



HADRONS, CHARME ET BEAUTÉ

Dr F. Buisseret
4 mai 2021
Séminaire



UMONS

Proposition

Physique des hadrons :
qu'est-ce à dire ?



- Orientation
 - *Approche historique*
 - *De "l'expérience" vers "la théorie"*
 - *Rendre certains choix "esthétiques" apparents*
 - *Actualités*

Lucrèce (94-56 av JC) & Einstein (1879-1955)

- « (...) s'il n'y a aucun terme à la petitesse, les moindres corps se composeront de parties innombrables, puisque la moitié même de chaque moitié aura la sienne, et se partagera à l'infini. (...) comme la saine raison se récrie et rejette une telle idée, tu es obligé de reconnaître qu'il y a certains corps qui ne peuvent plus avoir de parties, et qui sont de la plus petite nature possible; et que si ces corps existent, ils doivent être solides et éternels. »

De Rerum Natura, 1^{er} S. av. J.-C.

- $E = m c^2$
(1905, relativité restreinte)

Particules

Particules



Expérience



“Particle Zoo”

+



1°) Collision de 2
particules
Energie donnée

2°) Etat
intermédiaire

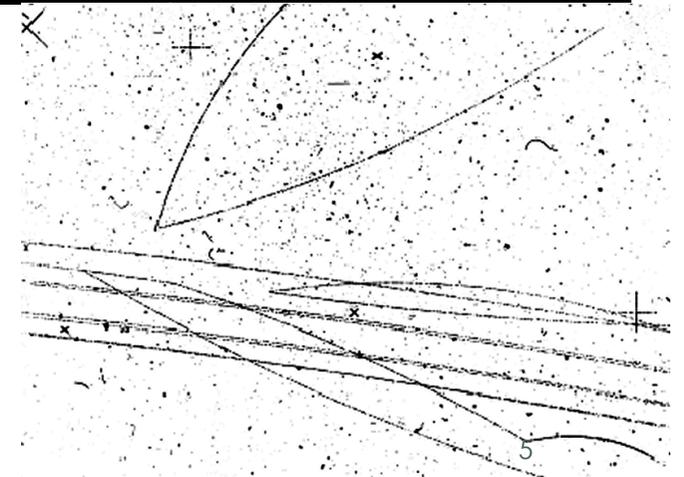
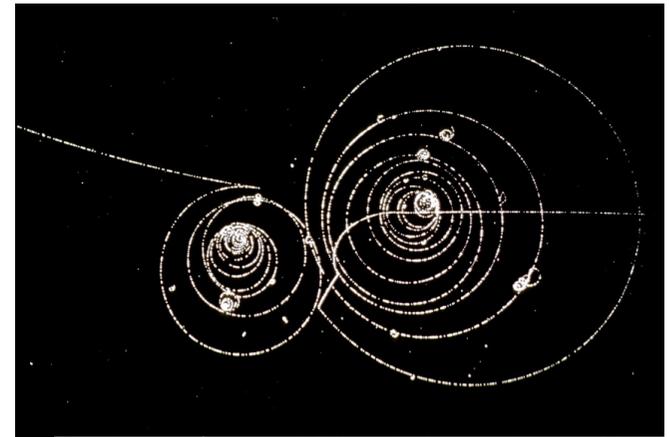
3°) Produits de
désintégration

- Accélérateurs de particules
 - Faisceaux de particules à haute énergie cinétique
 - Collisions
 - Particules produites (matérialisées) dans la collision



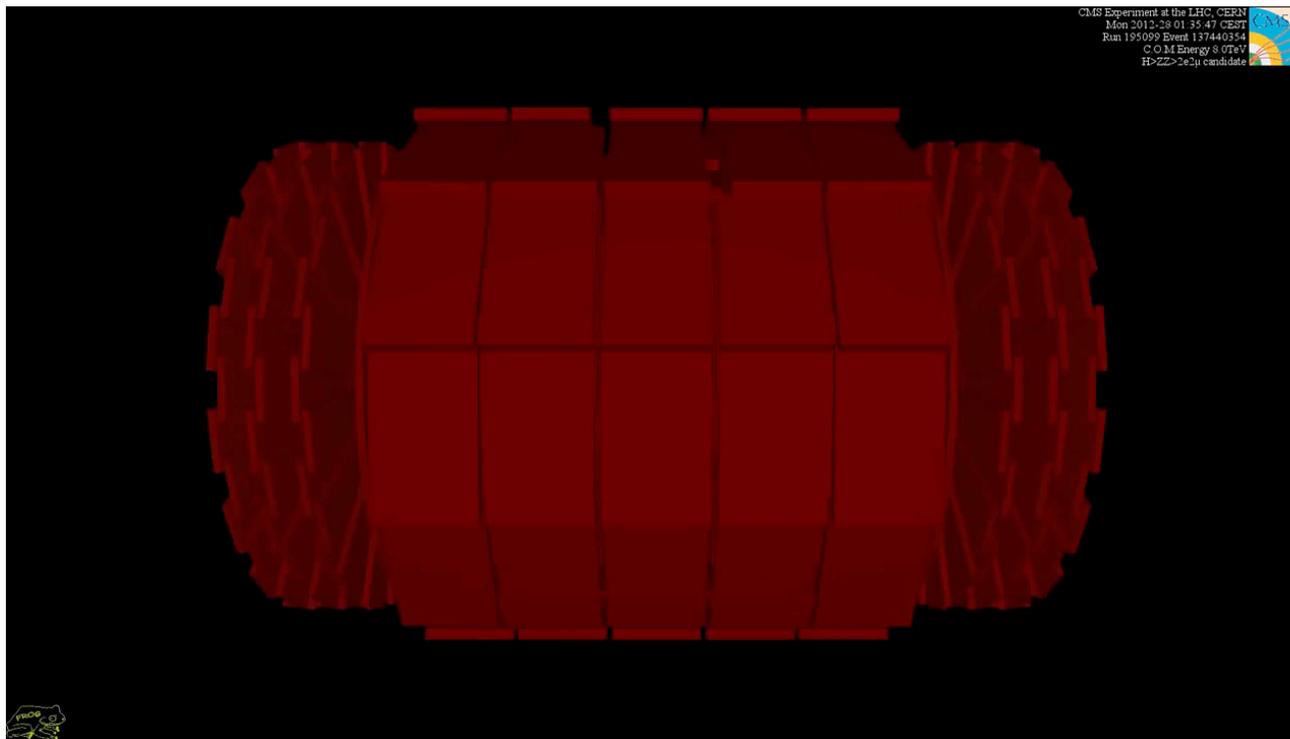
Analyse des données

- Début du 20e S jusque dans les années 1970 : chambres à bulles
 - *Liquide surchauffé*
- Particules produites dans un champ magnétique :
 - *Trajectoires courbes*
 - *Information sur leur charge, leur masse, leur vitesse,...*
 - *Distribution spatiale relativement à la direction de la collision*
- Dédudition des états intermédiaires possible

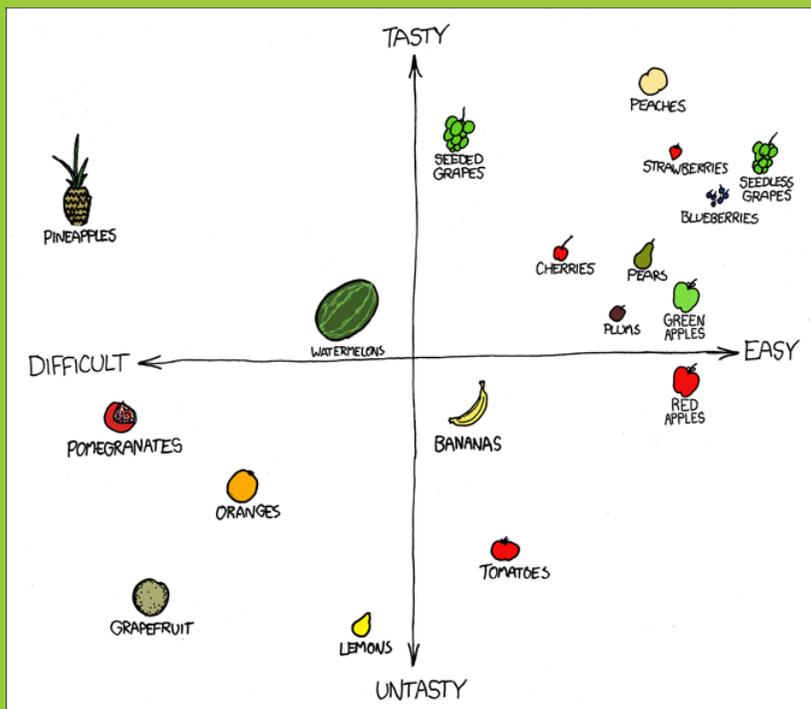




- De nos jours : électronique
 - Calorimètres
 - Photodétecteurs
- Accès aux traces de la particule, reconstruction de l'événement

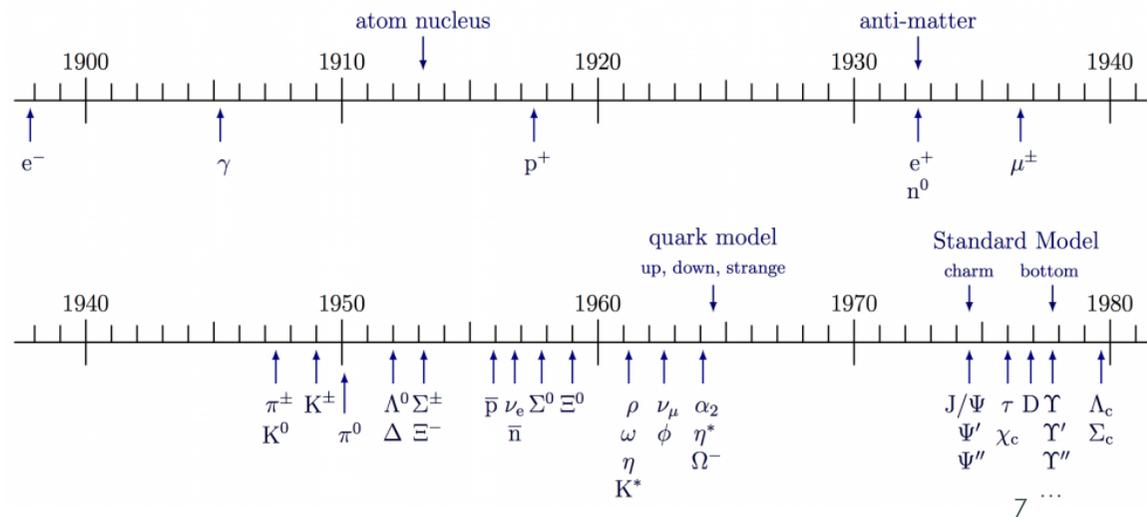


Taxonomie



Source : xkcd.com

- Années 1960 : des centaines de "hadrons" sont connus
 - Interaction forte (nucléaire)
 - Fermions de masses similaires aux protons et neutrons : baryons
 - Bosons similaires aux pions : mesons



La botanique des hadrons

- Chaque hadron se désintègre différemment (pdg.lbl.gov).

Exemple du Kaon

▼ Hadronic modes

Γ_9	$\pi^+\pi^0$	$(20.67 \pm 0.08)\%$	S=1.2	205
Γ_{10}	$\pi^+\pi^0\pi^0$	$(1.760 \pm 0.023)\%$	S=1.1	133
Γ_{11}	$\pi^+\pi^+\pi^-$	$(5.583 \pm 0.024)\%$	S=1.0	125

▶ Leptonic and semileptonic modes with photons

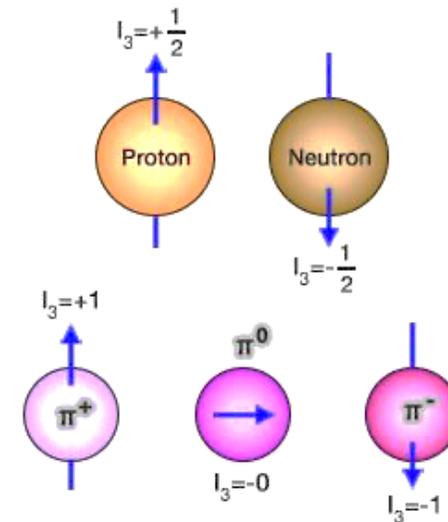
▼ Hadronic modes with photons or $\ell\bar{\ell}$ pairs

Γ_{21}	$\pi^+\pi^0\gamma$ (INT)	$(-4.2 \pm 0.9) \times 10^{-6}$		
Γ_{22}	$\pi^+\pi^0\gamma$ (DE)	[5][1] $(6.0 \pm 0.4) \times 10^{-6}$		205
Γ_{23}	$\pi^+\pi^0e^+e^-$	$(4.24 \pm 0.14) \times 10^{-6}$		205
Γ_{24}	$\pi^+\pi^0\pi^0\gamma$	[2][1] $(7.6_{-3.0}^{+6.0}) \times 10^{-6}$		133
Γ_{25}	$\pi^+\pi^+\pi^-\gamma$	[2][1] $(1.04 \pm 0.31) \times 10^{-4}$		125
Γ_{26}	$\pi^+\gamma\gamma$	[1] $(1.01 \pm 0.06) \times 10^{-6}$		227
Γ_{27}	$\pi^+3\gamma$	[1] $< 1.0 \times 10^{-4}$	CL=90%	227
Γ_{28}	$\pi^+e^+e^-\gamma$	$(1.19 \pm 0.13) \times 10^{-8}$		227





- Situation confuse : des centaines de particules et de désintégrations possibles.
 - Principe directeur : grandeurs / charges conservées
 - *Energie totale*
 - *Charge électrique*
 - Isospin (I) : certains hadrons se comportent de manière très similaire
 - *Masse + désintégrations*
 - *“Projections” d’un même état*
- Heisenberg (1901-1976), 1932*





■ Hypercharge / étrangeté (s)

Certains hadrons sont abondamment créés dans les collisions (Kaons) mais

- *Ne se désintègrent pas rapidement*
- *Sont créés par paires*
- *Hypothèse : il existe une charge conservée appelée étrangeté*

$\phi(1020)$ DECAY MODES

	Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1	$K^+ K^-$	(49.2 \pm 0.6) %	S=1.2
Γ_2	$K_L^0 K_S^0$	(34.0 \pm 0.5) %	S=1.1



Symétries

Mon travail a toujours essayé d'unir la vérité à la beauté, mais quand je devais choisir l'une ou l'autre, je choisisais habituellement la beauté.

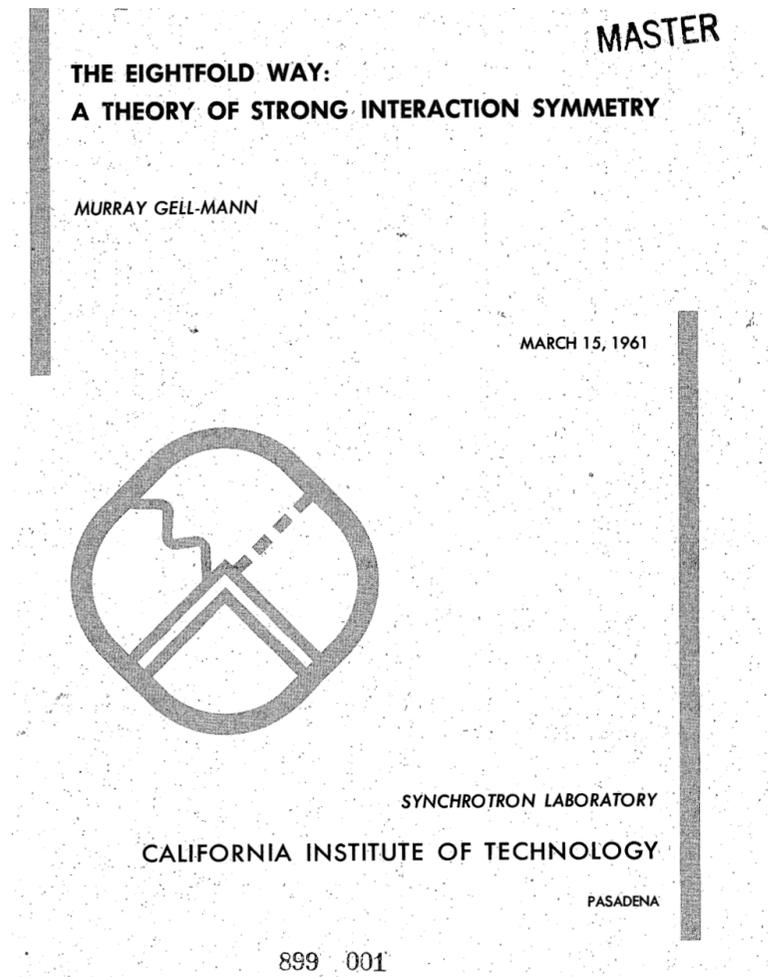
H. Weyl (1885-1955)

Why should the laws of nature care about what I find beautiful ?

S. Hossenfelder (1976-)

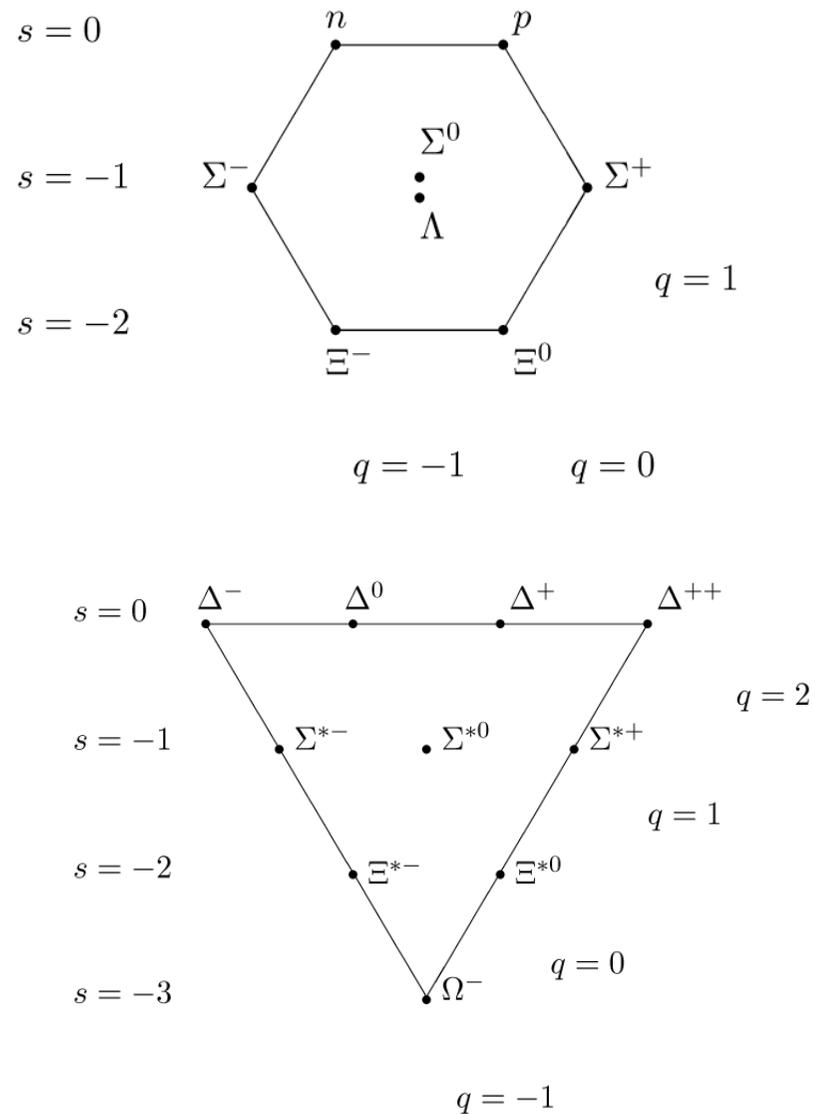
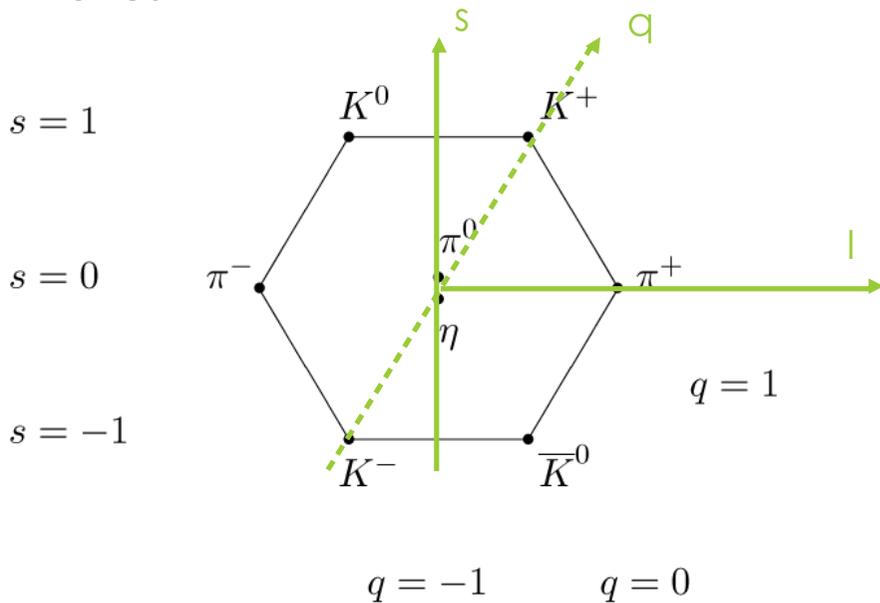
■ Voie octuple

M. Gell-Mann (1929-2019)



Dessins inspirés

- Représenter les hadrons en fonction de leur isospin et étrangeté met en évidence des **multiplets** de hadrons de masses similaires



Les quarks (les as)

- Gell-Mann et Zweig (1964) émettent une hypothèse radicale : les hadrons ne sont pas élémentaires mais formés de quarks et d'antiquarks.
 - Fermions (spin $1/2$)
 - 3 "saveurs" nécessaires à l'époque

Saveur	Charge	Etrangeté	Isospin
Up (u)	$(+1/3) e$	0	$1/2$
Down (d)	$(-1/3) e$	0	$1/2$
Strange (s)	$(-1/3) e$	-1	0

+ antisaveurs



AN SU_3 MODEL FOR STRONG INTERACTION SYMMETRY AND ITS BREAKING

G. Zweig *)
CERN - Geneva

A B S T R A C T

Both mesons and baryons are constructed from a set of three fundamental particles called aces. The aces

Charme, bottom, top

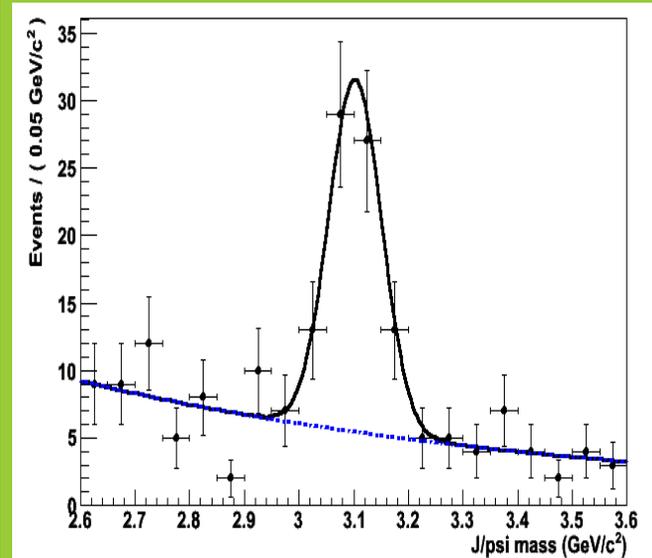
- À ce jour, 6 saveurs de quarks sont connues

masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u	c	t
	up	charm	top
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d	s	b
	down	strange	bottom

QUARKS



Charme : découverte du méson J/ψ (1974)



Bottom / Beauty : 1977
Top : 1994

Nouvelles questions

- Comment quarks et antiquarks interagissent-ils ? Lien avec la force nucléaire ?
- Comment un baryon tel que Ω^- peut-il exister ?

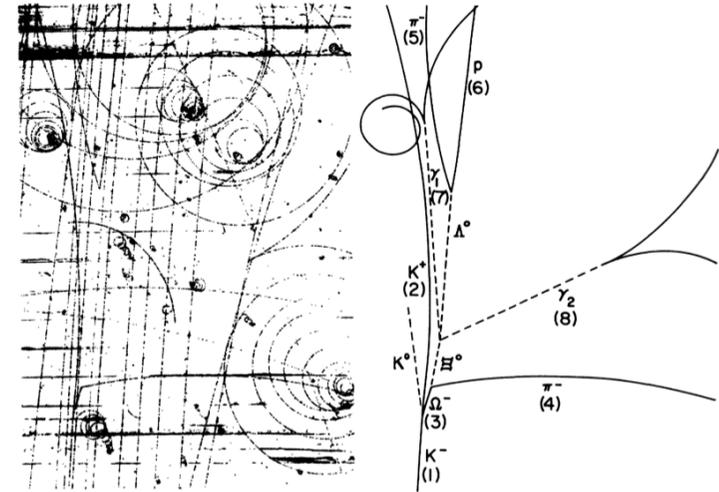
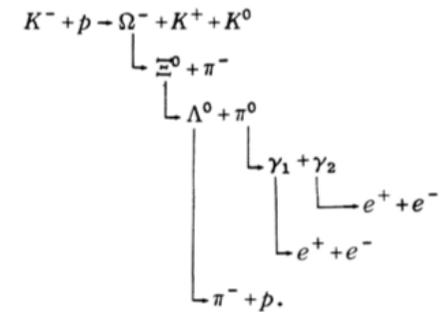


Table I. Our interpretation of this event is



VOLUME 12, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 FEBRUARY 1964

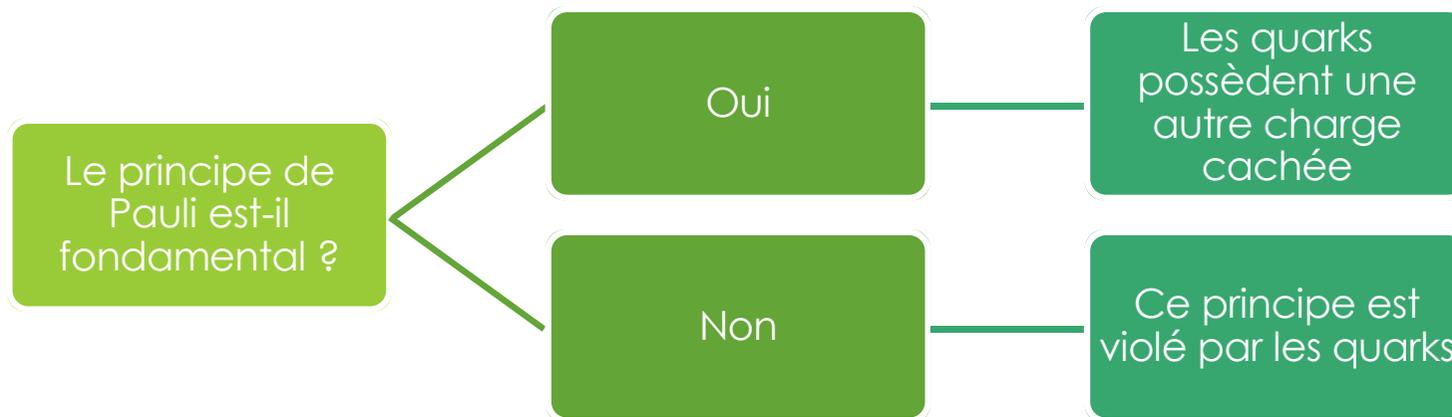
OBSERVATION OF A HYPERON WITH STRANGENESS MINUS THREE*

V. E. Barnes, P. L. Connolly, D. J. Crènnell, B. B. Culwick, W. C. Delaney, W. B. Fowler, P. E. Hagerty,† E. L. Hart, N. Horwitz,† P. V. C. Hough, J. E. Jensen, J. K. Kopp, K. W. Lai, J. Leitner,† J. L. Lloyd, G. W. London,‡ T. W. Morris, Y. Oren, R. B. Palmer, A. G. Prodell, D. Radojičić, D. C. Rahm, C. R. Richardson, N. P. Samios, J. R. Sanford, R. P. Shutt, J. R. Smith, D. L. Stonehill, R. C. Strand, A. M. Thorndike, M. S. Webster, W. J. Willis, and S. S. Yamamoto
 Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
 (Received 11 February 1964)



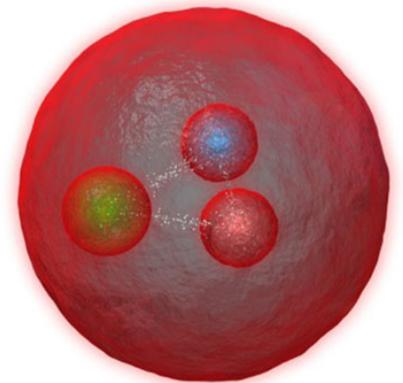


- Le Ω^- est formé de 3 quarks s dans le même état de spin
 - Une telle configuration est interdite par le principe de Pauli (1925)
 - Idem Δ^{++} (quarks u)
- Principe de Pauli (1900-1958) : deux fermions ne peuvent exister dans le même état au sein d'un même système quantique.
 - Exemple : les électrons et leurs orbitales



La couleur

- Greenberg (1932-) 1964 : les quarks possèdent une charge pouvant prendre 3 indices.
 - *Le principe de Pauli est sauvé*
 - *Gell-Mann parlera de 3 charges de couleur (bleu-vert-rouge)*
 - *Les hadrons sont "blancs" : neutre pour cette charge*
 - *Pour les antiquarks : anticouleur*
 - *Théorie des groupes : SU(3)-couleur*
 - **Blanc = singulet de couleur**



$$[T_a, T_b] = i \sum_{c=1}^8 f_{abc} T_c,$$
$$\{T_a, T_b\} = \frac{1}{3} \delta_{ab} I_3 + \sum_{c=1}^8 d_{abc} T_c,$$

- Les particules colorées interagissent !
 - *Structure mathématique : théories de jauge de Yang-Mills (années 1950)*
 - **Chromodynamique quantique (QCD, 1973) – 8 Gluons**



Advantages of the Color Octet Gluon Picture*

HARALD FRITZSCH[†], MURRAY GELL-MANN and HEINRICH LEUTWYLER^{††}

California Institute of Technology, Pasadena, California 91109

ABSTRACT

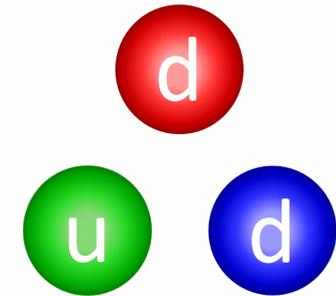
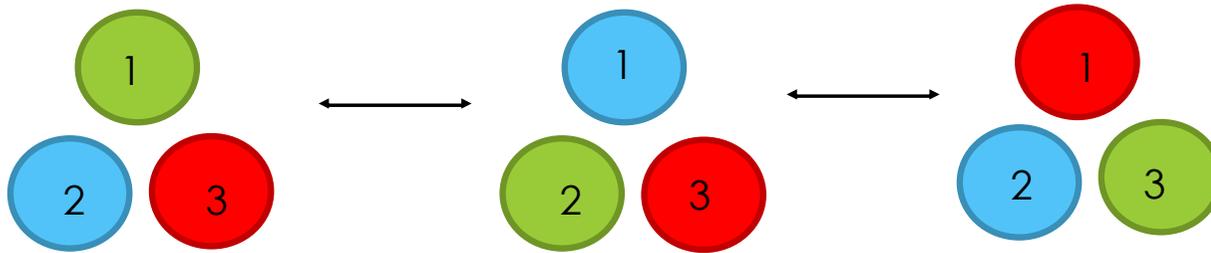
It is pointed out that there are several advantages in abstracting properties of hadrons and their currents from a Yang-Mills gauge model based on colored quarks and color octet gluons.





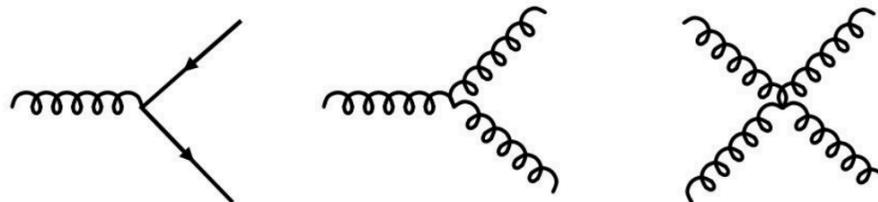
■ Invariance de jauge ?

- Une transformation modifiant localement les couleurs est une symétrie de la nature



- Une interaction via échange de gluons peut respecter ce type de symétrie : contrainte théorique forte

$$\mathcal{L}_{QCD} = \bar{\psi}(i \not{D}_a T_a - m)\psi - \frac{1}{4} F_a^{\mu\nu} F_{\mu\nu,a}$$



Hadrons exotiques

Exemple de questionnement contemporain



- Les hadrons connus sont blancs
 - *Singulet de $SU(3)$*

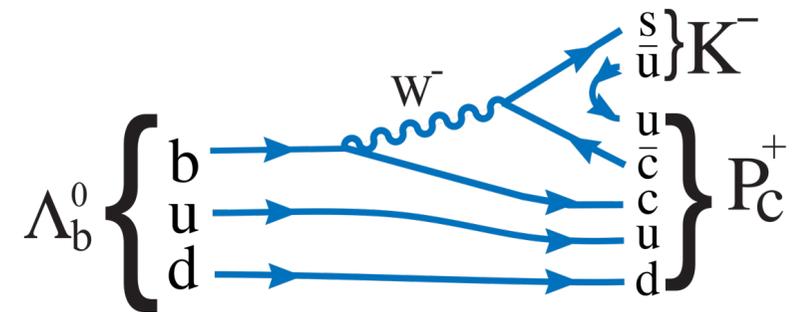
- Tous les objets blancs concevables existent-ils ?
 - *Pentaquark (4 quarks, 1 antiquark)*
 - *Tetraquark (2 quarks, 2 antiquarks)*
 - *Boule de glu (gluons uniquement)*
 - *Mesons hybrides (quark-antiquark-gluon)*
 - ...

- Comment les détecter ?

Pentaquark

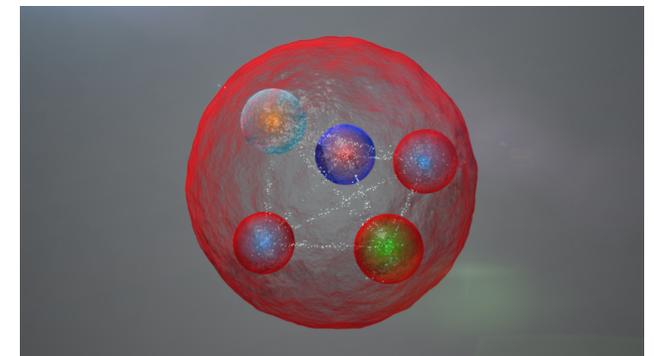
- Première découverte en 2015 au LHC
arXiv:1507.03414

Observation of $J/\psi p$ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays

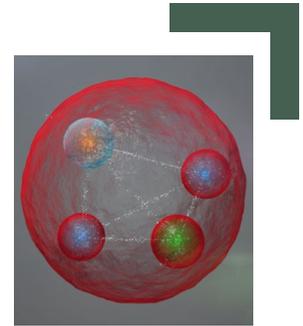


- Nouvelles détections en 2019

- Quarks charmés : P_c



Tetraquarks



- De nombreux états dénommés X,Y,Z ont été observés
 - Similaires à des mesons
 - Excédentaires par rapport à la classification en quark-antiquark

- Sont-ce des tetraquarks ?

- Consensus basé sur la QCD difficile quant aux propriétés de ces états
- Pour voir un tetraquark, il faut savoir ce qu'est un tetraquark...



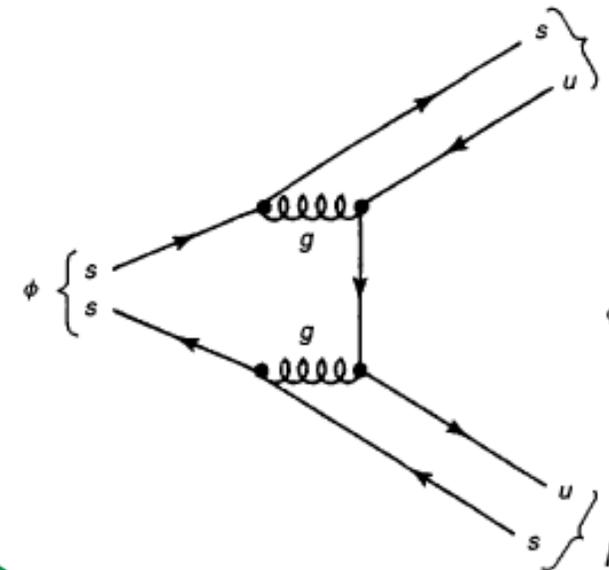
was X(3900)	
• X(3915) was $\chi_{c0}(3915)$	$0^+(0$ or $2^{++})$
• $\chi_{c2}(3930)$ was $\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
X(3940)	$?^?(?^{??})$
• X(4020)	$1^+(?^{?-})$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
X(4050) $^\pm$	$1^-(?^{?+})$
X(4055) $^\pm$	$1^+(?^{?-})$
X(4100) $^\pm$	$1^-(?^{??})$
• $\chi_{c1}(4140)$ was X(4140)	$0^+(1^{++})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
X(4160)	$?^?(?^{??})$
$Z_c(4200)$ was X(4200) $^\pm$	$1^+(1^{+-})$

Boules de glu

- Contrairement aux photons qui sont neutres, les gluons sont colorés : ils peuvent interagir et formé des états liés blancs également.
- Difficiles à produire directement : processus rares
 - Règle OZI (1963)
- Comme pour les tetraquarks :
 - Des candidats existent (f_0)
 - Le débat continue



GLUEX

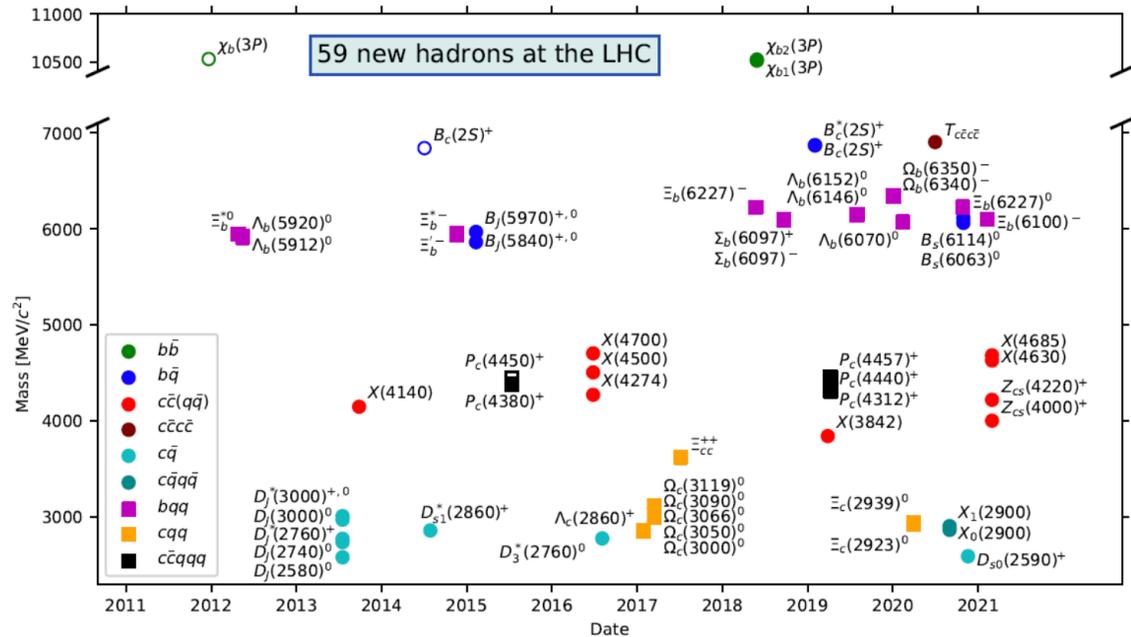


Finale

Où l'on réalise que tout n'est pas perdu en 2021

- Tetraquarks et pentaquarks confirmés
- Etat à 3 gluons potentiellement observé

■ LHCb (3 mars 2021)



■ TOTEM et $D\phi$

arXiv.org > hep-ex > arXiv:2012.03981

Search...

Help | Adv...

High Energy Physics – Experiment

[Submitted on 7 Dec 2020]

Comparison of pp and $p\bar{p}$ differential elastic cross sections and observation of the exchange of a colorless C -odd gluonic compound