colore" devono essere opportunamente simmetrizzati e normalizzati.
- Il colore è quindi un numero quantico "nascosto"
- I quarks, che necessariamente presi singolarmente sono "colorati" non sono sperimentalmente osservabili: esistono solo legati e mai "liberi"

Le particelle dello Standard Model

Famiglia	Particella	Q/e	Massa
Leptoni fermioni: spin 1/2 num. barionico B=0 num. leptonico L=1	e - elettrone	-1	0.511 MeV
	ν_e - neutrino elettrone	0	< 15 eV
	μ - muone	-1	0.106 GeV
	ν_μ - neutrino muonico	0	< 0.17 MeV
	τ - tau	-1	1.777 GeV
	ν_τ - neutrino tau	0	< 24 MeV
Quarks fermioni: spin 1/2 num. barionico B=1/3 num. leptonico L=0	u - up	2/3	6 MeV
	d - down	-1/3	10 MeV
	s - strange	-1/3	0.25 GeV
	c - charm	2/3	1.2 GeV
	b - bottom	-1/3	4.3 GeV
	t - top	2/3	180 GeV
Bosoni Vettoriali: spin 1 num. barionico B=0 num. leptonico L=0	γ - fotone	0	0 GeV
	W^\pm - bosone W	± 1	80.3 GeV
	Z^0 - bosone Z	0	91.2 GeV
	g - gluone	0	0 GeV
Bosone di Higgs spin 0, scalare	H - Higgs	0	< 1 TeV

Nel 1920: solo

e, p, γ

Oggi, si ritiene che questo insieme di particelle sia sufficiente a rappresentare l'intero zoo delle particelle elementari

Il Modello Standard

spiega alcune, ma non tutte, le caratteristiche delle particelle elencate. Compito della attuale ricerca nella teoria unificata delle interazioni è spiegare perchè la materia è formata da questi ingredienti e perchè sono ordinati in questo modo

ν_τ g H

non sono ancora stati sperimentalmente "osservati"

Le particelle dello Standard Model

- L'esistenza di W^\pm e Z^0 , dei quarks c , t , b , così come le loro proprietà di interazione, era stata prevista nell'ambito del Modello Standard (M.S.)
- Ciò dimostra il grande potere predittivo del M.S.
- La ricerca dell' Higgs domina oggi l'interesse sperimentale nel settore della fisica delle alte energie delle particelle elementari
- I quarks erano stati introdotti da Gell-Mann e Zweig solo come entità comode per generare i vari adroni esistenti attraverso l'opportuna riproduzione dei loro numeri quantici. Solo successivamente con le interazioni $e-p$ e $\nu-p$ "profondamente anelastiche (deep inelastic)" è stata messa in evidenza la natura "composita" degli adroni: i "partoni" sono ora identificati proprio con i "quarks".

Le interazioni sono caratterizzate da:

- natura della interazione
- forza della interazione
- tipo (massa) della “particella” scambiata durante l’interazione
- distanza (range) d’azione dell’interazione

Per caratterizzare le intensità delle forze si rapportano tutte alla intensità della interazione forte (a grandi distanze), in tal modo si definiscono delle
costanti di accoppiamento adimensionali

-inter. forte	1	$\frac{g^2}{\hbar c}; \quad \hbar c = 197.33 \text{MeV} \cdot \text{fermi}; \quad 1 \text{fermi} = 10^{-15} \text{m}$
-inter. elettromagnetica	$\alpha=1/137$	$\frac{e^2}{\hbar c}$
-inter. debole	$1.166 \cdot 10^{-5}$	$\frac{G_F M_p^2}{(\hbar c)^3}; \quad M_p = 938.3 \text{MeV}$
-inter. gravitazionale	$6.707 \cdot 10^{-39}$	$\frac{G_N M_p^2}{\hbar c}; \quad G_N = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$