

Nombres (charges) leptoniques L

nombre
quantique
additif

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
$\mu^+, \bar{\nu}_\mu$	0	-1	0
τ^-, ν_τ	0	0	+1
$\tau^+, \bar{\nu}_\tau$	0	0	-1
tous les non-leptons	0	0	0

- Conservation des nombres leptoniques (séparément)**

– exemples:

$\nu \rightarrow \gamma \gamma$ interdit / pas observé
 $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$ interdit / pas observé
 $\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-$ interdit / pas observé

$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ permis / observé
 $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ permis / observé
 $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$ permis / observé

$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$	interdit / observé
-----------------------------	--------------------

- 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

Nomenclature ...

- Hadrons** = particules sensibles à l'interaction forte (= particules formées de quarks)
 - Caractérisés par leur nombre baryonique:
 - baryons** $B = +1$
 - antibaryons** $B = -1$
 - mésons** $B = 0$
 - $L_e = L_\mu = L_\tau = 0$
- Leptons** = particules insensibles à l'interaction forte
 - Caractérisés 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

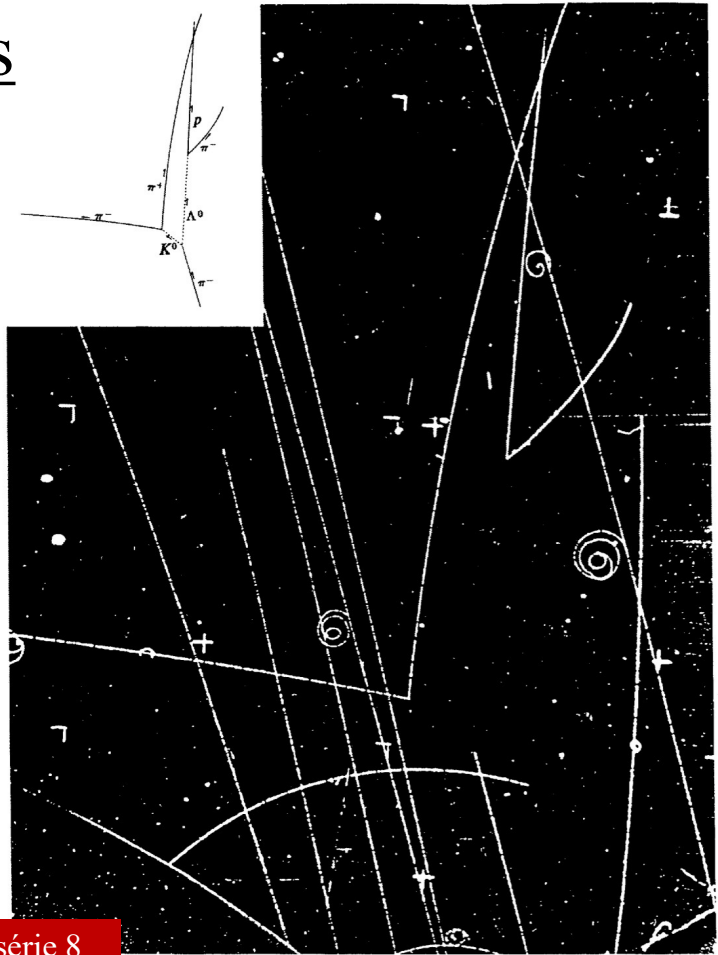
- Hadrons produits par interaction forte, mais avec une **durée de vie moyenne beaucoup trop grande** pour être des résonances caractéristiques de l'interaction forte
→ **étrange !?**

Exemple:

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

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

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



voir série 8

OS, 14 mai 2025

181

Charge d'étrangeté

nombre
quantique
additif

- Les désintégrations du K^0 et du Λ ne se font pas par interaction forte (sinon leur durée de vie serait de $\sim 10^{-23} \text{ s}$)
 - 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

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

$$0 + 0 = S(K^0) + S(\Lambda) \Rightarrow S(K^0) = -S(\Lambda)$$

OS, 14 mai 2025

182

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

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

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

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

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

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

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

etc ...

OS, 14 mai 2025

183

Particules étranges (fin)

- Finalement

Particules étranges	S	B	I	$2I+1 = \text{nombre d'états de charge}$
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

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

OS, 14 mai 2025

184

Renversement du temps T

- Transformation T:
 - **renversement des vitesses**
 - **échange entre l'état initial et l'état final**
- Exemple d'invariances par T:
 - « prédiction » 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

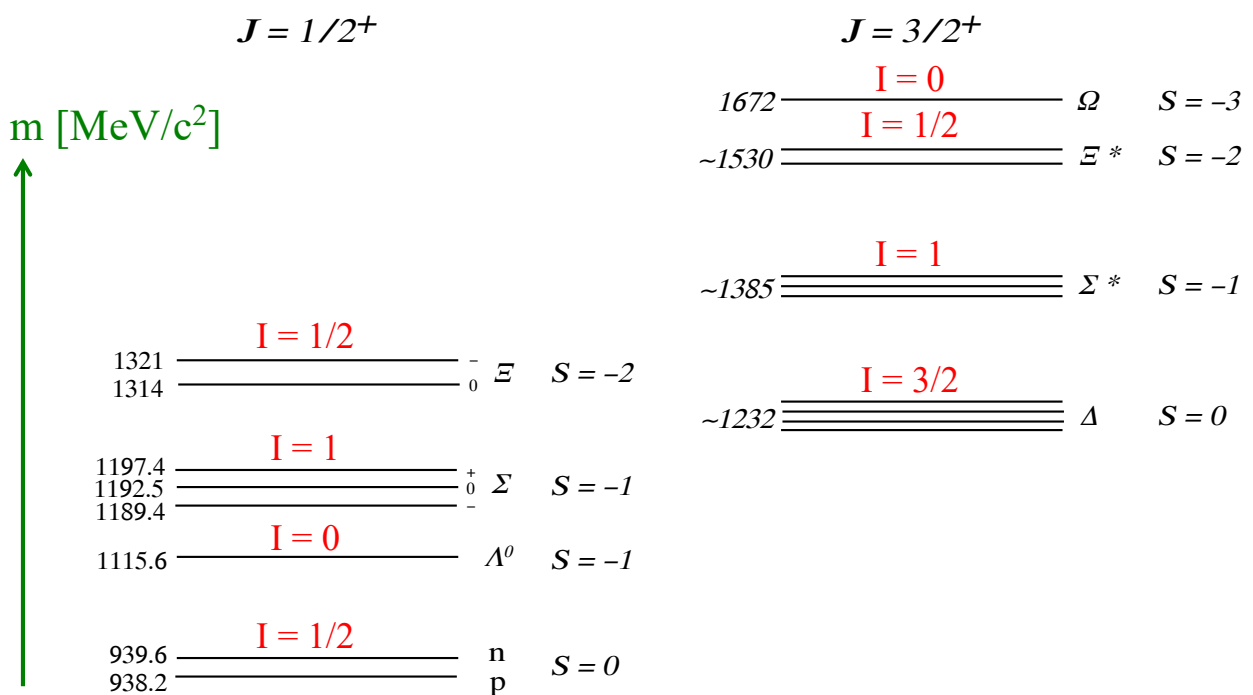
- **Théorème:**

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

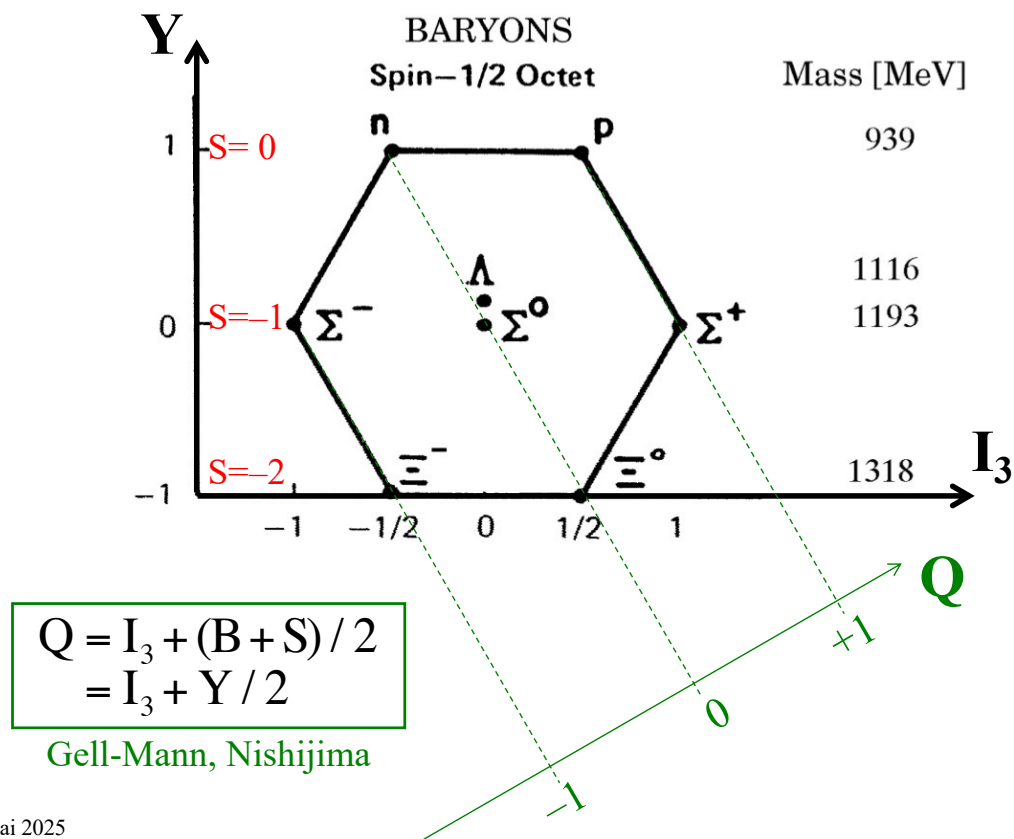
masses m	égales (théorème CPT)
durées de vie moyennes τ	égales (théorème CPT)
spins J	égaux
isospins I	égaux
composantes I_3	opposées
parités P	égales si bosons opposées si fermions
charges (électrique Q , baryonique B , leptoniques L , étrangeté S , ...)	opposées

Multiplets d'isospin (baryons)



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

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

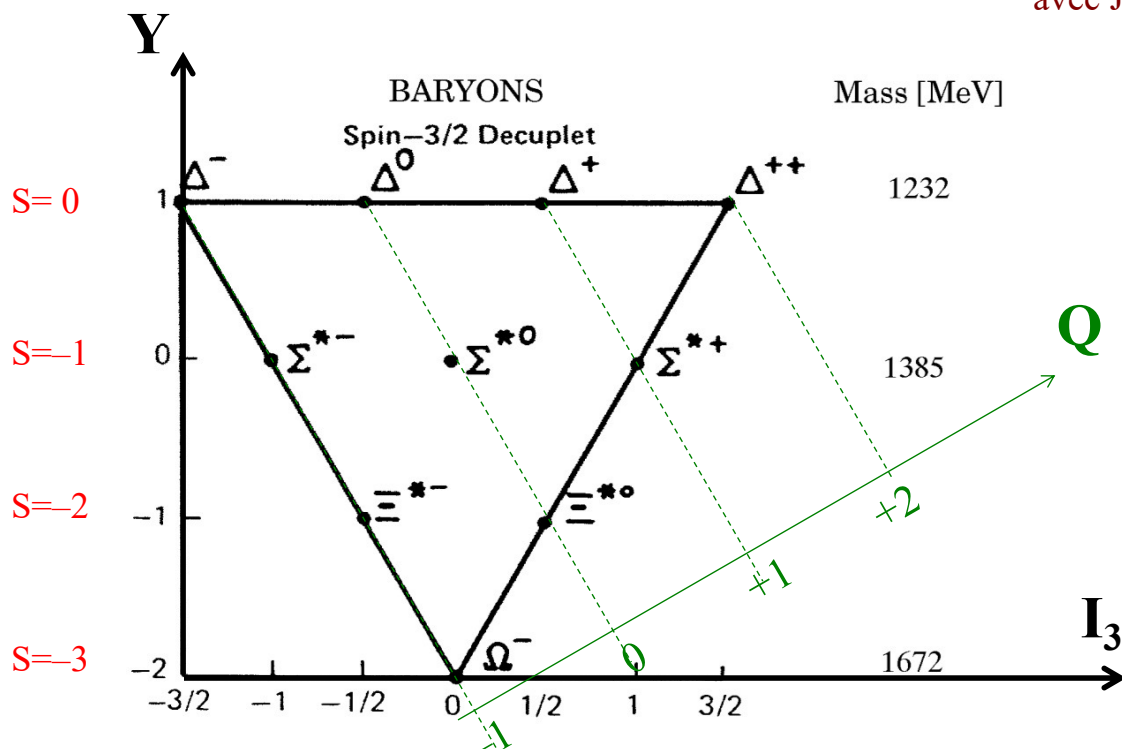


OS, 14 mai 2025

189

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

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

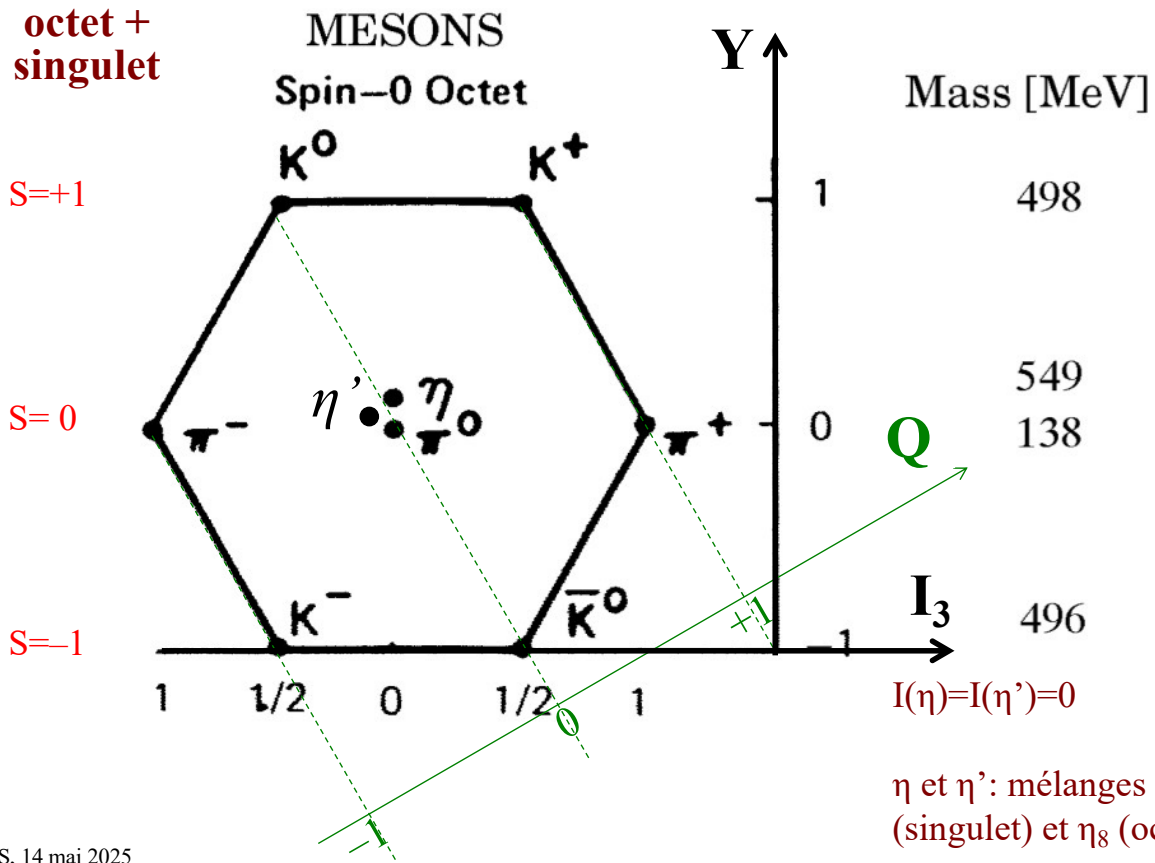


OS, 14 mai 2025

190

Mésons pseudoscalaires ($J^P = 0^-$)

octet +
singlet

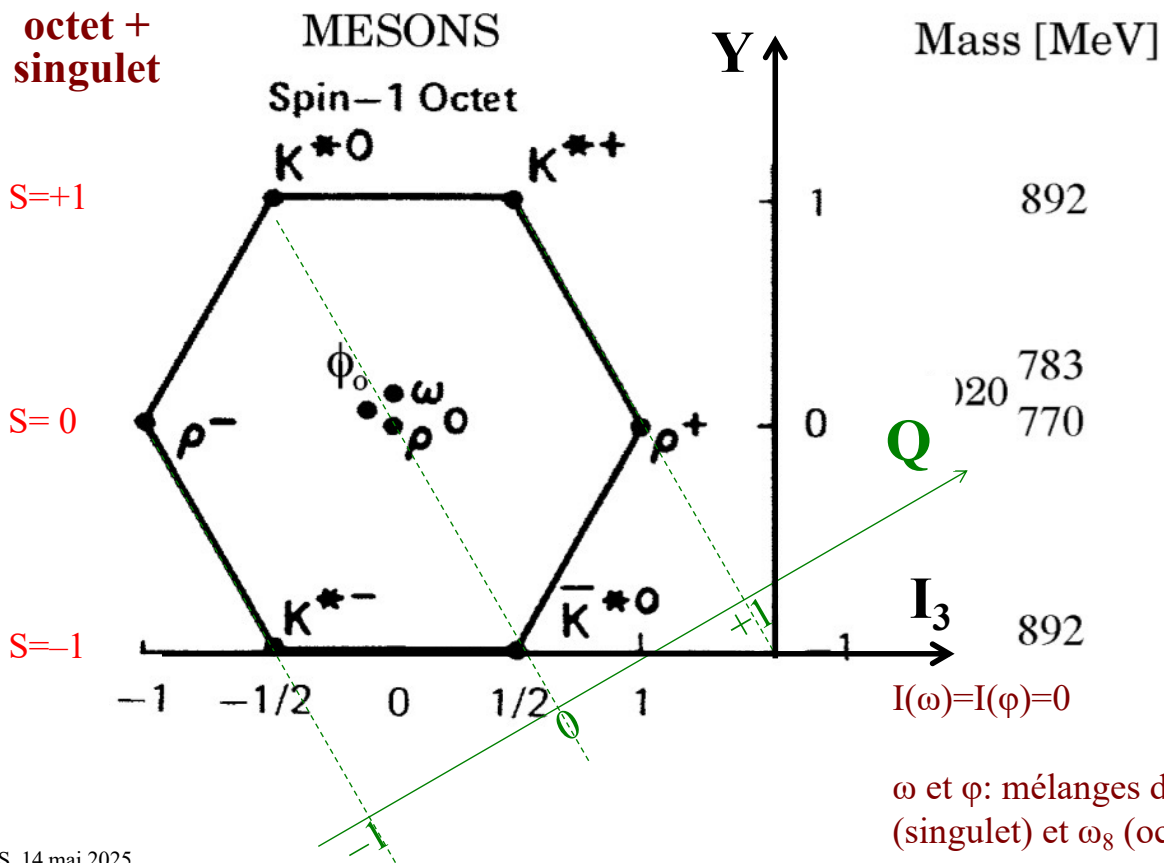


OS, 14 mai 2025

191

Mésons vecteurs ($J^P = 1^-$)

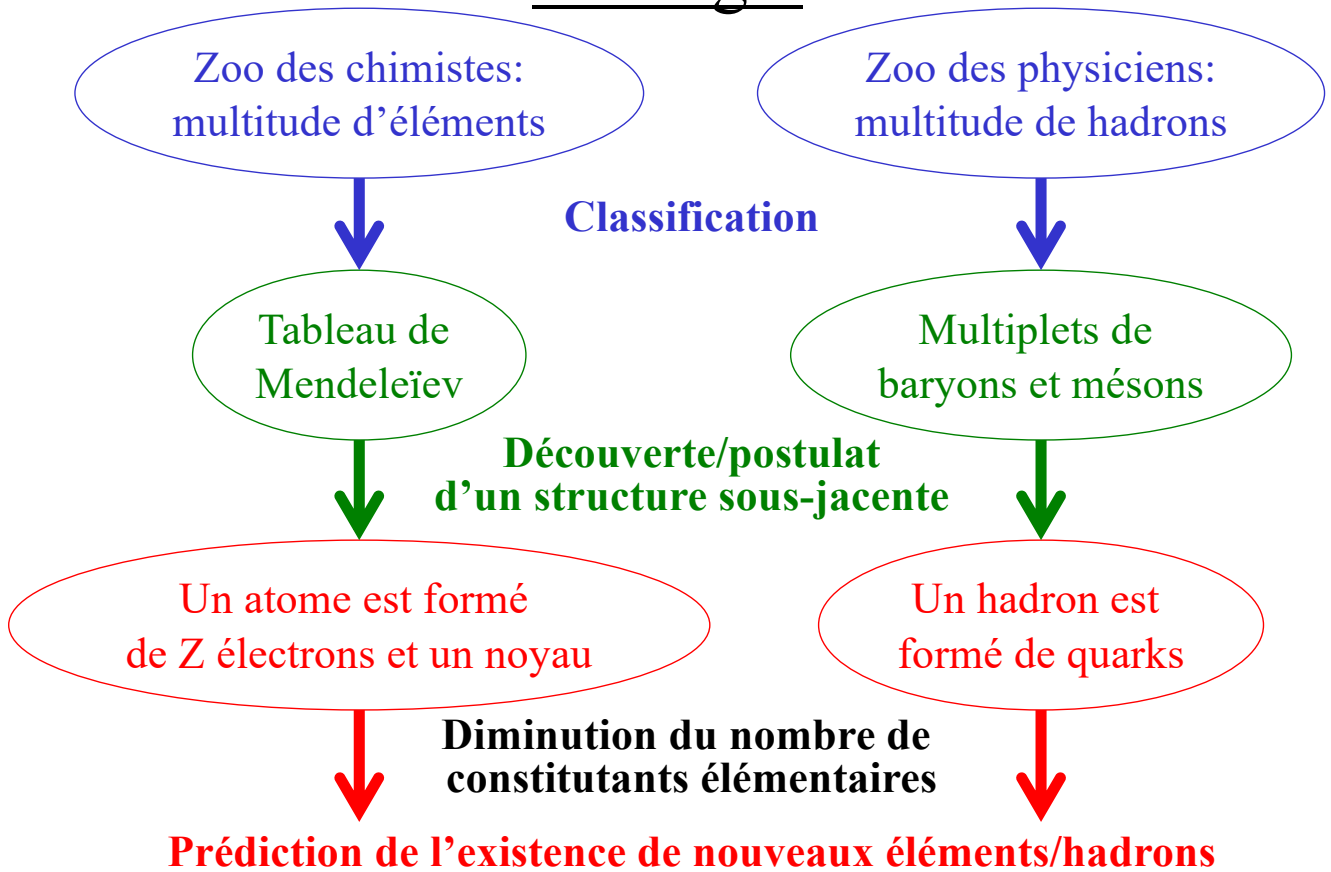
octet +
singlet



OS, 14 mai 2025

192

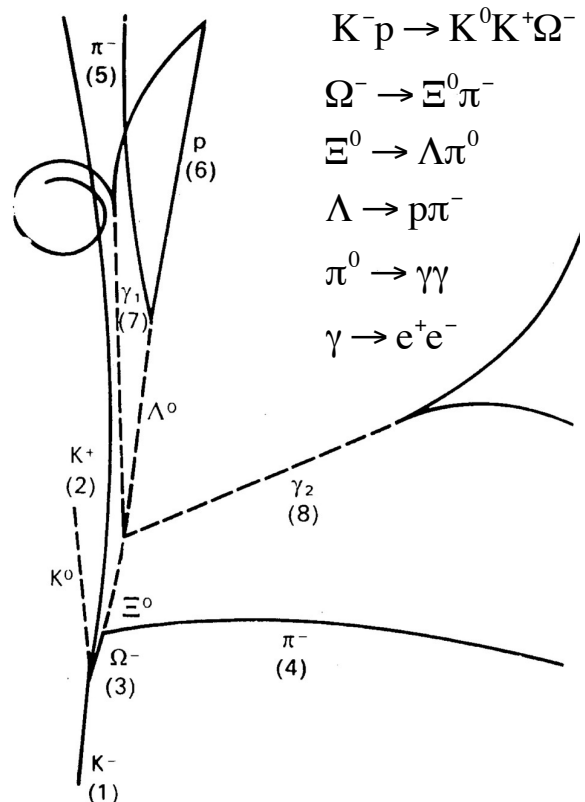
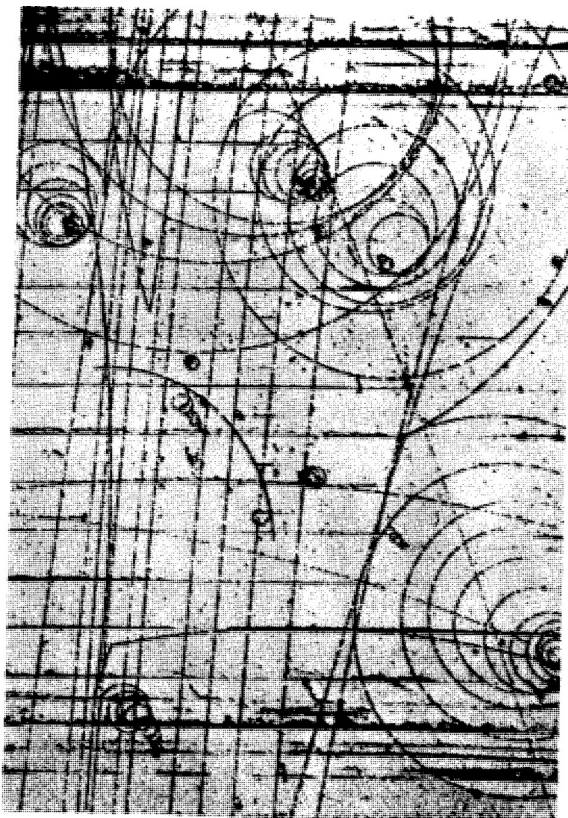
Analogie



OS, 14 mai 2025

193

Découverte du baryon Ω^-



[V.E. Barnes et al., Phys. Rev. Lett. 12, 204 \(1964\)](#)

OS, 14 mai 2025

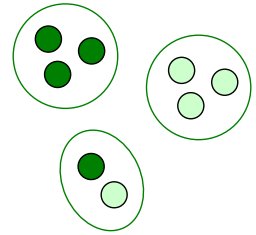
194

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



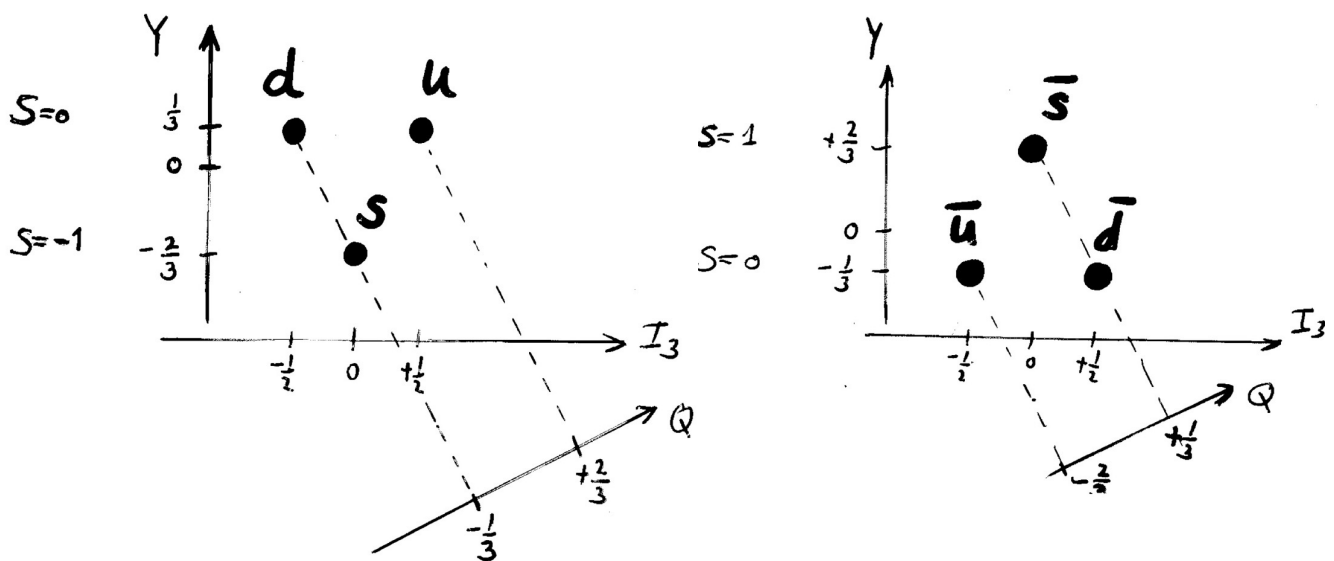
Quark	J^P	B	I	I_3	S	$Y = B + S$	$Q = I_3 + Y/2$
u = up	$1/2^+$	$+1/3$	$1/2$	$+1/2$	0	$1/3$	$+2/3$
d = down	$1/2^+$	$+1/3$	$1/2$	$-1/2$	0	$1/3$	$-1/3$
s = strange	$1/2^+$	$+1/3$	0	0	-1	$-2/3$	$-1/3$

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

OS, 14 mai 2025

195

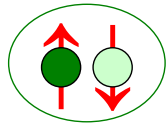
Multiplet fondamental



OS, 14 mai 2025

196

Construction des mésons pseudoscalaires

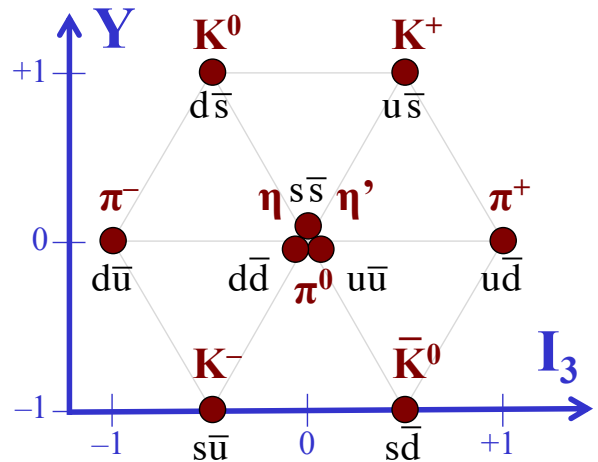


$$\ell = 0, \quad J^P = 0^-$$

- 9 combinaisons de quarks possibles:

$$\begin{matrix} u\bar{u} & d\bar{u} & s\bar{u} \\ u\bar{d} & d\bar{d} & s\bar{d} \\ u\bar{s} & d\bar{s} & s\bar{s} \end{matrix}$$
- Plaçons-les sur le diagramme $Y-I_3$:
- Théorie des groupes $SU(3)$:

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 = \text{octet} + \text{singlet}$$

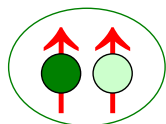


$$\begin{array}{l} \text{singlet} \quad I=0, I_3=0: \quad \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}) \\ \text{octet} \quad \left\{ \begin{array}{l} I=0, I_3=0: \quad \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) \\ I=1, I_3=0: \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}) \end{array} \right\}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

OS, 14 mai 2025

197

Construction des mésons vecteurs

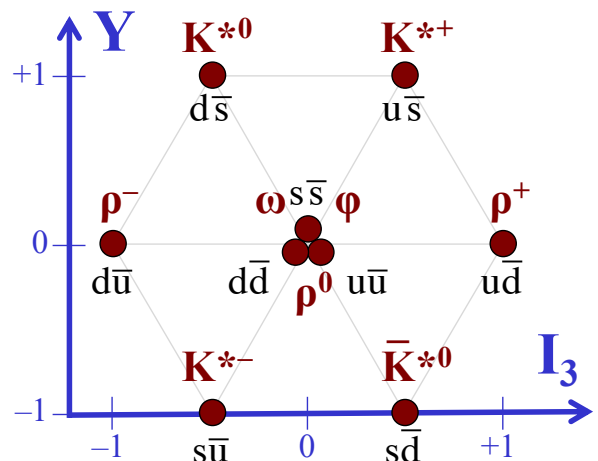


$$\ell = 0, \quad J^P = 1^-$$

- 9 combinaisons de quarks possibles:

$$\begin{matrix} u\bar{u} & d\bar{u} & s\bar{u} \\ u\bar{d} & d\bar{d} & s\bar{d} \\ u\bar{s} & d\bar{s} & s\bar{s} \end{matrix}$$
- A nouveau:

$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 = \text{octet} + \text{singlet}$$



+ construction d'autres mésons

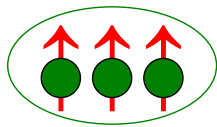
	S = 0	S = 1
$\ell = 0$	$J^P = 0^-$	$J^P = 1^-$
$\ell = 1$	$J^P = 1^+$	$J^P = 0^+, 1^+, 2^+$
$\ell = 2$	$J^P = 2^-$	$J^P = 1^-, 2^-, 3^-$
...

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

OS, 14 mai 2025

198

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



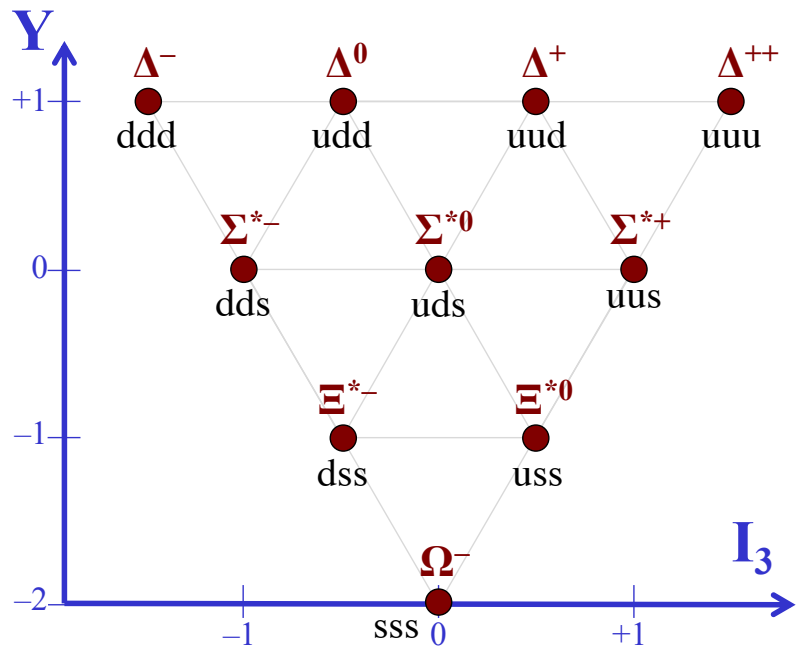
$$\ell = \ell' = 0, \quad J^P = 3/2^+$$

- 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 !



OS, 14 mai 2025

199

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

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

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

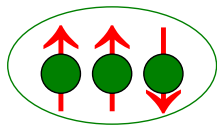
- Tous les hadrons (pas seulement le Δ^{++}) doivent être incolores
- Les combinaisons de quarks incolores les plus simples sont:
 - rouge+vert+bleu** \rightarrow baryons
 - rouge+antirouge** ou **vert+antivert** ou **bleu+antibleu** \rightarrow mésons

OS, 14 mai 2025

Pas de combinaisons incolores de 1 ou 2 quarks !

200

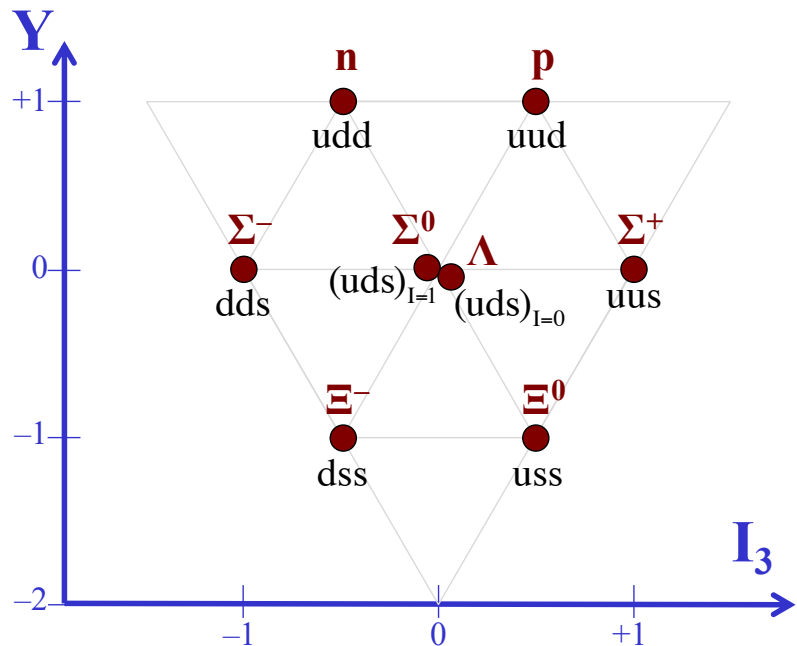
Construction des baryons avec $J^P=1/2^+$



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

- 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 $\ell' \neq 0$



OS, 14 mai 2025

201

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
BOSONS D'ÉCHANGE ($B=0, L=0$)	γ	0	0	0	0	0	0	1 ⁻	0	-
	Z	0	0	0	0	0	0	1 ⁻	91.2 × 10 ³	-
	W^\pm	±1	0	0	0	0	0	1	80.4 × 10 ³	-
	H	0	0	0	0	0	0	0 ⁺	125.1 × 10 ³	-
										-
LEPTONS ($B=0, L=1$)	e^-	-1	0	0	0	0	0	1/2 ⁻	0.511	-
	ν_e	0	0	0	0	0	0	1/2 ⁻	< 2 × 10 ⁻⁶	-
	μ^-	-1	0	0	0	0	0	1/2 ⁻	105.7	-
	ν_μ	0	0	0	0	0	0	1/2 ⁻	< 0.19	-
	τ^-	-1	0	0	0	0	0	1/2 ⁻	1776.9	-
QUARKS ($B=1/3, L=0$)	d	-1/3	1/2	-1/2	0	0	0	1/2 ⁺	4.7	d
	u	+2/3	1/2	+1/2	0	0	0	1/2 ⁺	2.2	u
	s	-1/3	0	0	-1	0	0	1/2 ⁺	96	s
	c	+2/3	0	0	0	+1	0	1/2 ⁺	1.3 × 10 ³	c
	b	-1/3	0	0	0	0	-1	1/2 ⁺	4.2 × 10 ³	b
	t	+2/3	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
HADRONS (liste non exhaustive)	MÉSONS ($B=0, L=0$)	π^\pm	±1	1	±1	0	0	0 ⁻	139.6	ud, dū
		π^0	0	1	0	0	0	0 ⁻	135.0	(uū - dđ)/√2
		η^0	0	0	0	0	0	0 ⁻	547.9	(uū + dđ - 2ss)/√6
		ρ^\pm	±1	1	±1	0	0	1 ⁻	775.1	ud, dū
		ρ^0	0	1	0	0	0	1 ⁻	775.3	(uū - dđ)/√2
		ω	0	0	0	0	0	1 ⁻	782.7	(uū + dđ)/√2
		ϕ	0	0	0	0	0	1 ⁻	1019.5	ss
		K^\pm	±1	1/2	±1/2	±1	0	0 ⁻	493.7	us, sū
		K^0	0	1/2	-1/2	+1	0	0 ⁻	497.6	ds
		\bar{K}^0	0	1/2	+1/2	-1	0	0 ⁻	497.6	sđ
		D^\pm	±1	1/2	±1/2	0	±1	0 ⁻	1869.6	cd, dc
		D^0	0	1/2	-1/2	0	+1	0 ⁻	1864.8	cū
		\bar{D}^0	0	1/2	+1/2	0	-1	0 ⁻	1864.8	uc
		B^\pm	±1	1/2	±1/2	0	0	±1	5279.3	ub, bū
		B^0	0	1/2	-1/2	0	+1	0 ⁻	5279.6	db
HADRONS (liste non exhaustive)	BARYONS ($B=1, L=0$)	Λ	0	0	0	-1	0	0 ⁻	1115.7	uds
		Σ^+	+1	1	+1	-1	0	0 ⁻	1189.4	uus
		Σ^0	0	1	0	-1	0	0 ⁻	1192.6	uds
		Σ^-	-1	1	-1	-1	0	0 ⁻	1197.4	dds
		Σ^{*+}	+1	1	+1	-1	0	3/2 ⁺	1383	uus
		Σ^{*0}	0	1	0	-1	0	3/2 ⁺	1384	uds
		Σ^{*-}	-1	1	-1	-1	0	3/2 ⁺	1387	dds
		Ξ^0	0	1/2	+1/2	-2	0	0 ⁻	1314.9	uss
		Ξ^-	-1	1/2	-1/2	-2	0	0 ⁻	1321.7	dss
		Ξ^{*0}	0	1/2	+1/2	-2	0	3/2 ⁺	1532	uss
		Ξ^{*-}	-1	1/2	-1/2	-2	0	3/2 ⁺	1535	dss
		Ω^-	-1	0	0	-3	0	0 ⁻	1672.5	sss
		Λ_c	+1	0	0	0	+1	0 ⁻	2286.5	udc
		Λ_b	0	0	0	0	-1	0 ⁻	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>

OS, 14 mai 2025

202