

CHAMPS & PARTICULES

LA VOIE OCTUPLE: QUARKS ET LEPTONS

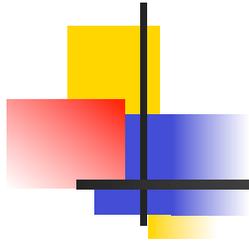


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





BARYONS MÉSONS

LEPTONS

Lois de conservation

- Lois empiriques pour expliquer **pourquoi** certaines actions n'ont jamais lieu
 - **Énergie** (retouchée au fur et à mesure que des formes différentes d'énergie étaient identifiées : cinétique, gravitationnelle, thermique, électromagnétique, nucléaire...)
 - **Impulsion** (moment linéaire) → recul du canon
 - **Moment cinétique** (moment angulaire) → orbites planétaires, patineurs...
 - **Masse**
 - **Charge électrique**
 - **Identité des atomes** lors des réactions chimiques (→ difficultés avec la radioactivité)
- Conservation = constance *dans le temps*
- Extension : constance lors d'une transformation (\pm virtuelle) à *un instant donné*
 - Transformation **spatiale** : translation, rotation, réflexion en miroir
 - Transformation **interne** : remplacement d'un atome/électron/quark par un autre
- Désintégration $p \rightarrow e^+ + \dots$ non-observée \Leftrightarrow conservation du **nombre baryonique**

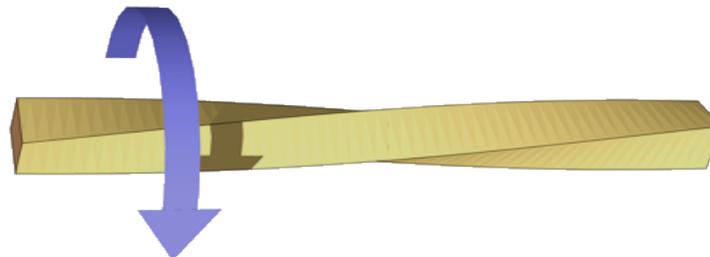


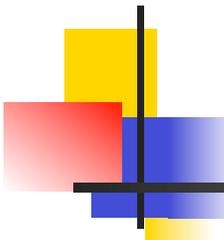
Théorème de Noether

- À toute transformation qui laisse invariante l'intégrale d'action correspond une grandeur qui se conserve

$$T |\psi\rangle = |\psi'\rangle \quad S = \int \mathcal{L}(\psi) dt \rightarrow S' = S$$

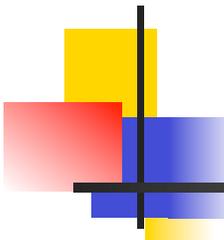
- Quantité **conservée** \Leftrightarrow **invariance** sous une transformation \Leftrightarrow **symétrie**
 - conservation de l'énergie \Leftrightarrow invariance par translation dans le temps
 - conservation de l'impulsion \Leftrightarrow invariance par translation dans l'espace
 - conservation du moment angulaire \Leftrightarrow invariance par rotation dans l'espace
 - conservation de la charge électrique ?
 - \rightarrow invariance du système par changement de phase (quantique)
- Symétries globales \Leftrightarrow transformation du système *identique* en tout point
- Symétries locales \Leftrightarrow transformations du système *variable* d'un point à l'autre





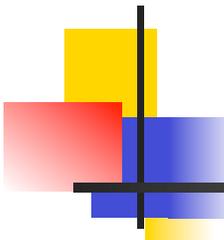
Les hadrons : baryons et mésons

- Baryon
 - proton et neutron (= nucléon)
 - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes (hypérons)
 - ➔ *nombre quantique baryonique conservé dans toutes les interactions*
 - Mésons
 - primary mesotron ➔ pi meson ➔ pion π (mundane mesotron ➔ mu meson ➔ muon μ)
 - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes
 - mésons K , aussi de spin zéro, mésons ρ , ω de spin 1
 - *pas de « nombre mésonique » conservé*
- Spin $\frac{1}{2}$ entier ➔ baryon** **Spin entier ➔ méson**
- (plus tard baryon = 3 quarks et méson = quark-antiquark, et quarks de spin $\frac{1}{2}$)
 - *Regroupement des particules identiques à la charge près en multiplets d'isospin*
 - multiplet de n particules ➔ isospin $I = (n-1)/2$
 - chaque membre du multiplet a $I_3 = -I, -I+1, \dots, I-1, I$
 - nucléons $\{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$ pions $\{-1, 0, 1\}$ kaons $\{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\}$



Les leptons

- Création d'un électron \Rightarrow création simultanée d'un positron ou d'un (anti)neutrino
 - \Rightarrow *nombre quantique leptonique L conservé par toutes les interactions*
 - \Rightarrow électron $L = +1 \Rightarrow$ positron $L = -1$
 - \Rightarrow neutrino rebaptisé antineutrino $L = -1$ (et donc neutrino $L = +1$)
- À l'électron et au neutrino s'était ajouté le muon, sans interaction forte
 - pas de désintégration $\mu \rightarrow e + \gamma$ observée
 - \Rightarrow *deux nombres quantiques leptoniques différents* : électronique et muonique
 - \Rightarrow un neutrino ν_e associé à l'électron et **un autre** associé au muon, ν_μ
 - \Rightarrow différence observée en 1962 à Brookhaven (Lederman, Schwarz et Steinberger)
 - faisceau de protons (AGS) + cible \rightarrow pions $\rightarrow \mu + \nu_\mu$
 - arrêt de tous les muons dans un blindage entourant une chambre à étincelles
 - observation de muons **mais pas d'électrons** produits dans la chambre par les neutrinos
 - $\Rightarrow \nu_\mu \neq \nu_e \Rightarrow$ prix Nobel (en 1988 seulement)



Spin et isospin

- Pauli (1924) : nombre quantique interne de l'électron avec 2 valeurs possibles
- Mécanique quantique
 - système à deux états $|p\text{erlin}\rangle$ et $|p\text{impin}\rangle \Rightarrow$ combinaisons linéaires (espace vectoriel)
 - \Rightarrow opérateurs/matrices \mathbf{U} 2x2 à *coefficients complexes* (mais unitaires $\mathbf{U}\mathbf{U}^\dagger = \mathbf{I}$) et de déterminant 1
 - \Rightarrow ces opérateurs forment un groupe, le **groupe SU(2)**
 - dont les éléments sont générés par des combinaisons linéaires des 3 matrices de Pauli
- Extension 3
 - on peut décrire d'autres *paires* d'états, par exemple proton et neutron \Rightarrow **isospin**
- Extension 2
 - on peut étendre ce formalisme à des systèmes à 1 état (**isospin 0**) ou à 3 états (**isospin 1**)
- Extension 1
 - le groupe SU(2) est *presque* identique au groupe SO(3) des rotations dans un espace à 3 dimensions réelles
 - \Rightarrow **le spin ressemble beaucoup à un moment angulaire**
 - \Rightarrow on peut additionner spin et moment angulaire dans la description d'un état quantique

Groupes et représentations

- Groupe G

- \mathbf{U} et \mathbf{V} éléments de $G \Rightarrow \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}$ élément de G
- il existe un élément neutre \mathbf{I} tel que $\mathbf{I} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}$ pour tout élément \mathbf{U} de G
- tout élément \mathbf{U} de G possède un inverse \mathbf{U}^{-1} tel que $\mathbf{U} \cdot \mathbf{U}^{-1} = \mathbf{I}$
- groupe non-abélien : $\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} \neq \mathbf{V} \cdot \mathbf{U}$
- groupe continu : les éléments dépendent (continûment) d'un ou plusieurs paramètres $\mathbf{U}(x)$
exemple: rotation $\mathbf{R}(\theta)$ ↳ groupe de Lie

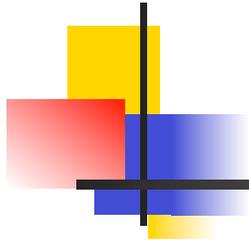
- Représentation *fondamentale* du groupe $SU(2)$

- ↪ matrices de Pauli
- particule/champ d'isospin $\frac{1}{2}$

- Autres représentations : par exemple deux particules de spin $\frac{1}{2}$

- états : règles de composition \Rightarrow 1 état (*singlet*) de spin total 0 + 3 états (*triplet*) de spin total 1
- opérateurs : matrices 3x3 (pour le spin 1)
- ex : $S_z = \text{diag}\{1, 0, -1\}$

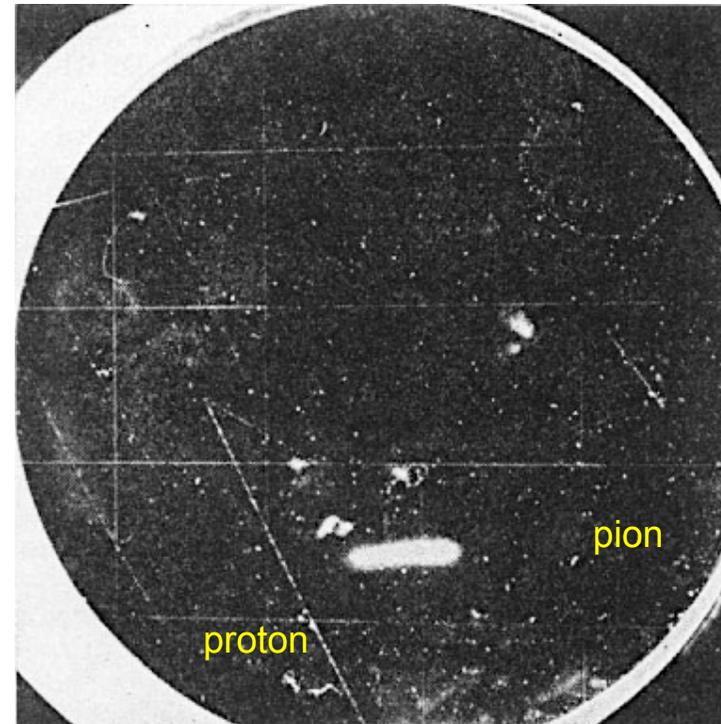
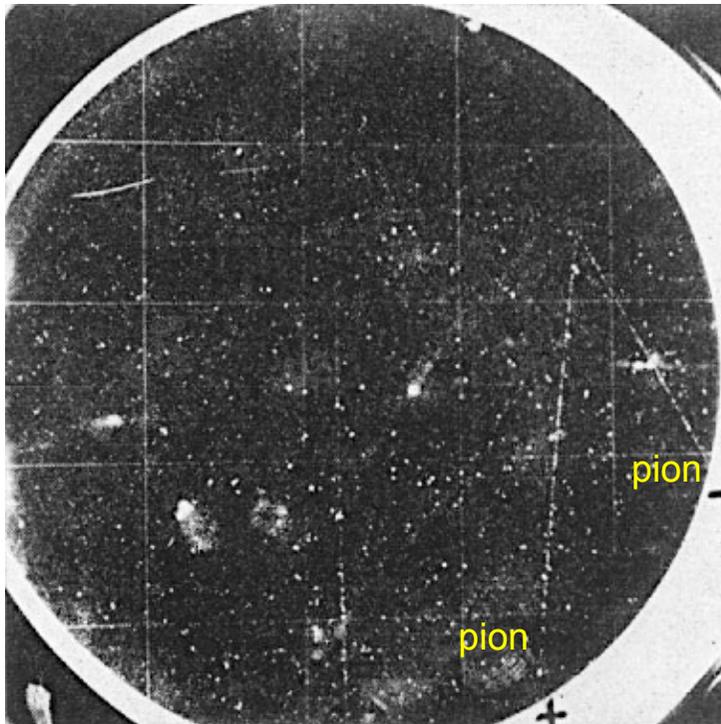
$$\begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array}$$

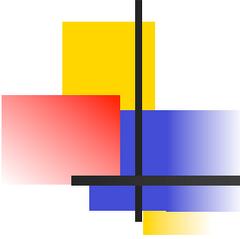


ÉTRANGÉTÉ

Particules V

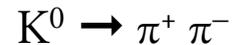
- 1946-1947 : Rochester et Butler (Manchester). Rayons cosmiques, chambre à brouillard, champ magnétique et images stéréo
- ➔ 2 exemples de traces en forme de V ➔ particule neutre ➔ 2 particules chargées
- ➔ masse de la particule neutre $500 \pm 80 \text{ MeV}$



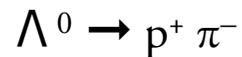


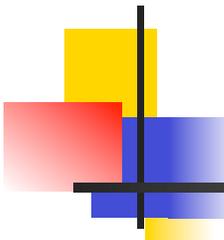
Particules V

- Confirmation par Anderson (Caltech)



- Ces particules parurent *étranges* en raison de leur longue durée de vie $\sim 10^{-10}$ s
- [10^{-23} s pour l'interaction forte, 10^{-16} s pour l'interaction électromagnétique $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$]
- Il s'avéra vite qu'il y avait deux types de particules V
 - des mésons (plus légers que le proton), de spin entier 495 MeV K^0, K^+, K^-
 - des hypérons (plus lourds que le proton), de spin $\frac{1}{2}$ entier 1116 MeV Λ^0
- qu'elles étaient toujours produites par paires (K^+K^- , $K^0\Lambda^0$, ...)
- et qu'elles ne se désintégraient que par interaction faible





Le nombre quantique d'étrangeté

Relation de Gell-Mann et de Nishijima (1953)

- L'étrangeté S est proportionnelle à la charge électrique *moyenne* Q (*hypercharge*) d'un multiplet d'isospin

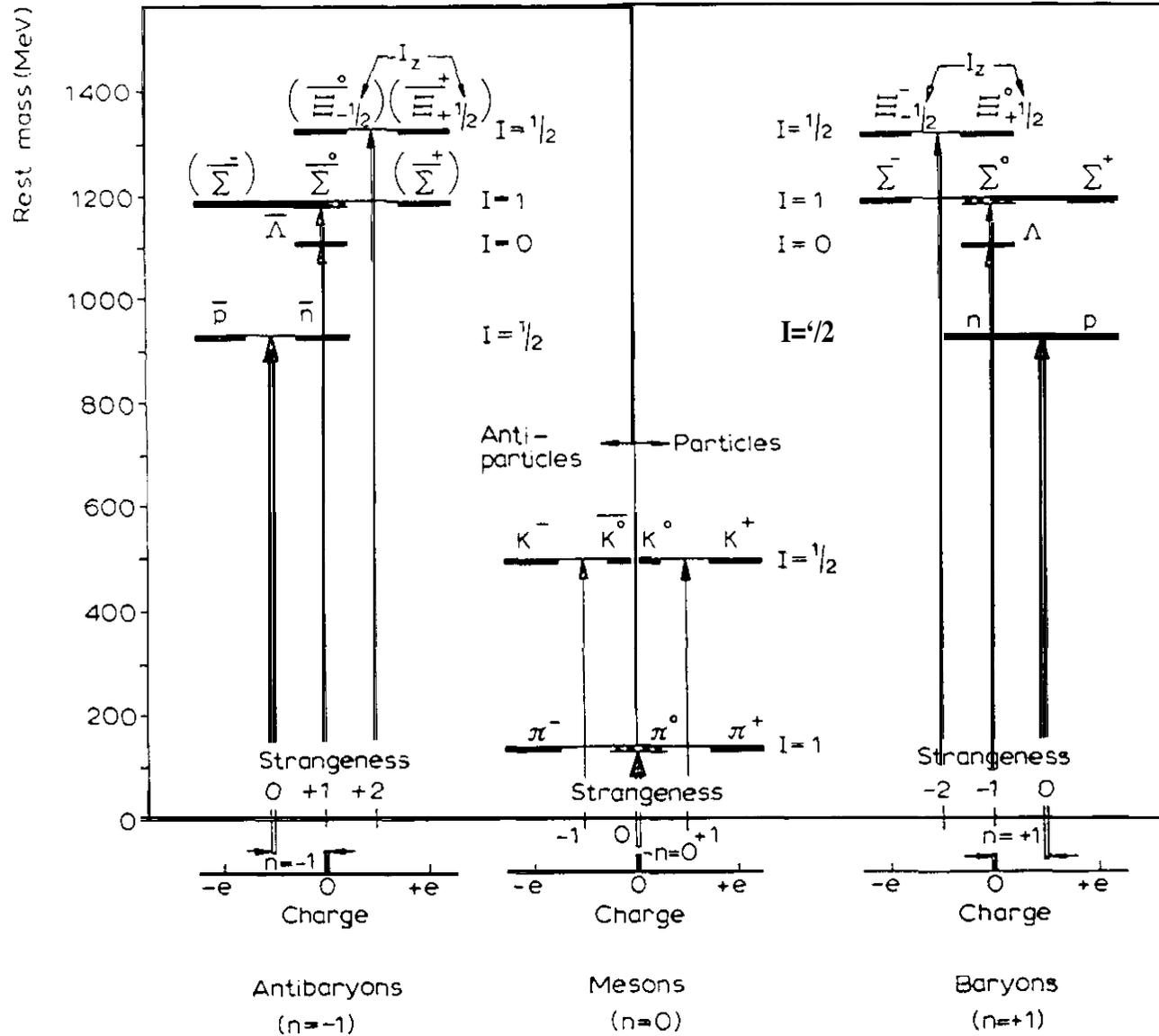
$$S = 2 \cdot Q - B$$

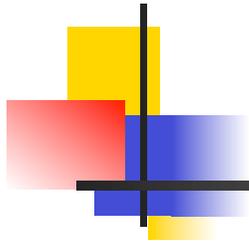
- nucléons : $Q = \frac{1}{2}$ $B = 1$ $\rightarrow S = 0$
- kaons : $Q = \frac{1}{2}$ $B = 0$ $\rightarrow S = +1$
- Λ^0 : $Q = 0$ $B = 1$ $\rightarrow S = -1$
- seul Ξ^- était alors connu, $B = 1$ et $S = -2$ $\rightarrow Q = -\frac{1}{2}$ \rightarrow il devait exister un Ξ^0
- (découvert à Brookhaven en 1959)

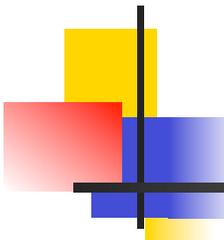
- L'étrangeté S augmente régulièrement avec la masse de la particule étrange

- -1 pour Λ^0 et les Σ (1100 et 1200 MeV)
- -2 pour Ξ^0 et Ξ^- (1300 MeV) ↙ modèle des quarks (Gell-Mann, Zweig)
- -3 pour...? \rightarrow oui, pour Ω^- (1670 MeV, prédit en 1962, découvert en 1964)
- -4 ? \rightarrow non, aucune particule n'a $S = -4$ (comme prédit en 1962)

La situation en 1957







Résonances

- Taille de la zone d'interaction $< 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
 - Durée d'interaction $\sim 1 \text{ fm}/c \sim 10^{-23} \text{ s}$
 - Pour être « vue », une particule doit parcourir au moins 1 mm (dans une chambre à bulles par ex.) ➡ durée de vie $> 10^{-11} \text{ s}$
 - Comment détecter des (quasi)particules de vie plus brève ?
 - collision $A + B \rightarrow C + D$
 - état intermédiaire $A + B \rightarrow E \rightarrow C + D$ (voire $A + B \rightarrow E + F + \dots \rightarrow C + D + \dots$)
 - utiliser la dilatation relativiste du temps pour des particules E de vitesse $\sim c$
- variation brusque de la probabilité d'interaction (➡ **section efficace**) avec l'énergie de la collision ➡ il se passe « quelque chose » pour une certaine énergie \Leftrightarrow masse
 - reconstruction de la « masse invariante » d'un état intermédiaire E à partir des ses « fragments » C et D

Résonance(s) Δ

- Groupe de Fermi (1952)
 - faisceau de pions du synchrocyclotron de 450 MeV de Chicago
 - collision $\pi + p \rightarrow$ pic dans la section efficace pour $E(\pi) = 195$ MeV
 - \rightarrow énergie *dans le centre de masse* 1232 MeV \rightarrow résonance $\Delta(1232)$
 - largeur de la résonance $\delta m \sim 100$ MeV \rightarrow durée $\tau \sim \hbar/\delta m \sim 6 \times 10^{-24}$ s
 - ($\hbar = 6 \times 10^{-16}$ eV.s)

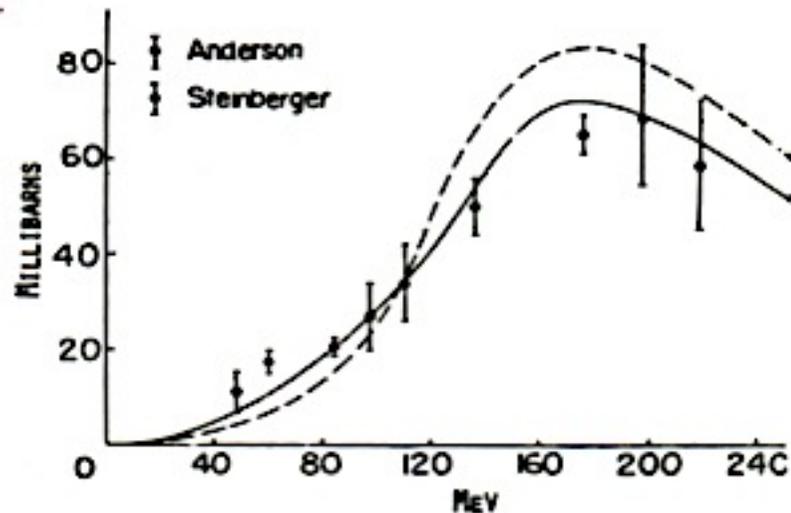
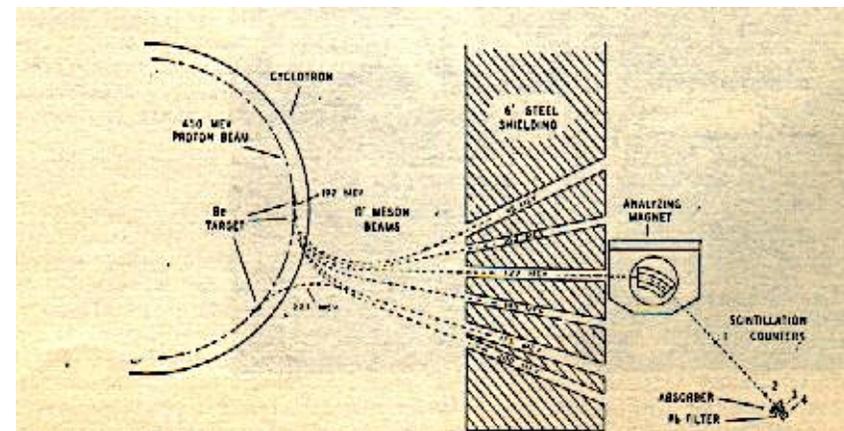


Fig. 48: Fit of cross sections for π^+p from the Brueckner preprint received in December 1951.



Extraction de faisceaux de pions de différentes énergie

Graphes de masse invariante

- Collision $A + B \rightarrow C + D + E + F + \dots$

- masses invariantes

- m_{CD}
- m_{CE}
- m_{CF}
- m_{DE}
- m_{DF}
- ...

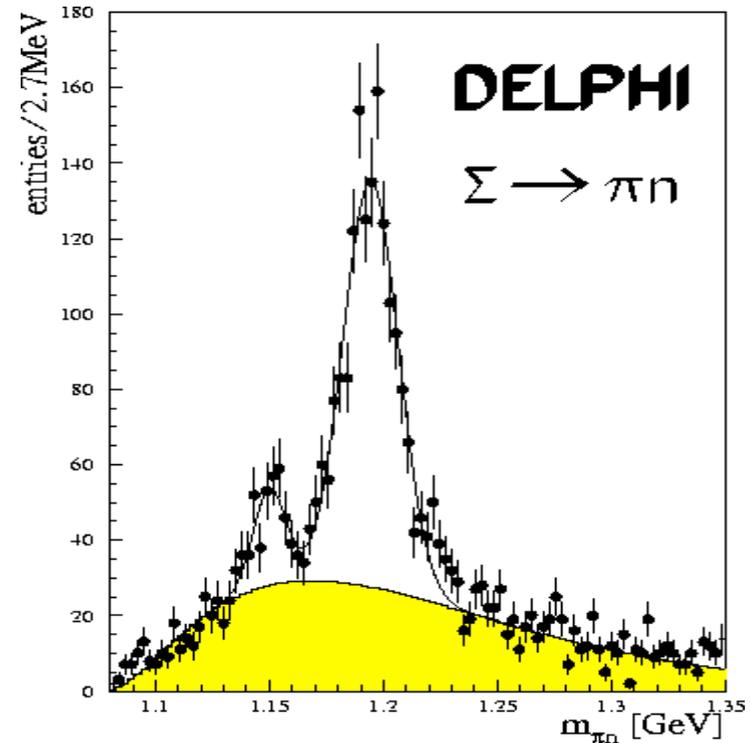
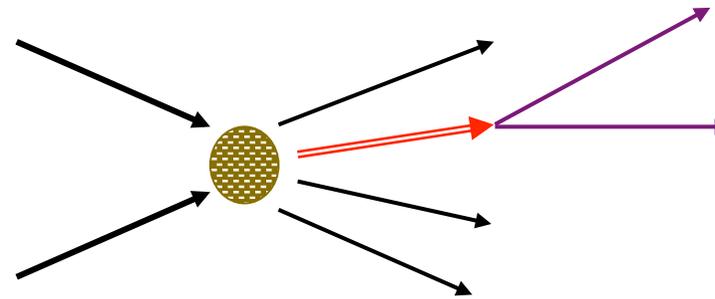
- avec $m_{CD}^2 = [E_C + E_D]^2 - [P_C + P_D]^2$

- recherche d'un excès d'événements

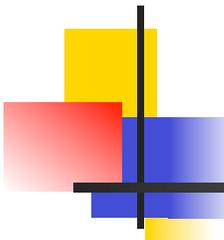
- existence d'un **état intermédiaire**



- de masse $m_X = m_{CD}$



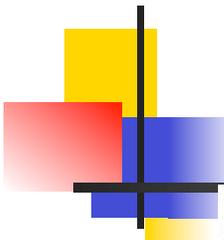
Masse invariante $\pi n \rightarrow$ pic Σ à 1200 MeV



Des résonances par centaines...

- Les centaines de résonances découvertes à partir de la fin des années 1950 étaient **toutes des hadrons**
 - Aucun lepton ne fut découvert (à part le tau)
 - Mêmes lois de conservation que les hadrons plus stables
 - charge
 - nombre baryonique
 - étrangeté
 - Mêmes nombres quantiques (sauf spin) que les hadrons plus stables, mais plus lourds
- ➔ états excités (et de ce fait instables) des hadrons plus légers ?
 - ➔ *structure interne*
 - ➔ les hadrons ne sont *pas* des particules fondamentales
- Regge (1959) : **le spin des résonances augmente proportionnellement à leur masse**
 - ➔ trajectoires de Regge ➔ pôles de Regge ➔ **bootstrap** (Chew et Frautschi 1961)

Extrait de la table des mésons légers

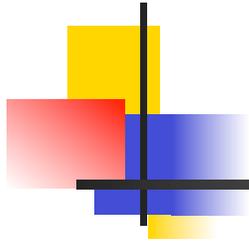


spin
parité
conj. charge

nom(masse)

isospin

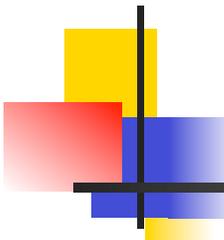
$n^{2s+1}\ell_J$	J^{PC}	$I = 1$ $u\bar{d}, \bar{u}d, \frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{d} - u\bar{u})$	$I = \frac{1}{2}$ $u\bar{s}, d\bar{s}; \bar{d}s, -\bar{u}s$	$I = 0$ f'	$I = 0$ f
1^1S_0	0^{-+}	π	K	η	$\eta'(958)$
1^3S_1	1^{--}	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\phi(1020)$	$\omega(782)$
1^1P_1	1^{+-}	$b_1(1235)$	K_{1B}^\dagger	$h_1(1380)$	$h_1(1170)$
1^3P_0	0^{++}	$a_0(1450)$	$K_0^*(1430)$	$f_0(1710)$	$f_0(1370)$
1^3P_1	1^{++}	$a_1(1260)$	K_{1A}^\dagger	$f_1(1420)$	$f_1(1285)$
1^3P_2	2^{++}	$a_2(1320)$	$K_2^*(1430)$	$f_2'(1525)$	$f_2(1270)$
1^1D_2	2^{-+}	$\pi_2(1670)$	$K_2(1770)^\dagger$	$\eta_2(1870)$	$\eta_2(1645)$
1^3D_1	1^{--}	$\rho(1700)$	$K^*(1680)$		$\omega(1650)$
1^3D_2	2^{--}		$K_2(1820)$		
1^3D_3	3^{--}	$\rho_3(1690)$	$K_3^*(1780)$	$\phi_3(1850)$	$\omega_3(1670)$
1^3F_4	4^{++}	$a_4(2040)$	$K_4^*(2045)$		$f_4(2050)$
1^3G_5	5^{--}	$\rho_5(2350)$	$K_5^*(2380)$		
1^3H_6	6^{++}	$a_6(2450)$			$f_6(2510)$
2^1S_0	0^{-+}	$\pi(1300)$	$K(1460)$	$\eta(1475)$	$\eta(1295)$
2^3S_1	1^{--}	$\rho(1450)$	$K^*(1410)$	$\phi(1680)$	$\omega(1420)$



LA VOIE OC'UPÉE



Vision juste
Pensée juste
Parole juste
Action juste
Profession juste
Persévérance juste
Attention juste
Concentration juste



Mettre un peu d'ordre dans tout cela

- Cohésion d'un noyau avec des protons de charge positive (☞ qui se repoussent)
- Yukawa (1935) : interaction entre protons et neutrons par échange de **mésons π** (pions) calquée sur l'interaction électromagnétique par échange de photons
- Observation des pions
- puis de mésons étranges à longue durée de vie : mésons K (kaons)
- et de particules lourdes analogues aux nucléons : hypérons Λ , Σ , Ξ
- et enfin de dizaines de particules (?) les résonances

- Toutes ces particules étaient-elles fondamentales ?
 - *position de plus en plus difficile à soutenir quand le nombre devient très grand*
- Certaines étaient-elles fondamentales, et les autres composées des premières ?
 - *un peu comme protons et neutrons forment tous les noyaux*
- Toutes étaient-elles composées d'objets plus fondamentaux ?

Peut-on simplifier le zoo hadronique ?

- 1949 (Fermi et Yang) : les mésons π comme états liés nucléon-antinuéon
- 1956 (Sakata) : tous les hadrons sont composés de trois hadrons fondamentaux
 - au moins un hadron étrange
 - au moins un de spin $\frac{1}{2}$ → baryon
 - par symétrie, 3 baryons fondamentaux
- Sakata choisit le proton p , le neutron n et l'hypéron Λ
 - méson → nombre baryonique nul → paire baryon-antibaryon
 - méson étrange → paire proton-antilambda (par exemple)



	\bar{p}	\bar{n}	$\bar{\Lambda}$
p	π^0, η^0	π^+	K^+
n	π^-	π^0, η^0	K^0
Λ	K^-	\bar{K}^0	η^0

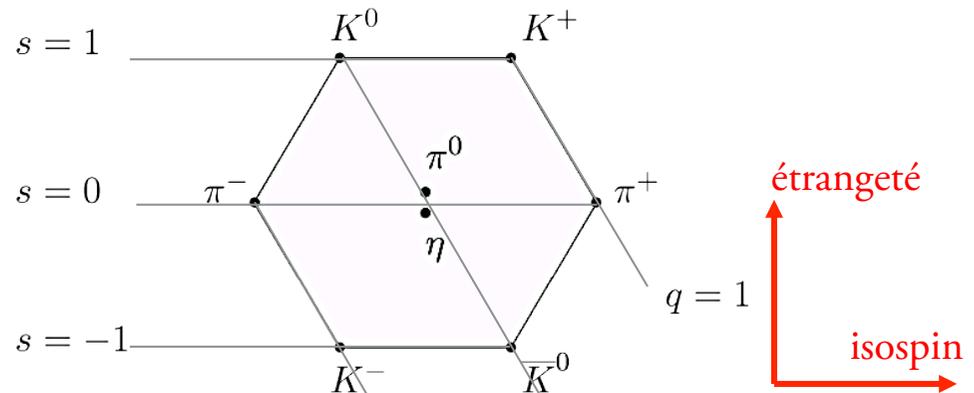
👉 **prédiction** du méson η^0 , observé en 1961 à 547 MeV

- masses ? → énergies de liaison beaucoup plus grandes que les énergies de masse

Regroupements

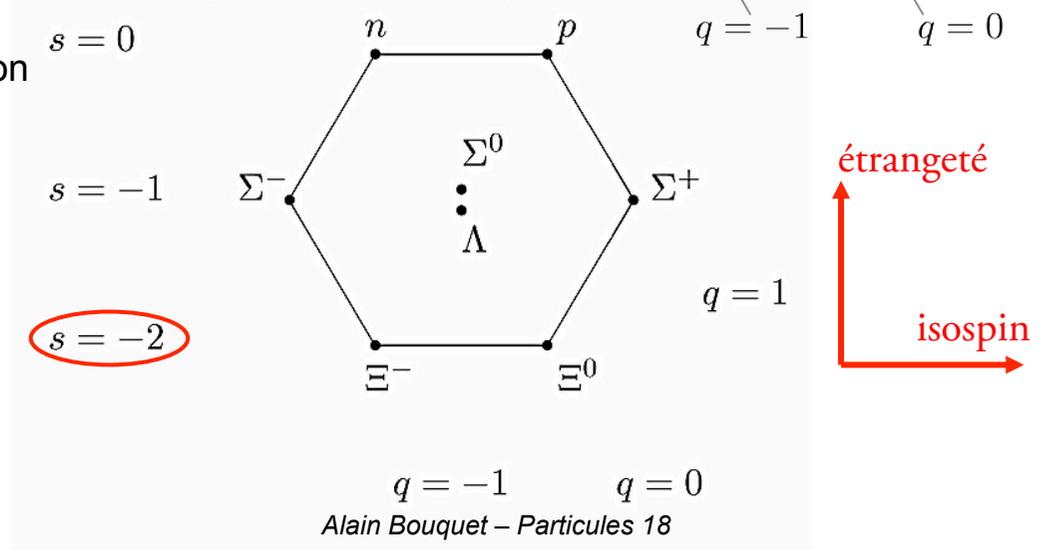
- Regroupement des particules en supermultiplets (même spin, même nombre baryonique, masses proches, mais charge électrique et étrangeté différentes)

- pions (π^+, π^0, π^-)
- kaons (K^+, K^0)
- antikaons (K^-, \bar{K}^0)
- eta (η^0 [déc. 1961])



- Diagramme *presque* identique pour les baryons

- proton, neutron ($s = 0$)
- les 3 sigmas ($s = -1$)
- les 2 xis ($s = -2$)
- et le Λ^0



Les baryons de spin 3/2

- Résonances Δ à 1232 MeV $\rightarrow \Delta^-, \Delta^0, \Delta^+$ et Δ^{++} \rightarrow multiplet de 4 éléments
- Puis 3 résonances Σ^* à 1385 MeV
- Quel supermultiplet?

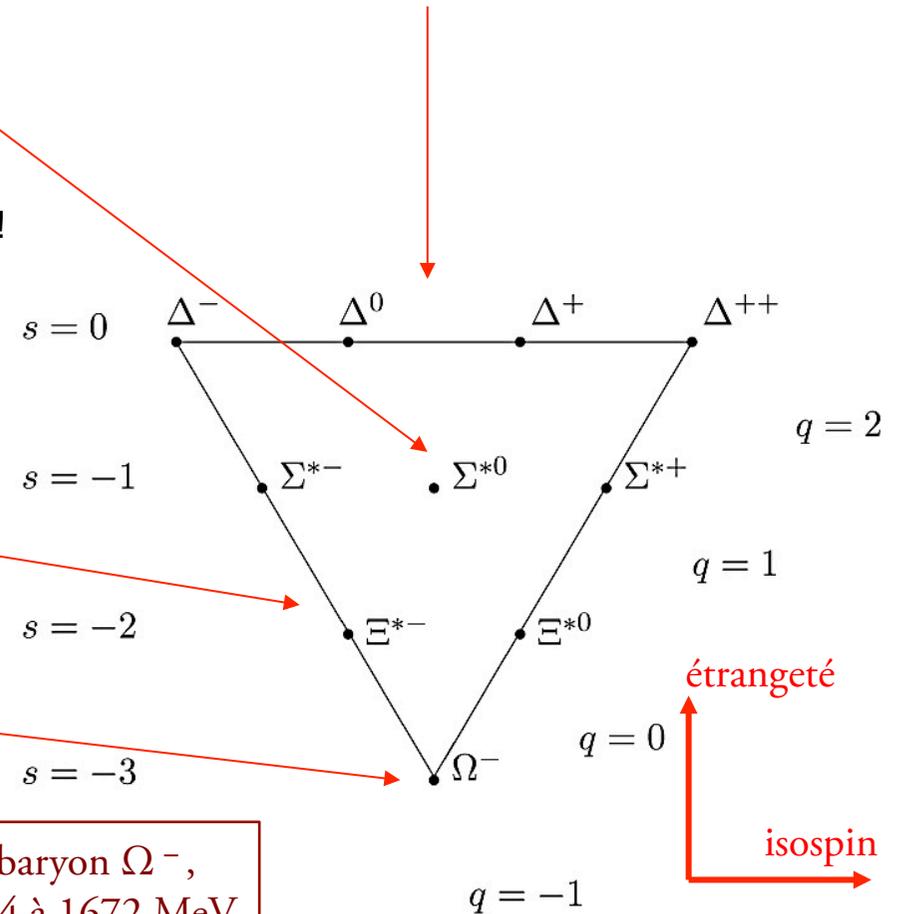
- pas un octet comme les baryons de spin $1/2$!
- un décuplet avec 3 *membres inconnus* ?
- un multiplet hexagonal de 27 membres ?

Observations

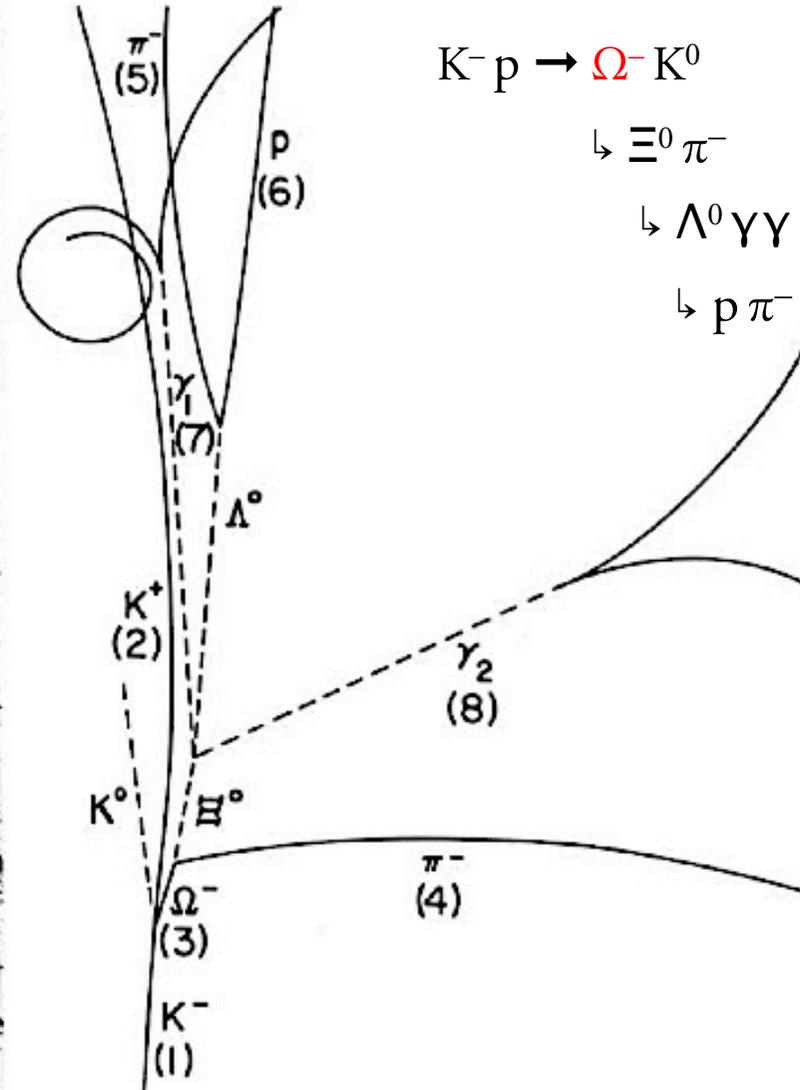
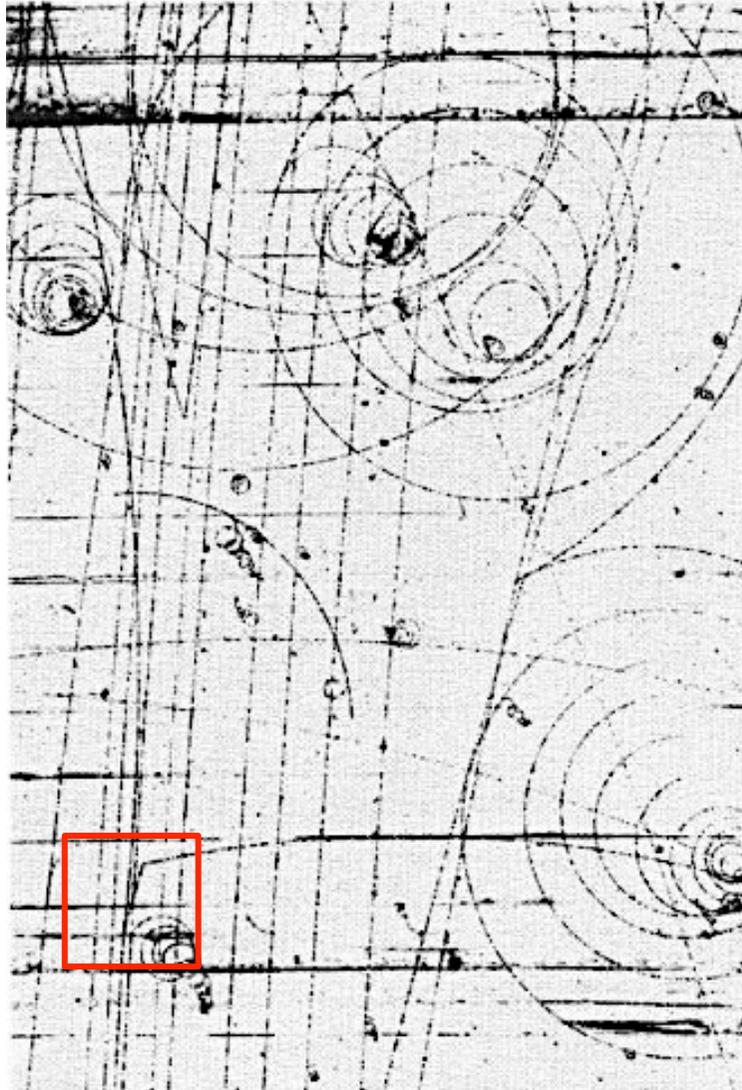
- 1962 : 2 résonances $\Xi^*(1530) \rightarrow \Xi\pi$
- pas de résonance Kp ($S = +1$)

\rightarrow prédiction d'une particule

- charge -1
- étrangeté -3



La découverte du baryon Ω^- en 1964 (Brookhaven)



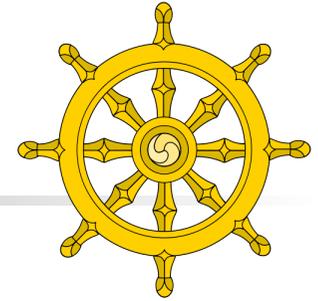
De SU(2) à SU(3), de l'isospin à la *saveur*

- SU(2) → matrices \mathbf{U} 2x2 unitaires ($\mathbf{U}\mathbf{U}^\dagger = \mathbf{I}$) de déterminant 1
- → combinaisons linéaires des 3 (=2x2-1) *matrices de Pauli*
- → particule/champ d'isospin donné [0, ½, 1 ...]
- Isospin + étrangeté = *saveur* → 3° dimension → SU(2) → SU(3)
- SU(3) → matrices \mathbf{U} 3x3 unitaires ($\mathbf{U}\mathbf{U}^\dagger = \mathbf{I}$) de déterminant 1
- → combinaisons linéaires des 8 (=3x3-1) *matrices de Gell-Mann*

$$\lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

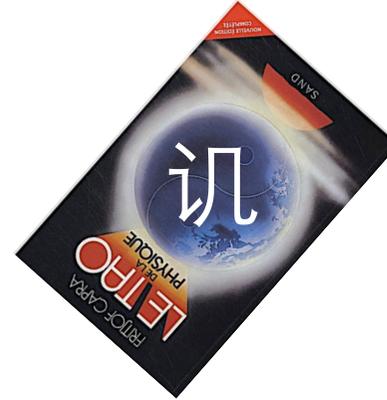
$$\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}.$$

La voie octuple (1961) : Gell-Mann et Ne'eman



■ Octuple ?

- un octet de mésons de spin zéro
- un octet de mésons de spin 1
- un octet de baryons de spin $\frac{1}{2}$
- un octet d'antibaryons de spin $\frac{1}{2}$
- *mais un décuplet de baryons de spin $\frac{3}{2}$*



■ Les matrices de SU(3) « transforment » un élément d'un multiplet en un autre

- ➡ changement de **saveur**

■ La « voie octuple » relie les hadrons d'un même multiplet (➡ relations de masse semi-empiriques de Gell-Mann et Okubo)

$$2 (m_N + m_{\Xi}) = 3m_{\Lambda} + m_{\Sigma}$$

- relations analogues (mais quadratiques) pour les mésons

■ Mais elle ne dit pas quels multiplets sont possibles, ni leur nombre



Murray Gell-Mann



Yuval Ne'eman

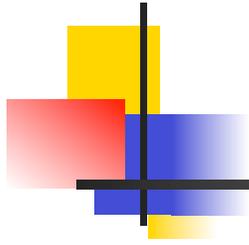
Les quarks (1964) : Murray Gell-Man et George Zweig

- On peut construire toutes les représentations de SU(2), spin ou isospin, à partir de la représentation fondamentale $I = \frac{1}{2}$ comportant deux éléments
- On peut construire toutes les représentations de SU(3) à partir de la représentation fondamentale comportant **trois** éléments
- Ces trois éléments sont-ils
 - uniquement des outils **mathématiques** pour construire les représentations physiques : octets, décuplets... ?
 - les briques **physiques** dont sont formés les hadrons ?
- Hésitation initiale de Gell-Mann
- 1964 : Gell-Mann et, indépendamment Zweig, suggèrent leur existence réelle
- Gell-Mann les baptise **quarks** (d'après le début de *Finnegan's wake* de Joyce)
- 🖐️ **3 quarks u, d et s reliés par SU(3)**



George Zweig

- ➡ **Modèle des quarks**
- 3 quarks \Leftrightarrow baryon
 - proton = uud $\Lambda = uds$
- quark-antiquark \Leftrightarrow méson
 - $\pi^- = \bar{u}d$ $K^- = \bar{u}s$

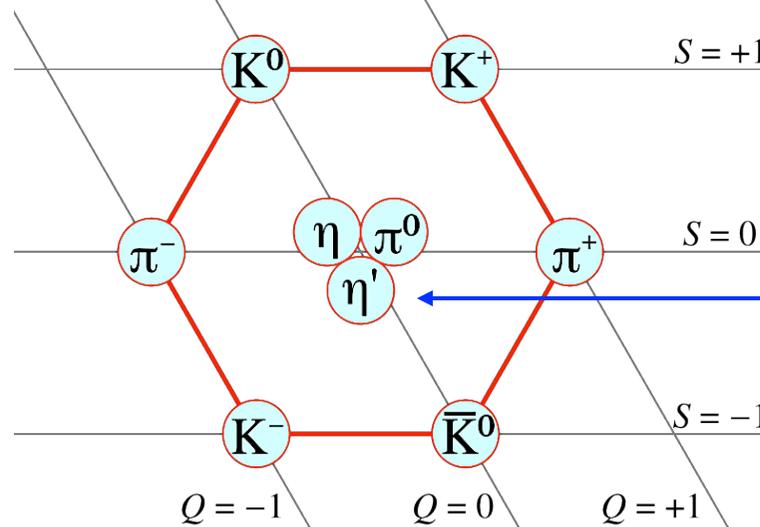


QUARKS ET PARTONS

Des quarks et des hadrons

- Avec 3 quarks différents u, d et s ➡ $3 \times 3 = 9$ mésons différents = octet + **singlet**

➡ mésons de spin zéro



$$\eta' = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}}$$

(découvert en 1964)

- Quark : spin $\frac{1}{2}$ ➡ tous les mésons ont un spin entier, les baryons demi-entier

■ Résonances

■ $\pi^- = \bar{u}d$	spins $\uparrow\downarrow$	➡ spin total 0	➡ masse 140 MeV
■ $\rho^- = \bar{u}d$	spins $\uparrow\uparrow$	➡ spin total 1	➡ masse 770 MeV
■ $\Sigma^- = dds$	spins $\uparrow\uparrow\downarrow$	➡ spin total $\frac{1}{2}$	➡ masse 1189 MeV
■ $\Sigma^{*-} = dds$	spins $\uparrow\uparrow\uparrow$	➡ spin total $\frac{3}{2}$	➡ masse 1385 MeV

Baryons

- Trois quarks de 2 modèles (u et d) $\Rightarrow 2 \times 2 \times 2 = 8$ baryons = 1 quadruplet + 2 doublets

$$\begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} = \left(\begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array} \right) \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|} \hline \square & \square \\ \hline \end{array}$$

- quadruplet (d'isospin) symétrique par permutation de 2 quarks $\Rightarrow \Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0$ et Δ^-
- les 2 doublets sont symétriques par permutation quark 1 \leftrightarrow quark 2 et antisymétriques par permutation quark 1 \leftrightarrow quark 3
- situation *identique* pour la combinaison des 3 spins $\frac{1}{2}$:

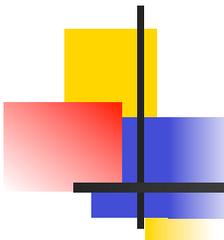
combinaisons $\uparrow\uparrow\uparrow$ symétriques et $\uparrow\uparrow\downarrow$ de symétrie mixte

- \Rightarrow solutions symétriques : 1 quadruplet Δ de spin $3/2$, et 1 doublet de nucléons de spin $\frac{1}{2}$

- **Problème : les quarks sont des fermions \Leftrightarrow états antisymétriques \Rightarrow couleur**

- Trois quarks de 3 modèles $\Rightarrow 3 \times 3 \times 3 = 27$ baryons = 1 décuplet + 2 octets + 1 singlet

$$\begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array} \otimes \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square & \square \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline & & & & \square \\ \hline & & & & \square & \square \\ \hline & & & & \square & \square & \square \\ \hline & & & & \square & \square & \square & \square \\ \hline & & & & \square & \square & \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \square & \square & \square \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array}$$



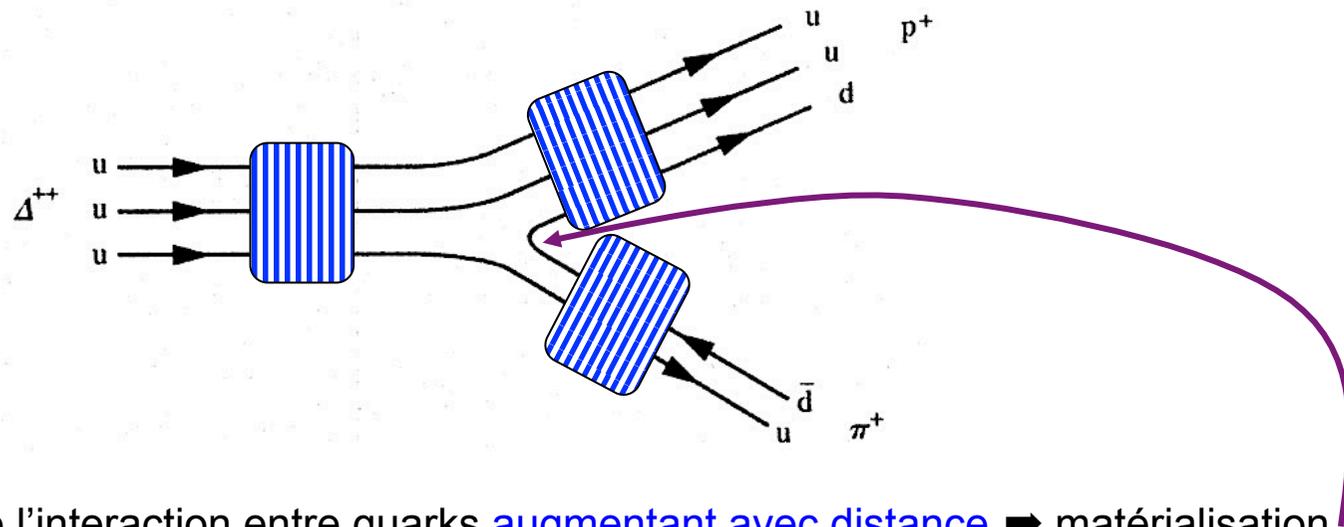
À la recherche des quarks

- Particularité des quarks : une charge **fractionnaire**
 - proton = u u d charge +1 ⇒ u charge +2/3 [et \bar{u} charge -2/3]
 - neutron = u d d charge 0 d charge -1/3
 - lambda = u d s charge 0 s charge -1/3
 - $\pi^- = \bar{u}d$ charge -1 OK ✓
 - $K^- = \bar{u}s$ charge -1 OK ✓
- **Pas de charge fractionnaire observée**
 - conservation de la charge électrique ⇒ particule stable
 - ⇒ rayons cosmiques, roches ...
 - ⇒ recherches infructueuses (malgré quelques fausses alertes)
- ⇒ particules très lourdes ?
 - ⇔ énergie insuffisante pour les matérialiser
- ⇒ interaction très forte entre quarks ?
 - ⇔ énergie insuffisante pour les libérer

À la recherche des quarks



- Cohésion des hadrons ?
- Interaction forte nucléaire ?
- ➔ idée d'une interaction entre quarks dont l'interaction entre hadrons ne serait que l'effet à grande distance (*analogie avec les forces de van der Waals*)

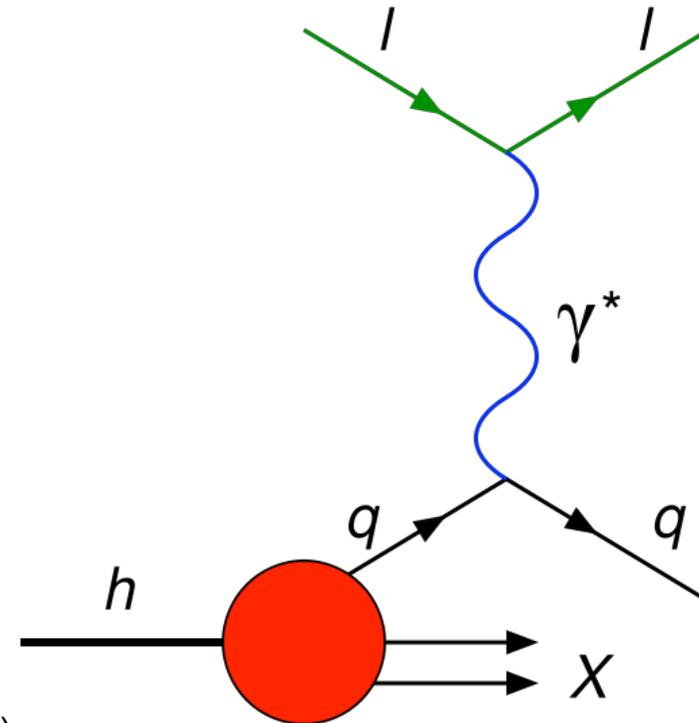


- Intensité de l'interaction entre quarks **augmentant avec distance** ➔ matérialisation d'une paire quark-antiquark quand la distance augmente ➔ **pas de quark libre**

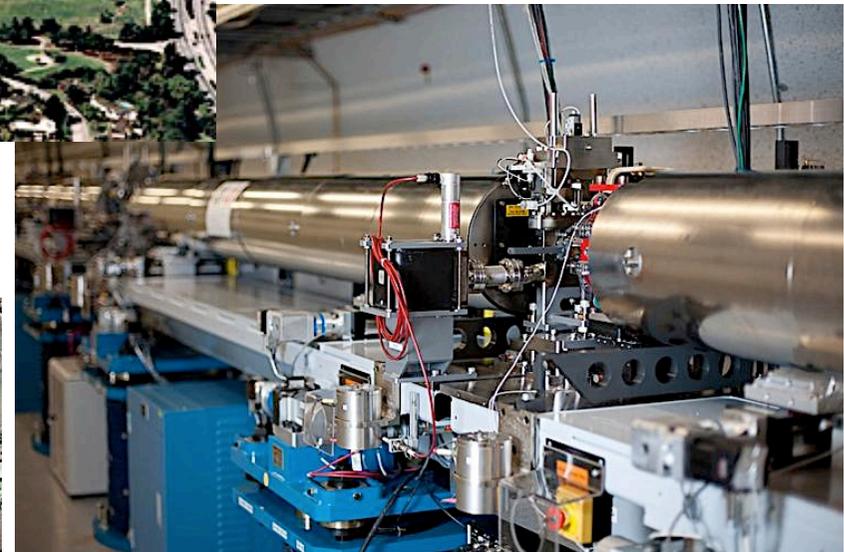
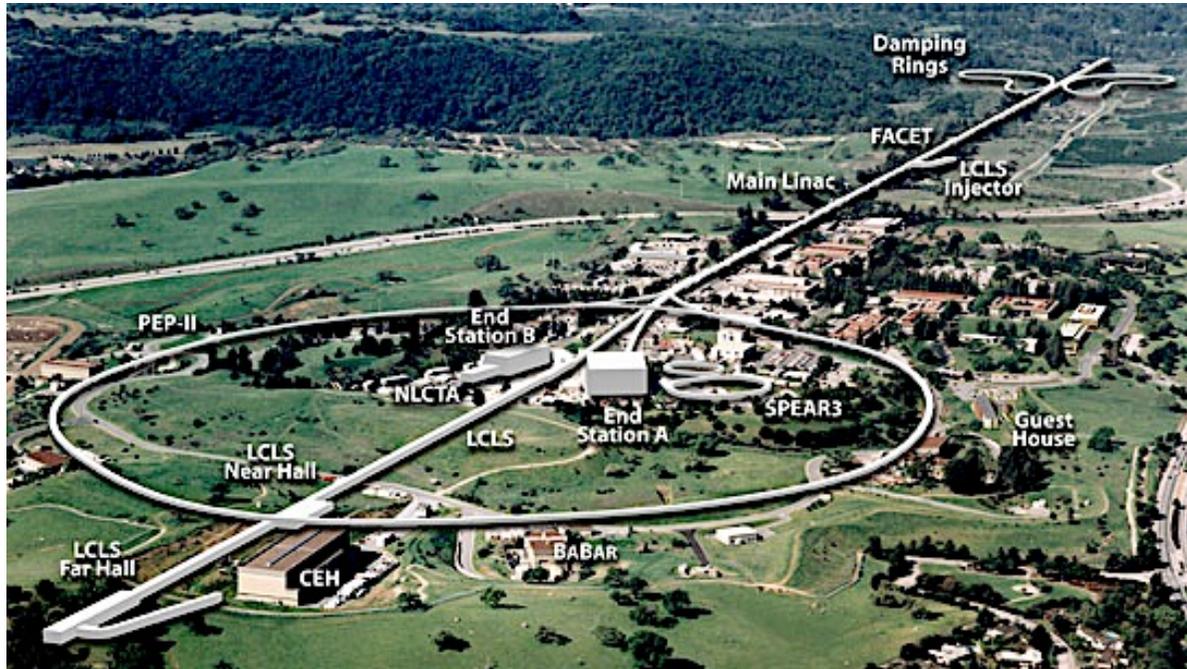
« Si vous cassez un bout de bois en deux, il y a encore deux bouts à chaque bout » (R. Devos 1973)

Diffusion inélastique profonde

- Quarks \Rightarrow les hadrons ont une structure interne (\Rightarrow niveaux d'énergie)
- Interaction augmentant avec la distance \Rightarrow quarks quasi-libres à courte distance
- Pour le vérifier : diffusion sur les quarks (à la Rutherford)
- Diffusion hadron-hadron = diffusion complexe (« sac » de quarks contre « sac » de quarks)
- \Rightarrow l'électron est une bien meilleure sonde
- \Rightarrow très courte distance \Rightarrow électrons de très haute énergie
- \Rightarrow *Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)*
 - accélérateur linéaire de 3.2 km
 - électrons (et positrons) de 20 GeV (puis 50)
 - Friedman, Kendall et Taylor (1969 \rightarrow Nobel 1990)



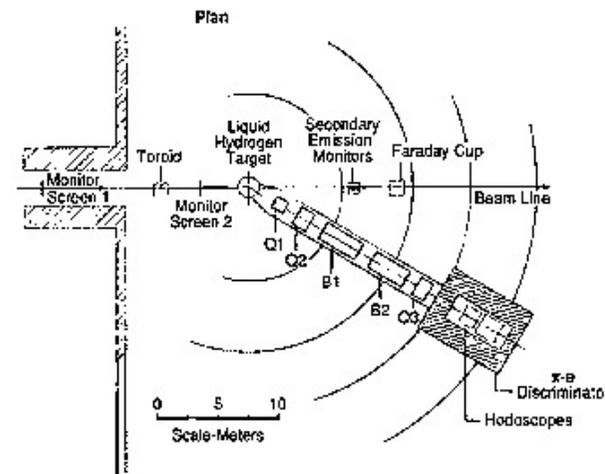
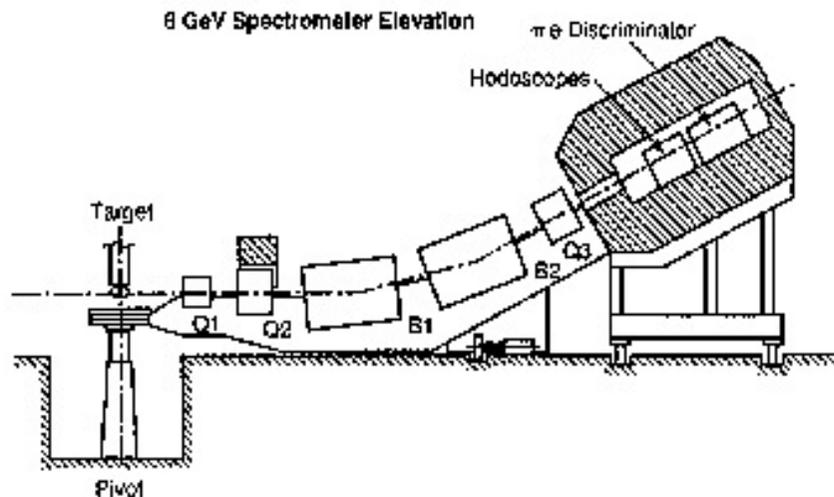
Stanford Linear Accelerator Center



Diffusion inélastique profonde

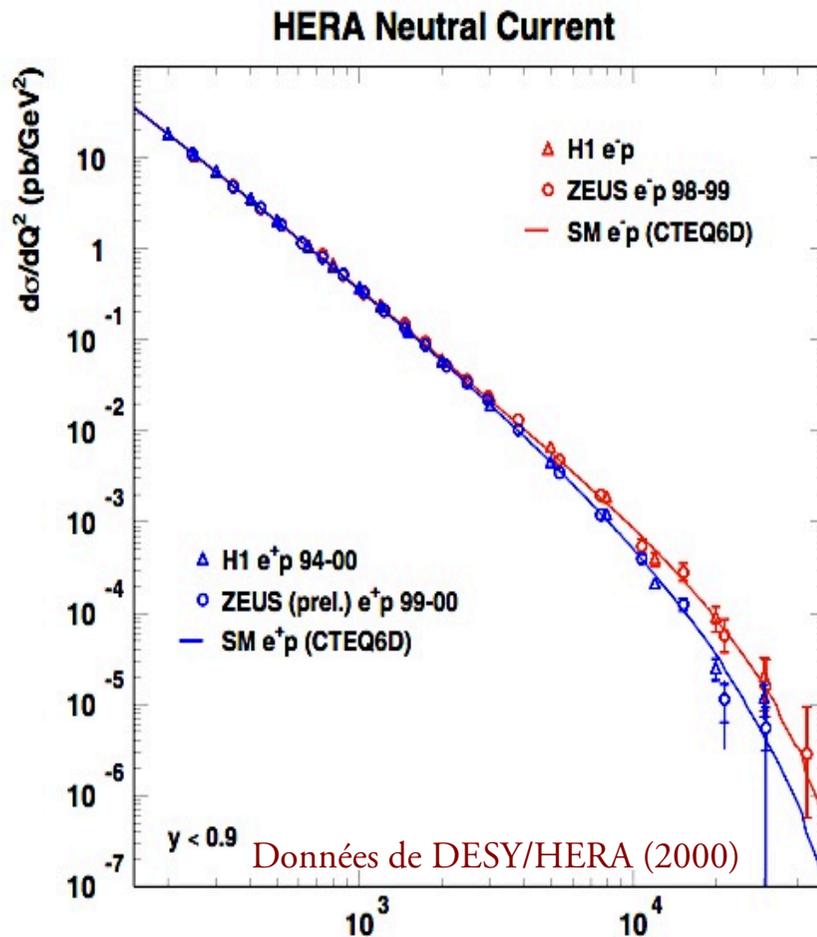


- Mesure de la section efficace de diffusion électron-proton en fonction de l'angle de diffusion
- ➔ relation angle ↔ énergie transférée Q
- ➔ décroissance « rutherfordienne »
- ➔ centres diffuseurs « durs » ponctuels
- ➔ structure interne du proton



Diffusion inélastique profonde

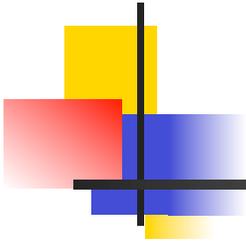
- ➔ diffusion « rutherfordienne »



énergie Q transférée entre électron et parton ➔ Q^2 (GeV²)

- Conclusions

- les hadrons ont bien une structure interne ➔ **partons** (\neq quarks ?)
- ces partons apparaissent comme des charges ponctuelles *et fractionnaires*
- sections efficaces $\sigma(e p) \sim 3/2 \sigma(e \pi)$
- ➔ il existe 3 points de déflection dans un baryon pour 2 dans un méson
- ➔ les partons *sont* des quarks
- ou presque : les partons sont aussi des quarks virtuels (« mer ») et des gluons
- ➔ corrections au modèle des partons-quarks dues à la chromodynamique (QCD)



Merci de votre attention !

