

Nombres (charges) leptoniques L

nombres
quantiques
additifs

Particules	L_e	L_μ	L_τ
e^- , ν_e	+1	0	0
e^+ , $\bar{\nu}_e$	-1	0	0
μ^- , ν_μ	0	+1	0
μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$	0	-1	0
τ^- , ν_τ	0	0	+1
τ^+ , $\bar{\nu}_\tau$	0	0	-1
tous les non-leptons	0	0	0

- La violation des nombres leptoniques (mais pas de leur somme !) est observée seulement dans les phénomènes d'oscillation des neutrinos
 - Prix Nobel de physique 2015

- **Conservation des nombres leptoniques (séparément)**

- exemples:

$$\nu \rightarrow \gamma \gamma$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \gamma$$

$$\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-$$

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

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

$$Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$$

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$$

interdit / pas observé

interdit / pas observé

interdit / pas observé

permis / observé

permis / observé

permis / observé

interdit / observé

Nomenclature ...

- **Hadrons = particules sensibles à l'interaction forte**
 (= particules formées de quarks)
 - Charactérisés par leur nombre baryonique:
 - **baryons** $B = +1$
 - **antibaryons** $B = -1$
 - **mésongs** $B = 0$
 - $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$
- **Leptons = particules insensibles à l'interaction forte**
 - Charactérisés par leur nombres leptoniques:
 - **e, ν_e** $L_e = \pm 1$
 - **μ, ν_μ** $L_\mu = \pm 1$
 - **τ, ν_τ** $L_\tau = \pm 1$
 - $B=0$, autres $L = 0$
- **gluons, γ , Z^0 , W^+ , W^- , H = bosons d'échange**
 - $B = L_e = L_\mu = L_\tau = 0$

Particules étranges

découvertes dès ~ 1950

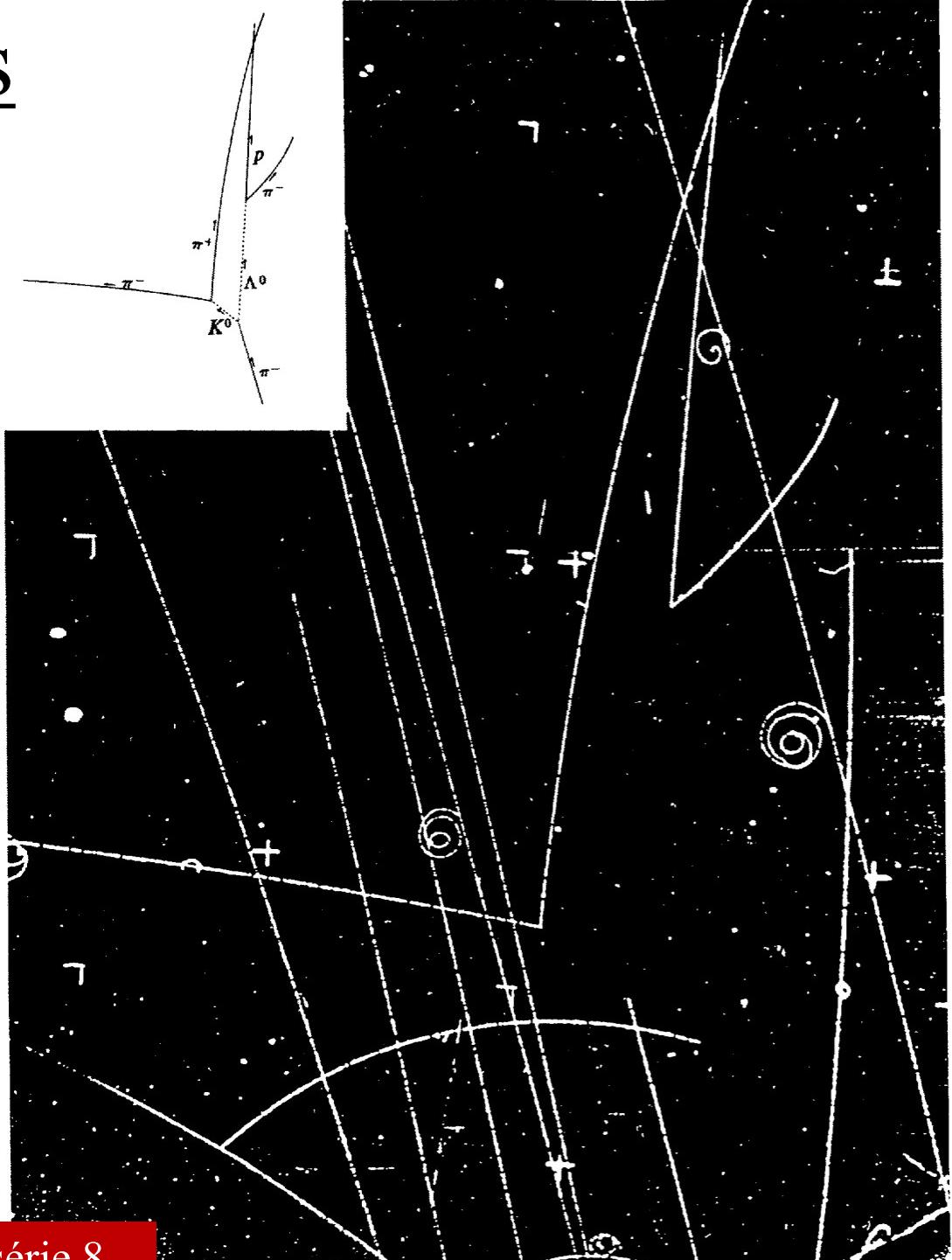
- Hadrons produits par interaction forte, mais avec une **durée de vie moyenne** beaucoup trop grande pour être des résonances caractéristiques de l'interaction forte
→ **étrange !?**

Exemple:

$$\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda$$

$$\text{suivi de } K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \text{ et } \Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$\tau(K^0) \sim \tau(\Lambda) \sim 10^{-10} \text{ s}$$



voir série 8

Charge d'étrangeté

- Les désintégrations du K^0 et du Λ ne se font pas par interaction forte (sinon leur durée de vie serait de $\sim 10^{-23}$ s)
 - quelque chose (une loi de conservation !) les empêche de se désintégrer par interaction forte
 - ils se désintègrent quand même: c'est l'effet d'une autre interaction (l'interaction faible) qui viole cette loi de conservation
- Introduction du concept d'étrangeté S et de la loi de conservation de l'étrangeté, violée par l'interaction faible
 - $S=0$ pour toutes les particules connues jusqu'alors
 - $S\neq 0$ pour les particules étranges
 - On assigne arbitrairement $S(K^0) = +1$ et $S(\Lambda) = -1$, pour que l'étrangeté soit conservée dans la production par interaction forte

$$\begin{aligned} \pi^- & p \rightarrow K^0 \quad \Lambda \\ 0 + 0 & = S(K^0) + S(\Lambda) \quad \Rightarrow \quad S(K^0) = -S(\Lambda) \end{aligned}$$

Particules étranges (suite)

- Désintégrations (faibles) du K^0 et du Λ :
 - S pas conservé, B conservé

$$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$\Lambda \rightarrow p \pi^-$$

$$S: \quad 1 \neq 0 + 0 \quad -1 \neq 0 + 0$$

$$B: B(K^0) = 0 + 0 \quad B(\Lambda) = 1 + 0$$

- Autres processus observés, par interaction forte:
 - S et B conservés

$$\pi^+ n \rightarrow K^0 \Sigma^+$$

$$S: \quad 0 + 0 = 1 + S(\Sigma^+) \quad \Rightarrow \quad S(\Sigma^+) = -1$$

$$B: \quad 0 + 1 = 0 + B(\Sigma^+) \quad \Rightarrow \quad B(\Sigma^+) = +1$$

$$\pi^- p \rightarrow K^0 K^0 \Xi^0$$

$$S: \quad 0 + 0 = 1 + 1 + S(\Xi^0) \quad \Rightarrow \quad S(\Xi^0) = -2$$

$$B: \quad 0 + 1 = 0 + 0 + B(\Xi^0) \quad \Rightarrow \quad B(\Xi^0) = +1$$

etc ...

Particules étranges (fin)

- Finalement

Particules étranges	S	B	I	2I+1 = nombre d'états de charge
Λ	-1	+1	0	1
$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	-1	+1	1	3
Ξ^0, Ξ^-	-2	+1	1/2	2
Ω^-	-3	+1	0	1
K^-, \bar{K}^0	-1	0	1/2	2
K^+, K^0	+1	0	1/2	2

- Note: $Q = I_3 + B/2$ pas valable pour les particules étranges

- Généralisation

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B+S) = I_3 + Y/2$$

Formule de
Gell-Mann
et Nishijima

$Y = B+S$ = hypercharge

Renversement du temps T

- Transformation T:
 - **renversement des vitesses**
 - **échange entre l'état initial et l'état final**
- Exemple d'invariances par T:
 - « prédition » des éclipses passées
 - particule dans un champ électromagnétique
 - réaction nucléaire $p + {}^{27}\text{Al} \rightleftharpoons \alpha + {}^{24}\text{Mg}$
- Attention:
 - l'irréversibilité de certains phénomènes macroscopiques (croissance de l'entropie) est de nature statistique; c'est une question indépendante de l'invariance par T !



Symétrie CPT

- **Théorème:**

Toute théorie quantique des champs locale qui incorpore l'invariance de Lorentz est automatiquement invariante sous la symétrie CPT

- Conséquences:

- les masses d'une particule et de son anti-particule sont égales
 - les temps de vie moyen d'une particule et de son anti-particule sont égaux

- Une observation d'un non-respect de la symétrie CPT impliquerait une violation de l'invariance de Lorentz

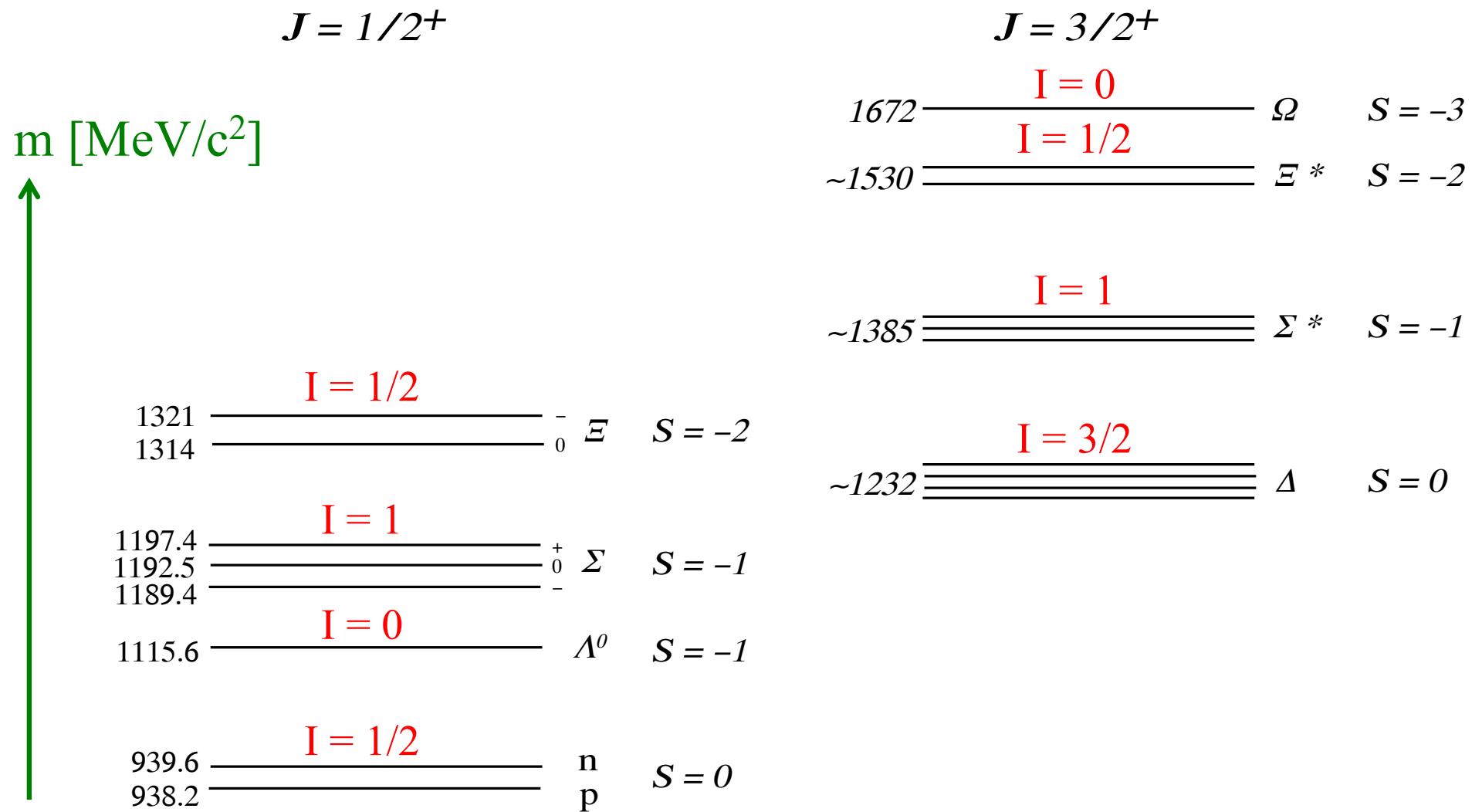
- pas observé jusqu'à présent

- Une violation de CP implique une violation de T

Particules et antiparticules

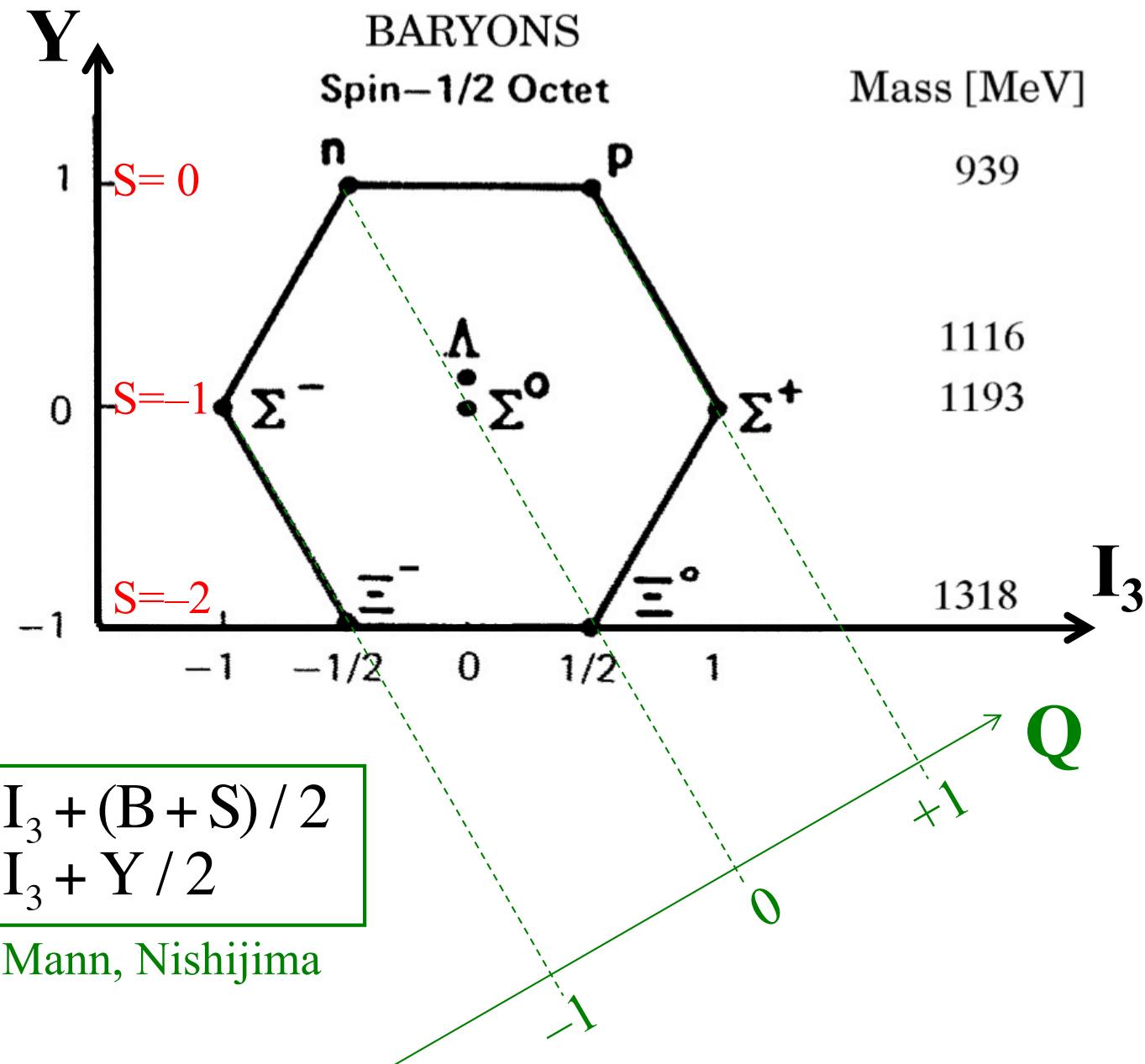
masses m	égales	(théorème CPT)
durées de vie moyennes τ	égales	(théorème CPT)
spins J	égaux	
isospins I	égaux	
composantes I_3	opposées	
parités P	égales si bosons opposées si fermions	
charges (électrique Q , baryonique B , leptoniques L , étrangeté S , ...)	opposées	

Multiplets d'isospin (baryons)



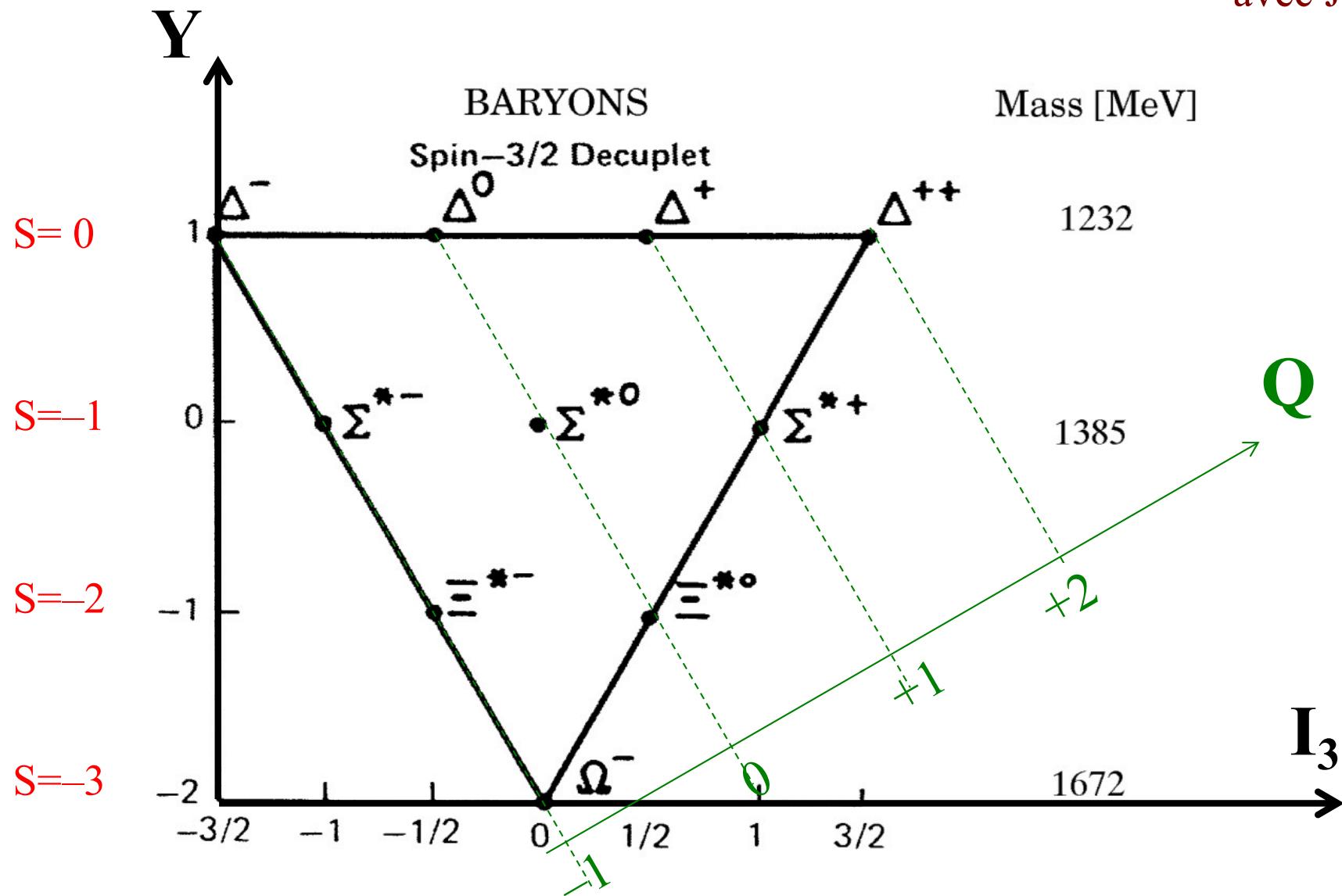
Baryons avec $J^P = 1/2^+$

octet similaire
pour les
antibaryons
avec $J^P=1/2^+$



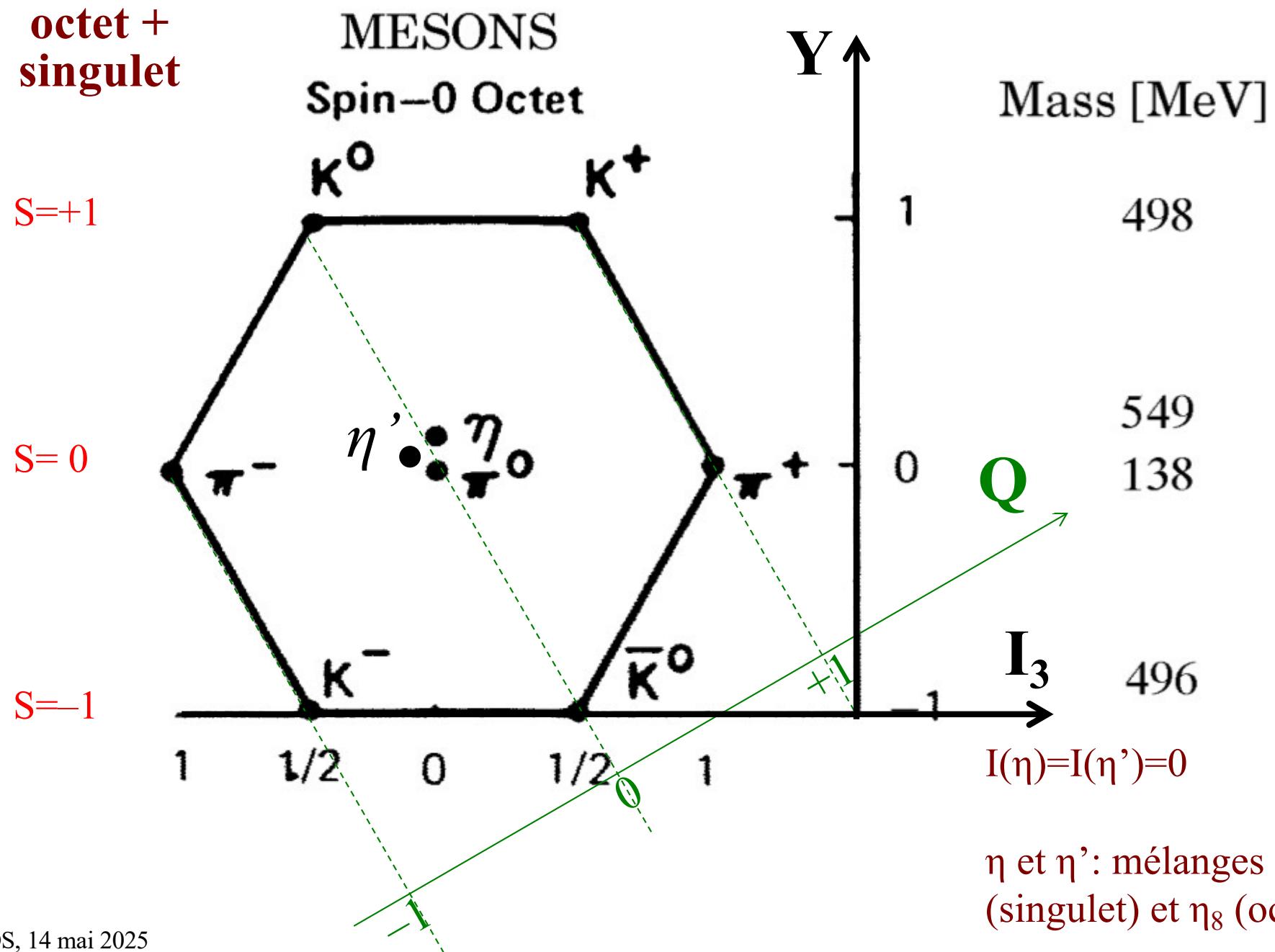
Baryons avec $J^P = 3/2^+$

décuplet similaire
pour les
antibaryons
avec $J^P=3/2^+$

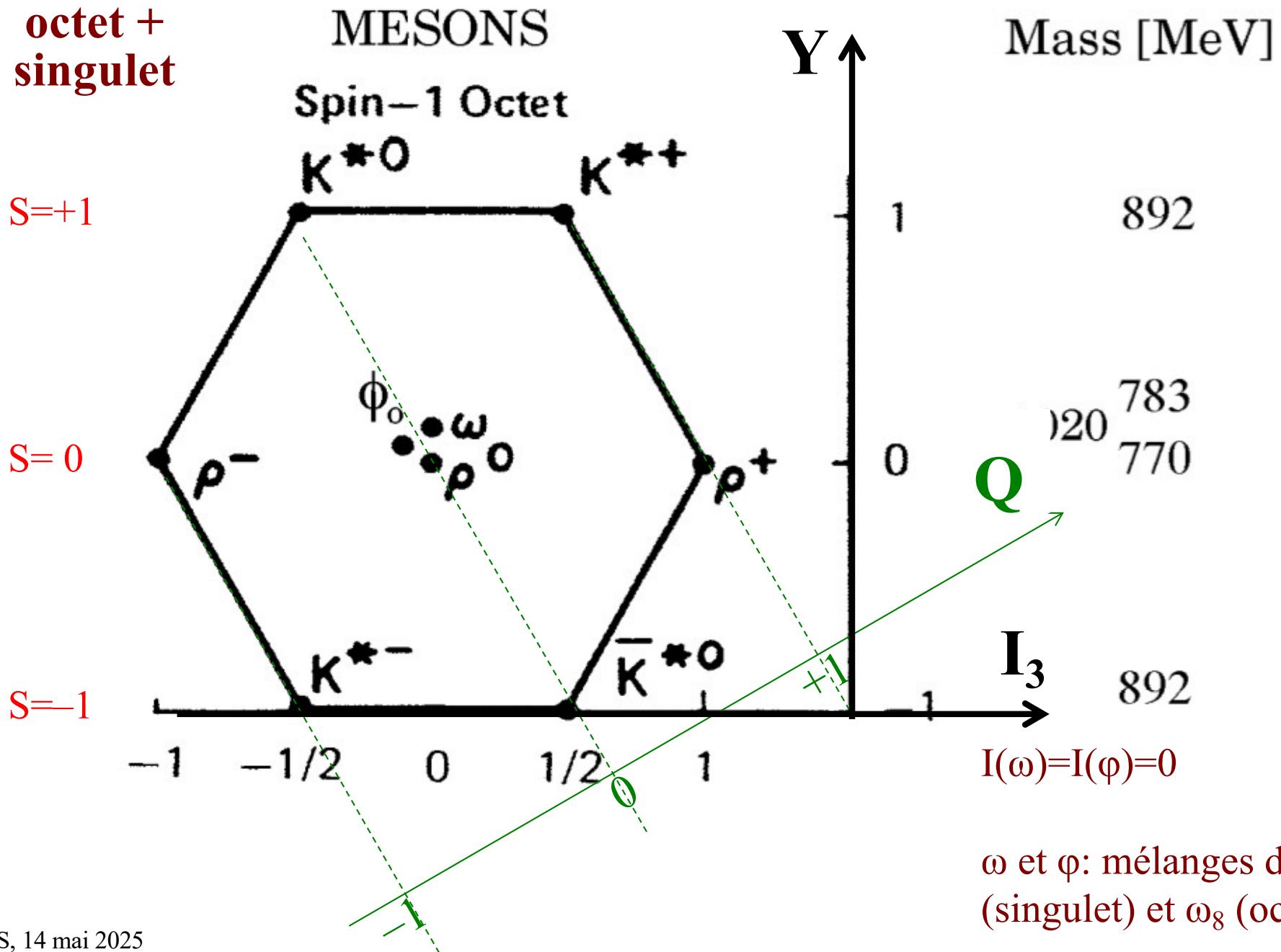


Mésons pseudoscalaires ($J^P = 0^-$)

octet +
singulet



Mésons vecteurs ($J^P = 1^-$)



Analogie

Zoo des chimistes:
multitude d'éléments

Zoo des physiciens:
multitude de hadrons

Classification

Tableau de
Mendeleïev

Multiplets de
baryons et mésons

Découverte/postulat d'un structure sous-jacente

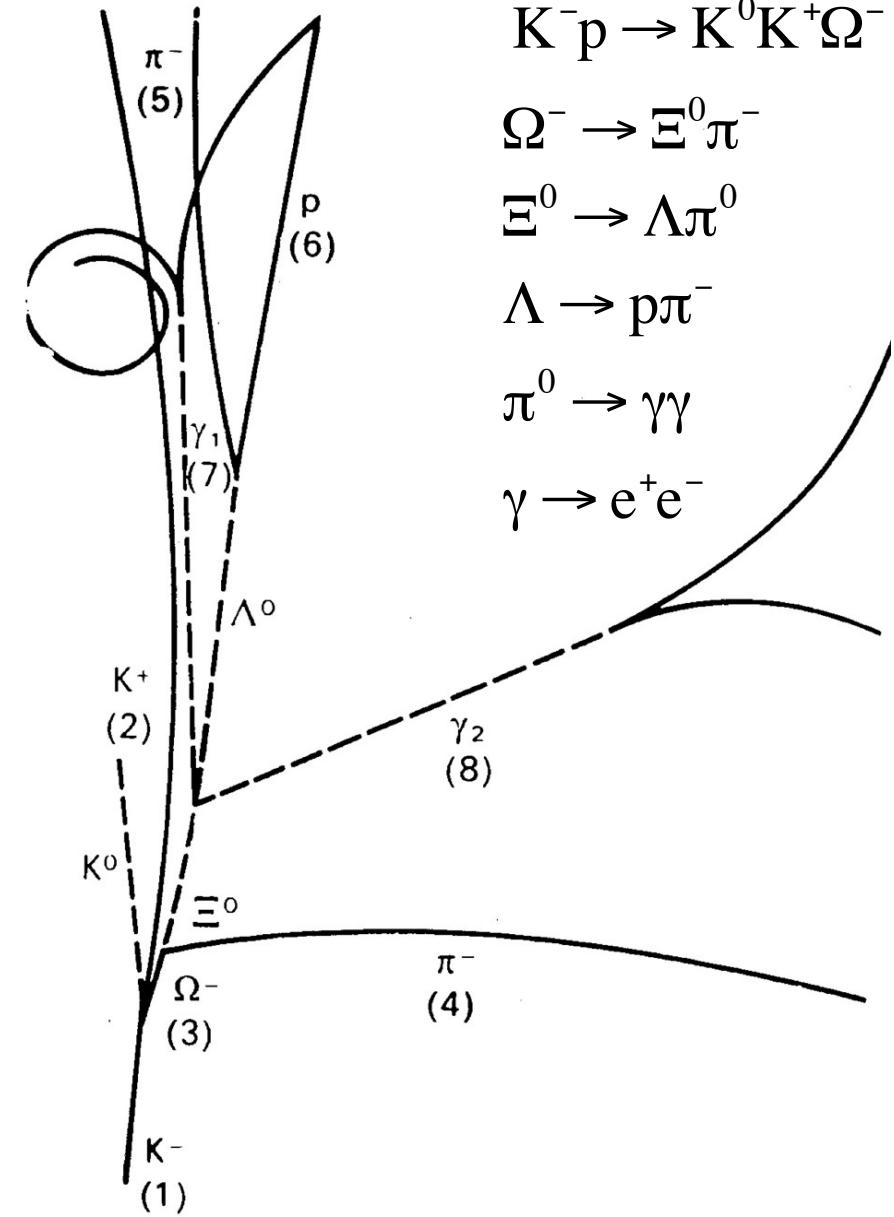
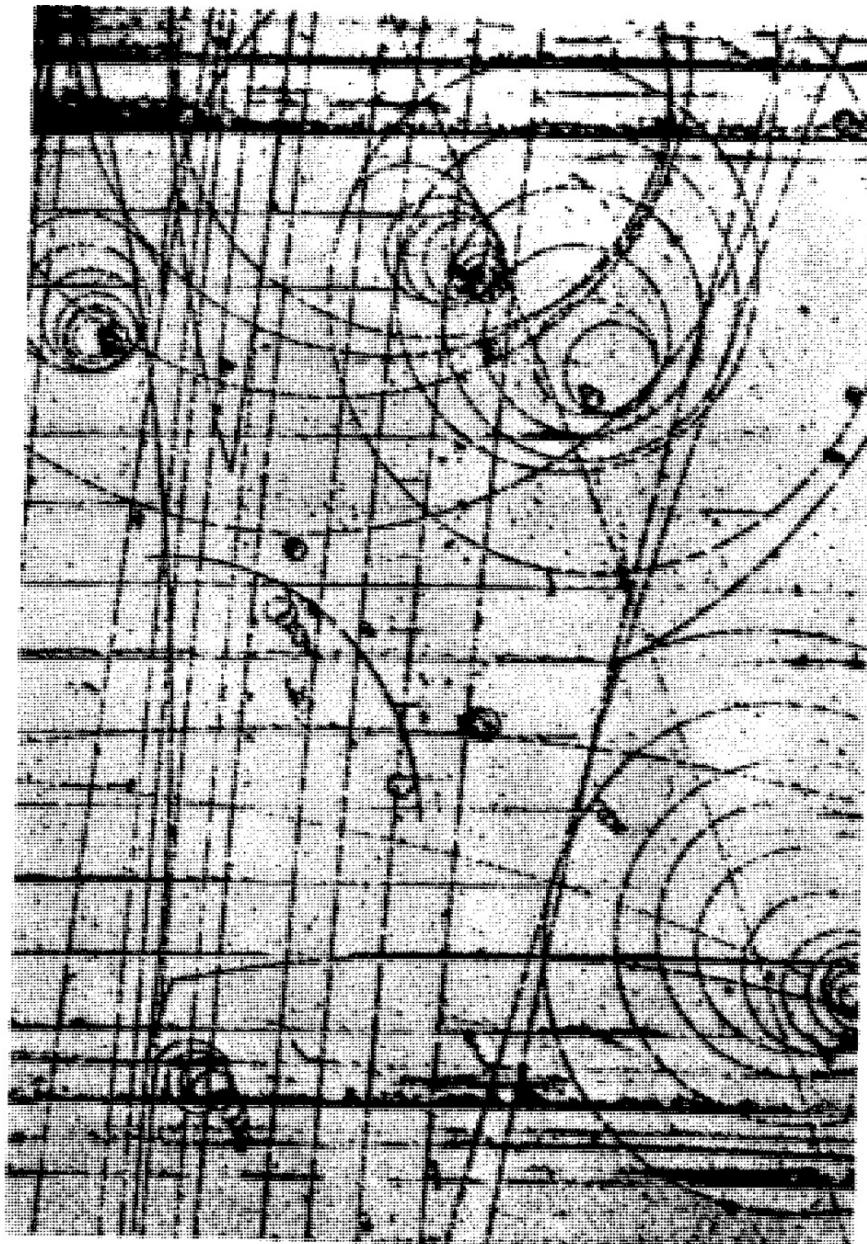
Un atome est formé
de Z électrons et un noyau

Un hadron est
formé de quarks

Diminution du nombre de constitutants élémentaires

Prédiction de l'existence de nouveaux éléments/hadrons

Découverte du baryon Ω^-



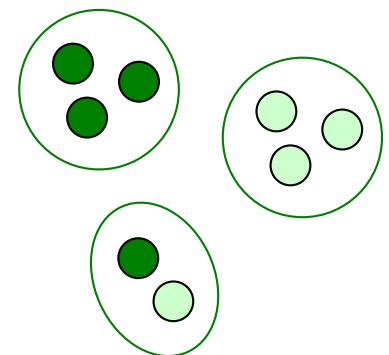
V.E. Barnes et al., Phys. Rev. Lett. 12, 204 (1964)

Le modèle des quarks

Gell-Mann
& Zweig
(~1964)

Postulat: tous les hadrons (connus à l'époque)
sont formés à partir de 3 sortes de quarks

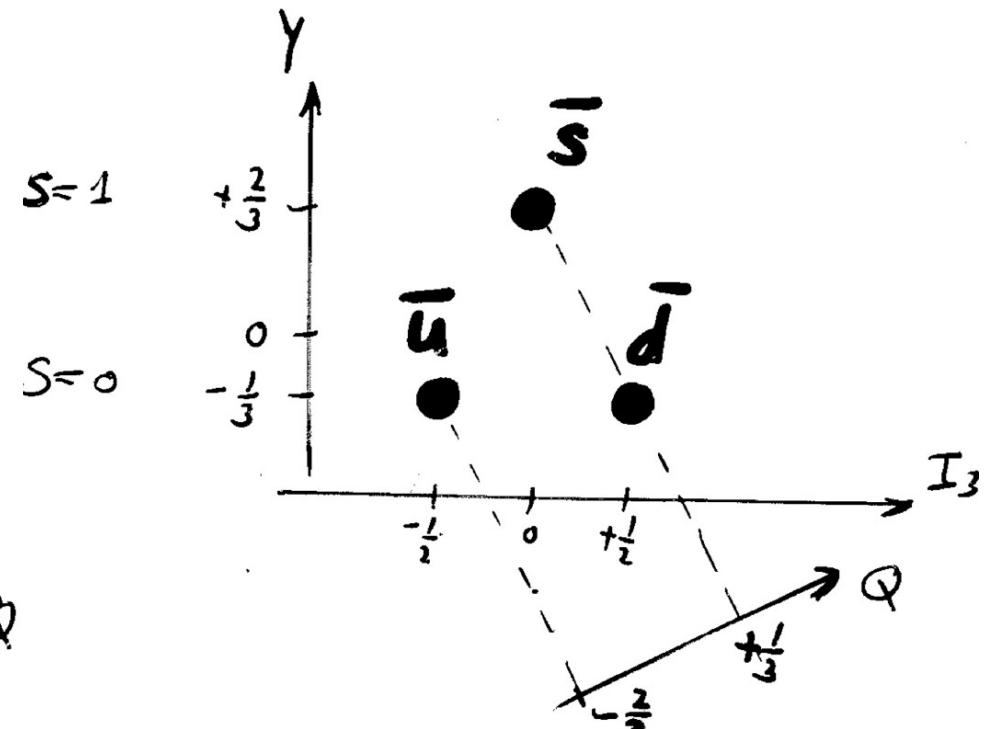
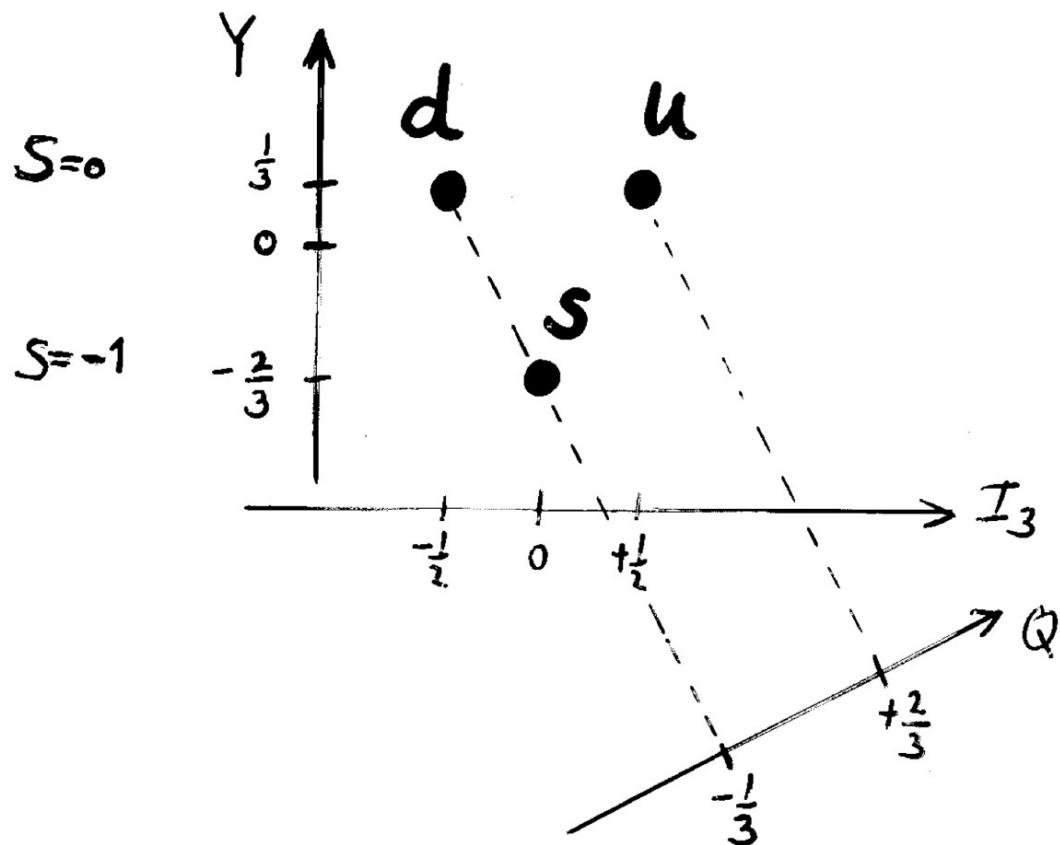
Baryon = quark + quark +quark
Méson = quark + anti-quark



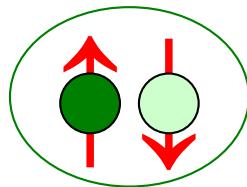
Quark	J^P	B	I	I_3	S	$Y = B+S$	$Q = I_3 + Y/2$
u = up	$1/2^+$	+1/3	1/2	+1/2	0	1/3	+2/3
d = down	$1/2^+$	+1/3	1/2	-1/2	0	1/3	-1/3
s = strange	$1/2^+$	+1/3	0	0	-1	-2/3	-1/3

anti-quarks	$1/2^-$	-1/3	=	$\times(-1)$	$\times(-1)$	$\times(-1)$	$\times(-1)$
-------------	---------	------	---	--------------	--------------	--------------	--------------

Multiplet fondamental



Construction des mésons pseudoscalaires

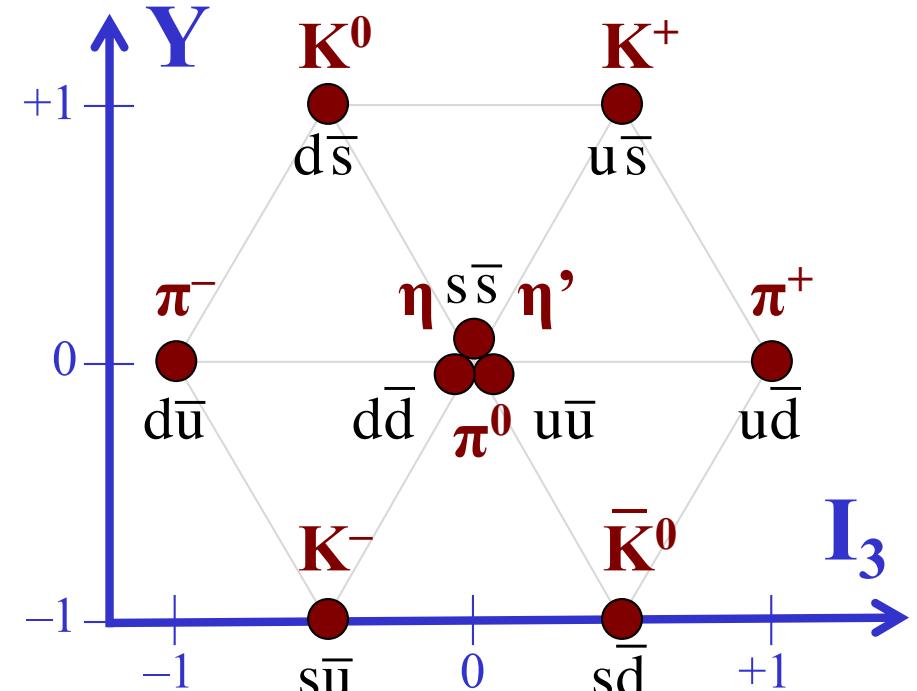


$$\ell = 0, \quad J^P = 0^-$$

- 9 combinaisons de quarks possibles:

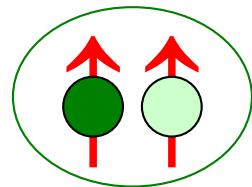
$u\bar{u}$	$d\bar{u}$	$s\bar{u}$
$u\bar{d}$	$d\bar{d}$	$s\bar{d}$
$u\bar{s}$	$d\bar{s}$	$s\bar{s}$

- Plaçons-les sur le diagramme $Y-I_3$:
- Théorie des groupes $SU(3)$:
 $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 = \text{octet} + \text{singulet}$



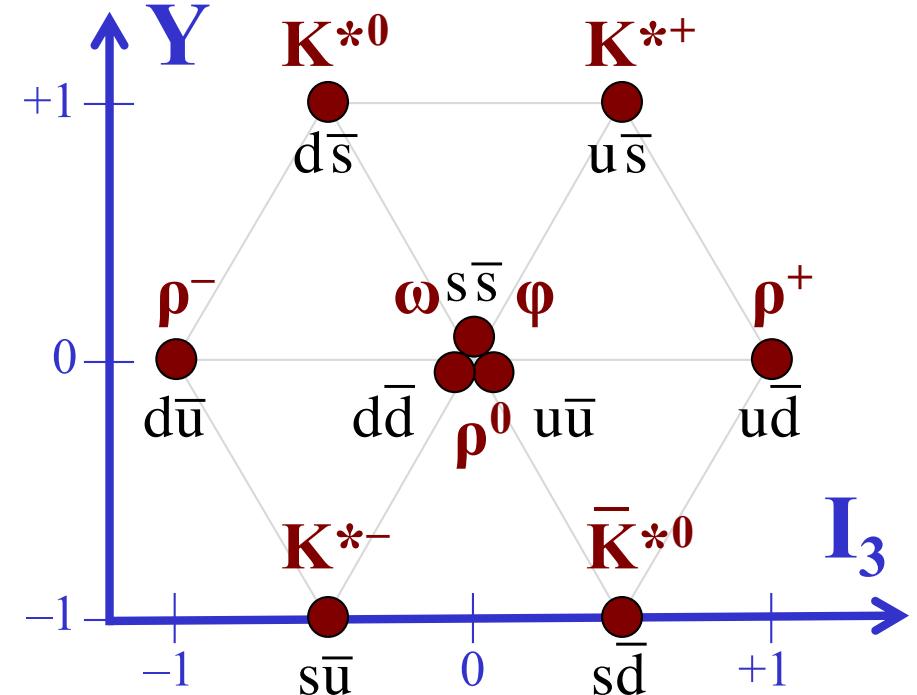
$$\begin{aligned}
 \text{singulet} \quad I = 0, I_3 = 0 : & \quad \frac{1}{\sqrt{3}} (u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}) \\
 \text{octet} \quad \left\{ \begin{array}{l} I = 0, I_3 = 0 : \quad \frac{1}{\sqrt{6}} (u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) \\ I = 1, I_3 = 0 : \quad \frac{1}{\sqrt{2}} (u\bar{u} - d\bar{d}) \end{array} \right. & \xrightarrow{\text{mélange}} \begin{cases} \eta \\ \eta' \\ \pi^0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Construction des mésons vecteurs



$$\ell = 0, \quad J^P = 1^-$$

- 9 combinaisons de quarks possibles:
- | | | |
|------------|------------|------------|
| $u\bar{u}$ | $d\bar{u}$ | $s\bar{u}$ |
| $u\bar{d}$ | $d\bar{d}$ | $s\bar{d}$ |
| $u\bar{s}$ | $d\bar{s}$ | $s\bar{s}$ |
- A nouveau:
 $3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 = \text{octet} + \text{singulet}$

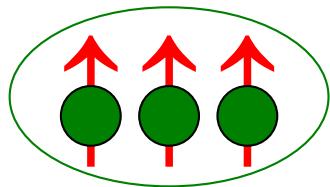


+ construction
d'autres mésons

	$S = 0$	$S = 1$
$\ell = 0$	$J^P = 0^-$	$J^P = 1^-$
$\ell = 1$	$J^P = 1^+$	$J^P = 0^+, 1^+, 2^+$
$\ell = 2$	$J^P = 2^-$	$J^P = 1^-, 2^-, 3^-$
...

Exemple:
mésons tenseurs
 a_2^- , a_2^0 , a_2^+
avec $I=1$, $J^P=2^+$,
 $m \approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$

Construction des baryons avec $J^P=3/2^+$



$$\ell = \ell' = 0, \quad J^P = 3/2^+$$

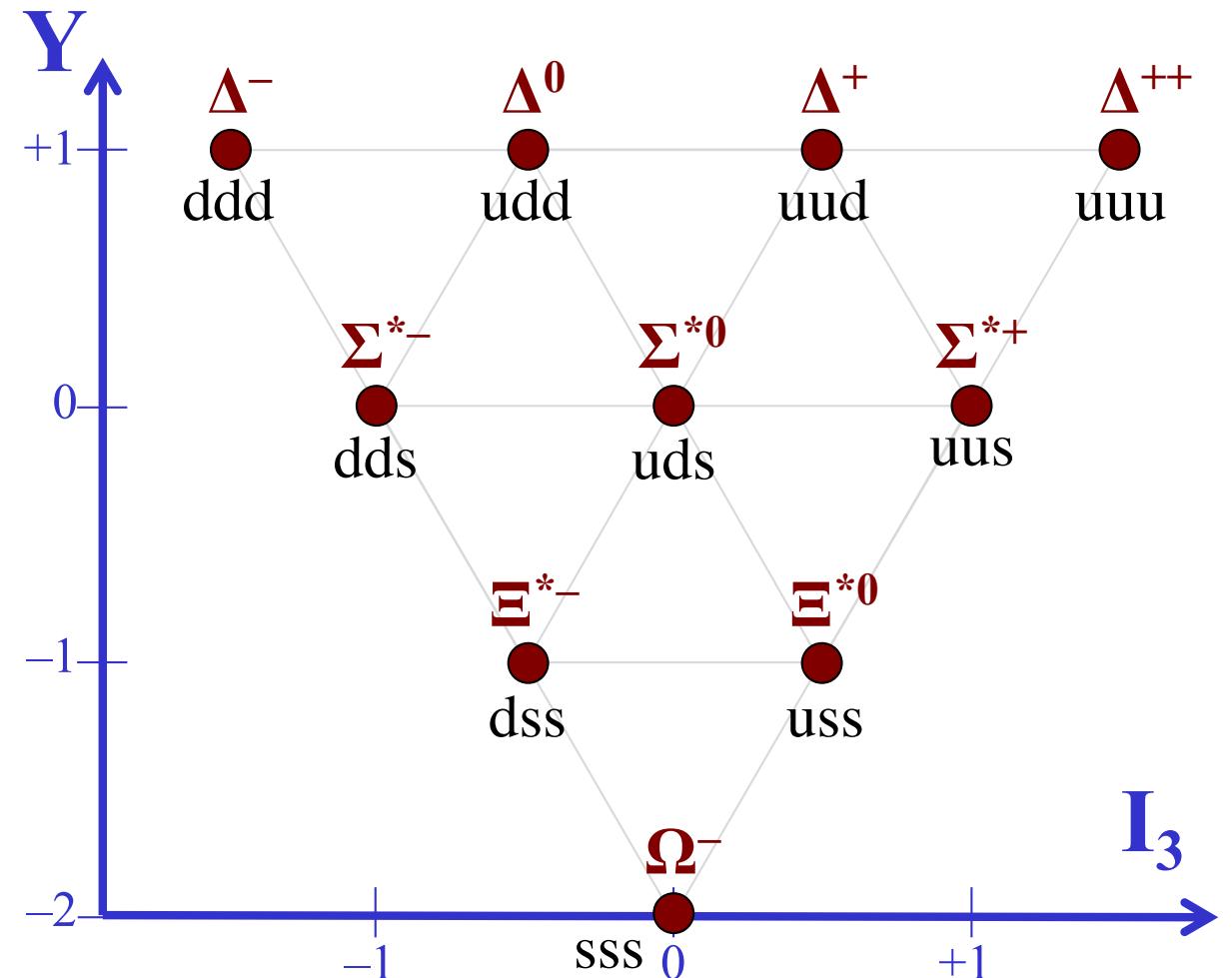
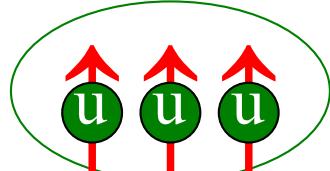
- 10 combinaisons de quarks possibles:

uuu	uud	uus
udd	uds	uss
ddd	dds	dss
sss		



Principe d'exclusion

Dans le Δ^{++} les 3 quarks u sont dans le même état !



Couleur des quarks

- On admet l'existence d'un degré de liberté interne supplémentaire, appelé “charge de couleur”
 - il faut 3 couleurs (**rouge**, **vert**, **bleu**), pour que les 3 quarks u du Δ^{++} ne soient pas dans le même état
- Δ^{++} = système de 3 quarks u avec $J^P=3/2^+$ et $\ell=0$, antisymétrique sous l'échange de 2 quelconques des 3 quarks

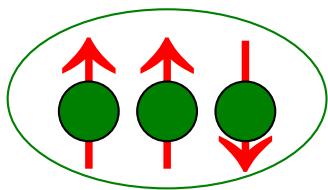
$$|\Delta^{++}\rangle \sim |uuu\rangle - |u\bar{u}u\rangle + |\bar{u}uu\rangle - |\bar{u}\bar{u}u\rangle + |\bar{u}u\bar{u}\rangle - |\bar{u}\bar{u}\bar{u}\rangle$$

- Un tel état totalement antisymétrique est “incolore” (singulet de couleur)

- Tous les hadrons (pas seulement le Δ^{++}) doivent être incolores
- Les combinaisons de quarks incolores les plus simples sont:
 - **rouge+vert+bleu** → baryons
 - **rouge+antirouge** ou **vert+antivert** ou **bleu+antibleu** → mésons

Pas de combinaisons incolores de 1 ou 2 quarks !

Construction des baryons avec $J^P=1/2^+$



$$\ell = \ell' = 0, \quad J^P = 1/2^+$$

- On doit trouver des combinaisons incolores qui satisfassent au principe d'exclusion
 - il ne reste que 8 états possibles

+ construction d'autres baryons
avec $\ell \neq 0$ et/ou $\ell' \neq 0$

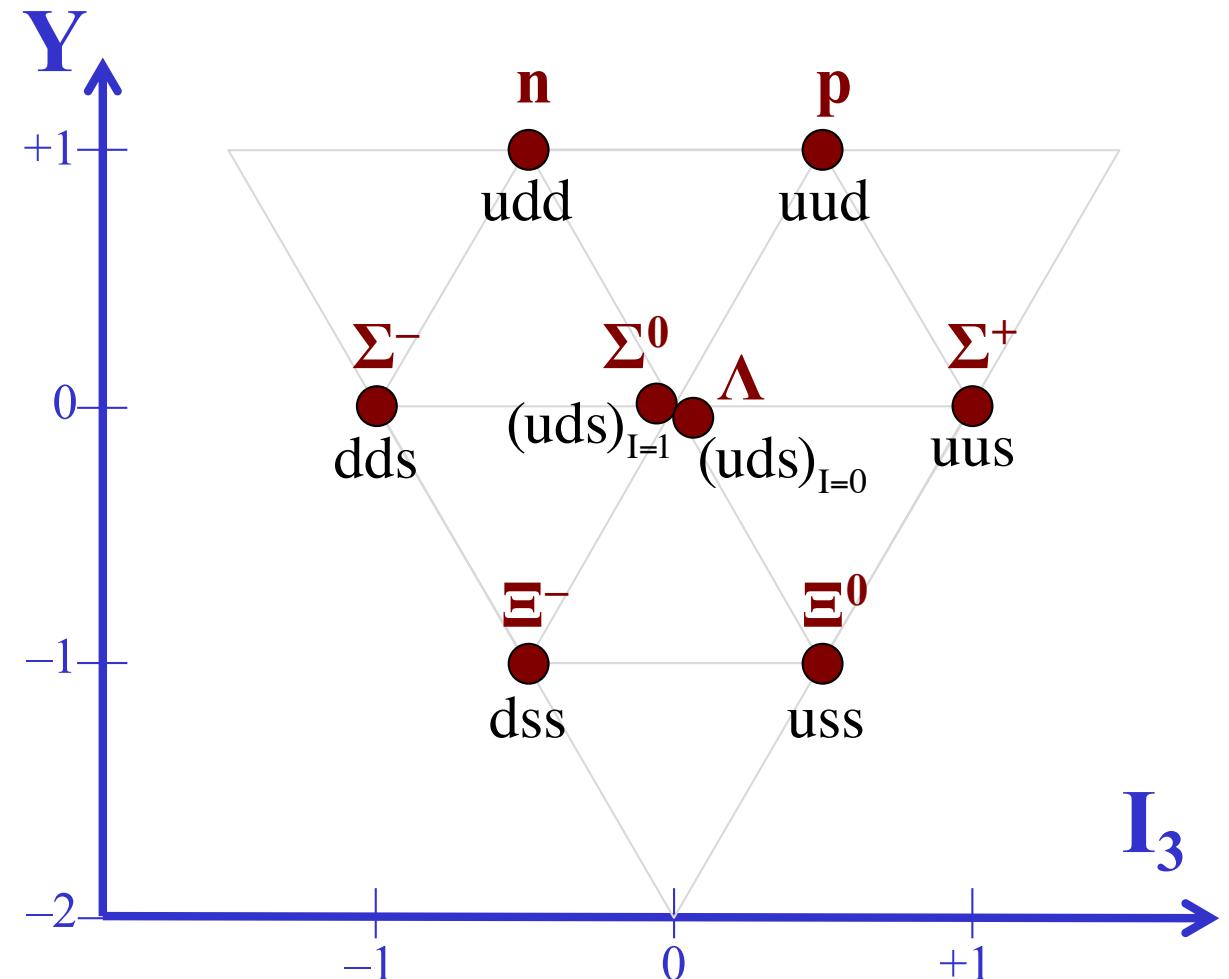


Table des particules

Particule		Q	I	I_3	$S = q_s$	q_c	q_b	q_t	J^P	Masse [MeV/ c^2]	Composition en quarks
<i>BOSONS D'ÉCHANGE</i> $(B = L = 0)$	g	0	0	0	0	0	0	0	1^-	0	—
	γ	0	—	—	0	0	0	0	1^-	0	—
	Z	0	—	—	0	0	0	0	1	91.2×10^3	—
	W^\pm	± 1	—	—	0	0	0	0	1	80.4×10^3	—
	H	0	—	—	0	0	0	0	0^+	125.1×10^3	—
<i>LEPTONS</i> $(B = 0, L = 1)$	e^-	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2$	0.511	—
	ν_e	0	—	—	0	0	0	0	$1/2$	$<2 \times 10^{-6}$	—
	μ^-	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2$	105.7	—
	ν_μ	0	—	—	0	0	0	0	$1/2$	<0.19	—
	τ^-	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2$	1776.9	—
	ν_τ	0	—	—	0	0	0	0	$1/2$	<18.2	—
<i>QUARKS</i> $(B = \frac{1}{3}, L = 0)$	d	-1/3	1/2	-1/2	0	0	0	0	$1/2^+$	4.7	d
	u	+2/3	1/2	+1/2	0	0	0	0	$1/2^+$	2.2	u
	s	-1/3	0	0	-1	0	0	0	$1/2^+$	96	s
	c	+2/3	0	0	0	+1	0	0	$1/2^+$	1.3×10^3	c
	b	-1/3	0	0	0	0	-1	0	$1/2^+$	4.2×10^3	b
	t	+2/3	0	0	0	0	0	+1	$1/2^+$	173.1×10^3	t

Particule		Q	I	I_3	$S = q_s$	q_c	q_b	q_t	J^P	Masse [MeV/ c^2]	Composition en quarks
<i>HADRONS (liste non exhaustive)</i>		<i>MÉSONS ($B = 0, L = 0$)</i>									
<i>BARYONS ($B = 1, L = 0$)</i>		<i>NUCL.</i>									
<i>BARYONS ($S \neq 0, q_c = q_b = q_t = 0$)</i>		<i>HYPRÉONS ($S \neq 0, q_c \neq q_b = q_t = 0$)</i>									
π^\pm	± 1	1	± 1	0	0	0	0	0	0^-	139.6	$u\bar{d}, d\bar{u}$
π^0	0	1	0	0	0	0	0	0	0^-	135.0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$
η^0	0	0	0	0	0	0	0	0	0^-	547.9	$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$
ρ^\pm	± 1	1	± 1	0	0	0	0	0	1^-	775.1	$u\bar{d}, d\bar{u}$
ρ^0	0	1	0	0	0	0	0	0	1^-	775.3	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$
ω	0	0	0	0	0	0	0	0	1^-	782.7	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$
ϕ	0	0	0	0	0	0	0	0	1^-	1019.5	$s\bar{s}$
K^\pm	± 1	$1/2$	$\pm 1/2$	± 1	0	0	0	0	0^-	493.7	$u\bar{s}, s\bar{u}$
K^0	0	$1/2$	$-1/2$	$+1$	0	0	0	0	0^-	497.6	$d\bar{s}$
\bar{K}^0	0	$1/2$	$+1/2$	-1	0	0	0	0	0^-	497.6	$s\bar{d}$
D^\pm	± 1	$1/2$	$\pm 1/2$	0	± 1	0	0	0	0^-	1869.6	$c\bar{d}, d\bar{c}$
D^0	0	$1/2$	$-1/2$	0	$+1$	0	0	0	0^-	1864.8	$c\bar{u}$
\bar{D}^0	0	$1/2$	$+1/2$	0	-1	0	0	0	0^-	1864.8	$u\bar{c}$
B^\pm	± 1	$1/2$	$\pm 1/2$	0	0	± 1	0	0	0^-	5279.3	$u\bar{b}, b\bar{u}$
B^0	0	$1/2$	$-1/2$	0	0	$+1$	0	0	0^-	5279.6	db
\bar{B}^0	0	$1/2$	$+1/2$	0	0	-1	0	0	0^-	5279.6	$b\bar{d}$
J/ψ	0	0	0	0	0	0	0	0	1^-	3096.9	$c\bar{c}$
$\Upsilon(1S)$	0	0	0	0	0	0	0	0	1^-	9460.3	$b\bar{b}$
p	$+1$	$1/2$	$+1/2$	0	0	0	0	$1/2^+$	938.3	uud	
n	0	$1/2$	$-1/2$	0	0	0	0	$1/2^+$	939.6	udd	
Δ^{++}	$+2$	$3/2$	$+3/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~ 1232	uuu	
Δ^+	$+1$	$3/2$	$+1/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~ 1232	uud	
Δ^0	0	$3/2$	$-1/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~ 1232	udd	
Δ^-	-1	$3/2$	$-3/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~ 1232	ddd	
Λ	0	0	0	-1	0	0	0	$1/2^+$	1115.7	uds	
Σ^+	$+1$	1	$+1$	-1	0	0	0	$1/2^+$	1189.4	uus	
Σ^0	0	1	0	-1	0	0	0	$1/2^+$	1192.6	uds	
Σ^-	-1	1	-1	-1	0	0	0	$1/2^+$	1197.4	dds	
Σ^{*+}	$+1$	1	$+1$	-1	0	0	0	$3/2^+$	1383	uus	
Σ^{*0}	0	1	0	-1	0	0	0	$3/2^+$	1384	uds	
Σ^{*-}	-1	1	-1	-1	0	0	0	$3/2^+$	1387	dds	
Ξ^0	0	$1/2$	$+1/2$	-2	0	0	0	$1/2^+$	1314.9	uss	
Ξ^-	-1	$1/2$	$-1/2$	-2	0	0	0	$1/2^+$	1321.7	dss	
Ξ^{*0}	0	$1/2$	$+1/2$	-2	0	0	0	$3/2^+$	1532	uss	
Ξ^{*-}	-1	$1/2$	$-1/2$	-2	0	0	0	$3/2^+$	1535	dss	
Ω^-	-1	0	0	-3	0	0	0	$3/2^+$	1672.5	sss	
Λ_c	$+1$	0	0	0	$+1$	0	0	$1/2^+$	2286.5	udc	
Λ_b	0	0	0	0	0	-1	0	$1/2^+$	5619.6	udb	

Formule de Gell-Mann et Nishijima généralisée (quarks et hadrons) : $Q = I_3 + (B + S + q_c + q_b + q_t)/2$

- Disponible sur le site Moodle
(section “examen”)
 - liste des hadrons non exhaustive
 - Pour une version plus complète
voir <http://pdglive.lbl.gov>