

Physique des particules

MASTER 1 de physique fondamentale
Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules/>



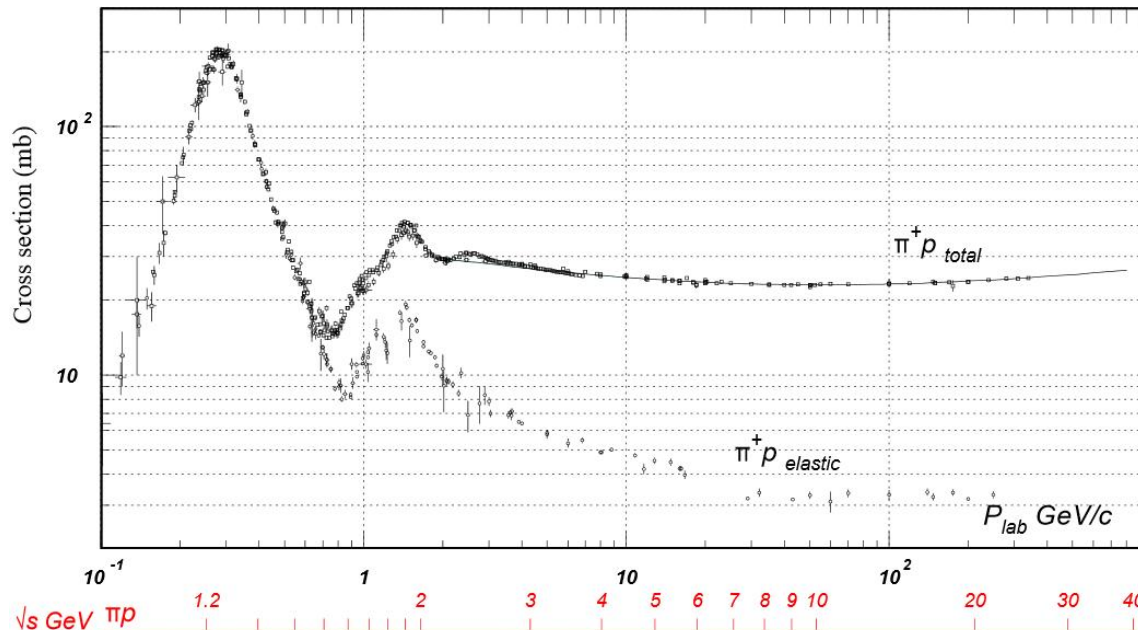
l'interaction forte

Hadrons

À partir de 1950 : collisions pp, pn, πp , πd ...

- Effets résonants : nouvelles particules produites par interaction forte :

Hadrons { Bosons \rightarrow mésons : pions (π^+ , π^- , π^0), ...
 Fermions \rightarrow baryons : nucléons (p, n), ...



Désintégrations des hadrons :

méson \rightarrow non hadrons possible ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$)

baryon \rightarrow n baryon(s) + (n-1) antibaryons + autres

Nombre baryonique conservé : $N_B = 1$ baryons, -1 antibaryons, 0 sinon

ex : $pp \rightarrow p\bar{p}p\bar{p}$ $N_B^{\text{initial}} = N_N^{\text{final}} = 2$

Isospin fort

On constate qu'il existe des famille de particules

- de même spin
- de même masse (presque)
- qui ont le même comportement vis-à-vis de l'interaction forte
- se différencient par l'interaction EM (charges différentes)

Ex : nucléon : (n,p) , pions (π^+ , π^- , π^0)

Structure en multiplet (doublet, triplet, quadruplet) est similaire à celle observée pour le spin (spin S, $S_3 = -S \dots +S$).

Par analogie on introduit un nouveau nombre quantique \rightarrow Isospin : I et I_3

Nucléon : doublet \rightarrow	$I = \frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$	$I_3 = +\frac{1}{2}$ $I_3 = -\frac{1}{2}$	Charge électrique (formule empirique) $Q = I_3 + \frac{N_B}{2}$
Pions : triplet \rightarrow	$I = 1$	$\begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix}$	$I_3 = +1$ $I_3 = 0$ $I_3 = -1$	

Symétrie \Rightarrow I et I_3 sont conservés dans les interactions fortes
Hamiltonien d'interaction forte H_S est indépendant de I_3

Exemple : $NN \rightarrow \pi d$

Le deuton (état lié neutron-proton) est un singlet d'isospin : $I = 0$

Que vaut le rapport de sections efficaces $\frac{\sigma(pp \rightarrow \pi^+ d)}{\sigma(np \rightarrow \pi^0 d)}$?

NN : composition de 2 isospin $\frac{1}{2}$: isospin 0 ou 1

On note un état : $|NN\rangle = |I, I_3\rangle_{NN}$

$$|pp\rangle = |1,1\rangle_{NN} \quad |np\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0,0\rangle_{NN} + |1,0\rangle_{NN})$$

Pion-Deuton : isospin 1 et 0 : isospin 1

$$|\pi^+ d\rangle = |1,1\rangle_{\pi d} \quad |\pi^0 d\rangle = |1,0\rangle_{\pi d}$$

Section efficace : $\sigma = K_{NN\pi d} \times |{}_{NN}\langle I, I_3 | H | I', I'_3 \rangle_{\pi d}|^2$ et ${}_{NN}\langle I, I_3 | H | I, I_3 \rangle_{\pi d} = A_I \delta_{II'} \delta_{I_3 I'_3}$
 Car H est indépendant de I_3 et I et I_3 sont conservés

$$\frac{\sigma(pp \rightarrow \pi^+ d)}{\sigma(np \rightarrow \pi^0 d)} = \frac{K_{NN\pi d} \times |{}_{NN}\langle 1,1 | H | 1,1 \rangle_{\pi d}|^2}{K_{NN\pi d} \times \underbrace{\frac{1}{2} |{}_{NN}\langle 0,0 | H | 1,0 \rangle_{\pi d} + {}_{NN}\langle 1,0 | H | 1,0 \rangle_{\pi d}|^2}_{= 0}} = \frac{K_{NN\pi d} \times A_1^2}{K_{NN\pi d} \times \frac{1}{2} A_1^2} = 2$$

NN → πd : validation expérimentale

R. A. Schluter , Phys. Rev. 96, 734 - 742 (1954)

Neutral Pion-Deuteron Production in 400-Mev n - p Collisions

- Mesure de la section efficace : $np \rightarrow \pi^0 D$

→ bande rouge (x2)

- Comparaison avec des mesures de $pp \rightarrow \pi^+ D$

→ points / barres d'erreurs

On a bien $\sigma(pp \rightarrow \pi^+ D) / \sigma(np \rightarrow \pi^0 D) = 2 !!!$

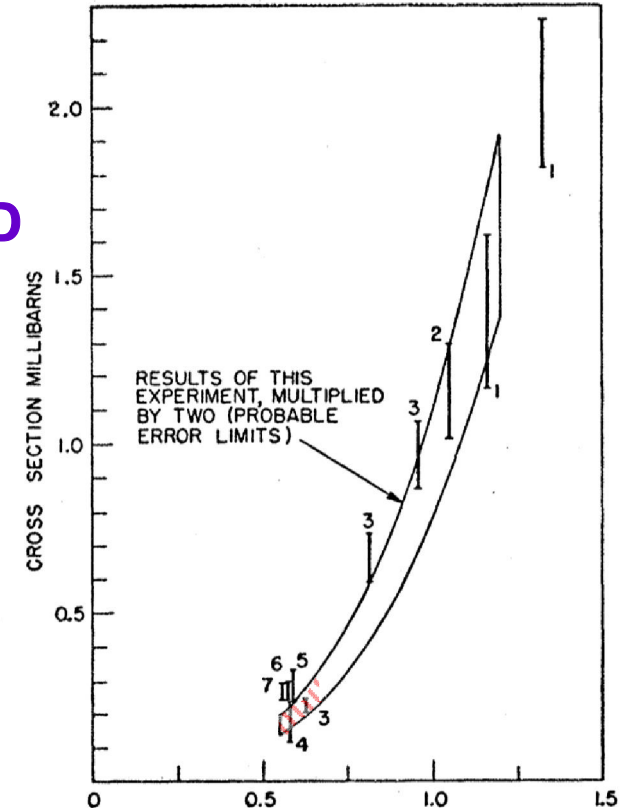
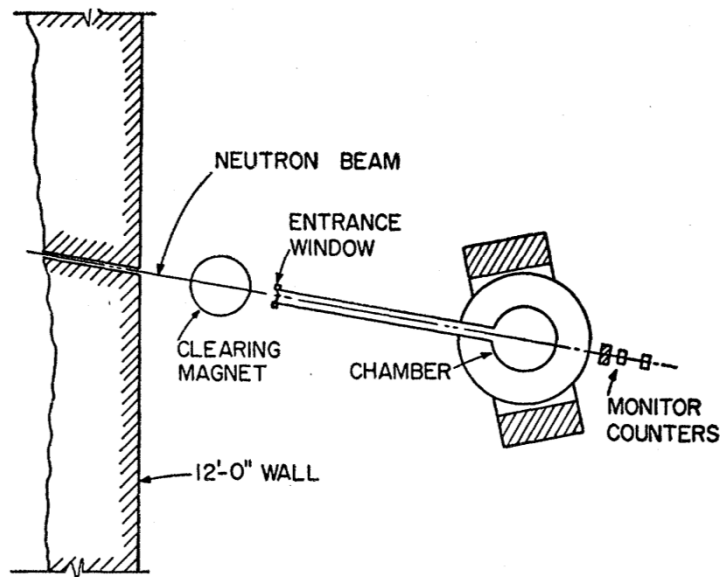


FIG. 11. Comparison of two times the total cross section for $n+p \rightarrow d+\pi^0$ with the total cross section for $p+p \rightarrow d+\pi^+$, as a test of charge independence. Points are: 1, Stadler (reference 15); 2, Fields *et al.* (reference 17); 3, Durbin *et al.* (reference 3); 4, Cartwright *et al.* (reference 18); 5, Clark *et al.* (reference 16); 6, Crawford and Stevenson (reference 20); 7, Schulz (reference 19) normalized by Rosenfeld (reference 1) to Crawford and Stevenson (reference 20).

Modèle des quarks $SU(2)_F$

Propriétés des hadrons observés :

- il existe des **bosons** et des **fermions**. (spin 0, 1/2, 1, 3/2)
- Il existe des particules de **charges différentes** (p, n, π^- , Δ^{++})
- certains **mésons** sont leur **propre antiparticule** (ex : π^0)
- classification en **multiplets d'isospin**

Pour décrire une sous-structure : on imagine de nouvelles particules formant un **doublet d'isospin de fermions de spin 1/2** : **les quarks**

$$S = 1/2 \quad I = 1/2 \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad u=\text{up}, d=\text{down}$$

Baryons (fermions) : 3 quarks (3 spin 1/2 : S=1/2 ou S=3/2)

Mésons (bosons) : 1quark+1antiquark (2 spin 1/2 : S=0 ou S=1)

$|uud\rangle$ a un isospin $I_3=1/2$: proton

$|ddu\rangle$ a un isospin $I_3=-1/2$: neutron

$$\begin{cases} 2q_u + q_d = 1 \\ 2q_d + q_u = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_u = 2/3 \\ q_d = -1/3 \end{cases}$$

Nombre baryonique $N_b = 1/3$ pour u et d et $N_b = -1/3$ pour les anti-quarks.

Modèle des quarks $SU(2)_F$

L'isospin fonctionne comme le spin \rightarrow mêmes règles de composition

Mésons : 2 isospin $\frac{1}{2}$ et 2 spin $\frac{1}{2} \rightarrow$ 4 combinaisons

singlet ($I=0$) de spin $S=0$: $|\eta\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} + d\bar{d}\rangle$ $m=$

triplet ($I=1$) de spin $S=0$: $|\pi^-\rangle = |d\bar{u}\rangle$, $|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} - d\bar{d}\rangle$, $|\pi^+\rangle = |u\bar{d}\rangle$

singlet ($I=0$) de spin $S=1$: $|\omega\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} + d\bar{d}\rangle$

triplet ($I=1$) de spin $S=1$: $|\rho^-\rangle = |d\bar{u}\rangle$, $|\rho^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} - d\bar{d}\rangle$, $|\rho^+\rangle = |u\bar{d}\rangle$

Baryons : 3 isospin $\frac{1}{2}$ et 3 spin $\frac{1}{2} \rightarrow$ 9 combinaisons

3 spin $\frac{1}{2} =$ (spin 0 ou spin 1) + spin $\frac{1}{2} =$ 2 spin $\frac{1}{2}$ et 1 spin $\frac{3}{2}$

~~4 doublets ($I=1/2$) de spin $S=1/2 \rightarrow$ 1 doublet de spin $S=1/2$ $|n\rangle = |udd\rangle, |p\rangle = |udd\rangle$~~

~~2 quadruplets ($I=3/2$) de spin $S=1/2 \rightarrow$ rien~~

~~2 doublets ($I=1/2$) de spin $S=3/2 \rightarrow$ rien~~

1 quadruplet ($I=3/2$) de spin $S=3/2 \rightarrow |\Delta^-\rangle = |ddd\rangle, |\Delta^0\rangle = |udd\rangle, |\Delta^+\rangle = |uud\rangle, |\Delta^{++}\rangle = |uuu\rangle$

Tous les multiplets ne correspondent pas à des états physiques à cause de la contrainte **d'antisymétrie de la fonction d'onde** d'un fermion.

Baryons observés

Etat lié de 3 quarks : un état fondamental et des états excités.

$$m_u, m_d \approx \text{qq MeV} \ll m_{\text{hadrons}} \approx 1 \text{ GeV}$$

- Masse hadronique est dominée par l'énergie de liaison.
- Différents états excités ont des masses très différentes.
- Chaque état excité est une "particules" différente.
(à comparer avec la physique nucléaire...)

Quatre systèmes possibles : uuu, uud, udd, ddd

p : état fondamental du système uud ($m_p = 938.3 \text{ MeV}$)

n : état fondamental du système udd ($m_n = 939.6 \text{ MeV}$)

Δ^{++} : état fondamental du système uuu

Δ^+ : 1er état excité ($J=3/2$) du système uud

Δ^0 : 1er état excité ($J=3/2$) du système udd

Δ^- : état fondamental du système ddd

($m_\Delta = 1232 \text{ MeV}$)

Multitudes d'autres baryons plus lourds :

→ états excités de plus haute énergie

Hadrons étranges

Quelques hadrons au comportement étrange...

Nom	Mass (MeV)	Désintégration	Temps de vie
Λ	1116	$N\pi$	1.10^{-10}s
Ξ^0, Ξ^-	1320	$\Lambda\pi$	3.10^{-10}s
Σ^+, Σ^-	1190	$N\pi$	8.10^{-11}s
Σ^0	1200	$\gamma\Lambda$	1.10^{-20}s (EM)

Temps de vie caractéristique de l'**interaction faible**

Particules stables pour les interactions forte et EM (sauf Σ^0)

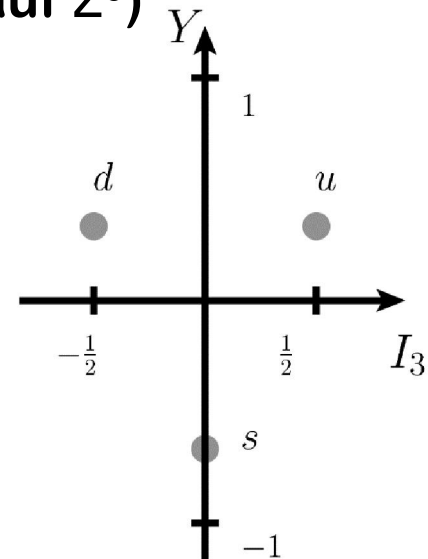
Nombre quantique conservé (S, étrangeté)

→ troisième quark : s

$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \begin{matrix} I_3 & S & Y & Q \\ 1/2 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ -1/2 & 0 & 1/3 & -1/3 \\ 0 & -1 & -2/3 & -1/3 \end{matrix}$$

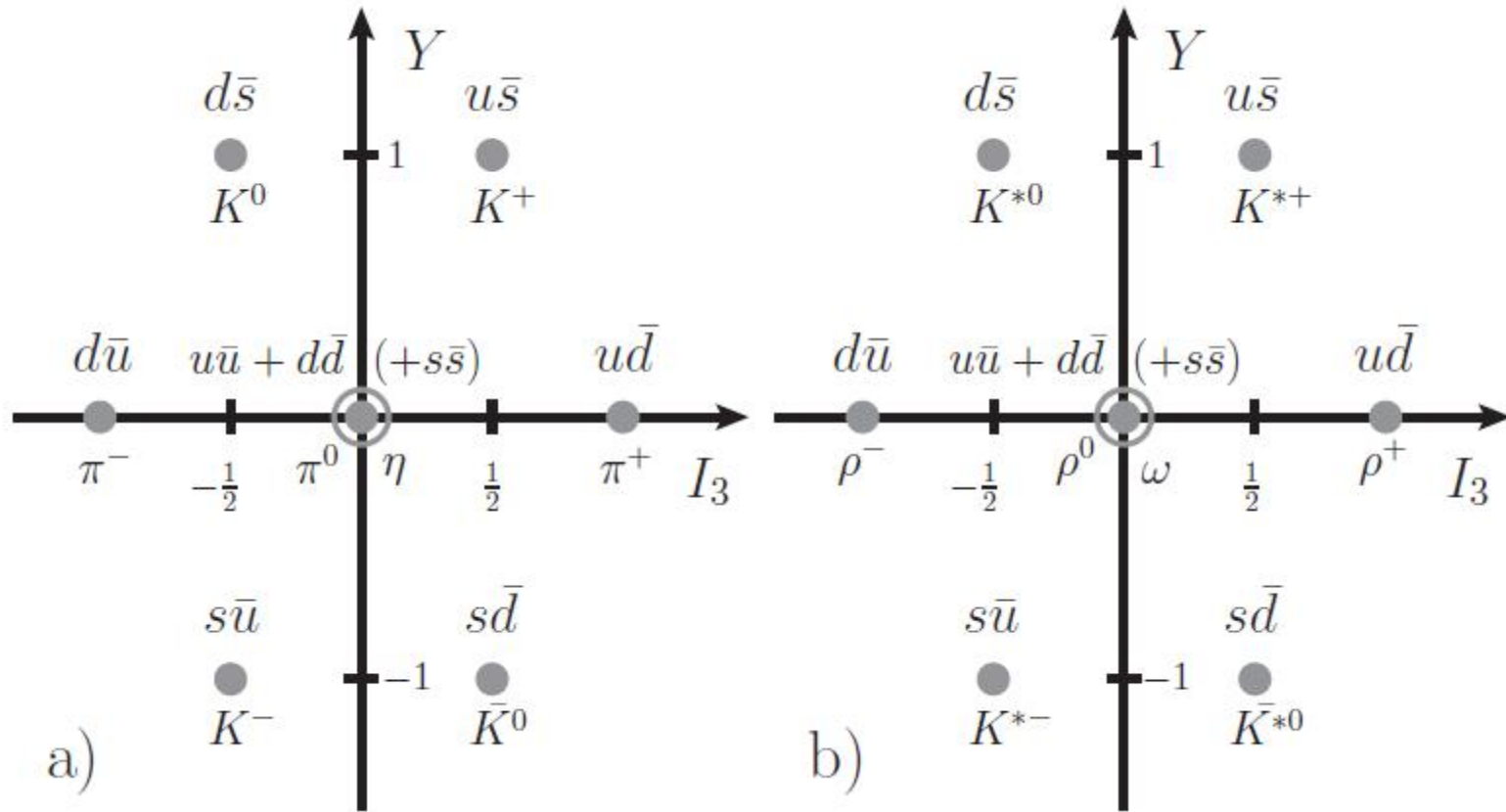
Relation de
Gell-Mann Nishijima

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$



$Y = \text{hypercharge} = S + N_B$

Représentation des mésons de SU(3)



Octets des mésons fondamentaux

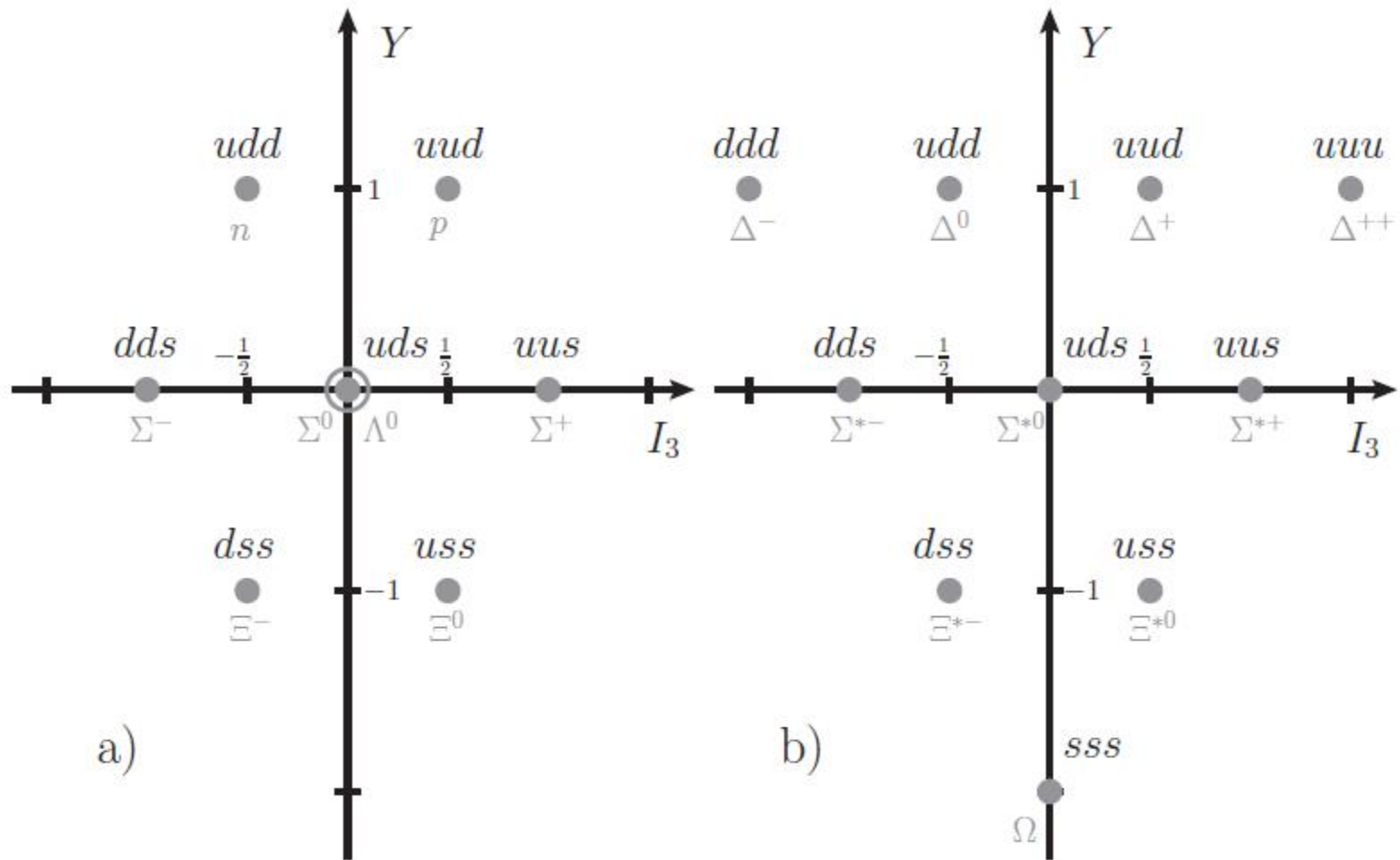
scalaires ($S = 0$)

vecteurs ($S = 1$)

Chaque ligne : multiplets d'isospin (quarks u et d)

Remarque : $K^0 \neq \bar{K}^0$

Représentation des baryons de SU(3)



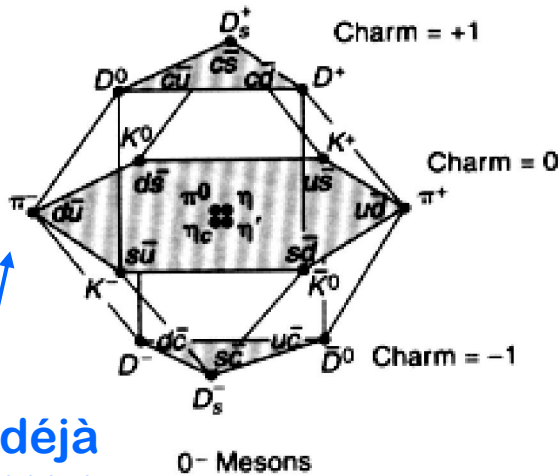
octet des baryons avec $J = 1/2$

décuplet des baryons avec $J = 3/2$

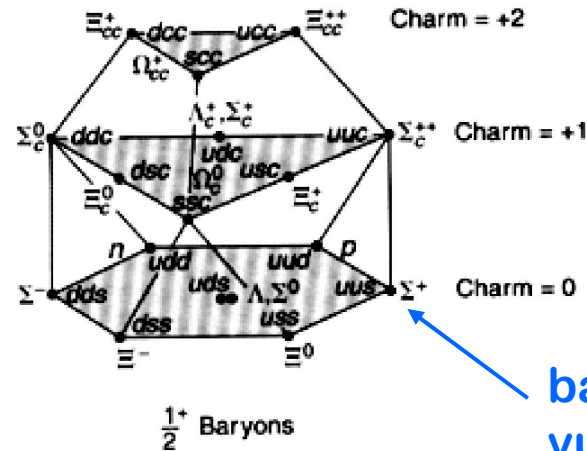
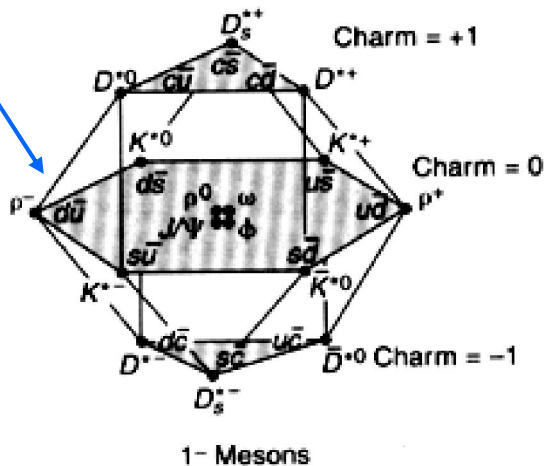
Les multiplets de SU(4) de saveur

SU(4) saveur : diagrammes dans le plan I3, Y, C.

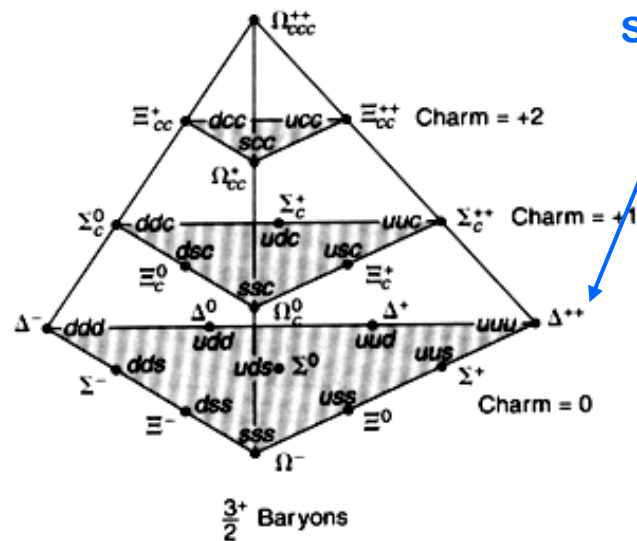
Prédiction de la spectroscopie des hadrons.



mésons déjà vus de SU(3) saveur



baryons déjà vus de SU(3) saveur



Charge de couleur et interaction forte

Quarks portent une charge de **couleur** (rouge, vert, bleu)

“vecteur” de charge $(n_r, n_v, n_b) : q_R (1, 0, 0) - q_V(0, 1, 0) - q_B(0, 0, 1)$

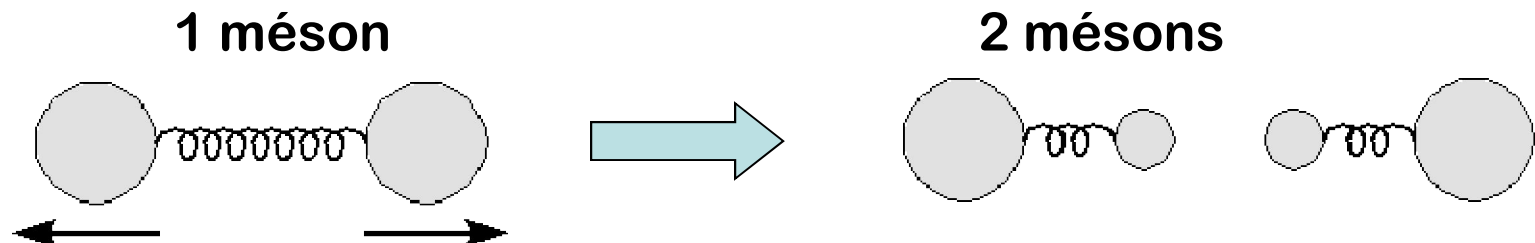
Les antiquarks une “charge d’anticouleur” (1 \rightarrow -1)

Objet neutre pour l’interaction forte : $n_R = n_V = n_B$

- méson : quark-antiquark (de la même couleur/anticouleur)
- (anti)baryon : trois (anti)quarks, un de chaque (anti)couleur.

Interaction forte augmente avec la distance (confinement):

- Plus on veut séparer deux charges, plus on apporte d’énergie
- Si on apporte suffisamment d’énergie ($2m_{\text{quark}}$) : formation d’une paire quark-antiquark :



Rapport $R = \sigma_{e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}} / \sigma_{e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-}$

Pour chaque diagramme : $\sigma \sim |M_{fi}|^2 \sim (q\alpha_{EM})^2$

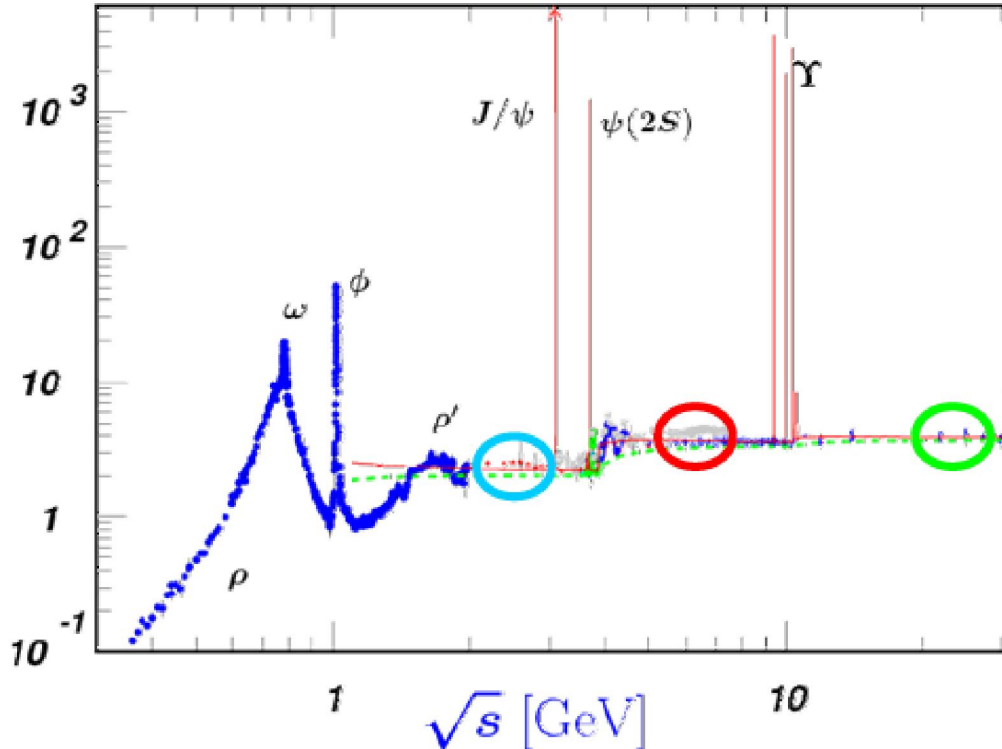
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- : \sigma \sim \alpha_{EM}^2$$

$$e^+e^- \rightarrow u\bar{u}, c\bar{c} : \sigma \sim N_c 4/9 \alpha_{EM}^2$$

$$e^+e^- \rightarrow d\bar{d}, s\bar{s}, b\bar{b} : \sigma \sim N_c 1/9 \alpha_{EM}^2$$

Finalemment : $R = N_c/9(4N_u + N_d)$

Pour $300 < \sqrt{s} < 3000$ MeV	: $N_u=1$ (u), $N_d=2$ (d,s)	: $R = 2/3 N_c$
Pour $3000 < \sqrt{s} < 9500$ MeV	: $N_u=2$ (u,c), $N_d=2$ (d,s)	: $R = 10/9 N_c$
Pour $\sqrt{s} > 9500$ MeV	: $N_u=2$ (u,c), $N_d=3$ (d,s,b)	: $R = 11/9 N_c$



Dans les zones entourées (loin des résonnances), on mesure :

1 : $R = 2,3 \rightarrow N_c = 3,4$

2 : $R = 3,5 \rightarrow N_c = 3,2$

3 : $R = 3,9 \rightarrow N_c = 3,2$

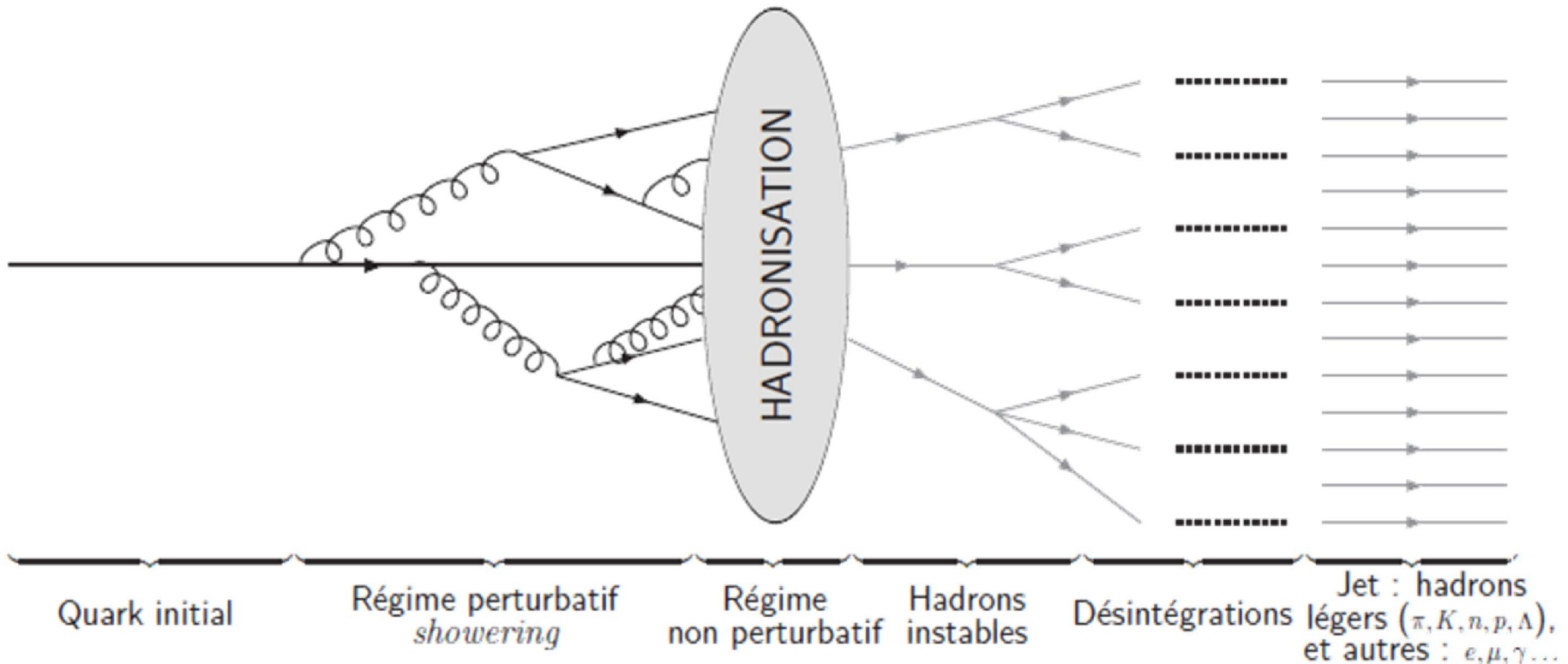
Formation de Jets

Les quarks ne peuvent demeurer isolés (couleur)

→ doivent former des objets “blancs”

- **impulsion relative faible** : les deux quarks forment un état lié ($n\bar{p} \rightarrow \pi^0 d$)

- **grande impulsion** : chaque quark part de son côté en “s’habillant”
→ processus d’hadronisation



faisceau de particules ~stables (nucléons, pions, muons, électrons, neutrinos, photons) dans la **direction du quark initial**, qui se partagent sa 4-impulsion : **JET**

$$e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow q \bar{q} q \bar{q}$$



DELPHI Run: 110163 Evt: 982
Beam: 102.6 GeV Proc: 30-Jun-2001
DAS: 19-May-2000 Scan: 12-Jun-2002
13:03:52 'Tan+D5'L'

