

# Nombres (charges) leptoniques L

nombres  
quantiques  
additifs

Particules	L <sub>e</sub>	L <sub>μ</sub>	L <sub>τ</sub>
e <sup>-</sup> , ν <sub>e</sub>	+1	0	0
e <sup>+</sup> , ν̄ <sub>e</sub>	-1	0	0
μ <sup>-</sup> , ν <sub>μ</sub>	0	+1	0
μ <sup>+</sup> , ν̄ <sub>μ</sub>	0	-1	0
τ <sup>-</sup> , ν <sub>τ</sub>	0	0	+1
τ <sup>+</sup> , ν̄ <sub>τ</sub>	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:

ν → γγ	interdit / pas observé
μ <sup>-</sup> → e <sup>-</sup> γ	interdit / pas observé
μ <sup>-</sup> → e <sup>-</sup> e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	interdit / pas observé
μ <sup>-</sup> → e <sup>-</sup> ν̄ <sub>e</sub> ν <sub>μ</sub>	permis / observé
n → p e <sup>-</sup> ν̄ <sub>e</sub>	permis / observé
Z → τ <sup>+</sup> τ <sup>-</sup>	permis / observé
ν <sub>e</sub> → ν <sub>μ</sub>	interdit / observé

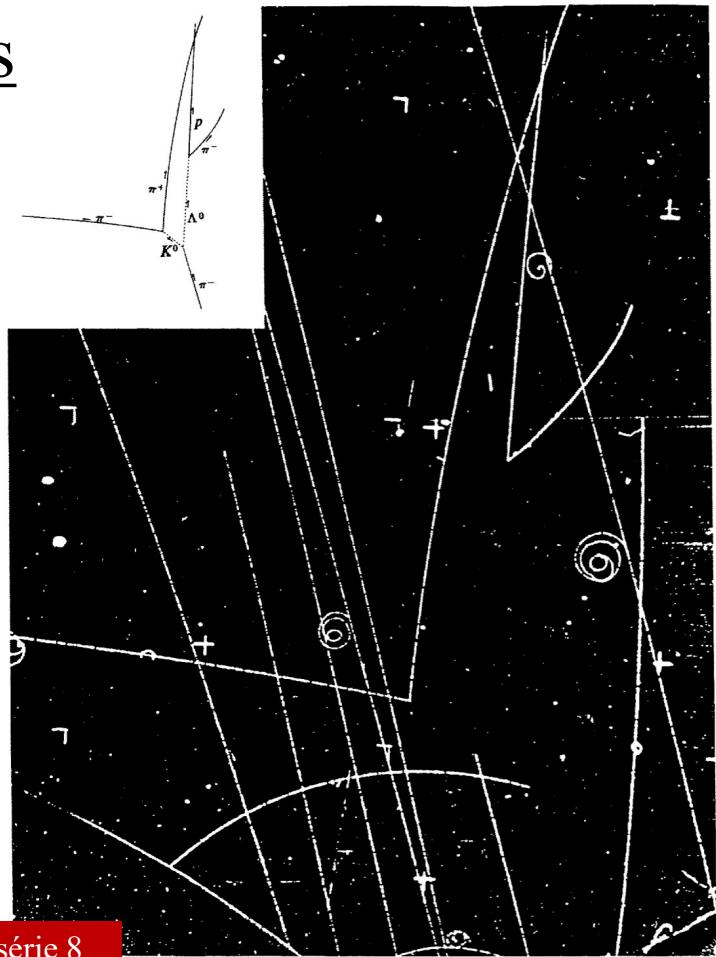
## Nomenclature ...

- **Hadrons = particules sensibles à l'interaction forte**  
(= particules formées de quarks)
  - Charactérisés par leur nombre baryonique:
    - **baryons**      B = +1
    - **antibaryons** B = -1
    - **mésons**        B = 0
  - L<sub>e</sub> = L<sub>μ</sub> = L<sub>τ</sub> = 0
- **Leptons = particules insensibles à l'interaction forte**
  - Charactérisés par leur nombres leptoniques:
    - **e, ν<sub>e</sub>**    L<sub>e</sub> = ±1
    - **μ, ν<sub>μ</sub>**    L<sub>μ</sub> = ±1
    - **τ, ν<sub>τ</sub>**    L<sub>τ</sub> = ±1
  - B=0, autres L = 0
- **gluons, γ, Z<sup>0</sup>, W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>, H = bosons d'échange**
  - B = L<sub>e</sub> = L<sub>μ</sub> = L<sub>τ</sub> = 0

# Particules étranges

découvertes dès  $\sim 1950$

- 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 !?**



OS, 14 mai 2025

voir série 8

181

## Charge d'étrangeté

nombre quantique additif

- Les désintégrations du  $K^0$  et du  $\Lambda$  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

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

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

OS, 14 mai 2025

182

# Particules étranges (suite)

- Désintégrations (faibles) du  $K^0$  et du  $\Lambda$ :
  - 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 ...

# Particules étranges (fin)

- Finalement

Particules étranges	S	B	I	2I+1 = nombre d'états de charge
$\Lambda$	-1	+1	0	1
$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$	-1	+1	1	3
$\Xi^0, \Xi^-$	-2	+1	1/2	2
$\Omega^-$	-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

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

# 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

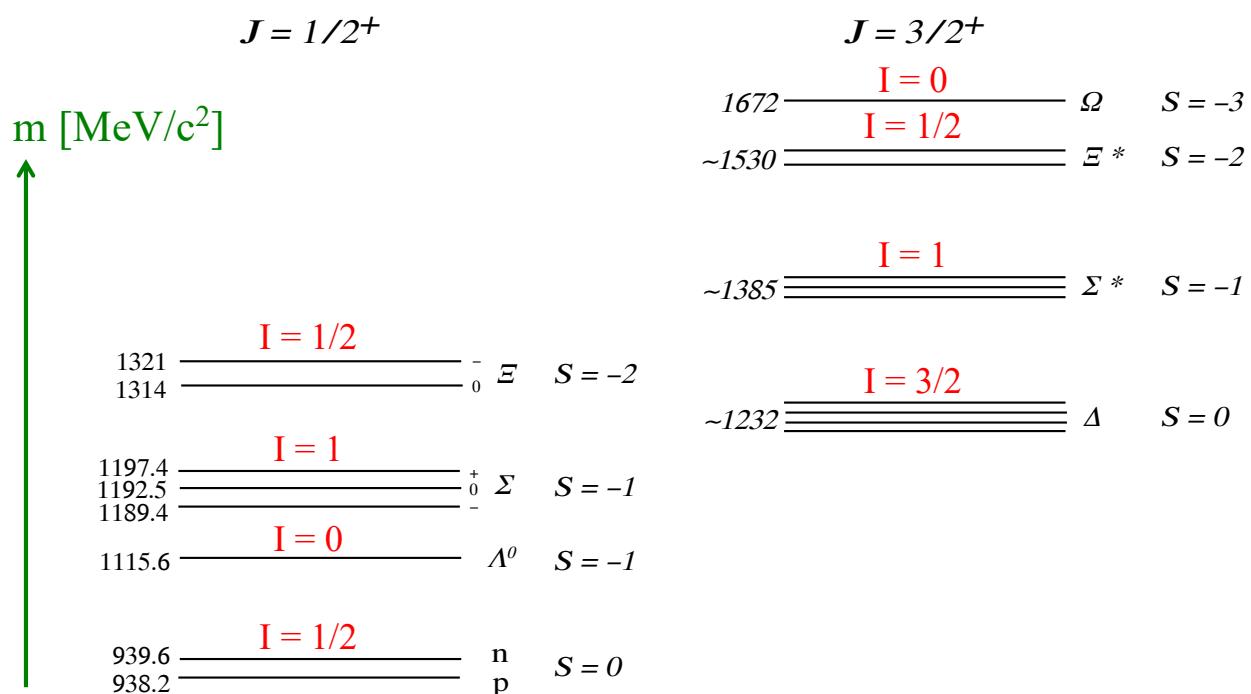
- **Théorème:**

**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

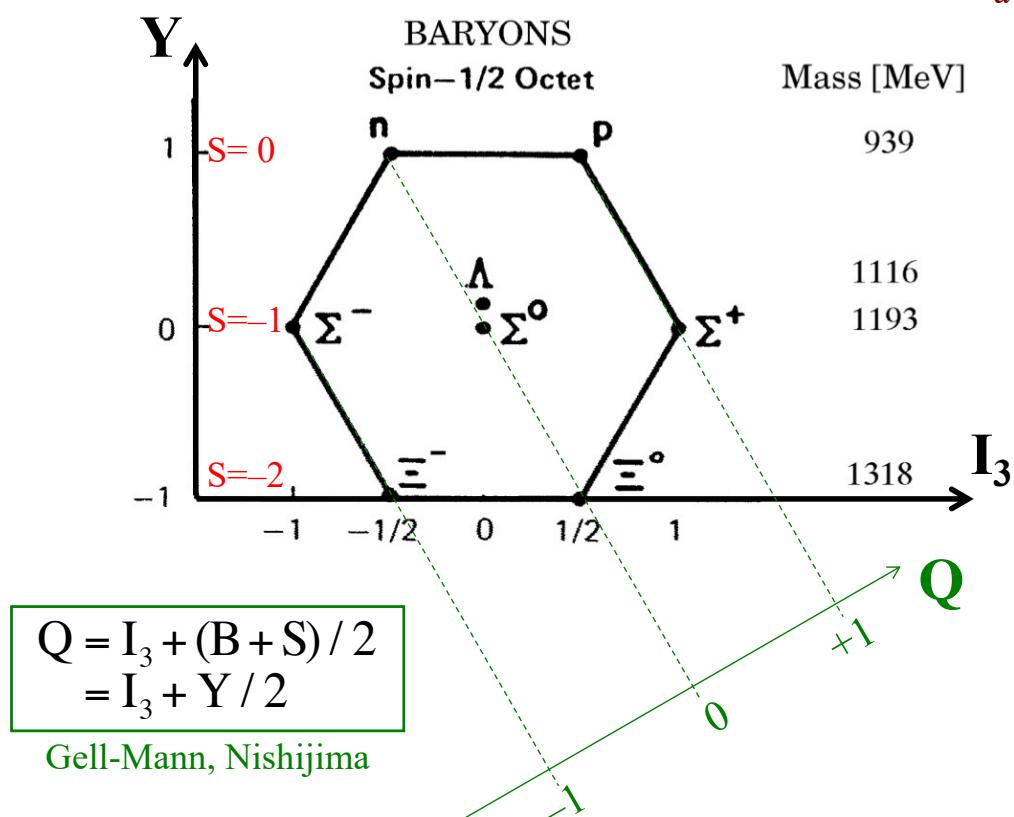
masses m	égales	(théorème CPT)
durées de vie moyennes $\tau$	égales	(théorème CPT)
spins J	égaux	
isospins I	égaux	
composantes $I_3$	opposées	
parités P	égales si bosons opposées si fermions	
charges (électrique Q, baryonique B, leptoniques L, étrangeté S, ...)		

## Multiplets d'isospin (baryons)



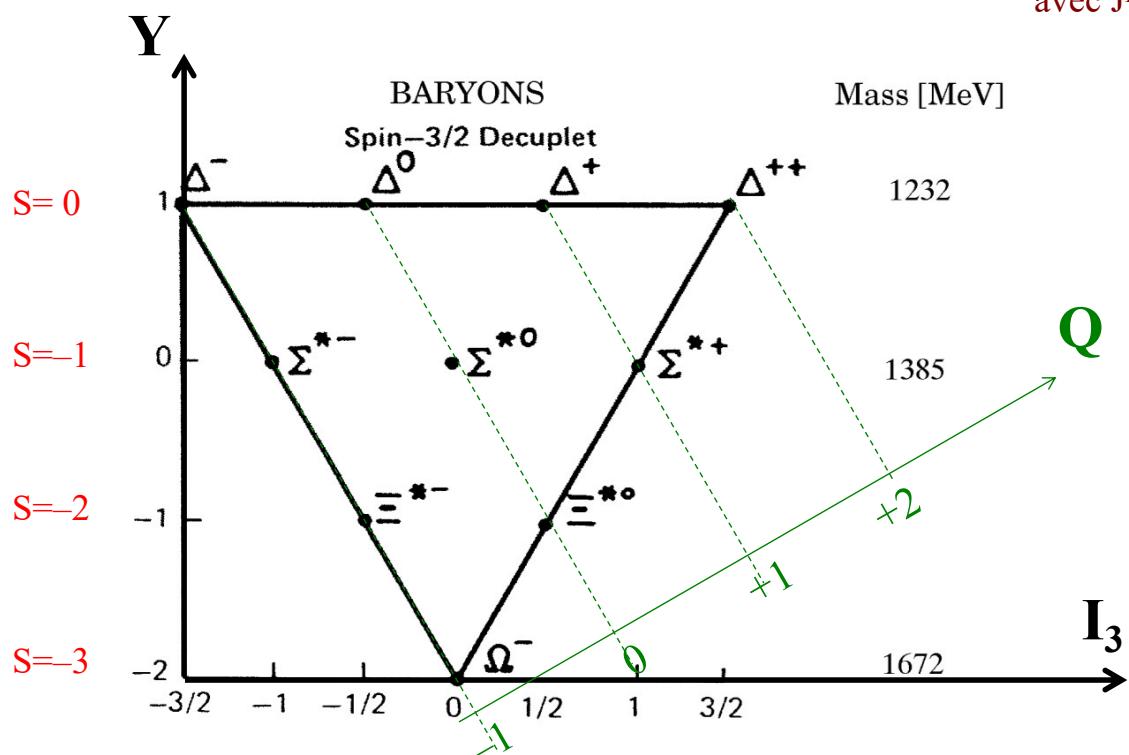
# Baryons avec $J^P = 1/2^+$

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

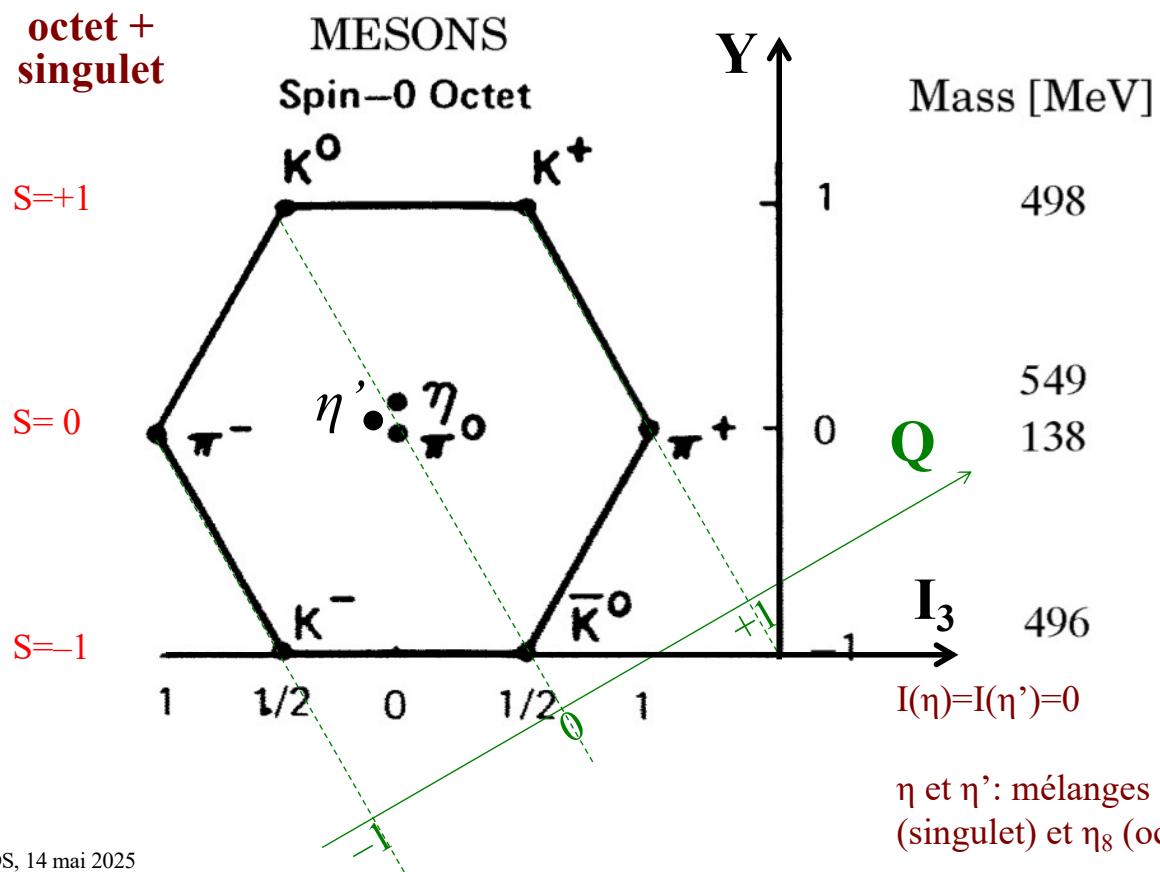


# Baryons avec $J^P = 3/2^+$

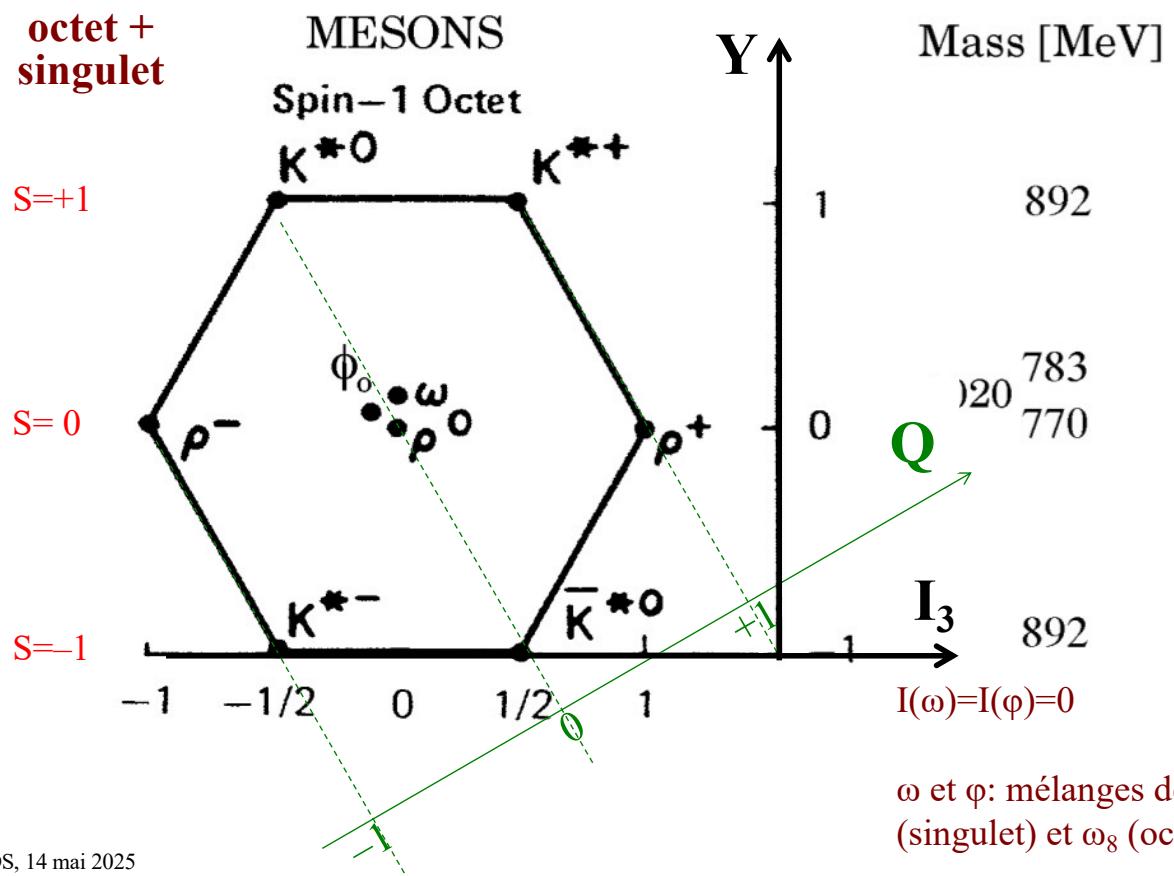
décuplet similaire  
pour les  
antibaryons  
avec  $J^P=3/2^+$



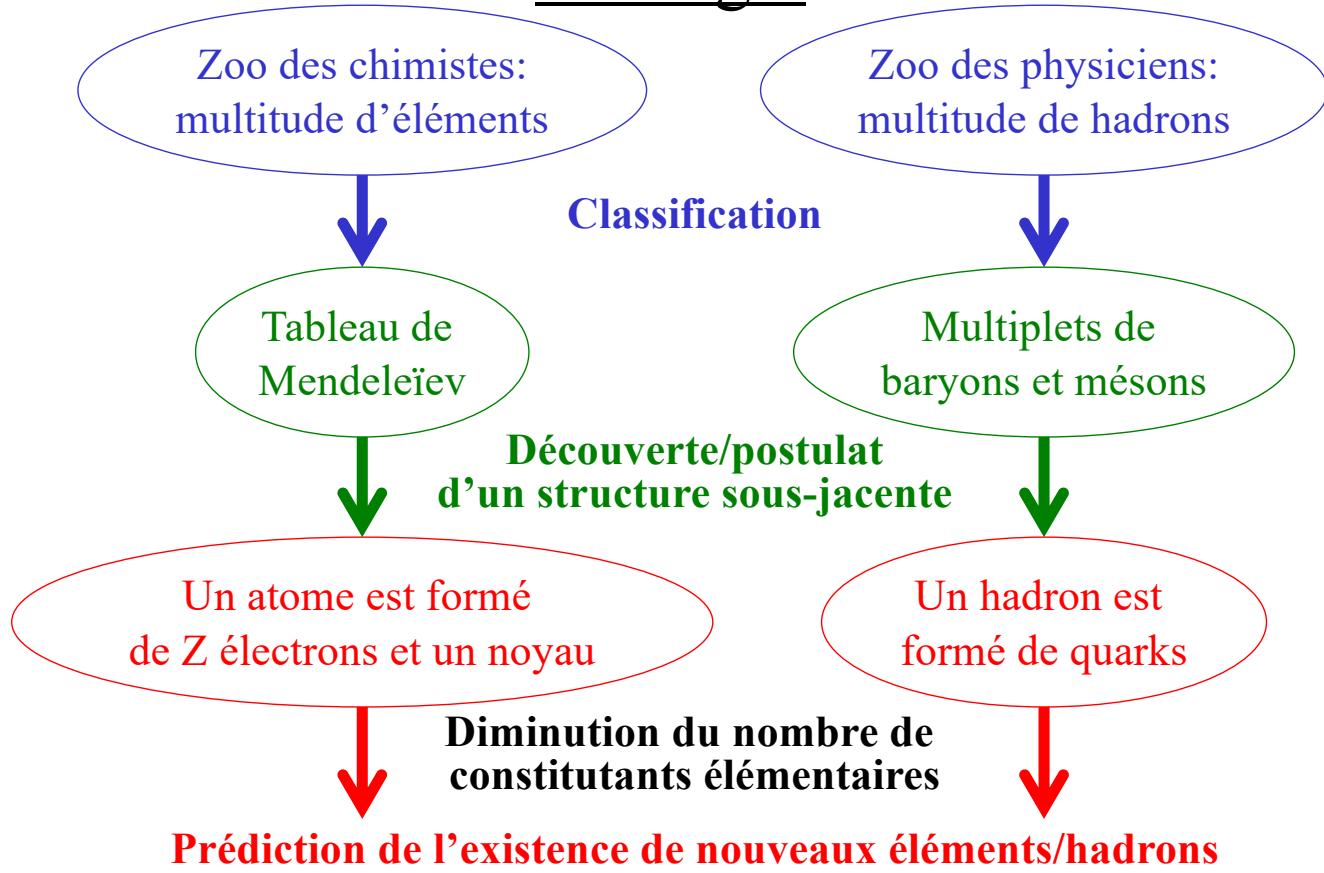
# Mésons pseudoscalaires ( $J^P = 0^-$ )



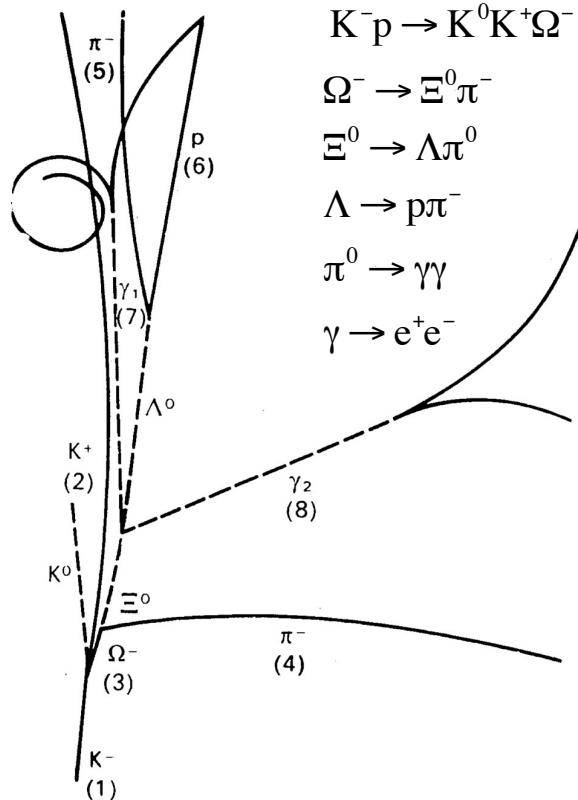
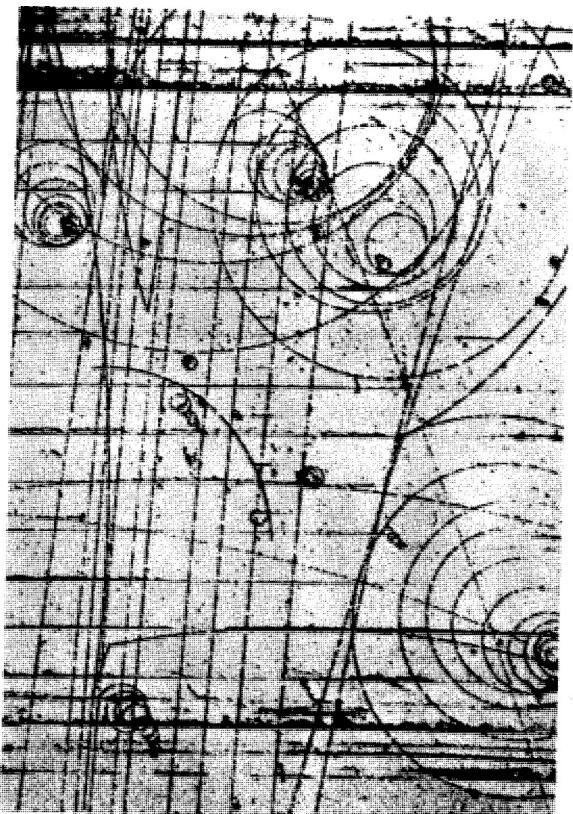
# Mésons vecteurs ( $J^P = 1^-$ )



# Analogie



## Découverte du baryon $\Omega^-$

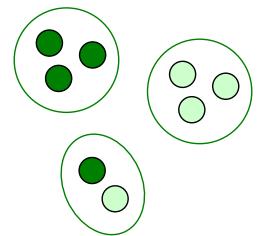


# Le modèle des quarks

Gell-Mann  
& Zweig  
(~1964)

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

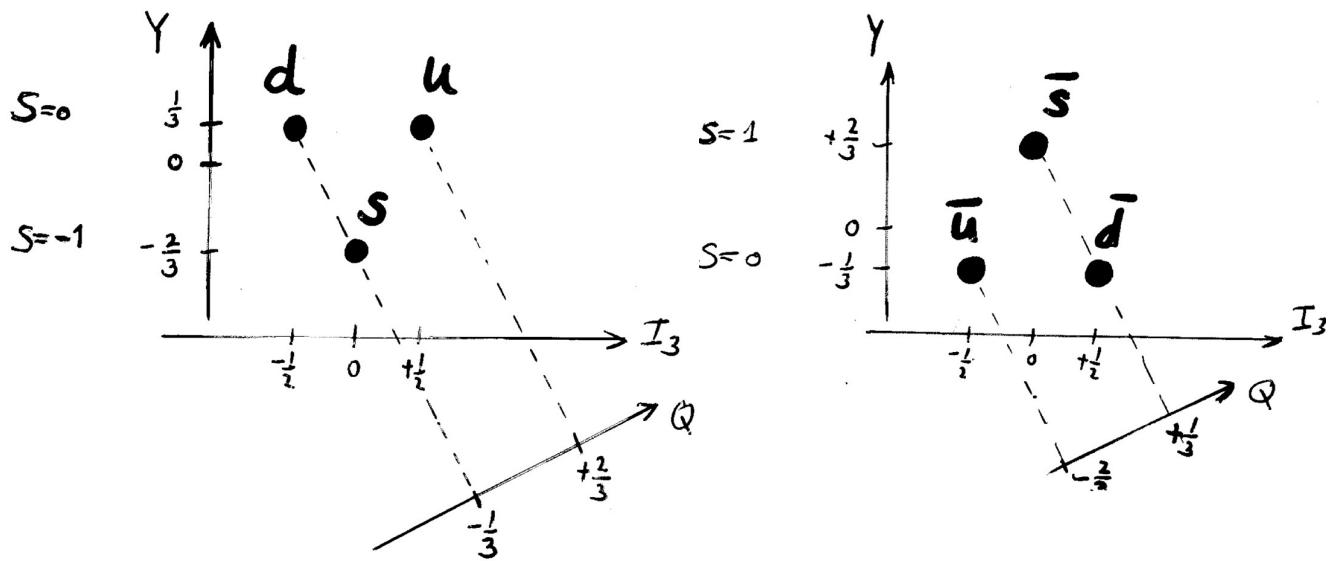
Baryon = quark + quark +quark  
Méson = quark + anti-quark



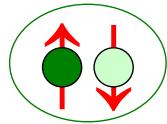
Quark	$J^P$	B	I	$I_3$	S	$Y = B+S$	$Q = I_3 + Y/2$
<b>u = up</b>	1/2 <sup>+</sup>	+1/3	1/2	+1/2	0	1/3	+2/3
<b>d = down</b>	1/2 <sup>+</sup>	+1/3	1/2	-1/2	0	1/3	-1/3
<b>s = strange</b>	1/2 <sup>+</sup>	+1/3	0	0	-1	-2/3	-1/3

anti-quarks	1/2 <sup>-</sup>	-1/3	=	$\times(-1)$	$\times(-1)$	$\times(-1)$	$\times(-1)$
-------------	------------------	------	---	--------------	--------------	--------------	--------------

## Multiplet fondamental



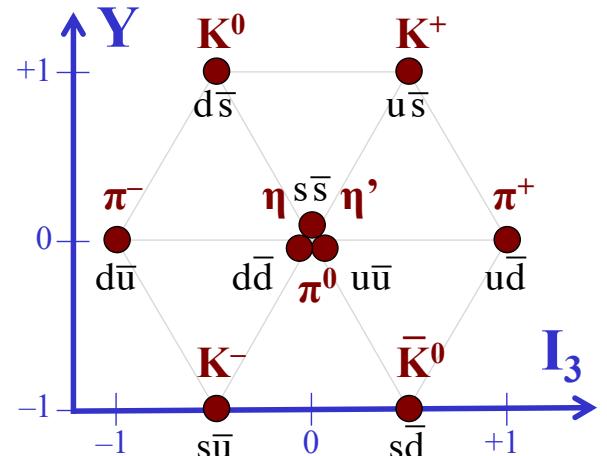
# Construction des mésons pseudoscalaires



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

- 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  $SU(3)$ :
 
$$3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1 = \text{octet} + \text{singulet}$$

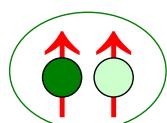


$$\begin{array}{ll}
 \text{singulet} & I=0, I_3=0 : \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}) \\
 \text{octet} & \left\{ \begin{array}{l} I=0, I_3=0 : \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) \\ I=1, I_3=0 : \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}) \end{array} \right. \xrightarrow{\text{mélange}}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

OS, 14 mai 2025

197

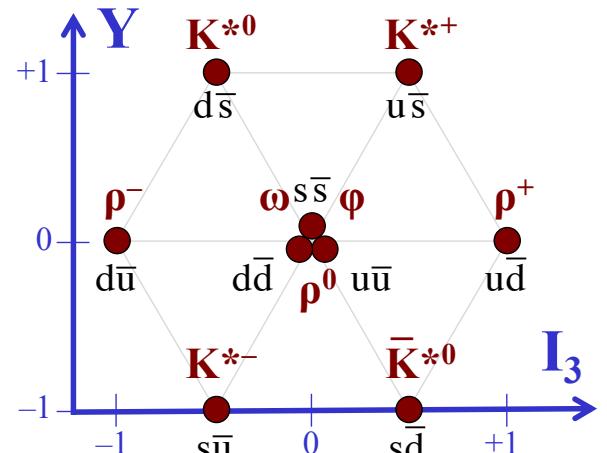
# Construction des mésons vecteurs



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

- 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

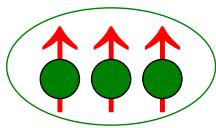
	S = 0	S = 1
$\ell = 0$	$J^P = 0^-$	$J^P = 1^-$
$\ell = 1$	$J^P = 1^+$	$J^P = 0^+, 1^+, 2^+$
$\ell = 2$	$J^P = 2^-$	$J^P = 1^-, 2^-, 3^-$
...	...	...

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

OS, 14 mai 2025

198

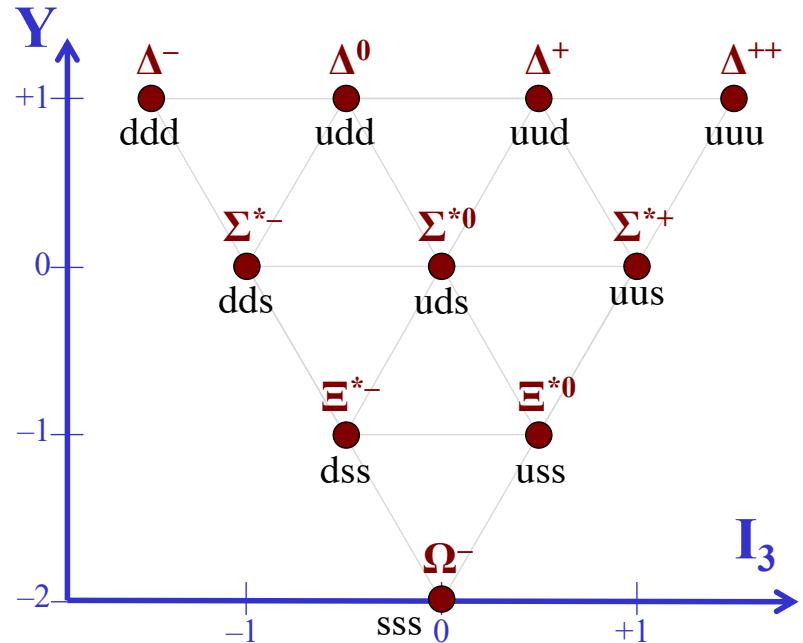
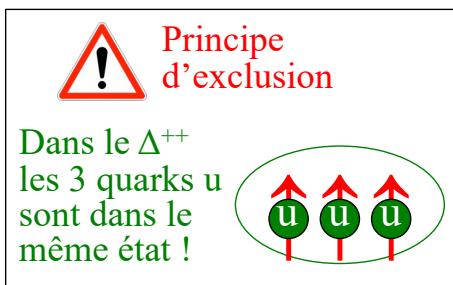
# Construction des baryons avec $J^P=3/2^+$



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

- 10 combinaisons de quarks possibles:

uuu    uud    uus  
 udd    uds    uss  
 ddd    dds    dss  
 sss



## 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  $\Delta^{++}$  ne soient pas dans le même état
- $\Delta^{++}$  = système de 3 quarks u avec  $J^P=3/2^+$  et  $\ell=0$ , antisymétrique sous l'échange de 2 quelconques des 3 quarks

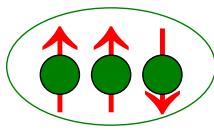
$$|\Delta^{++}\rangle \sim |\text{rouge} \text{ vert} \text{ bleu}\rangle - |\text{rouge} \text{ bleu} \text{ vert}\rangle + |\text{vert} \text{ rouge} \text{ bleu}\rangle - |\text{vert} \text{ bleu} \text{ rouge}\rangle + |\text{bleu} \text{ rouge} \text{ vert}\rangle - |\text{bleu} \text{ vert} \text{ rouge}\rangle$$

– Un tel état totalement antisymétrique est "incolore" (singulet de couleur)

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

Pas de combinaisons incolores de 1 ou 2 quarks !

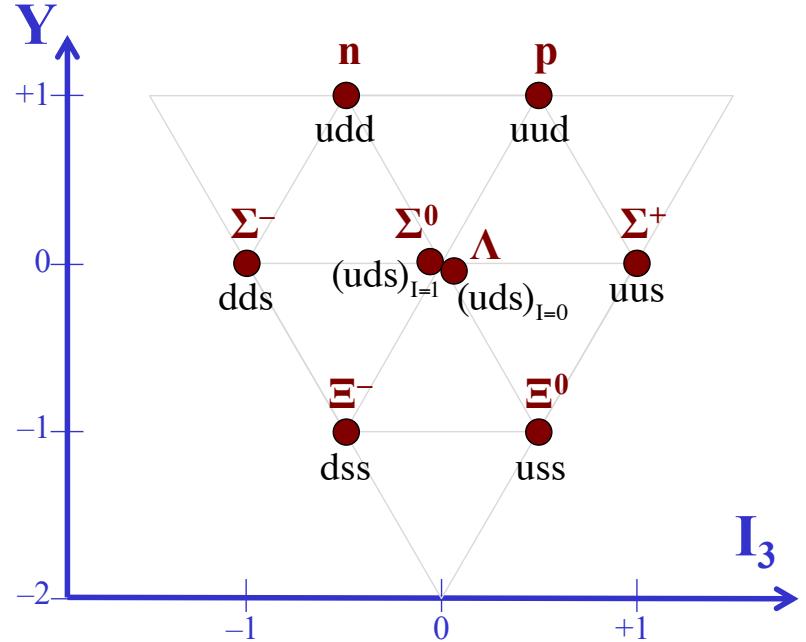
# Construction des baryons avec $J^P=1/2^+$



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

- 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'ECHANGE</i>										
g	0	0	0	0	0	0	0	$1^-$	0	—
$\gamma$	0	—	—	0	0	0	0	$1^-$	0	—
Z	0	—	—	0	0	0	0	1	$91.2 \times 10^3$	—
$W^\pm$	$\pm 1$	—	—	0	0	0	0	$1^-$	$80.4 \times 10^3$	—
H	0	—	—	0	0	0	0	$0^+$	$125.1 \times 10^3$	—
e <sup>-</sup>	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	0.511	—
$\nu_e$	0	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	$<2 \times 10^{-6}$	—
$\mu^-$	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	105.7	—
$\nu_\mu$	0	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	<0.19	—
$\tau^-$	-1	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	1776.9	—
$\nu_\tau$	0	—	—	0	0	0	0	$1/2^-$	<18.2	—
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	$1/2^+$	$1.3 \times 10^3$	c
b	-1/3	0	0	0	0	-1	0	$1/2^+$	$4.2 \times 10^3$	b
t	+2/3	0	0	0	0	0	+1	$1/2^+$	$173.1 \times 10^3$	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>MÉSONS (<math>B = 0, L = 0</math>)</i>										
$\pi^\pm$	$\pm 1$	1	$\pm 1$	0	0	0	0	$0^-$	139.6	u $\bar{d}$ , d $\bar{u}$
$\pi^0$	0	1	0	0	0	0	0	$0^-$	135.0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$
$\eta^0$	0	0	0	0	0	0	0	$0^-$	547.9	$(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$
$\rho^\pm$	$\pm 1$	1	$\pm 1$	0	0	0	0	$1^-$	775.1	u $\bar{d}$ , d $\bar{u}$
$\rho^0$	0	1	0	0	0	0	0	$1^-$	775.3	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$
$\omega$	0	0	0	0	0	0	0	$1^-$	782.7	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$
$\phi$	0	0	0	0	0	0	0	$1^-$	1019.5	ss
$K^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	$\pm 1$	0	0	0	$0^-$	493.7	u $\bar{s}$ , s $\bar{u}$
$K^0$	0	1/2	$-1/2$	$+1$	0	0	0	$0^-$	497.6	d $\bar{s}$
$K^0$	0	1/2	$+1/2$	$-1$	0	0	0	$0^-$	497.6	s $\bar{d}$
$D^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	0	$\pm 1$	0	0	$0^-$	1869.6	c $\bar{d}$ , d $\bar{c}$
$D^0$	0	1/2	$-1/2$	0	$+1$	0	0	$0^-$	1864.8	c $\bar{u}$
$D^0$	0	1/2	$+1/2$	0	$-1$	0	0	$0^-$	1864.8	u $\bar{c}$
$B^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	0	0	$\pm 1$	0	$0^-$	5279.3	ub, b $\bar{u}$
$B^0$	0	1/2	$-1/2$	0	0	$+1$	0	$0^-$	5279.6	db
$B^0$	0	1/2	$+1/2$	0	0	$-1$	0	$0^-$	5279.6	b $\bar{d}$
$J/\psi$	0	0	0	0	0	0	0	$1^-$	3096.9	c $\bar{c}$
$\Upsilon(1S)$	0	0	0	0	0	0	0	$1^-$	9460.3	bb
<i>HADRONS (liste non exhaustive)</i>										
<i>NUCLEON</i>										
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
$\Delta^{++}$	+2	3/2	$+3/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~1232	uuu
$\Delta^+$	+1	3/2	$+1/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~1232	uud
$\Delta^0$	0	3/2	$-1/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~1232	udd
$\Delta^-$	-1	3/2	$-3/2$	0	0	0	0	$3/2^+$	~1232	ddd
$\Lambda$	0	0	0	-1	0	0	0	$1/2^+$	1115.7	uds
$\Sigma^+$	+1	1	$+1$	-1	0	0	0	$1/2^+$	1189.4	us
$\Sigma^0$	0	1	0	-1	0	0	0	$1/2^+$	1192.6	uds
$\Sigma^-$	-1	1	-1	-1	0	0	0	$1/2^+$	1197.4	dds
$\Sigma^{*+}$	+1	1	$+1$	-1	0	0	0	$3/2^+$	1383	us
$\Sigma^{*0}$	0	1	0	-1	0	0	0	$3/2^+$	1384	uds
$\Sigma^{*-}$	-1	1	-1	-1	0	0	0	$3/2^+$	1387	dds
$\Xi^0$	0	1/2	$+1/2$	-2	0	0	0	$1/2^+$	1314.9	uss
$\Xi^-$	-1	1/2	$-1/2$	-2	0	0	0	$1/2^+$	1321.7	dss
$\Xi^{*0}$	0	1/2	$+1/2$	-2	0	0	0	$3/2^+$	1532	uss
$\Xi^{*-}$	-1	1/2	$-1/2$	-2	0	0	0	$3/2^+$	1535	dss
$\Omega^-$	-1	0	0	-3	0	0	0	$3/2^+$	1672.5	sss
$\Lambda_c$	+1	0	0	0	+1	0	0	$1/2^+$	2286.5	ude
$\Lambda_b$	0	0	0	0	0	-1	0	$1/2^+$	5619.6	udb

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