



# CHAMPS & PARTICULES

---

## LA VOIE OCTUPLE: QUARKS ET LEPTONS

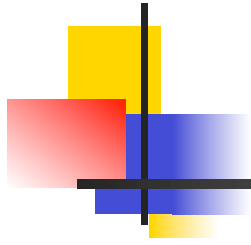


Alain Bouquet

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)



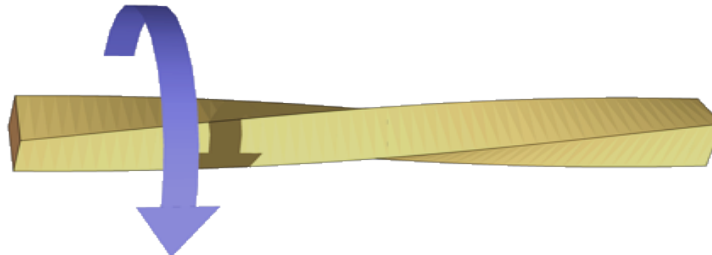
- Conservation = constance *dans le temps*
- Extension : constance lors d'une transformation ( $\pm$  virtuelle) à *un instant donné*
  - Transformation **spatiale** : translation, rotation, réflexion en miroir
  - Transformation **interne** : remplacement d'un atome/électron/quark par un autre
- Désintégration  $p \rightarrow e^+ + \dots$  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  $\pi$  (mundane mesotron ➔ mu meson ➔ muon  $\mu$ )
    - puis découverte progressive de particules du même genre mais plus lourdes
    - mésons K , aussi de spin zéro, mésons  $\rho$ ,  $\omega$  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  $\nu_e$  associé à l'électron et **un autre** associé au muon,  $\nu_\mu$
  - $\Rightarrow$  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  $\mathbf{U}$   $2 \times 2$  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  $SU(2)$

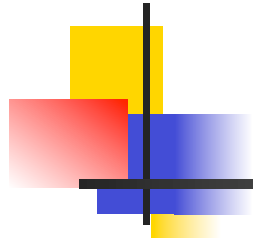
- ↪ matrices de Pauli
- particule/champ d'isospin  $\frac{1}{2}$

- 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 :  $S_z = \text{diag}\{1, 0, -1\}$

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

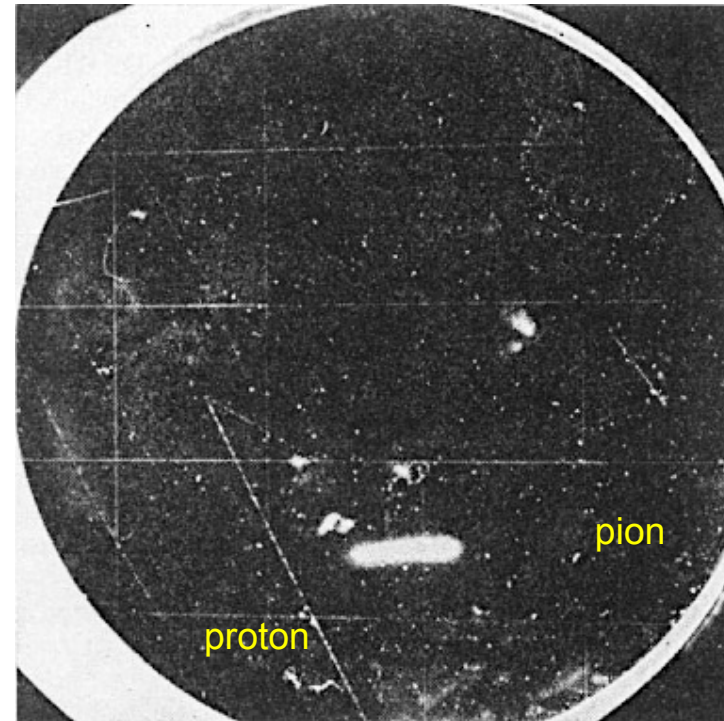
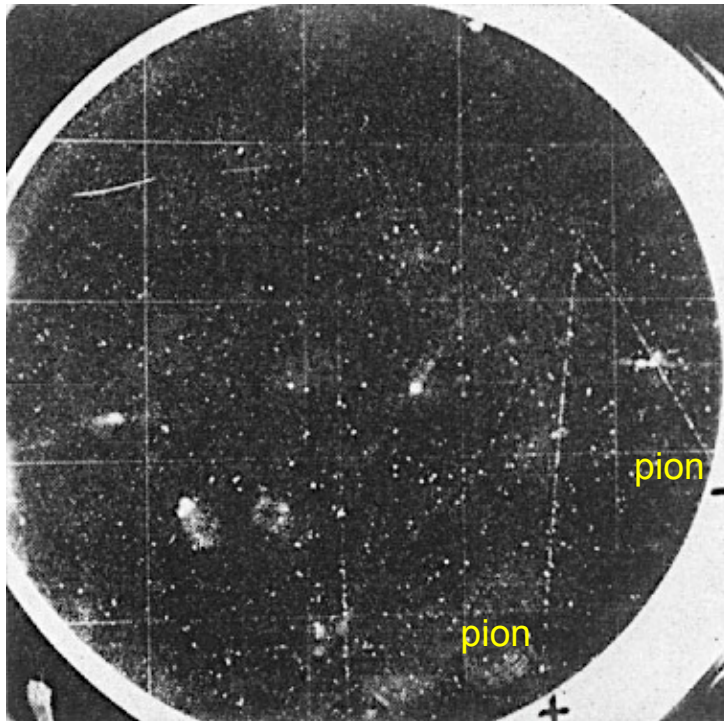




# ÉTRANGÉTÉ

## 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  $500 \pm 80 \text{ MeV}$

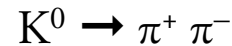




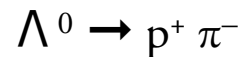
# Particules V

---

- 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  $\Lambda^0$
- 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 (1952)

---

- Abraham Pais (1918-2000), Kazuhiko Nishijima (1926-2009), Murray Gell-Mann (1929- )
- Explication possible : existence d'un nombre quantique S, l'**étrangeté** (*strangeness*)
  - **conservé par interaction forte** → production nécessairement par paires (d'étrangetés opposées)
  - **non conservé par interaction faible** → désintégration très lente
  - exemple: collision  $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0 K^0$  → étrangetés S = 0 , 0 , -1 et +1
- Découverte progressive d'autres particules étranges
  - 2 hypérons xi  $\Xi^-$  (1952) puis  $\Xi^0$  (1959)      masse 1320 MeV      S = -2  
→ cascades :  $\Xi \rightarrow \Lambda \rightarrow p$
  - 3 hypérons sigma  $\Sigma^+$  et  $\Sigma^-$  (1953) puis  $\Sigma^0$  (1956)      masse 1190 MeV      S = -1
  - toujours avec des durées de vie  $\sim 10^{-10}$  s



# 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

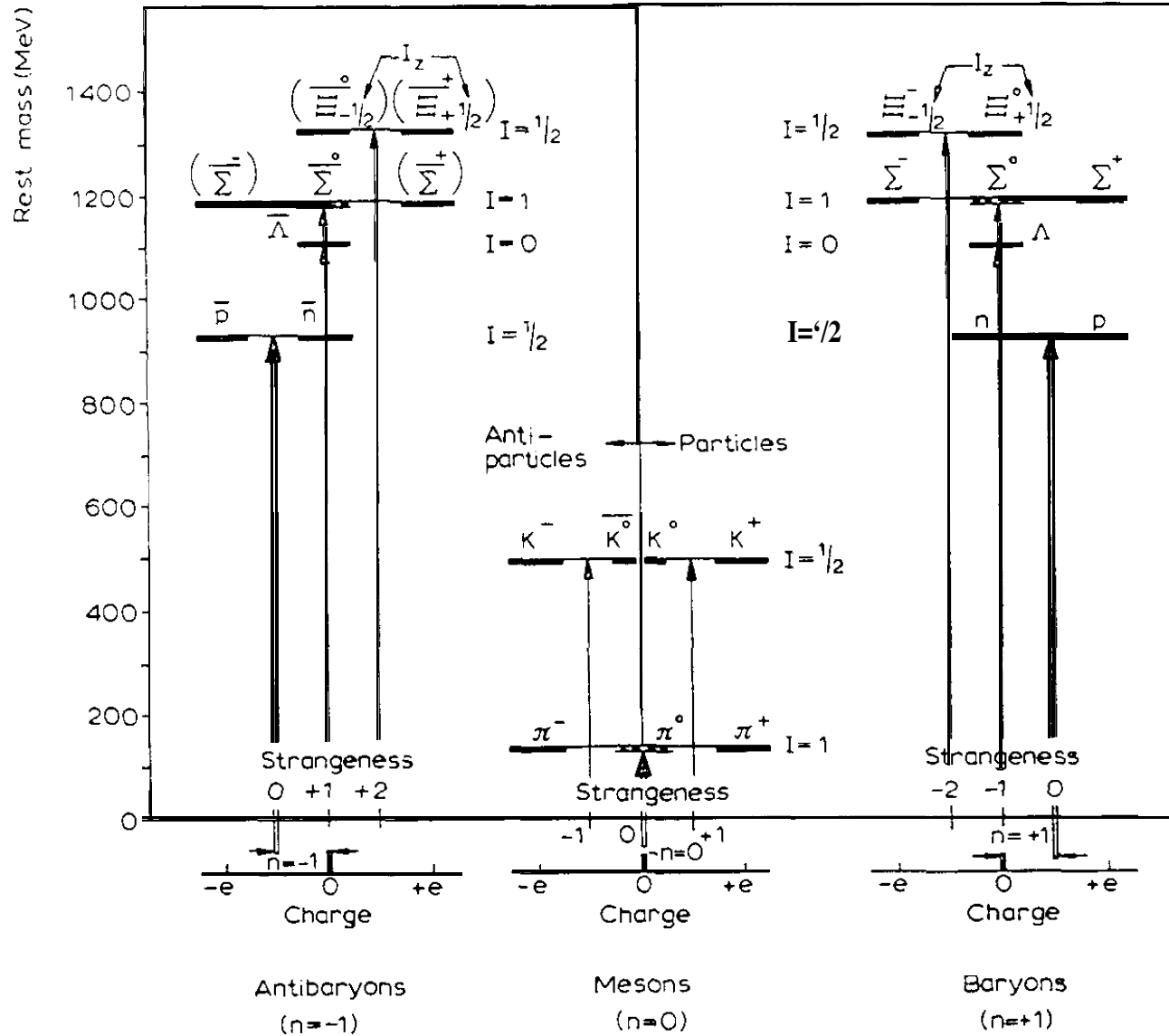
$$S = 2 \cdot Q - B$$

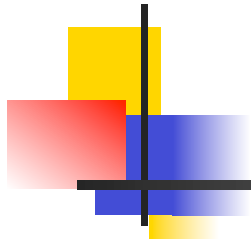
- nucléons :  $Q = \frac{1}{2}$   $B = 1$   $\rightarrow S = 0$
- kaons :  $Q = \frac{1}{2}$   $B = 0$   $\rightarrow S = +1$
- $\Lambda^0$  :  $Q = 0$   $B = 1$   $\rightarrow S = -1$
- seul  $\Xi^-$  était alors connu,  $B = 1$  et  $S = -2$   $\rightarrow Q = -\frac{1}{2}$   $\rightarrow$  il devait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

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

- $-1$  pour  $\Lambda^0$  et les  $\Sigma$  (1100 et 1200 MeV)
- $-2$  pour  $\Xi^0$  et  $\Xi^-$  (1300 MeV) ↙ modèle des quarks (Gell-Mann, Zweig)
- $-3$  pour...?  $\rightarrow$  oui, pour  $\Omega^-$  (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) $\Delta$

- 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)

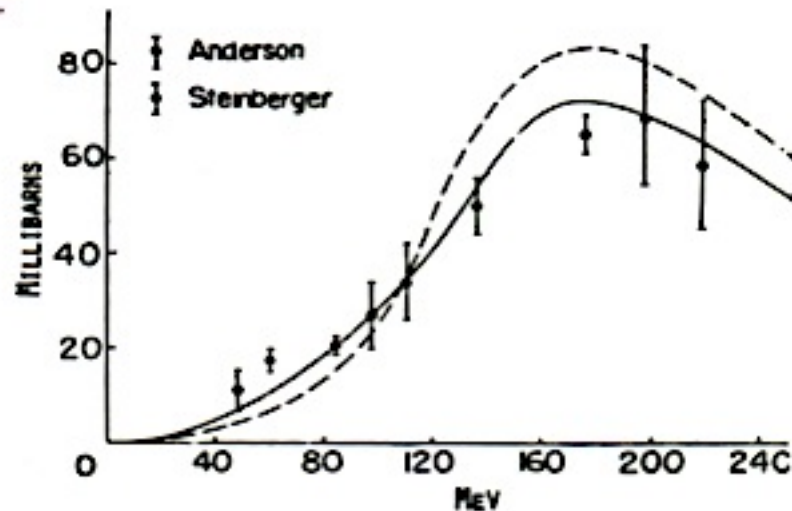
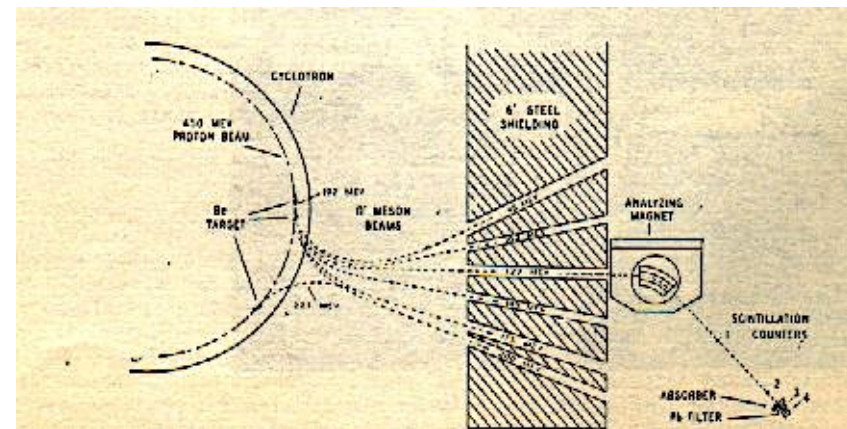


Fig. 48: Fit of cross sections for  $\pi^+p$  from the Brueckner preprint received in December 1951.



Extraction de faisceaux de pions de différentes énergie

# Graphes de masse invariante

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

- masses invariantes

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

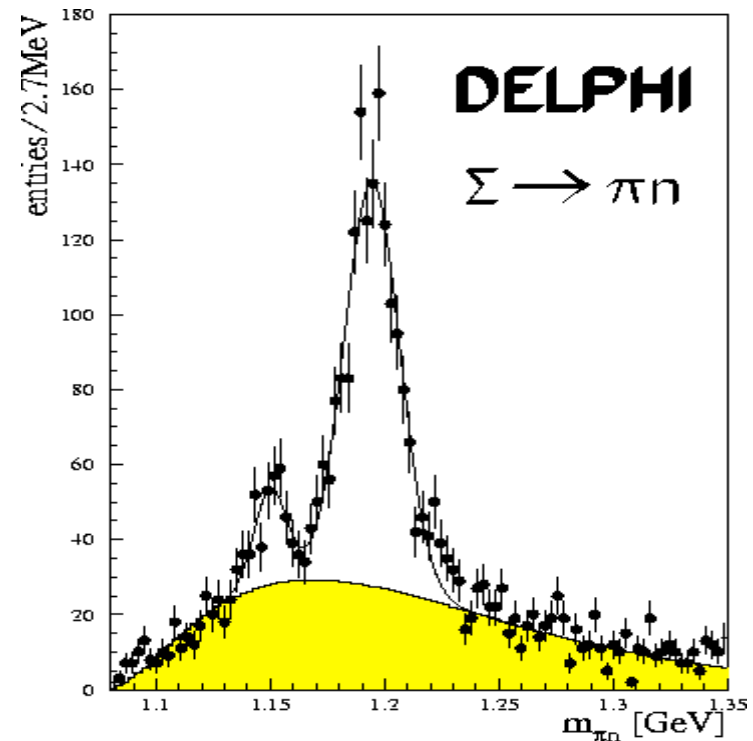
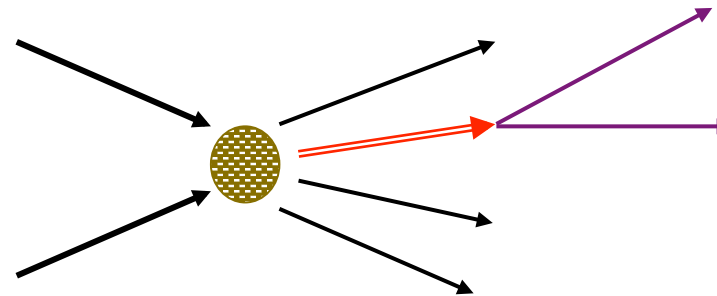
- avec  $m_{CD}^2 = [E_C + E_D]^2 - [P_C + P_D]^2$

- recherche d'un excès d'événements

- existence d'un **état intermédiaire**



- de masse  $m_X = m_{CD}$



Masse invariante  $\pi n \rightarrow$  pic  $\Sigma$  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

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



# 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

---

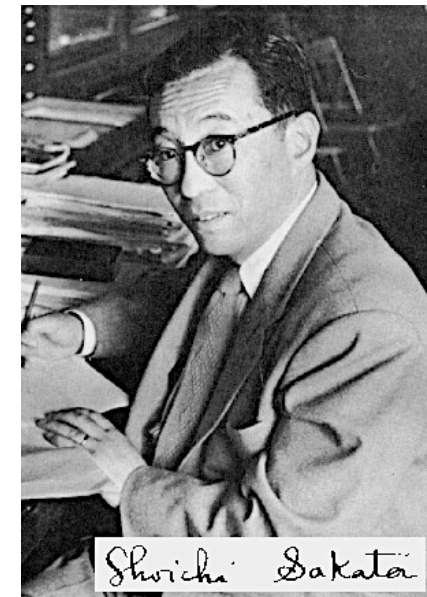
- Cohésion d'un noyau avec des protons de charge positive (☞ qui se repoussent)
- Yukawa (1935) : interaction entre protons et neutrons par échange de **mésons  $\pi$**  (pions) calquée sur l'interaction électromagnétique par échange de photons
- Observation des pions
  - puis de mésons étranges à longue durée de vie : mésons K (kaons)
  - et de particules lourdes analogues aux nucléons : hypérons  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$
  - 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  $\pi$  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  $\frac{1}{2}$   $\rightarrow$  baryon
  - par symétrie, 3 baryons fondamentaux
- Sakata choisit le proton  $p$ , le neutron  $n$  et l'hypéron  $\Lambda$ 
  - méson  $\rightarrow$  nombre baryonique nul  $\rightarrow$  paire baryon-antibaryon
  - méson étrange  $\rightarrow$  paire proton-antilambda (par exemple)



	$\bar{p}$	$\bar{n}$	$\bar{\Lambda}$
$p$	$\pi^0, \eta^0$	$\pi^+$	$K^+$
$n$	$\pi^-$	$\pi^0, \eta^0$	$K^0$
$\Lambda$	$K^-$	$\bar{K}^0$	$\eta^0$

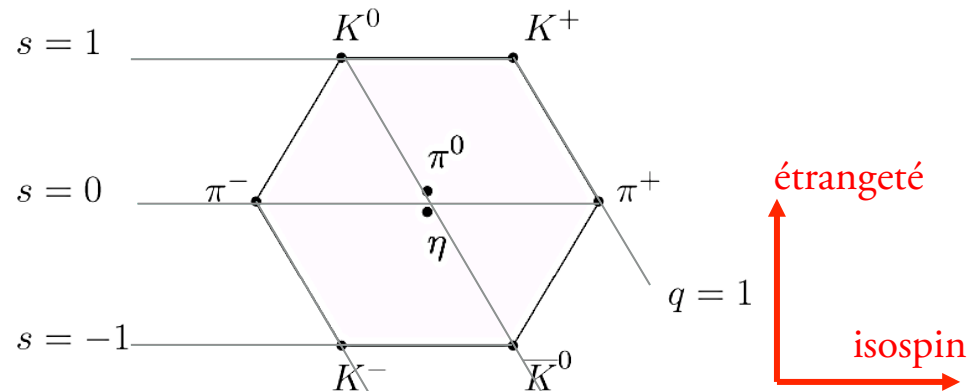
$\rightarrow$  **prédiction** du méson  $\eta^0$ ,  
observé en 1961 à 547 MeV

- masses ?  $\rightarrow$  énergies de liaison beaucoup plus grandes que les énergies de masse

# Regroupements

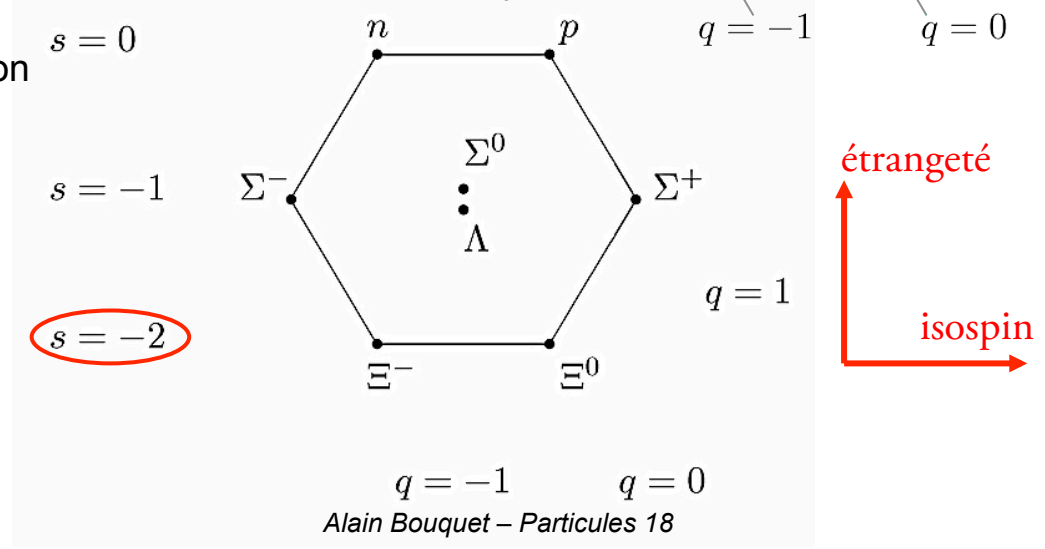
- Regroupement des particules en supermultiplets (même spin, même nombre baryonique, masses proches, mais charge électrique et étrangeté différentes)

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



- Diagramme *presque* identique pour les baryons

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





# Les baryons de spin 3/2

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

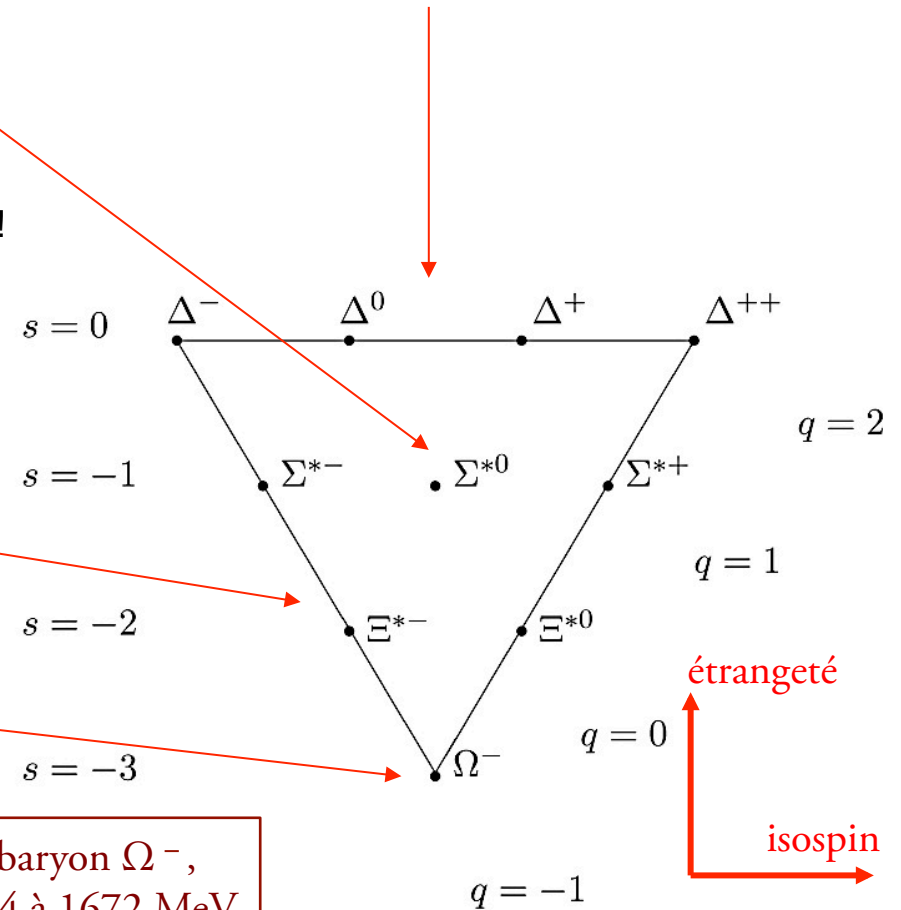
- pas un octet comme les baryons de spin  $1/2$  !
- un décuplet avec 3 *membres inconnus* ?
- un multiplet hexagonal de 27 membres ?

## Observations

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

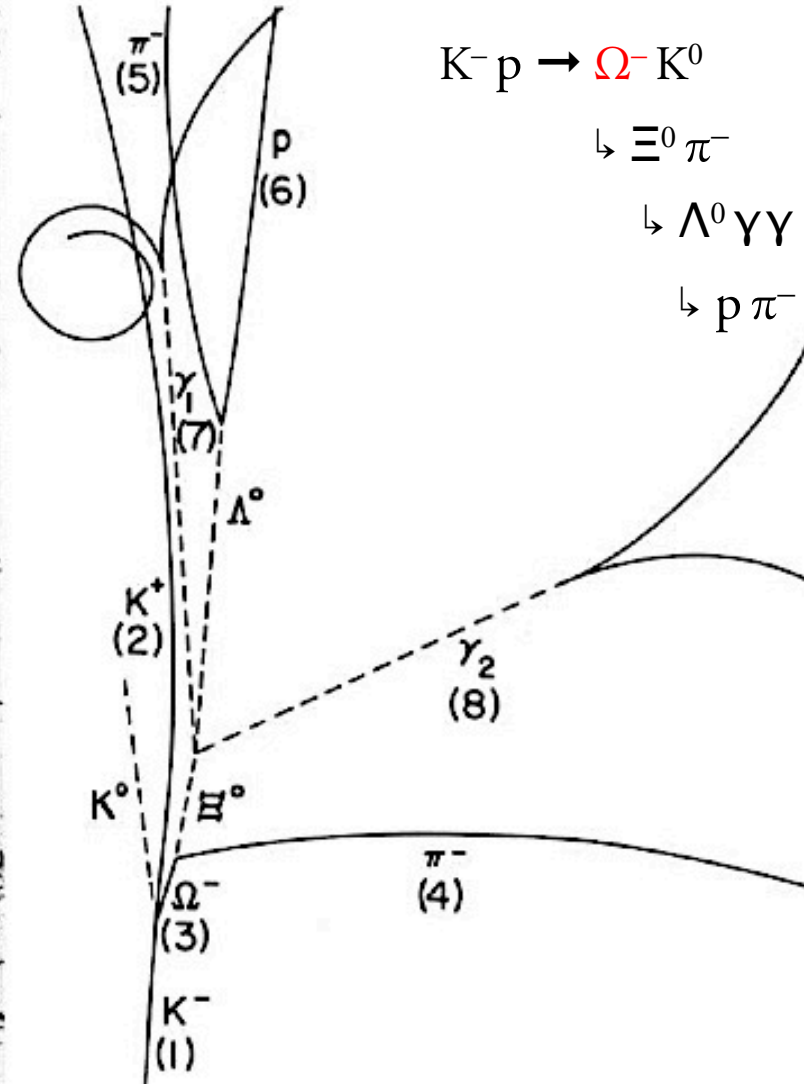
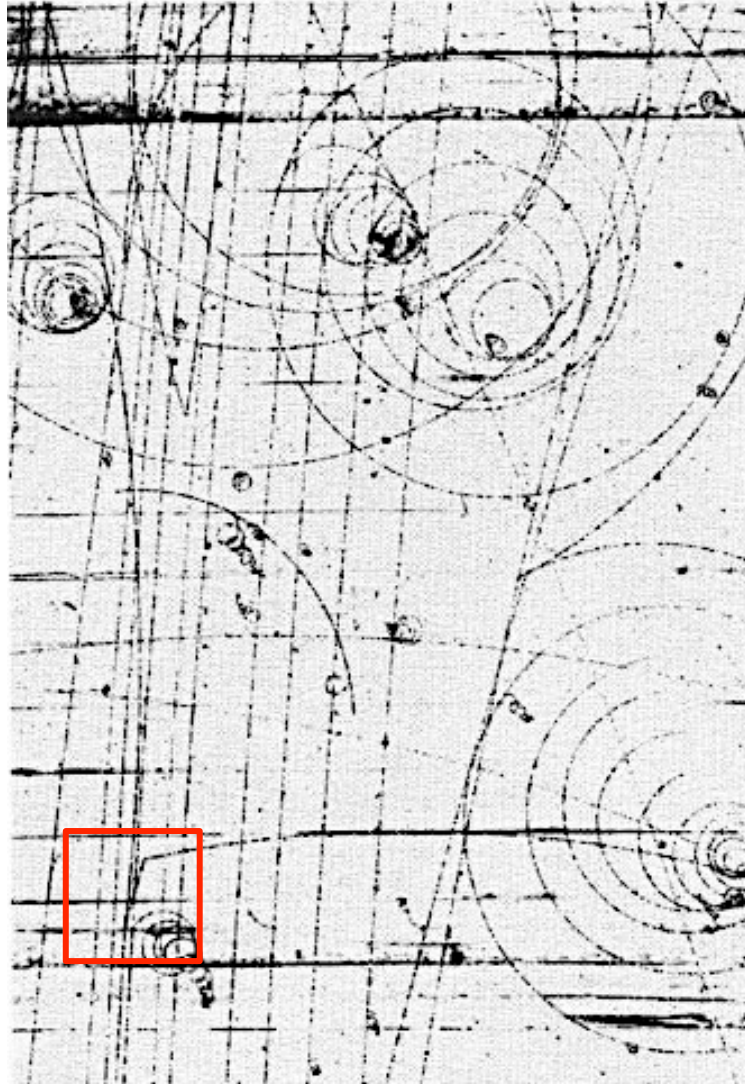
## $\rightarrow$ prédiction d'une particule

- charge  $-1$
- étrangeté  $-3$



**prédiction** du baryon  $\Omega^-$ ,  
observé en 1964 à 1672 MeV

# La découverte du baryon $\Omega^-$ en 1964 (Brookhaven)



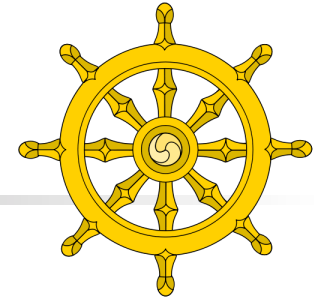
## De SU(2) à SU(3), de l'isospin à la *saveur*

- 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*

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

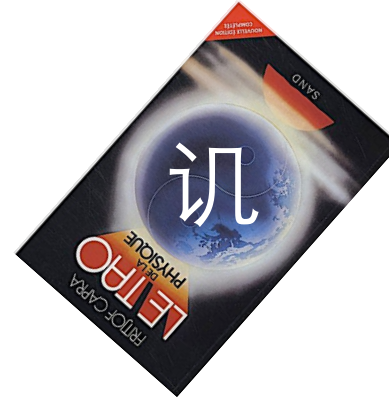
$$\lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} \quad \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix}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

# 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

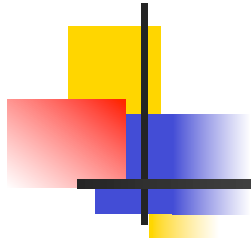
# Les quarks (1964) : Murray Gell-Man et George Zweig

- 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
  - $\pi^- = \bar{u}d$        $K^- = \bar{u}s$

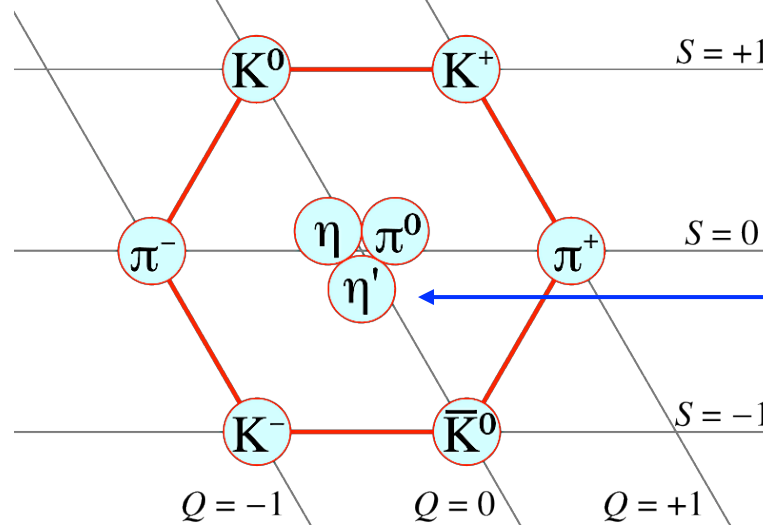


# QUARKS ET PARTONS

# Des quarks et des hadrons

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

$\Rightarrow$  mésons de spin zéro



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

(découvert en 1964)

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

## ■ Résonances

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

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

$\uparrow$  étrangerité

$\rightarrow$  isospin





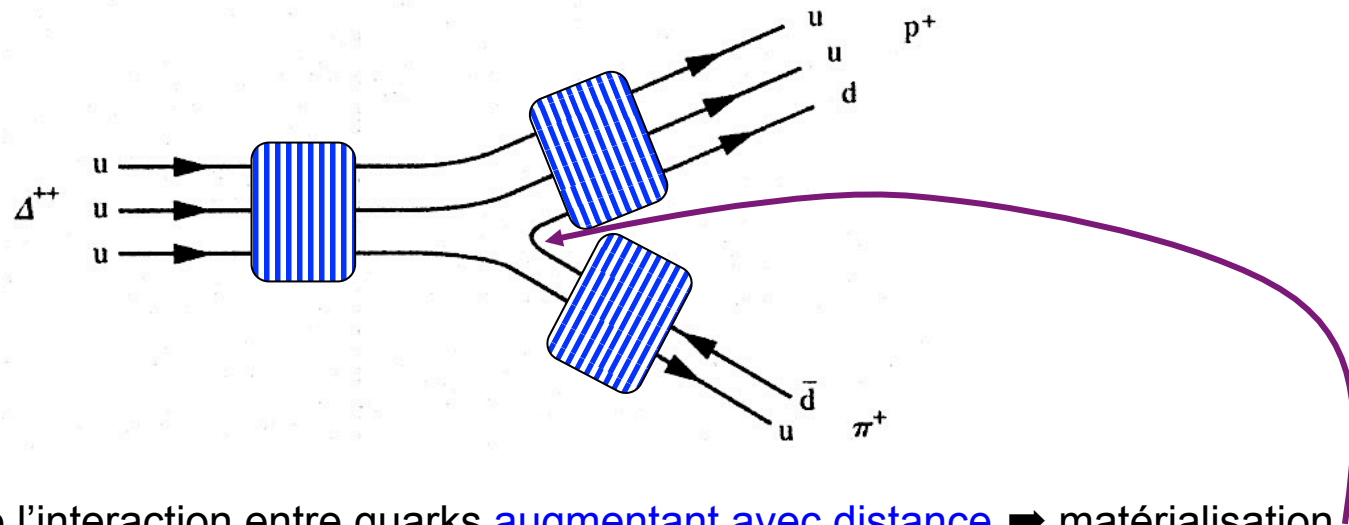
# À la recherche des quarks

- 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*)

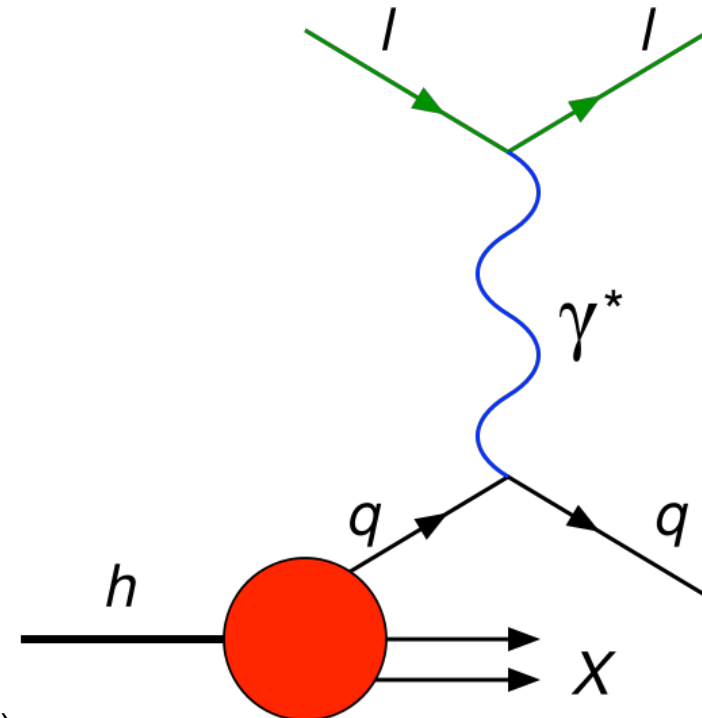


- Intensité de l'interaction entre quarks **augmentant avec distance** ➔ matérialisation d'une paire quark-antiquark quand la distance augmente ➔ **pas de quark libre**

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

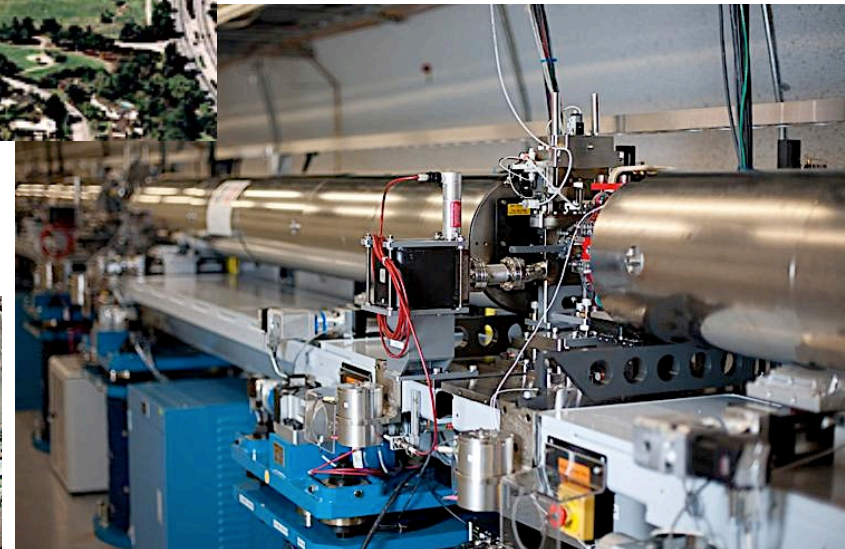
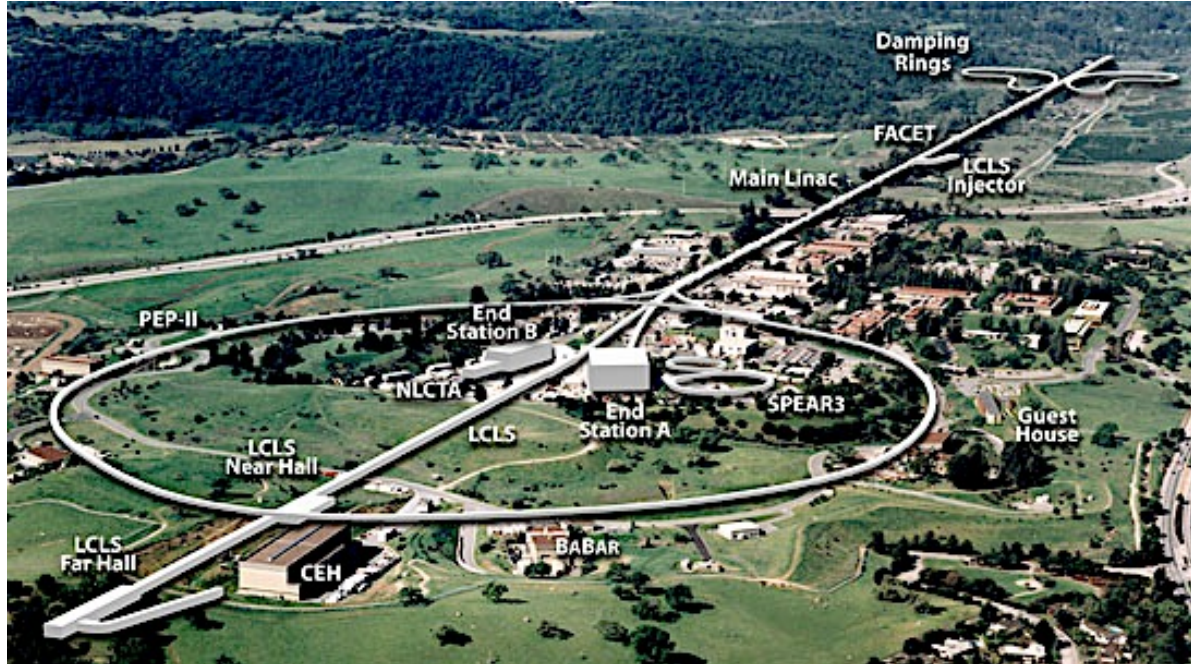
# Diffusion inélastique profonde

- 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)



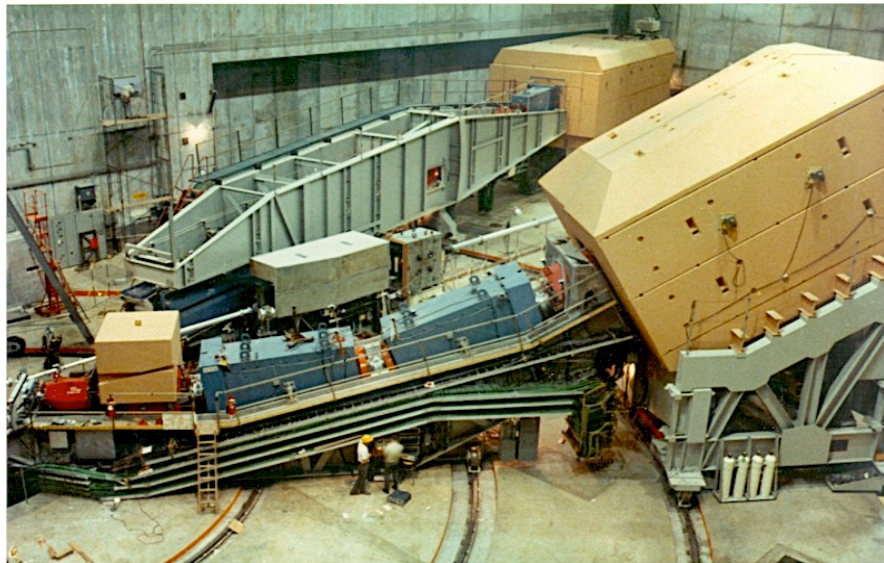


# Stanford Linear Accelerator Center

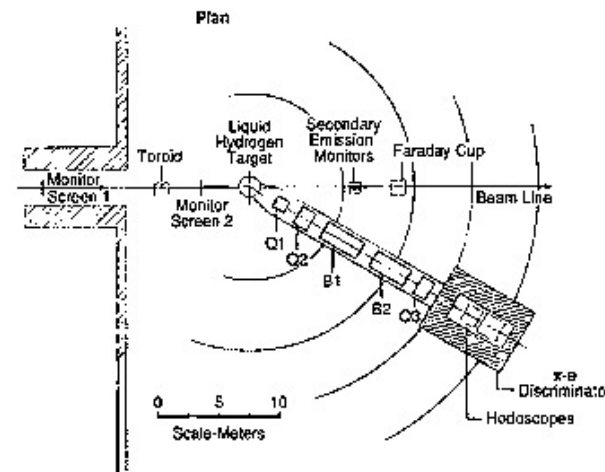
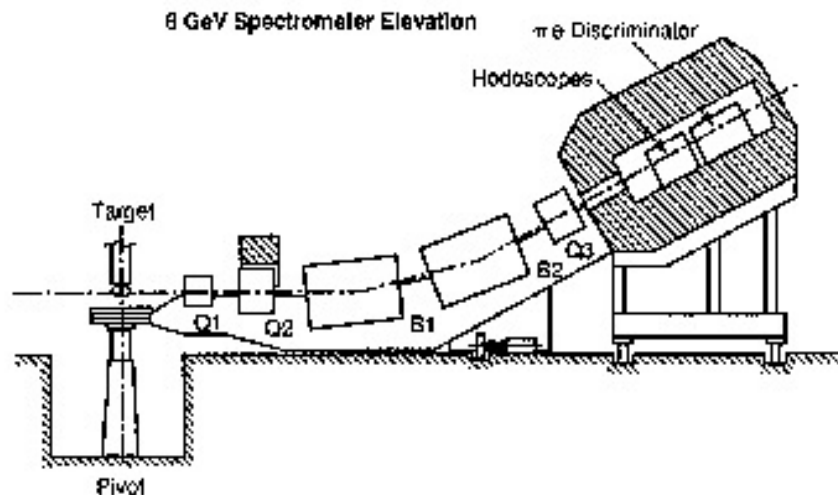




# Diffusion inélastique profonde

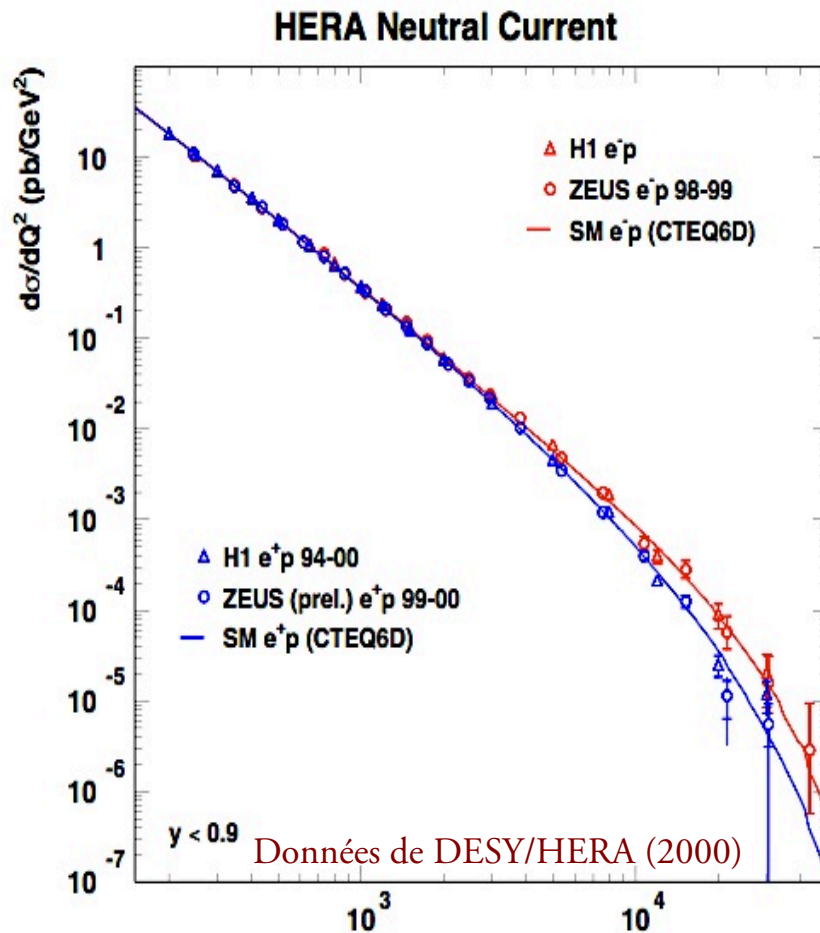


- Mesure de la section efficace de diffusion électron-proton en fonction de l'angle de diffusion
- ➔ relation angle ↔ énergie transférée  $Q$
- ➔ décroissance « rutherfordienne »
- ➔ centres diffuseurs « durs » ponctuels
- ➔ structure interne du proton



# Diffusion inélastique profonde

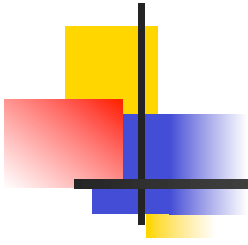
- ➔ diffusion « rutherfordienne »



énergie  $Q$  transférée entre électron et parton ➔  $Q^2$  (GeV<sup>2</sup>)

- 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 !

