

# Nombres (charges) leptoniques L

nombre  
quantique  
additif

Particules	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$
$e^-, \nu_e$	+1	0	0
$e^+, \bar{\nu}_e$	-1	0	0
$\mu^-, \nu_\mu$	0	+1	0
$\mu^+, \bar{\nu}_\mu$	0	-1	0
$\tau^-, \nu_\tau$	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,  $\nu_e$**   $L_e = \pm 1$
    - **$\mu, \nu_\mu$**   $L_\mu = \pm 1$
    - **$\tau, \nu_\tau$**   $L_\tau = \pm 1$
  - $B=0$ , autres  $L = 0$
- **gluons,  $\gamma$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$ ,  $W^-$ , H** = **bosons d'échange**
  - $B = L_e = L_\mu = L_\tau = 0$

# Particules étranges

découvertes dès ~ 1950

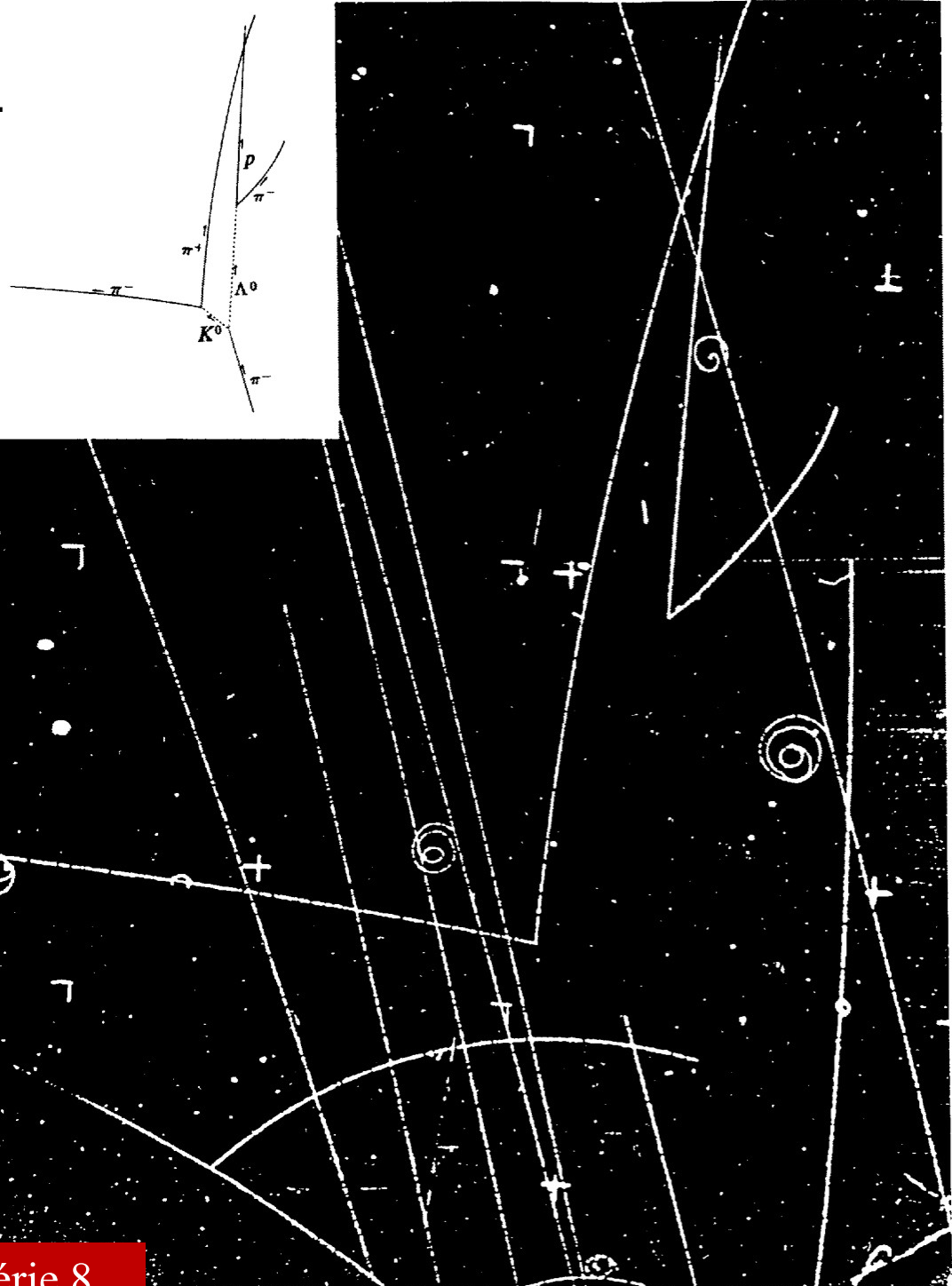
- Hadrons produits par interaction forte, mais avec une durée de vie moyenne beaucoup trop grande pour être des résonances caractéristiques de l'interaction forte  
→ étrange !?

## Exemple:

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

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

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



# 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

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

# 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

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

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

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

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

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

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

etc ...

# Particules étranges (fin)

- Finalement

Particules étranges	S	B	I	$2I+1 = \text{nombre d'états de charge}$
$\Lambda$	-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:
  - « prédiction » des éclipses passées
  - particule dans une 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

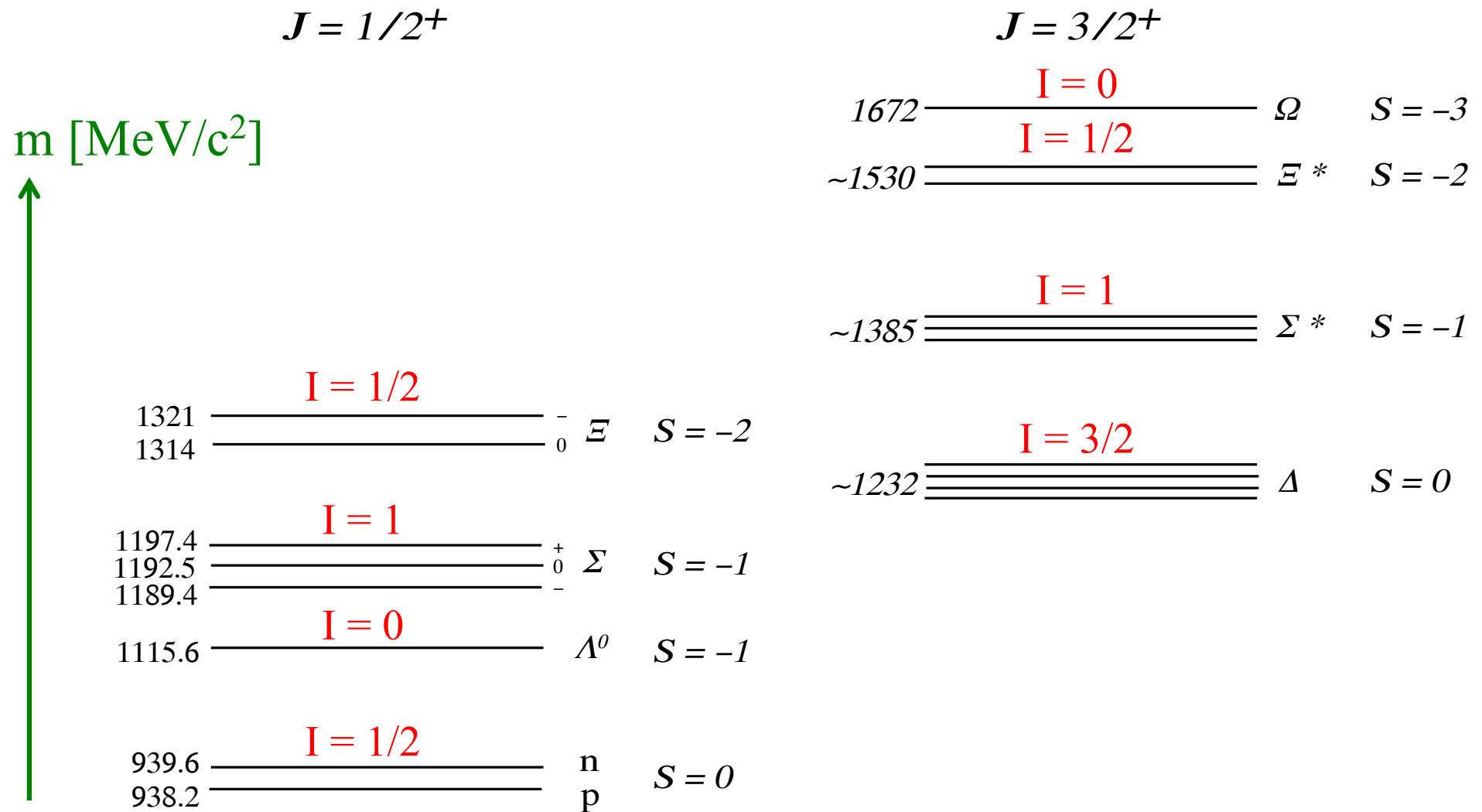
- Une observation d'un non-respect de la symétrie CPT impliquerait une violation de l'invariance de Lorentz
  - pas observé jusqu'à présent
- Une violation de CP implique une violation de T



# Particules et antiparticules

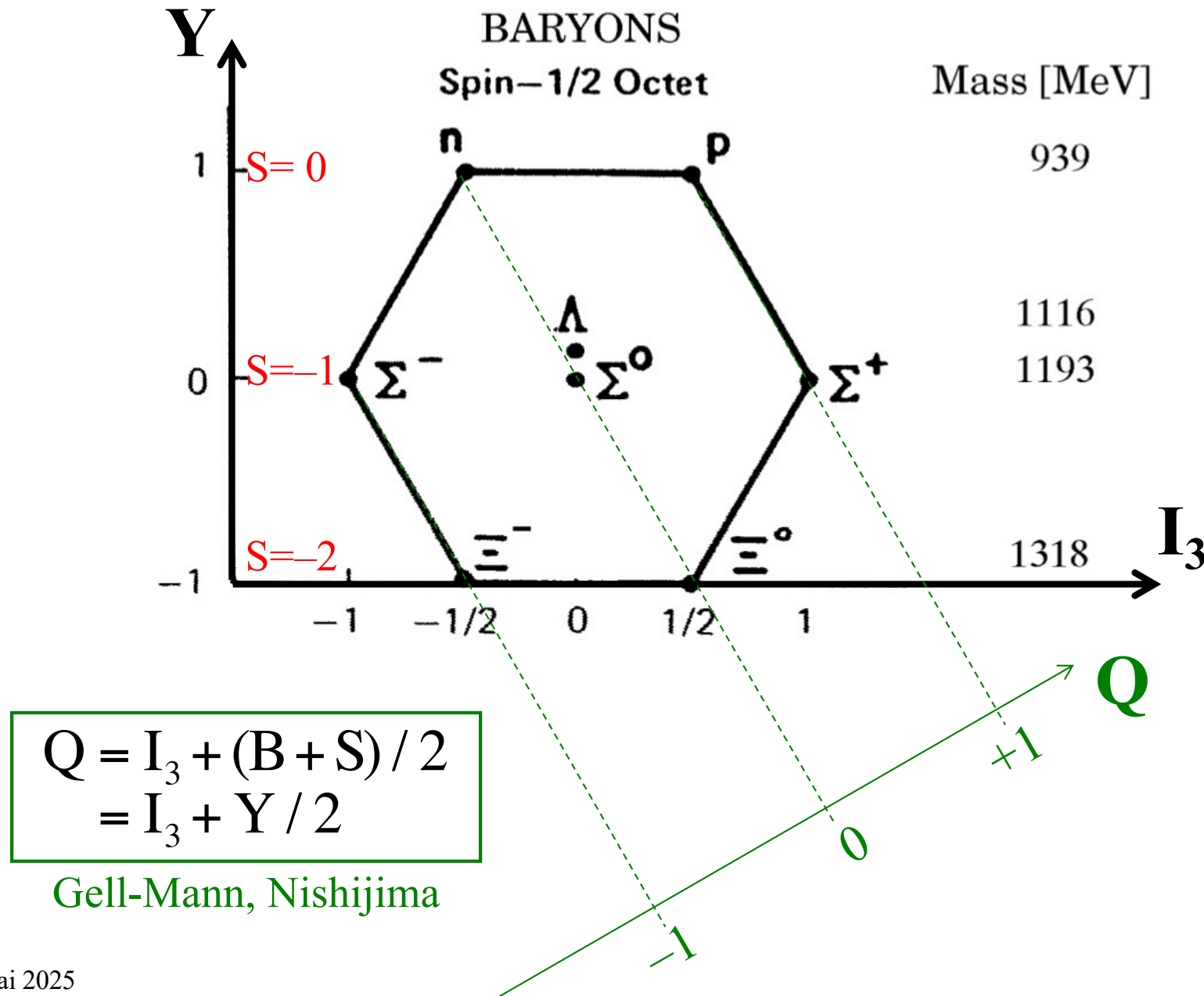
masses $m$	égales (théorème CPT)
durées de vie moyennes $\tau$	égales (théorème CPT)
spins $J$	égaux
isospins $I$	égaux
composantes $I_3$	opposées
parités $P$	égales si bosons opposées si fermions
charges (électrique $Q$ , baryonique $B$ , leptoniques $L$ , étrangeté $S$ , ...)	opposées

# Multiplets d'isospin (baryons)



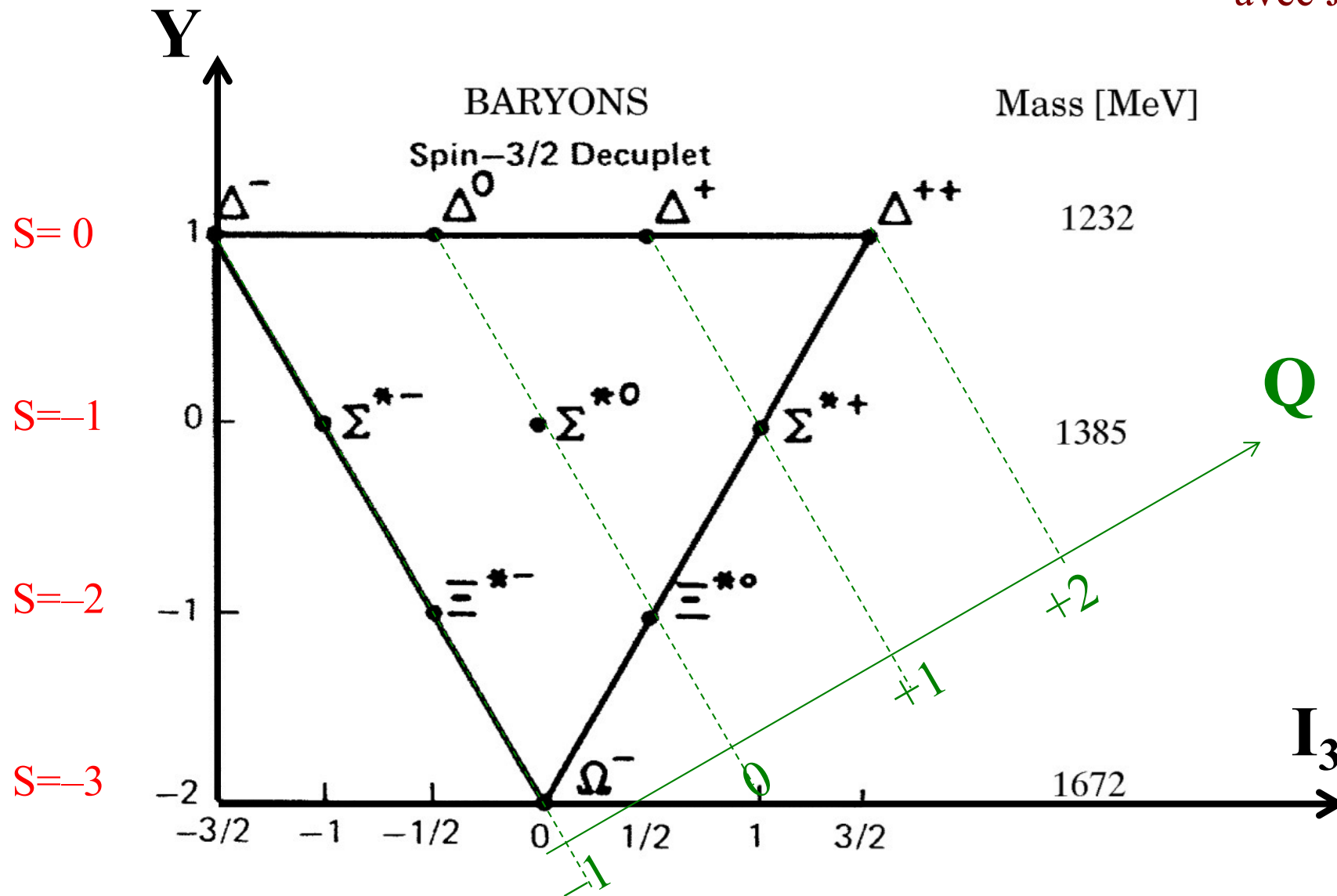
# Baryons avec $J^P = 1/2^+$

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

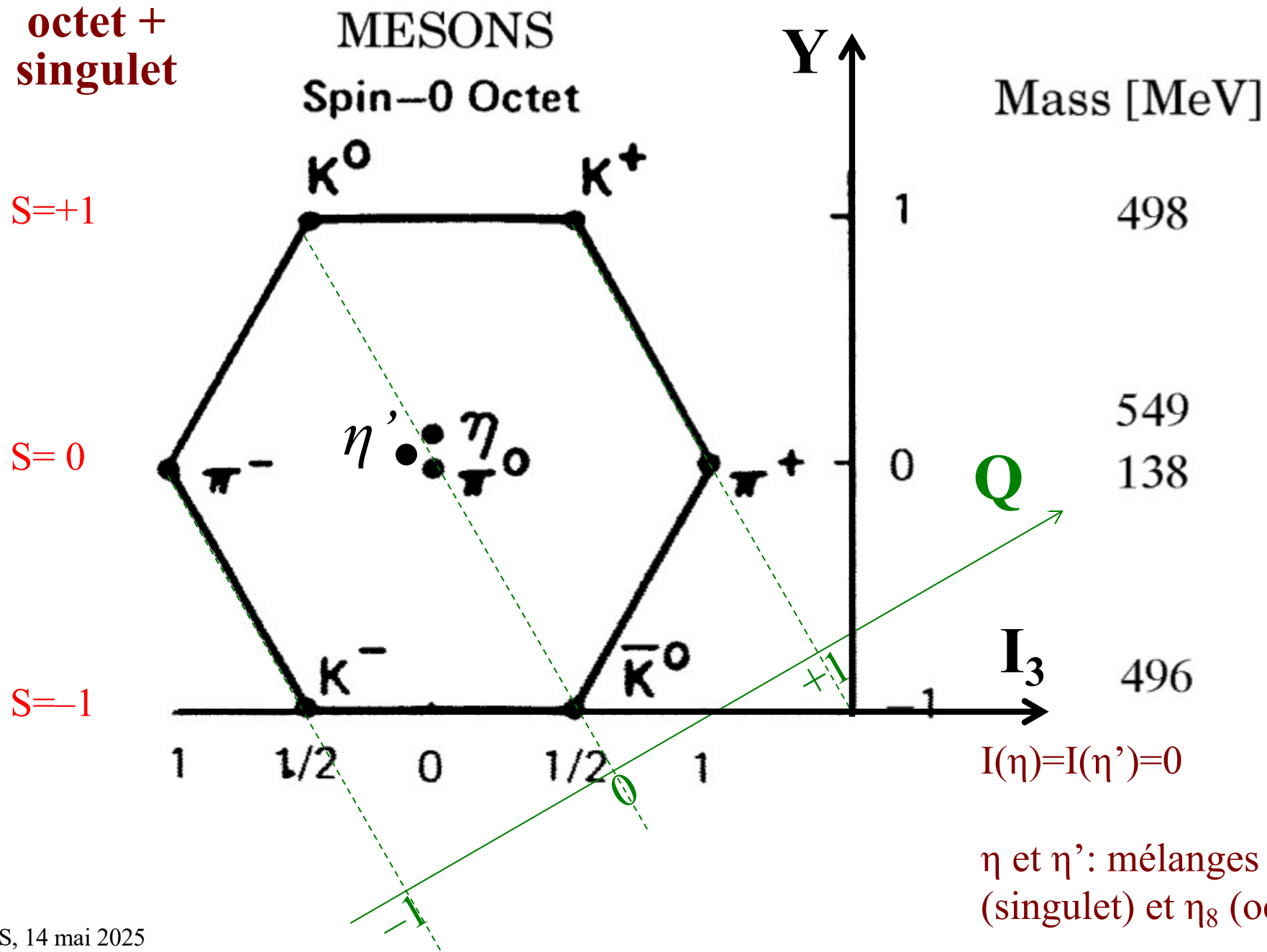


# Baryons avec $J^P = 3/2^+$

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

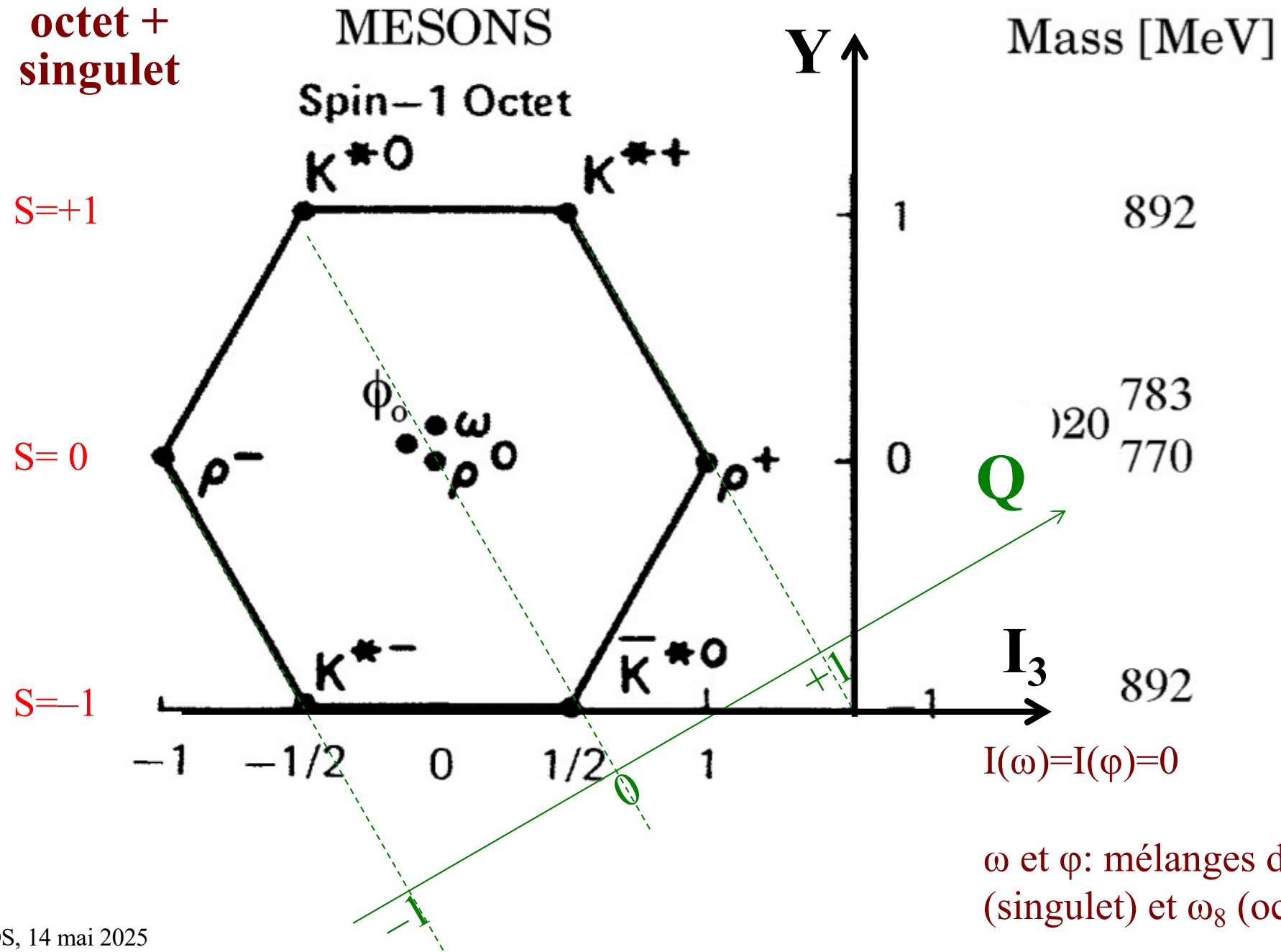


## Mésons pseudoscalaires ( $J^P = 0^-$ )

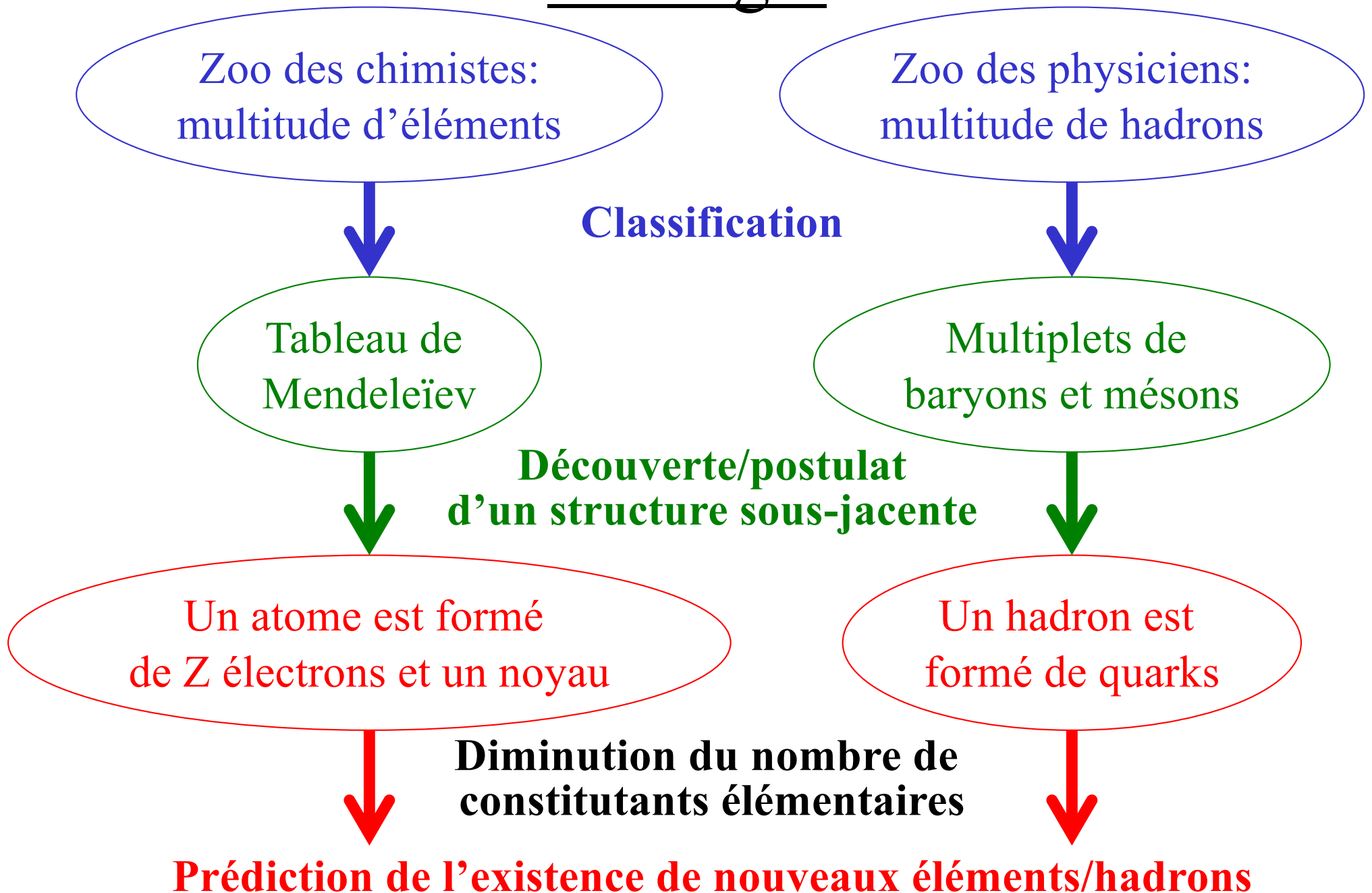


# Mésons vecteurs ( $J^P = 1^-$ )

octet +  
singlet

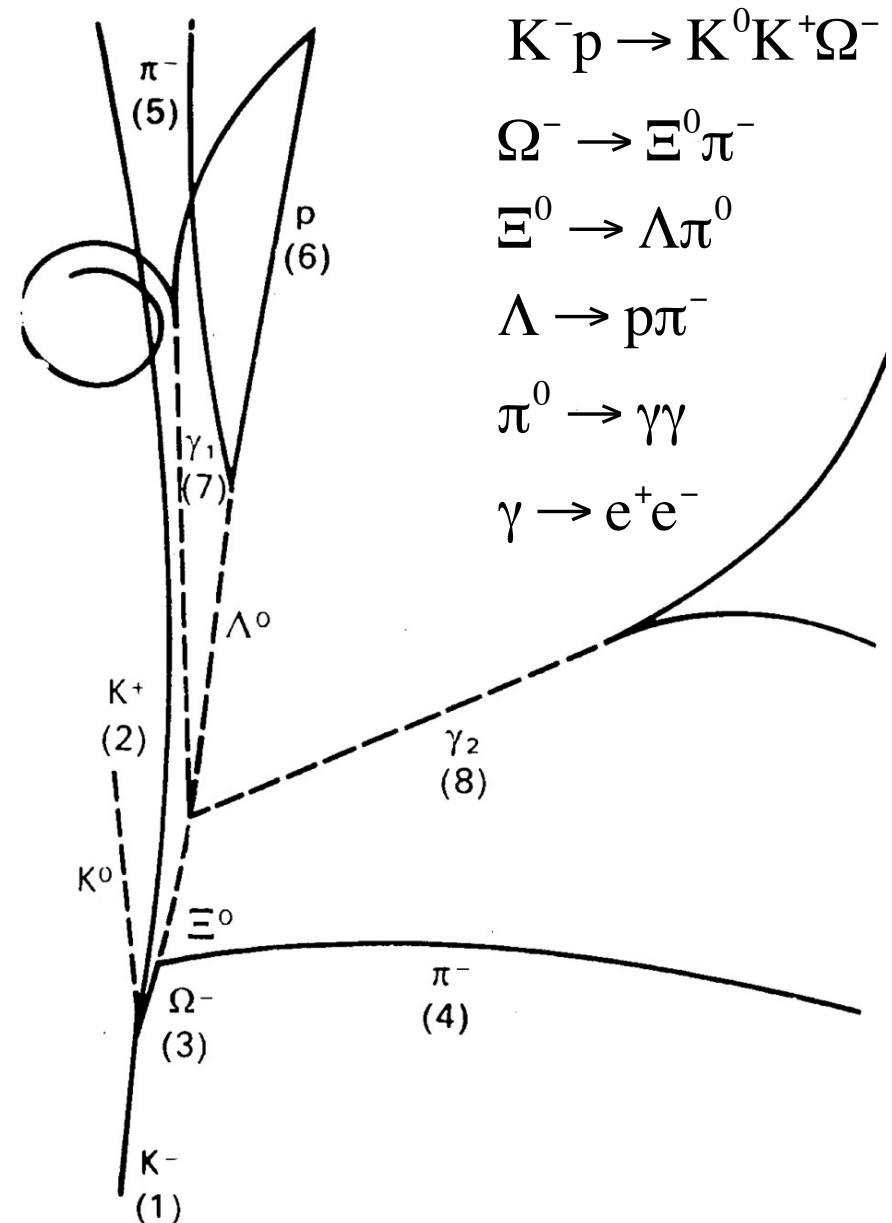
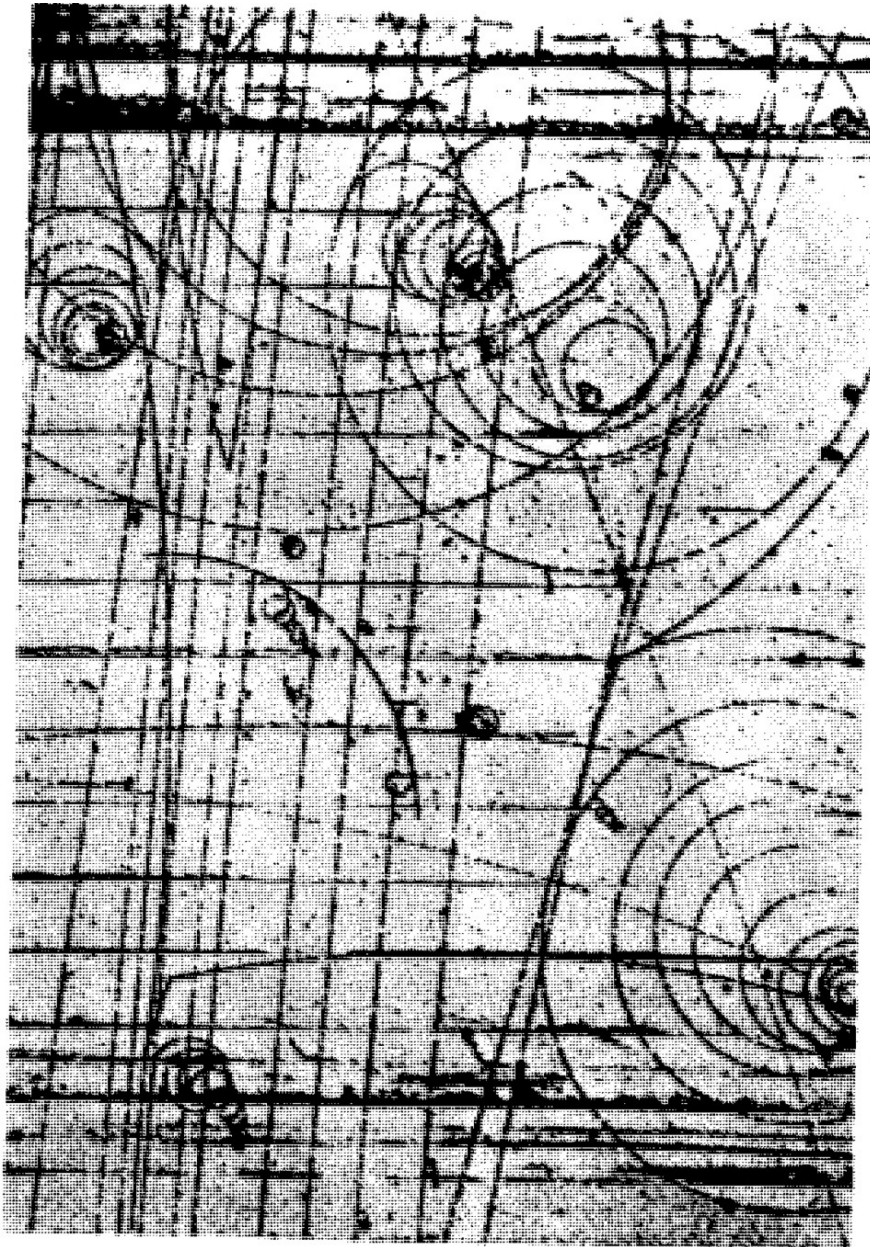


# Analogie





# Découverte du baryon $\Omega^-$



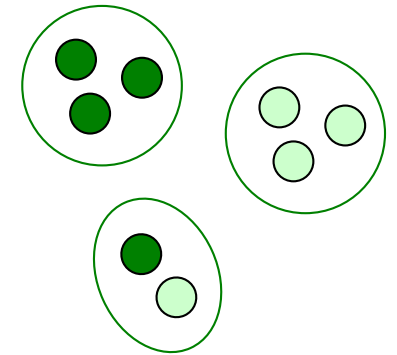


# Le modèle des quarks

Gell-Mann  
& Zweig  
(~1964)

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

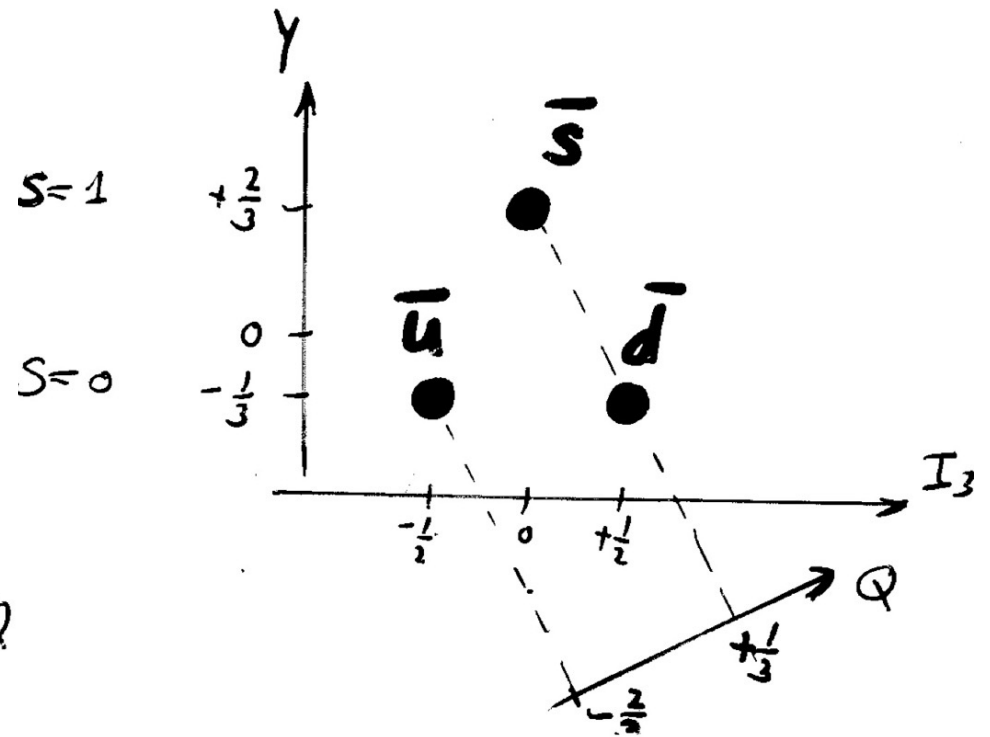
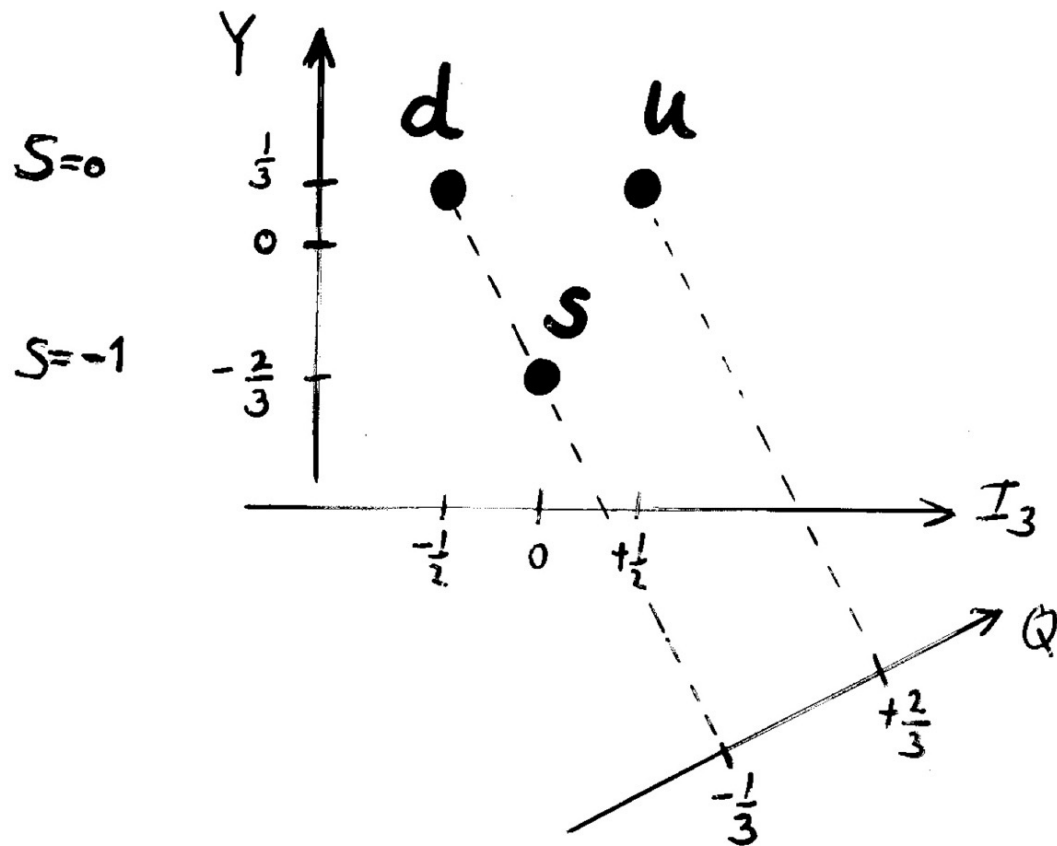
**Baryon** = quark + quark + quark  
**Méson** = quark + anti-quark



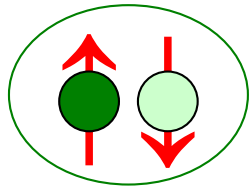
Quark	$J^P$	B	I	$I_3$	S	$Y = B + S$	$Q = I_3 + Y/2$
<b>u = up</b>	$1/2^+$	$+1/3$	$1/2$	$+1/2$	0	$1/3$	$+2/3$
<b>d = down</b>	$1/2^+$	$+1/3$	$1/2$	$-1/2$	0	$1/3$	$-1/3$
<b>s = strange</b>	$1/2^+$	$+1/3$	0	0	-1	$-2/3$	$-1/3$

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

# Multiplet fondamentale



# Construction des mésons pseudoscalaires



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

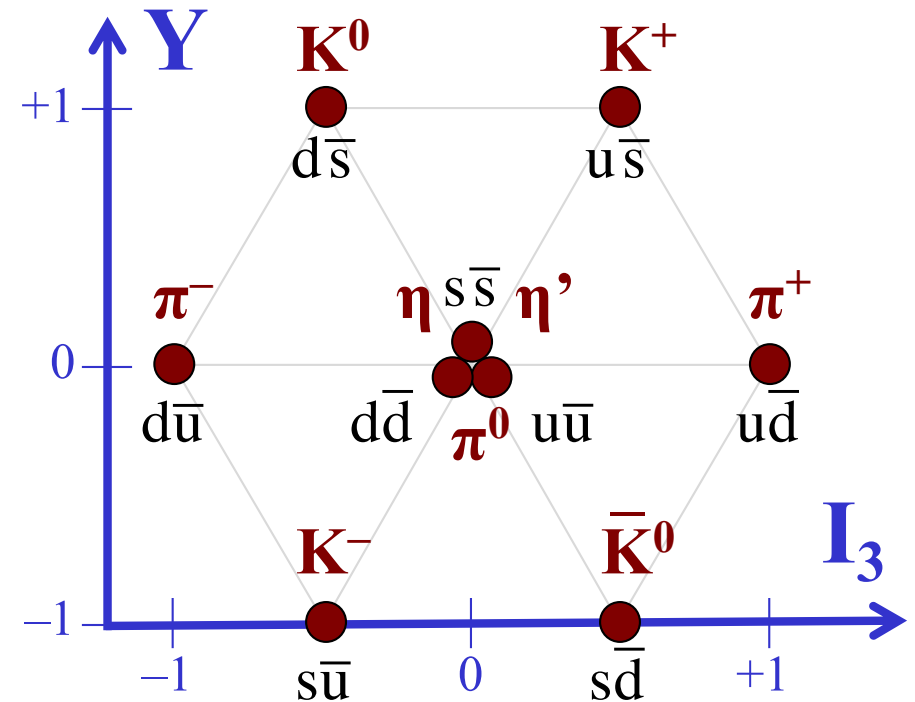
- 9 combinaisons de quarks possibles:

$$\begin{array}{ccc} u\bar{u} & d\bar{u} & s\bar{u} \\ u\bar{d} & d\bar{d} & s\bar{d} \\ u\bar{s} & d\bar{s} & s\bar{s} \end{array}$$

- Plaçons-les sur le diagramme Y–I<sub>3</sub>:

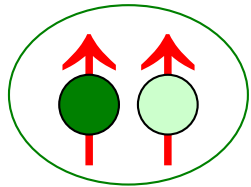
- Théorie des groupes SU(3):

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



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

# Construction des mésons vecteurs



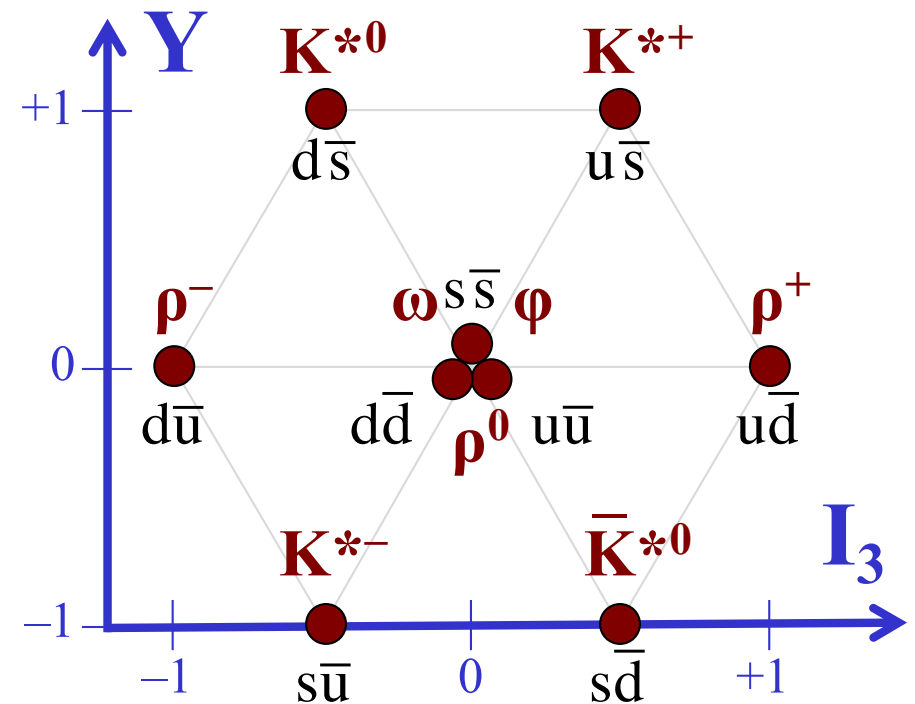
$$\ell = 0, \quad J^P = 1^-$$

- 9 combinaisons de quarks possibles:

$$\begin{array}{ccc} u\bar{u} & d\bar{u} & s\bar{u} \\ u\bar{d} & d\bar{d} & s\bar{d} \\ u\bar{s} & d\bar{s} & s\bar{s} \end{array}$$

- A nouveau:

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

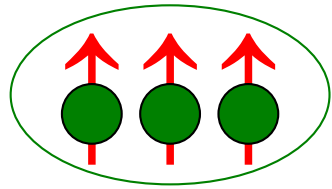


+ construction  
d'autres mésons

	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  $I=1, J^P=2^+, m \simeq 1.32 \text{ GeV}/c^2$

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



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

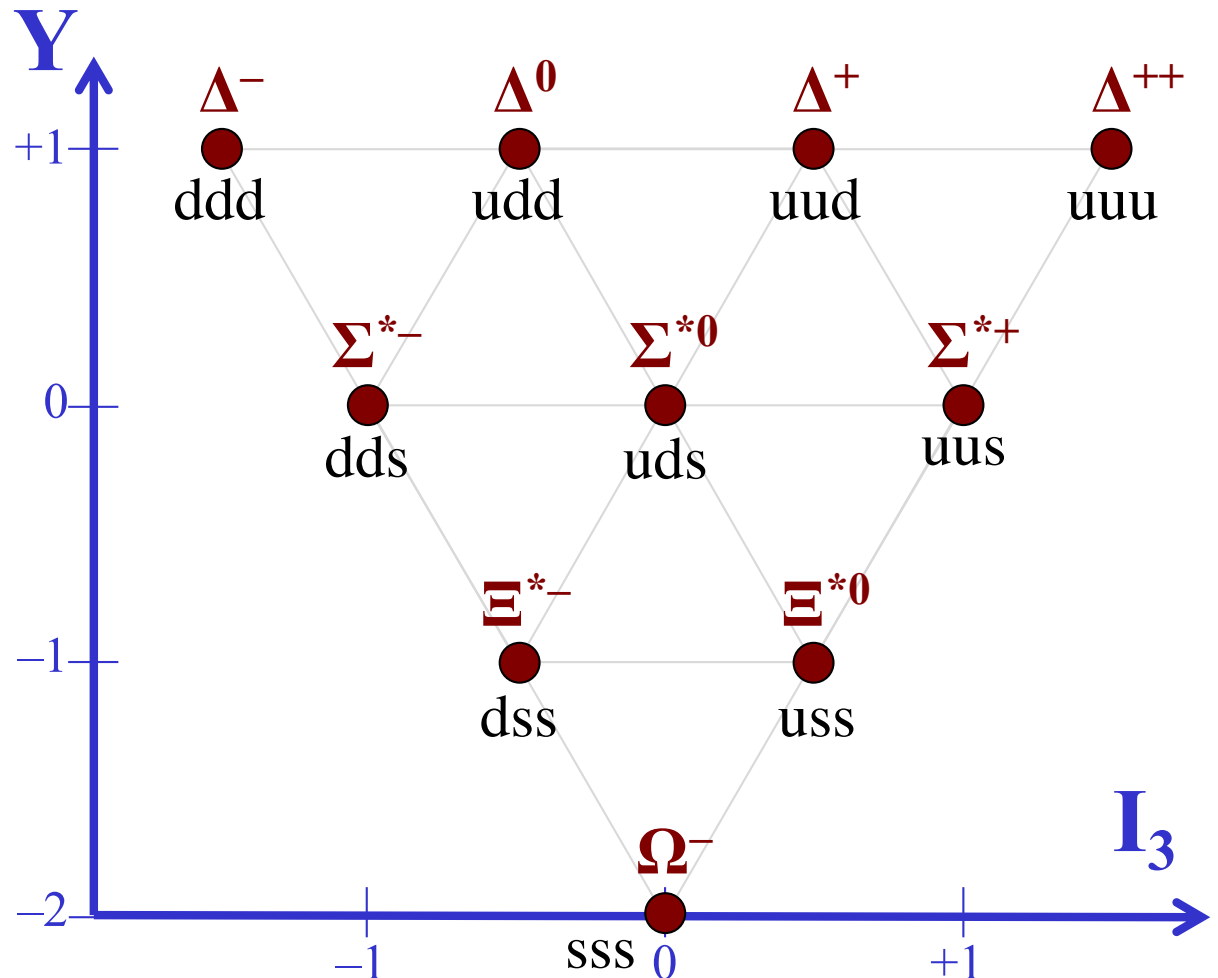
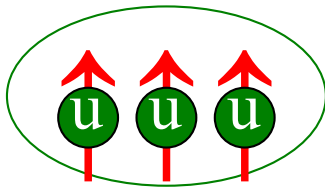
- 10 combinaisons de quarks possibles:

uuu uud uus  
 udd uds uss  
 ddd dds dss  
 sss



Principe d'exclusion

Dans le  $\Delta^{++}$   
les 3 quarks u  
sont dans le  
même état !



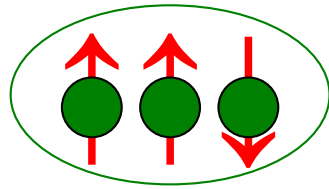
# Couleur des quarks

- 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  $\Delta^{++}$  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

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

- 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**+**antivert** ou **bleu**+**antibleu**  $\rightarrow$  mésons

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

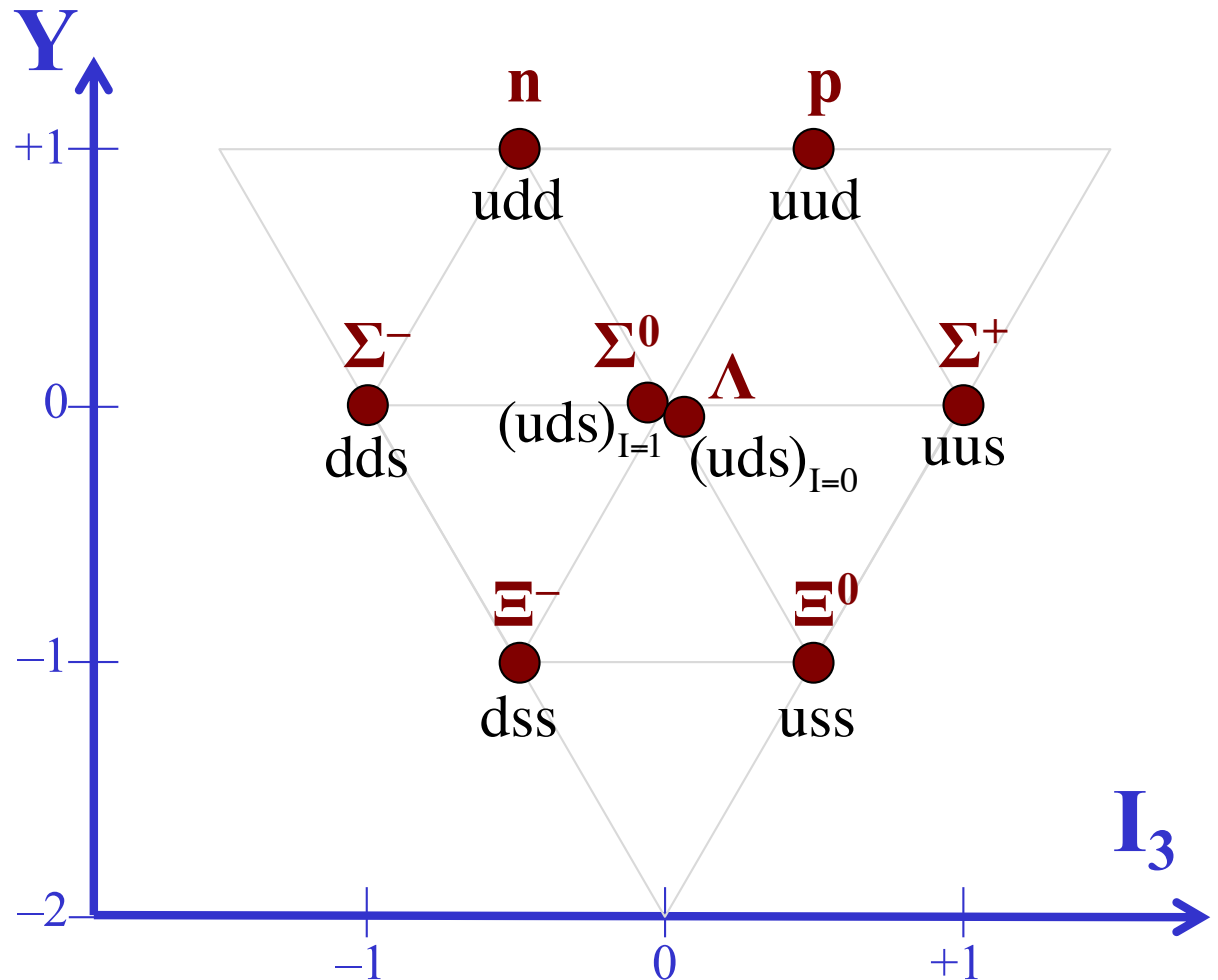


$$\ell = \ell' = 0, \quad J^P = 1/2^+$$

- On doit trouver des combinaisons incolores qui satisfont 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
<b>BOSONS D'ÉCHANGE</b> ( $B = L = 0$ )	$g$	0	0	0	0	0	0	$1^-$	0	–
	$\gamma$	0	–	–	0	0	0	$1^-$	0	–
	$Z$	0	–	–	0	0	0	1	$91.2 \times 10^3$	–
	$W^\pm$	$\pm 1$	–	–	0	0	0	1	$80.4 \times 10^3$	–
	$H$	0	–	–	0	0	0	$0^+$	$125.1 \times 10^3$	–
<b>LEPTONS</b> ( $B = 0, L = 1$ )	$e^-$	–1	–	–	0	0	0	$1/2$	0.511	–
	$\nu_e$	0	–	–	0	0	0	$1/2$	$< 2 \times 10^{-6}$	–
	$\mu^-$	–1	–	–	0	0	0	$1/2$	105.7	–
	$\nu_\mu$	0	–	–	0	0	0	$1/2$	$< 0.19$	–
	$\tau^-$	–1	–	–	0	0	0	$1/2$	1776.9	–
	$\nu_\tau$	0	–	–	0	0	0	$1/2$	$< 18.2$	–
<b>QUARKS</b> ( $B = \frac{1}{3}, L = 0$ )	$d$	–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	$1/2^+$	$1.3 \times 10^3$	$c$
	$b$	–1/3	0	0	0	0	–1	$1/2^+$	$4.2 \times 10^3$	$b$
	$t$	+2/3	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>HADRONS</i> (liste non exhaustive)	<i>MÉSONS</i> ( $B = 0, L = 0$ )	$\pi^\pm$	$\pm 1$	1	$\pm 1$	0	0	0	$0^-$	139.6	$u\bar{d}, d\bar{u}$	
		$\pi^0$	0	1	0	0	0	0	$0^-$	135.0	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	
		$\eta^0$	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	$1^-$	775.1	$u\bar{d}, d\bar{u}$	
		$\rho^0$	0	1	0	0	0	0	$1^-$	775.3	$(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$	
		$\omega$	0	0	0	0	0	0	$1^-$	782.7	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$	
		$\phi$	0	0	0	0	0	0	$1^-$	1019.5	$s\bar{s}$	
		$K^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	$\pm 1$	0	0	$0^-$	493.7	$u\bar{s}, s\bar{u}$	
		$K^0$	0	1/2	$-1/2$	+1	0	0	$0^-$	497.6	$d\bar{s}$	
		$\bar{K}^0$	0	1/2	+1/2	-1	0	0	$0^-$	497.6	$s\bar{d}$	
		$D^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	0	$\pm 1$	0	$0^-$	1869.6	$c\bar{d}, d\bar{c}$	
		$D^0$	0	1/2	$-1/2$	0	+1	0	$0^-$	1864.8	$c\bar{u}$	
		$\bar{D}^0$	0	1/2	+1/2	0	-1	0	$0^-$	1864.8	$u\bar{c}$	
		$B^\pm$	$\pm 1$	1/2	$\pm 1/2$	0	0	$\pm 1$	$0^-$	5279.3	$u\bar{b}, b\bar{u}$	
		$B^0$	0	1/2	$-1/2$	0	0	+1	$0^-$	5279.6	$d\bar{b}$	
		$\bar{B}^0$	0	1/2	+1/2	0	0	-1	$0^-$	5279.6	$b\bar{d}$	
		$J/\psi$	0	0	0	0	0	0	$0^-$	3096.9	$c\bar{c}$	
		$\Upsilon(1S)$	0	0	0	0	0	0	$1^-$	9460.3	$b\bar{b}$	
	<i>BARYONS</i> ( $B = 1, L = 0$ )	<i>NUCL.</i>	p	+1	1/2	+1/2	0	0	0	$1/2^+$	938.3	uud
			n	0	1/2	-1/2	0	0	0	$1/2^+$	939.6	udd
			$\Delta^{++}$	+2	3/2	+3/2	0	0	0	$3/2^+$	$\sim 1232$	uuu
			$\Delta^+$	+1	3/2	+1/2	0	0	0	$3/2^+$	$\sim 1232$	uud
			$\Delta^0$	0	3/2	-1/2	0	0	0	$3/2^+$	$\sim 1232$	udd
			$\Delta^-$	-1	3/2	-3/2	0	0	0	$3/2^+$	$\sim 1232$	ddd
		<i>HYPERONS</i> ( $S \neq 0, q_c = q_b = q_t = 0$ )	$\Lambda$	0	0	0	-1	0	0	$1/2^+$	1115.7	uds
			$\Sigma^+$	+1	1	+1	-1	0	0	$1/2^+$	1189.4	uus
			$\Sigma^0$	0	1	0	-1	0	0	$1/2^+$	1192.6	uds
			$\Sigma^-$	-1	1	-1	-1	0	0	$1/2^+$	1197.4	dds
			$\Sigma^{*+}$	+1	1	+1	-1	0	0	$3/2^+$	1383	uus
			$\Sigma^{*0}$	0	1	0	-1	0	0	$3/2^+$	1384	uds
			$\Sigma^{*-}$	-1	1	-1	-1	0	0	$3/2^+$	1387	dds
			$\Xi^0$	0	1/2	+1/2	-2	0	0	$1/2^+$	1314.9	uss
			$\Xi^-$	-1	1/2	-1/2	-2	0	0	$1/2^+$	1321.7	dss
			$\Xi^{*0}$	0	1/2	+1/2	-2	0	0	$3/2^+$	1532	uss
			$\Xi^{*-}$	-1	1/2	-1/2	-2	0	0	$3/2^+$	1535	dss
			$\Omega^-$	-1	0	0	-3	0	0	$3/2^+$	1672.5	sss
			$\Lambda_c$	+1	0	0	0	+1	0	$1/2^+$	2286.5	udc
			$\Lambda_b$	0	0	0	0	0	-1	$1/2^+$	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>