

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2025-2026

Première partie - L. Favart

VII - Quarks et leptons : constituants de la matière

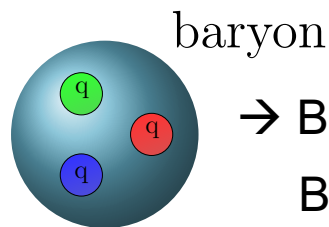
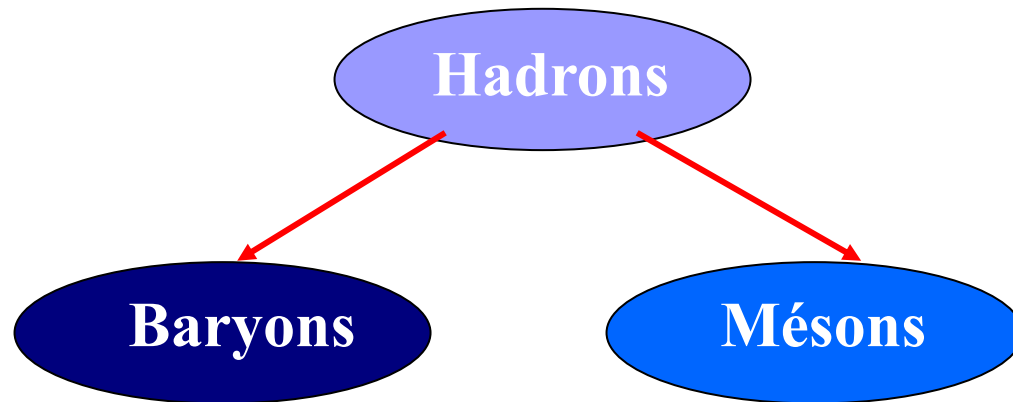
Contenu Chapitre VII

VII. Quarks et leptons : constituants de la matière

1. Structure des hadrons: modèle statique des quarks
2. Le charme
3. Une troisième famille de leptons: tau
4. La quark de beauté
5. Le quark top
6. Bilan début des années 2000

Le modèle (statique) des quarks en question

Dans le modèle dit statique des quarks les hadrons s'interprètent comme des états liés de quarks et/ou d'antiquarks, suivant la règle :

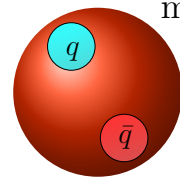


baryon

$$\rightarrow B(q) = 1/3,$$

$$B(\bar{q}) = -1/3$$

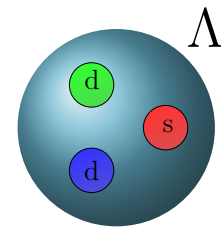
Antibaryons :
3 antiquarks



meson

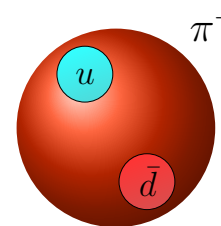
Antimésons :
cf. mésons

Exemples



$$Q_{\Lambda} = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$$

$$S_{\Lambda} = -1 + 0 + 0 = -1$$



$$Q_{\pi^+} = 2/3 - (-1/3) = 1$$

$$S_{\pi^+} = 0 - 0 = 0$$

On comprend maintenant pourquoi

$$\overline{\pi^+} = \pi^- \quad \overline{K^+} = K^- \quad \overline{\pi^0} = \pi^0$$

Le modèle (statique) des quarks en question

Deux problèmes

jettent le scepticisme sur le modèle statique des quarks à la fin des années 60 :

- **Jamais un quark n'a été observé à l'état libre !**
- Collisions à haute énergie (accélérateurs, rayonnement cosmique)
Recherche infructueuse de particules de charge $1/3$ ou $2/3$
- Dans la matière
Nombreuses expériences (météorites, sédiments, roches lunaires, ...)

Les quarks sont confinés à l'intérieur des hadrons

Pourquoi ? Beaucoup pensent à cette époque que les quarks n'existent pas vraiment à l'intérieur des hadrons !

Le modèle (statique) des quarks en question

Deux problèmes

■ Le principe d'exclusion de Pauli semble violé !

Il impose que 2 fermions identiques **ne soient pas** dans le même état.

Or, par exemple,

$\Delta^{++} \equiv u u u$ (spin 3/2) $\rightarrow$ 3 u dans le même état

$\rightarrow$ introduction ad hoc d'un nouveau degré de liberté : **LA COULEUR**

- q : 3 couleurs **Rouge** **Bleu** **Vert**
- q : 3 anticouleurs **R** **B** **V**

Le principe d'exclusion de Pauli est sauvé, ainsi que le modèle des quarks !

Ce nouveau degré de liberté n'a rien à voir avec la couleur que nous connaissons; c'est seulement un moyen de distinguer les 3 états possibles pour chaque quark.

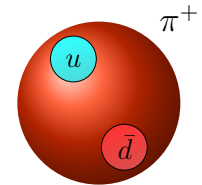
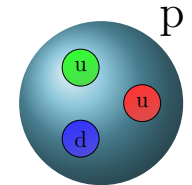
Le modèle (statique) des quarks en question

Cela semble un peu ad hoc. Toutefois cette hypothèse permet d'aller beaucoup plus loin, en postulant que :

Les hadrons sont sans couleur, on dit "blancs"

soit mélange égal de **R**, **B**, **V** (baryons)

soit combinaison **$R\bar{R}$** , **$B\bar{B}$** , **$V\bar{V}$** (mésons)



Depuis : - nombreuses évidences expérimentales

- base de la ChromoDynamique Quantique (QCD) = théorie de l'interaction forte par échange de couleur entre les quarks.

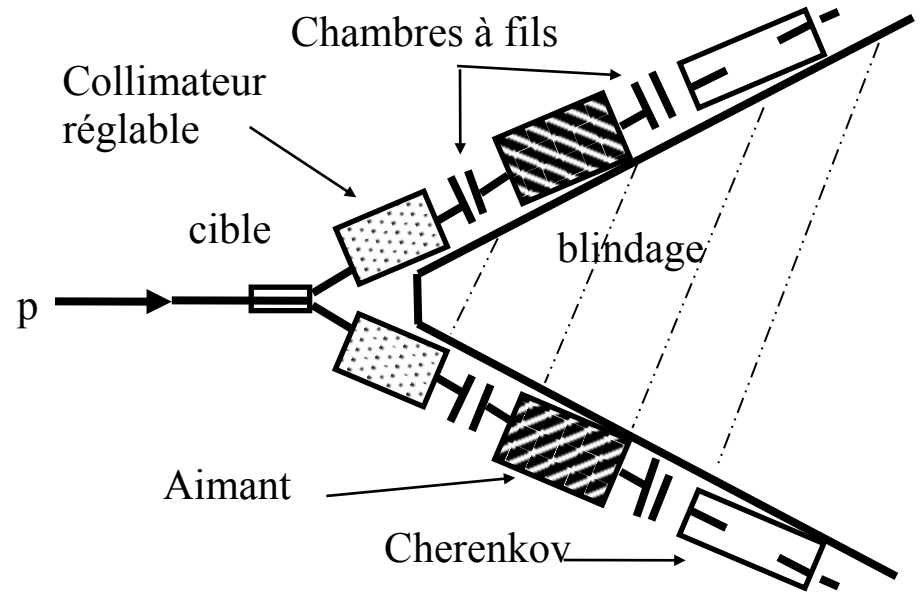
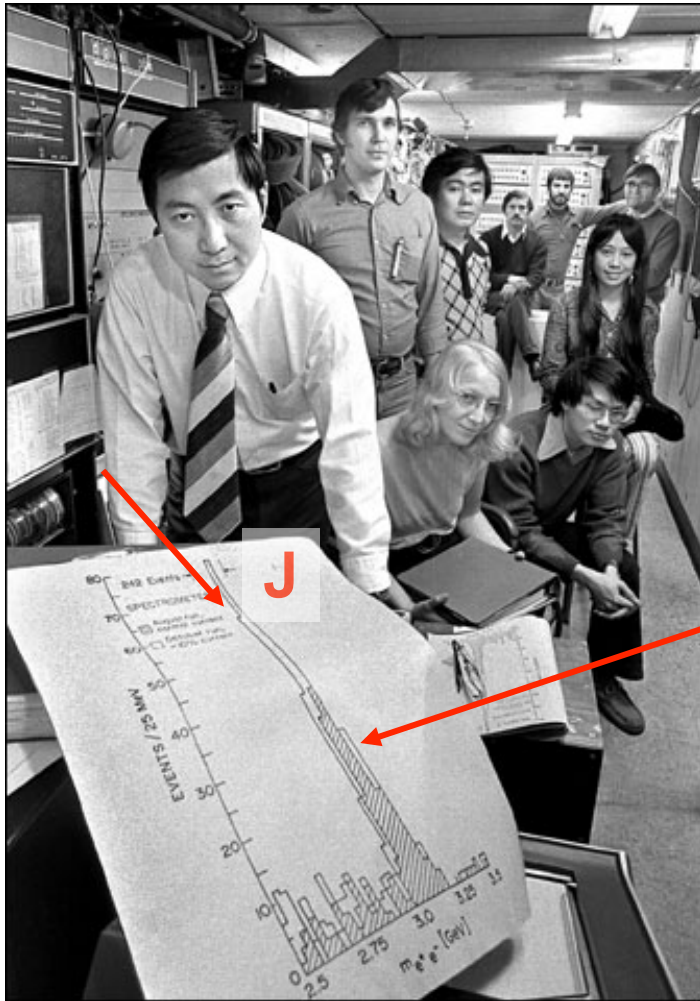
- on sait maintenant qu'il existe d'autres états :

tetraquark $(q\bar{q}q\bar{q})$

pentaquark $(q\bar{q}qqq)$

2. Un 4ème quark : le quark c: J (1974)

Brookhaven



Observation d'un pic dans la distribution de masse invariante du système e^+e^- , centré à $3,1 \text{ GeV}/c^2$.

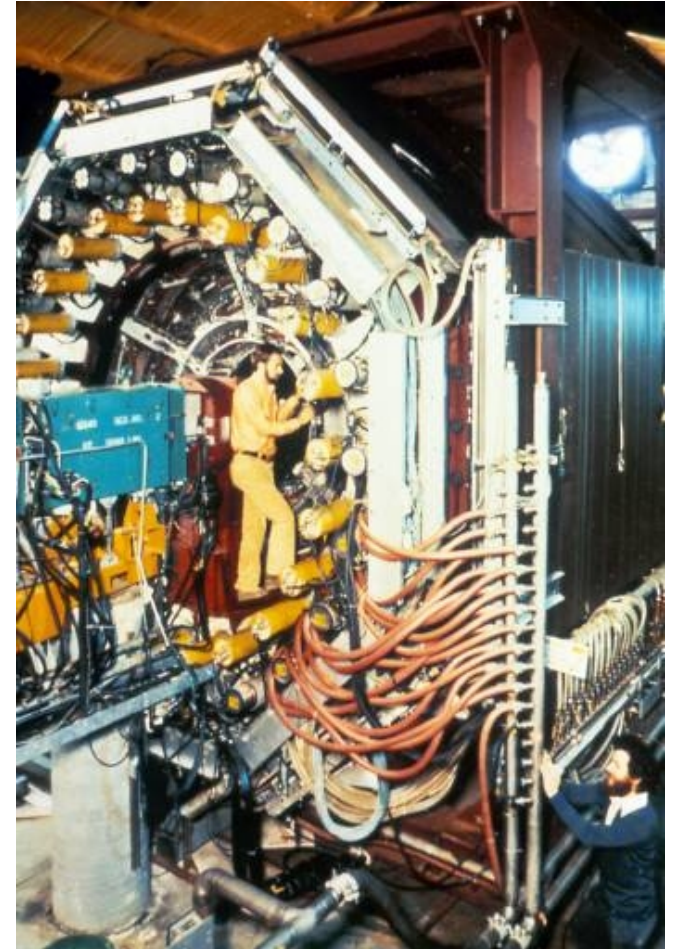
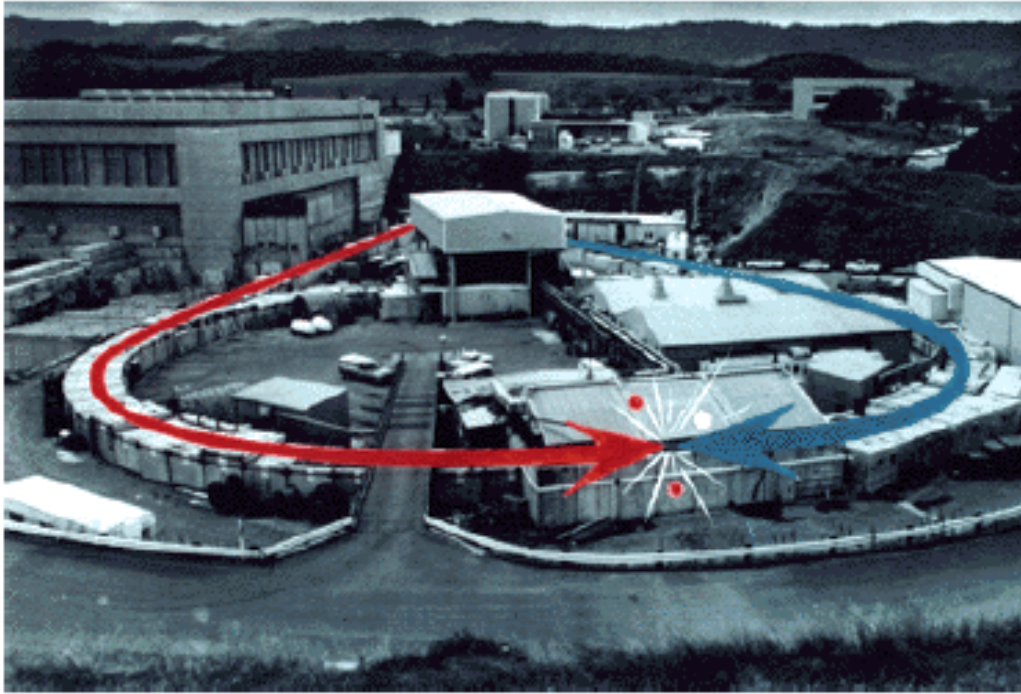
La faible largeur du pic, compatible avec la résolution de l'appareil, signale un temps de vie beaucoup plus long que pour les habituelles résonances (IF).

Un 4ème quark : le quark c: ψ

Expérience auprès du collisionneur e^+e^- de SLAC (était circulaire à l'époque) : mesure de la section efficace du processus

$$e^+ + e^- \rightarrow X$$

Accélérateur – collisionneur e^+e^- SPEAR circ 240m

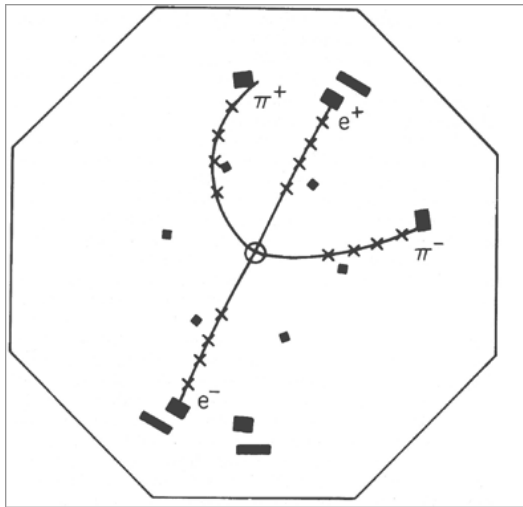


Détecteur "MARK I" photo

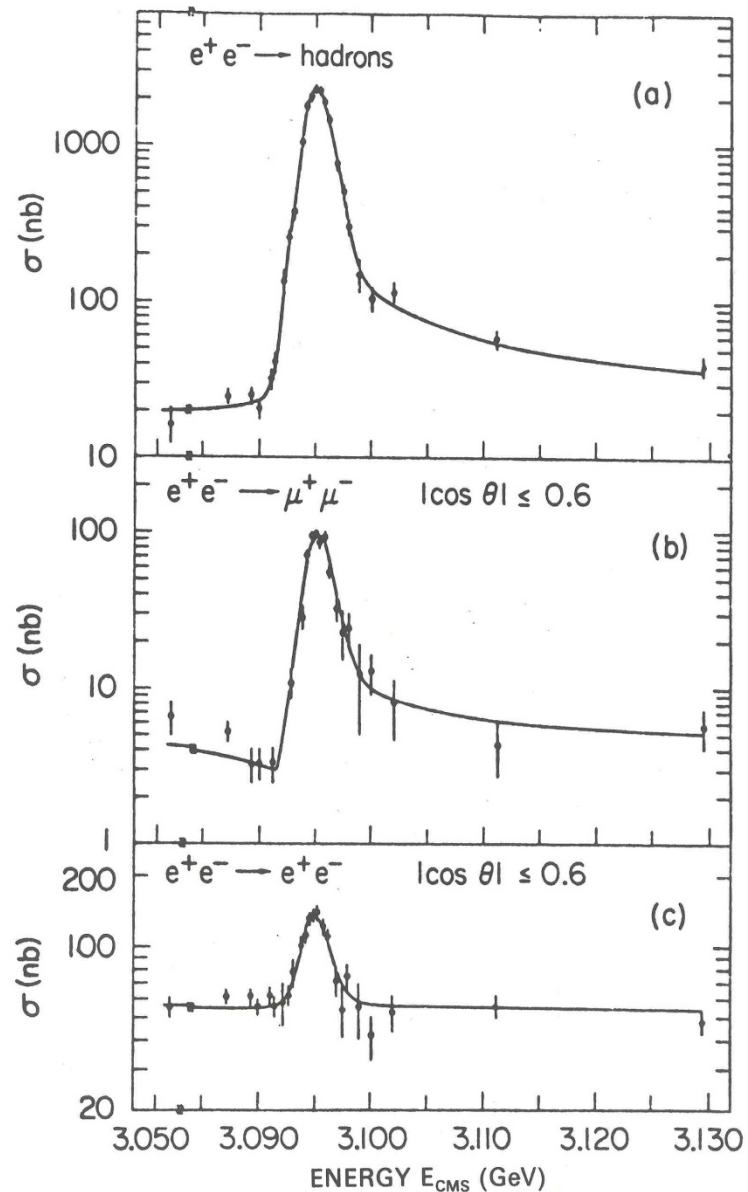


Un 4ème quark : le quark c : ψ

masse du ψ : $(3,105 \pm 0,003)$ GeV



$$\begin{aligned}\Psi' &\rightarrow J/\psi + \pi^+ + \pi^- \\ &\hookrightarrow e^+ + e^-\end{aligned}$$

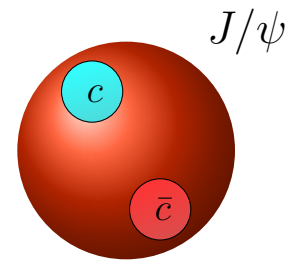


Un 4ème quark : le quark c : J/ψ

Brookhaven : $p + Be \rightarrow J + \text{hadrons}$
 $\hookrightarrow e^+e^-$

SLAC : $e^+e^- \rightarrow \Psi \rightarrow \text{hadrons (86\%)}$
 $\hookrightarrow e^+e^- (7\%)$
 $\hookrightarrow \mu^+\mu^- (7\%)$

$J/\Psi = \{c, \bar{c}\}$ quark c : charge 2/3



Nobel de Physique en 1976 : Richter (SLAC) et Ting (Brookhaven)

le quark c : prédiction - mécanisme de GIM

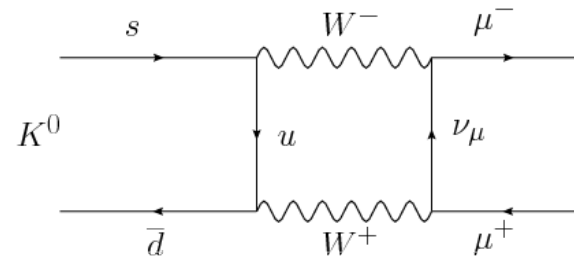
Existence prédite par S.L. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani

Basé sur l'observation de la désintégration du :

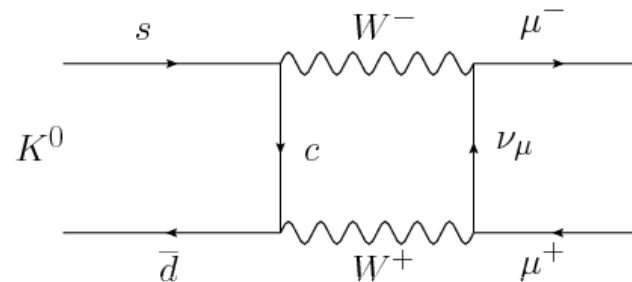
$$K^0(s\bar{d}) \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

dont le branchement est très petit

mais non-nul : $6.87 \cdot 10^{-9}$



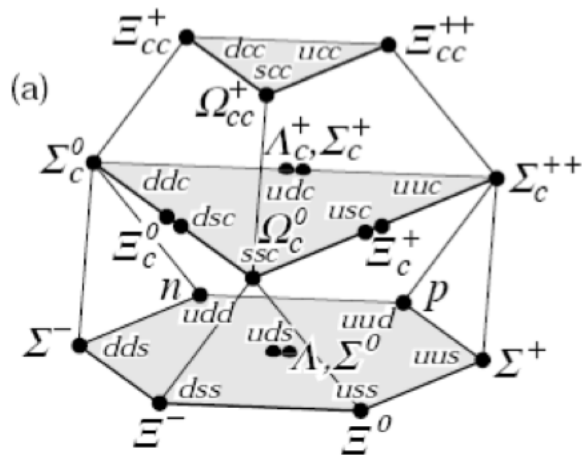
L'introduction d'un nouveau quark permet un nouveau diagramme qui annule le précédent sauf en la dépendance en la masse



→ somme des deux diagramme $\sim m_c^2 - m_u^2$

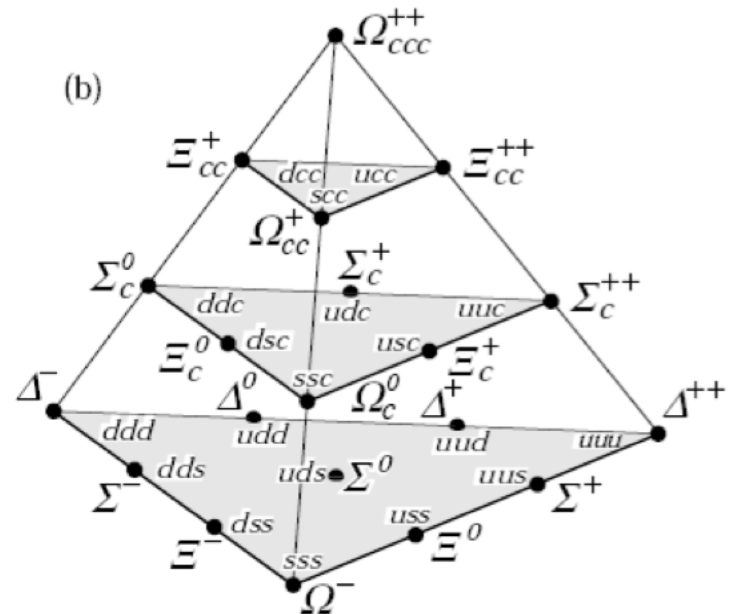
La découverte des particules charmées

- Si le quark c existe, il doit former avec les autres quarks, u, d et s, différents hadrons.
- Baryons charmés $SU(4)$:



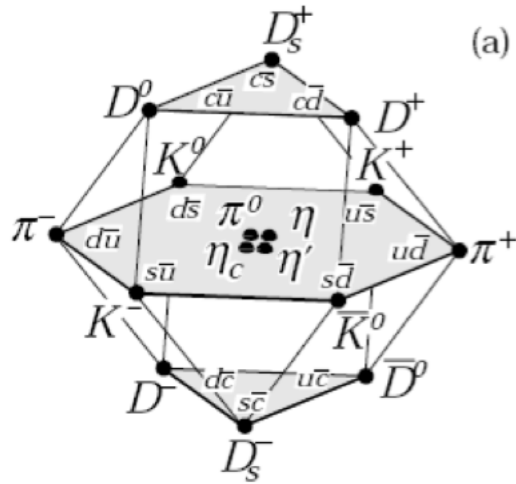
voir
PDG

rep. 20 spin 1/2



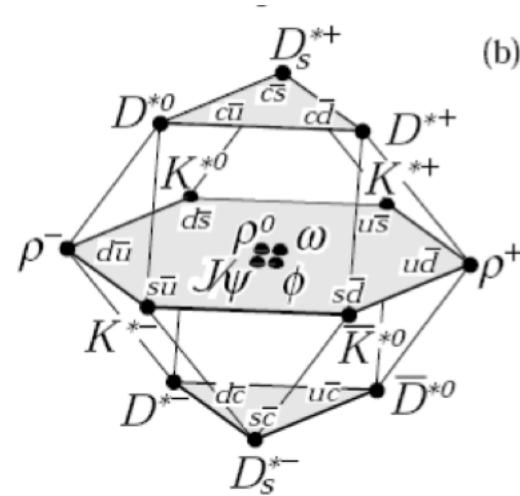
rep. 20' spin 3/2

- Mésons charmés $SU(4)$:



(a)

voir
PDG



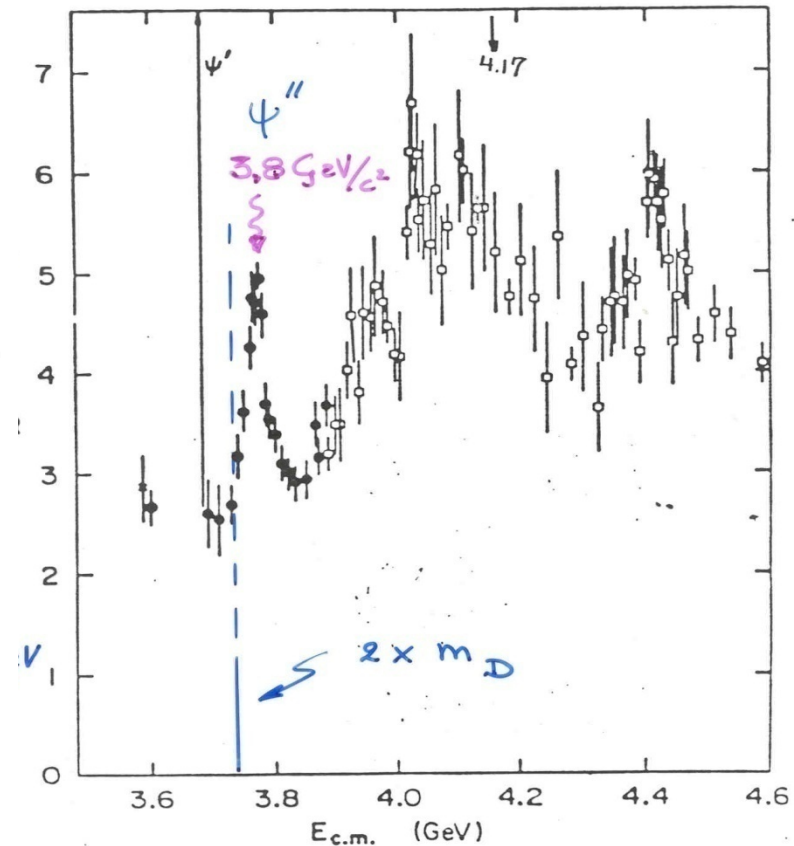
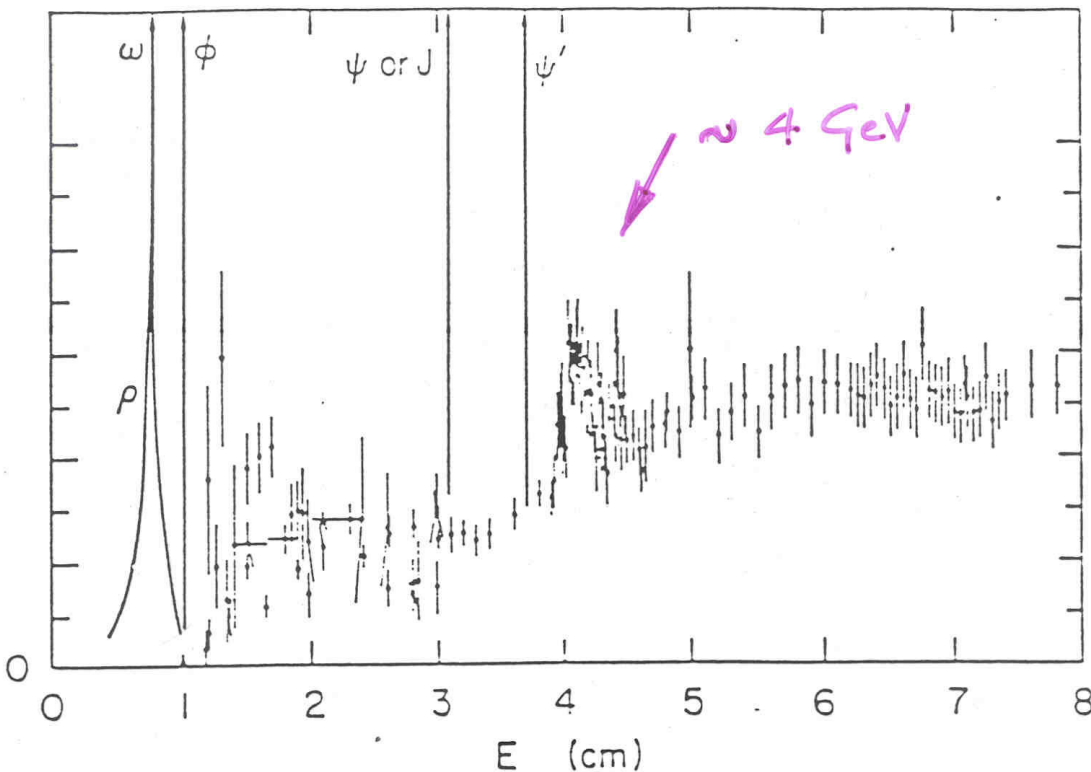
(b)

- 1975 : $\Lambda_c^+ = udc$ et $\Sigma_c^{++} = uuc$
- 1976 : $D^0 = c\bar{u}$ et $D^+ = c\bar{d}$
- 1977 : $D_s^+ = c\bar{s}$
- plus tard : $\Xi_c = usc$ et $\Omega_c = ssc$

Masses $\approx 1,9 \text{ GeV}$
Temps de vie $\approx 10^{-13} \text{ s}$

- le charme (comme l'étrangeté) est conservé dans les IF et EM, peut être violé par If (courant chargé)

- Les états excités de charmonium
- Des états excités du J/ψ constitués d'une paire $c\bar{c}$, appelés "charmonium", furent aussi observés aux collisionneurs e^+e^- :



3. Un autre lepton: troisième famille (1975)

Découverte du lepton τ

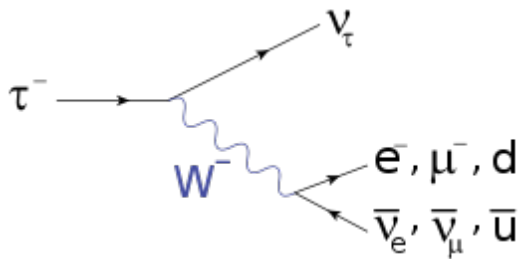
$$e^+ + e^- \rightarrow e^\pm + \mu^\mp + \text{impulsion manquante}$$

interprétée comme :

$$e^+e^- \rightarrow \tau^+ + \tau^-$$

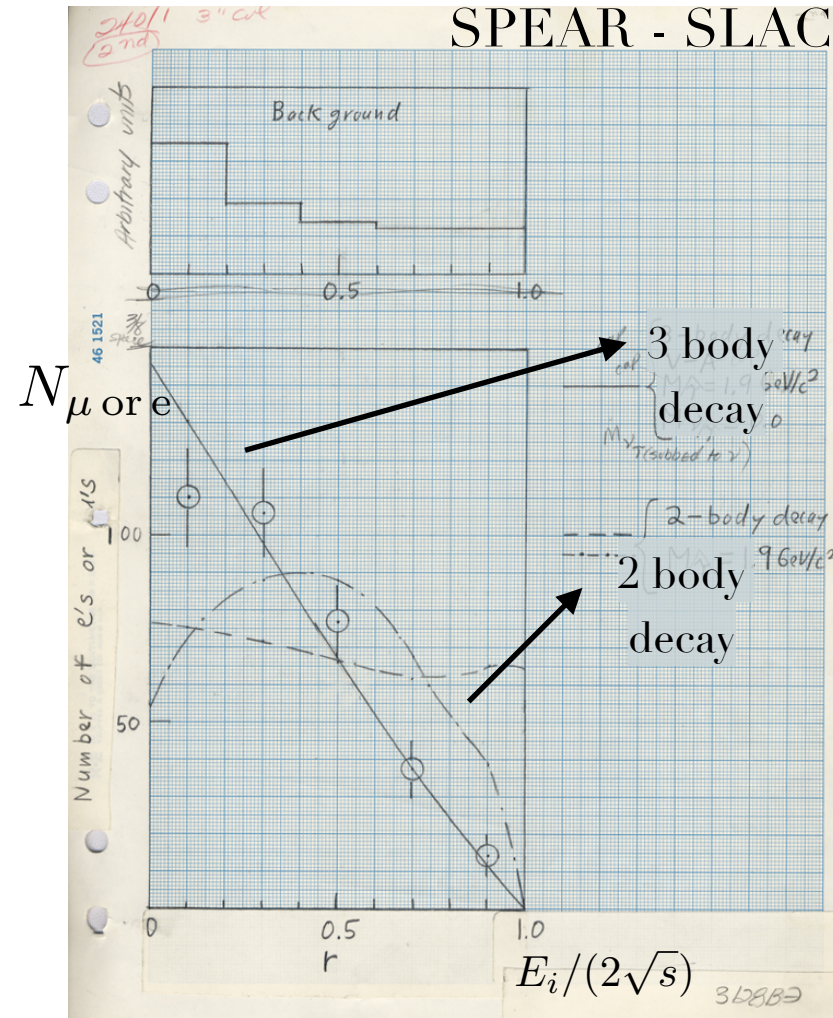
$$\hookrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau \quad (17,4\%)$$

$$\hookrightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau \quad (17,8\%)$$




modes
hadroniques

existe-t-il un ν_τ ?



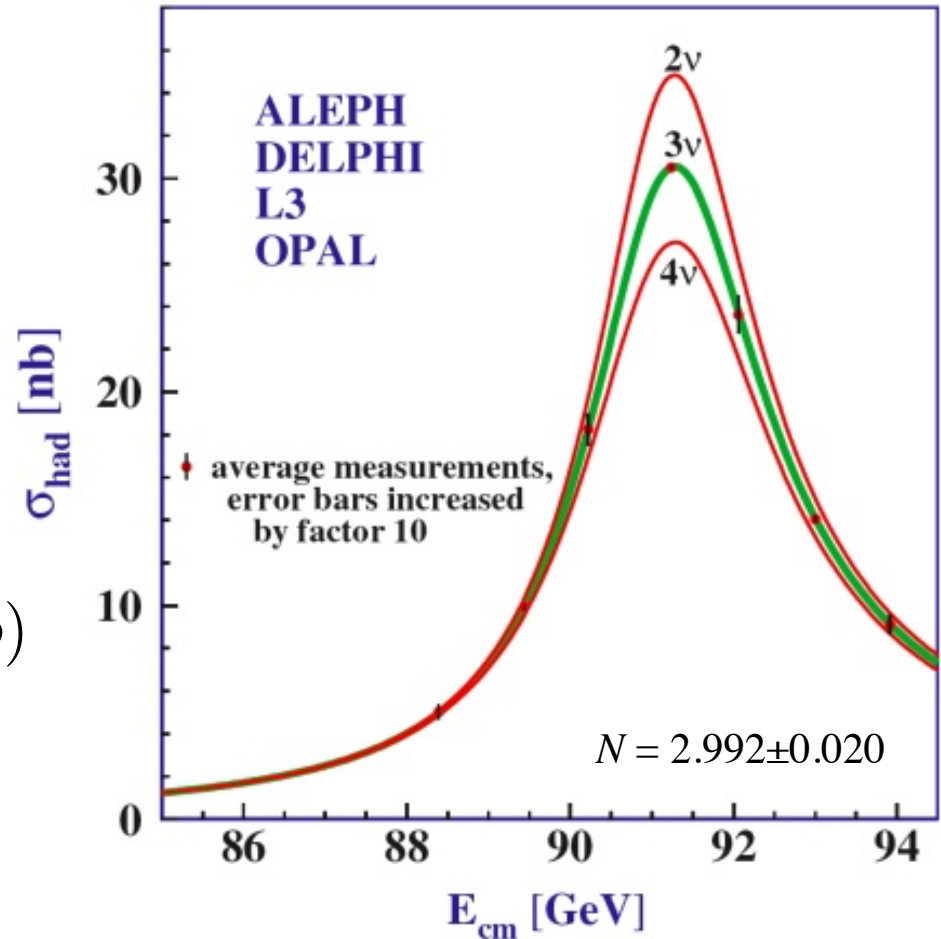
$$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$$

$$\tau_\tau = 2.9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$$

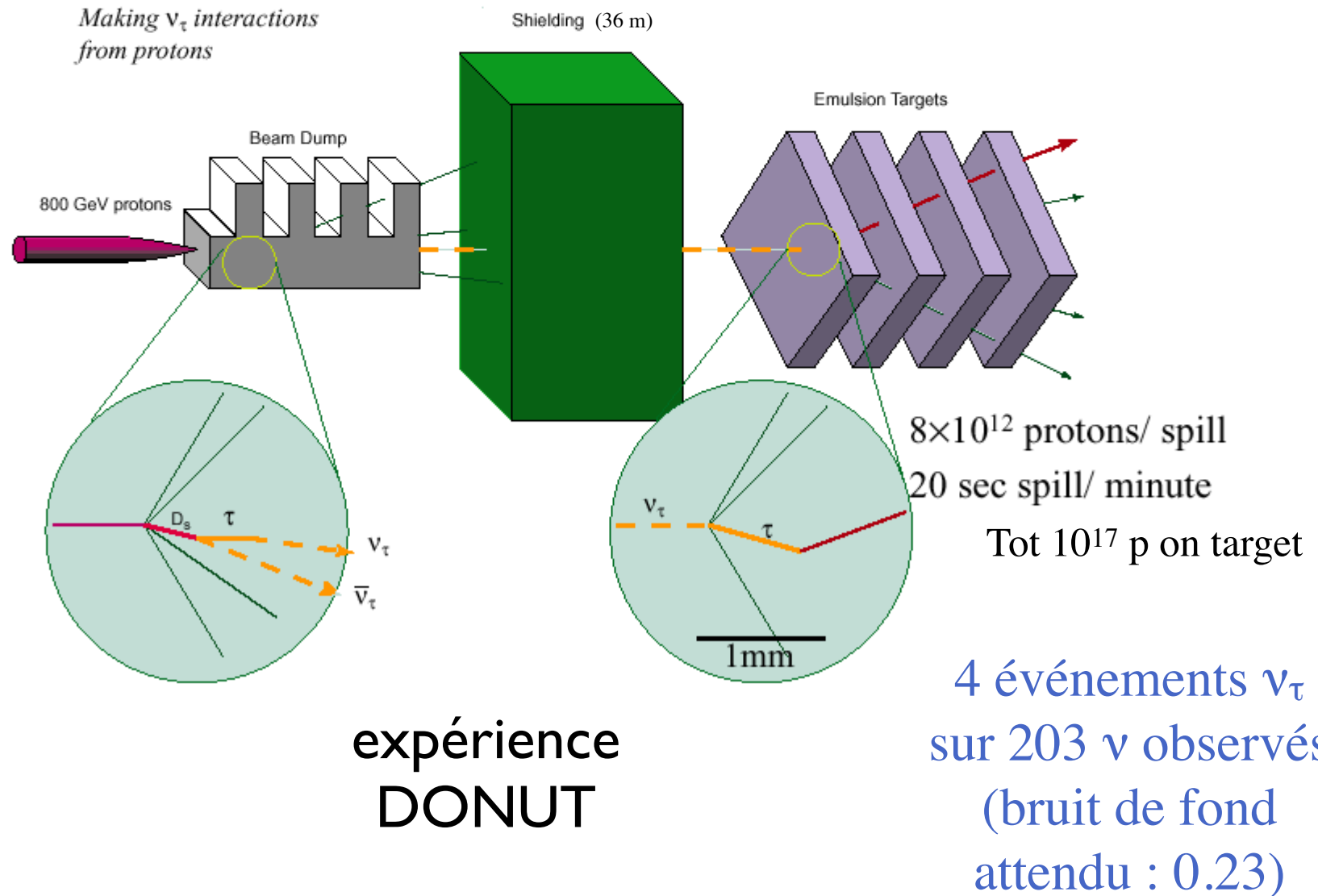
Confirmation indirecte du ν_τ (LEP – 1992)

La mesure de la largeur totale
(Breit-Wigner) du Z, au LEP,
prouve qu'il n'y a que 3
familles de neutrinos

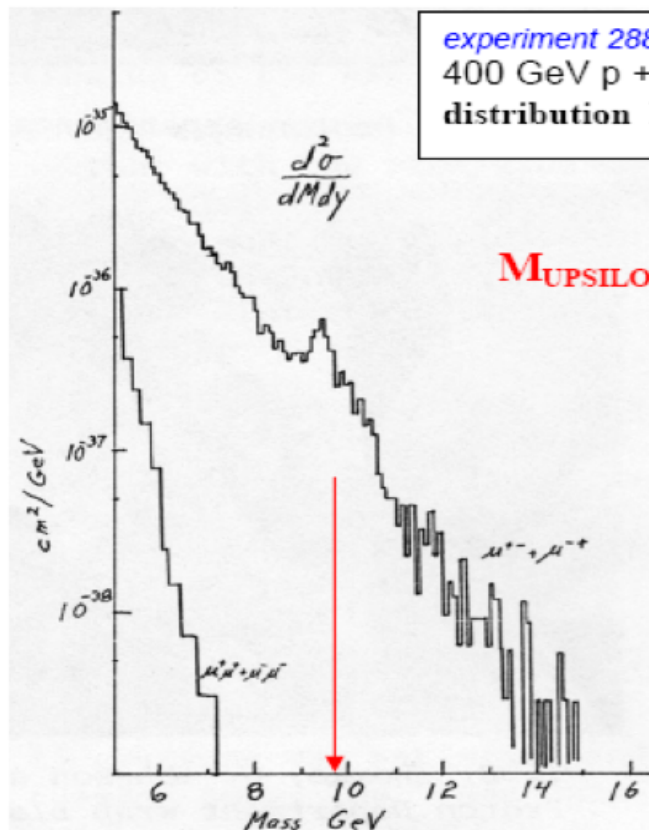
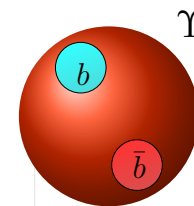
$$\begin{aligned} Z &\rightarrow q \bar{q} & (q = u, d, s, c, b) \\ &\rightarrow l^+ l^- & (q = e, \mu, \tau) \\ &\rightarrow \nu \bar{\nu} & (q = \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau) \end{aligned}$$



Observation directe du ν_τ (FNAL – 2000)



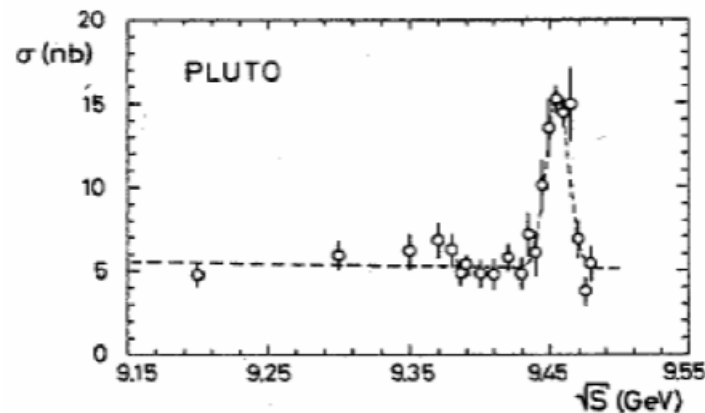
Découverte du quark b (1977)



experiment 288 @ Fermilab fixed target 1977 / L. Lederman :
400 GeV p + Nucleus
distribution $M_{inv} \mu^+ \mu^-$

$M_{\text{UPSILON}} = 9,5 \text{ GeV}$

experiment PLUTO @ DESY
Collisionneur $e^+ e^-$ DORIS
 $\sigma(e^+ e^- \rightarrow Y \rightarrow \mu^+ \mu^-) = f(\sqrt{s})$



1981 : premier baryon "beautiful" : $\Lambda_b(5461) = udb$ ($\tilde{B} = -1$)

1983 : premiers mésons de beauté $B^0 = d\bar{b}$ et $B^+ = u\bar{b}$ ($\tilde{B} = +1$)
 $\bar{B}^0 = b\bar{d}$ et $B^- = b\bar{u}$ ($\tilde{B} = -1$)

Masses $\approx 5,3 \text{ GeV}$
Temps de vie $\approx 10^{-12} \text{ s}$

$\Rightarrow$ bottom strange mesons : $B_s^0(5370) = s\bar{b}$ $\bar{B}_s^0(5370) = \bar{s}b$

$\Rightarrow$ bottom charmed mesons : $B_c^+(6400) = c\bar{b}$ $B_c^-(6400) = \bar{c}b$

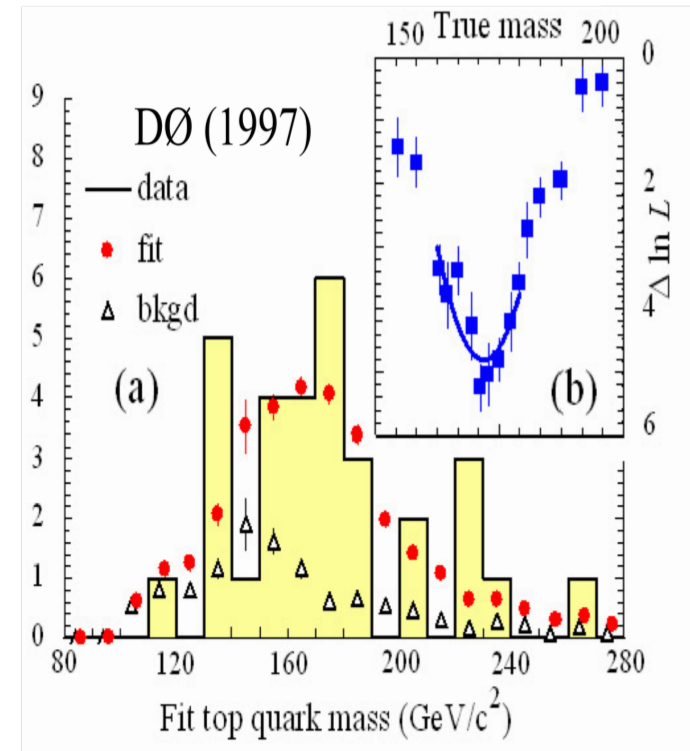
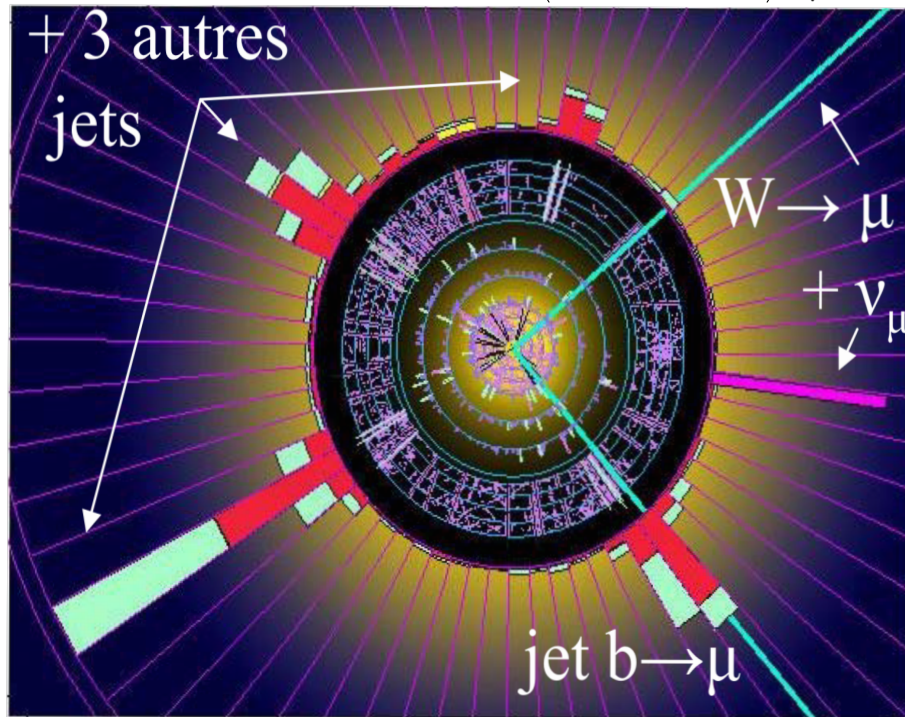
Temps de vie $\approx 10^{-12} \text{ s}$

Découverte du quark t (1995)

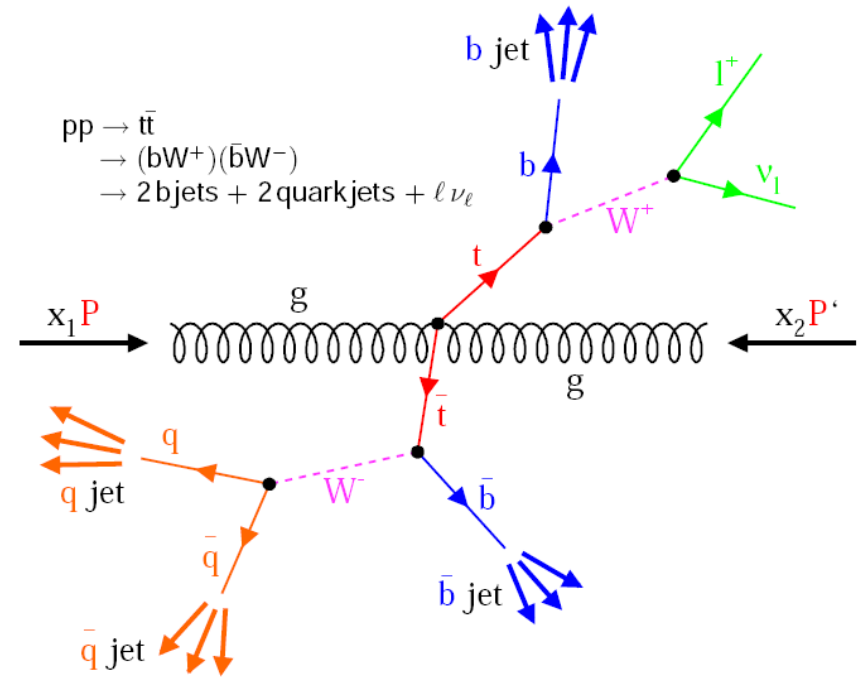
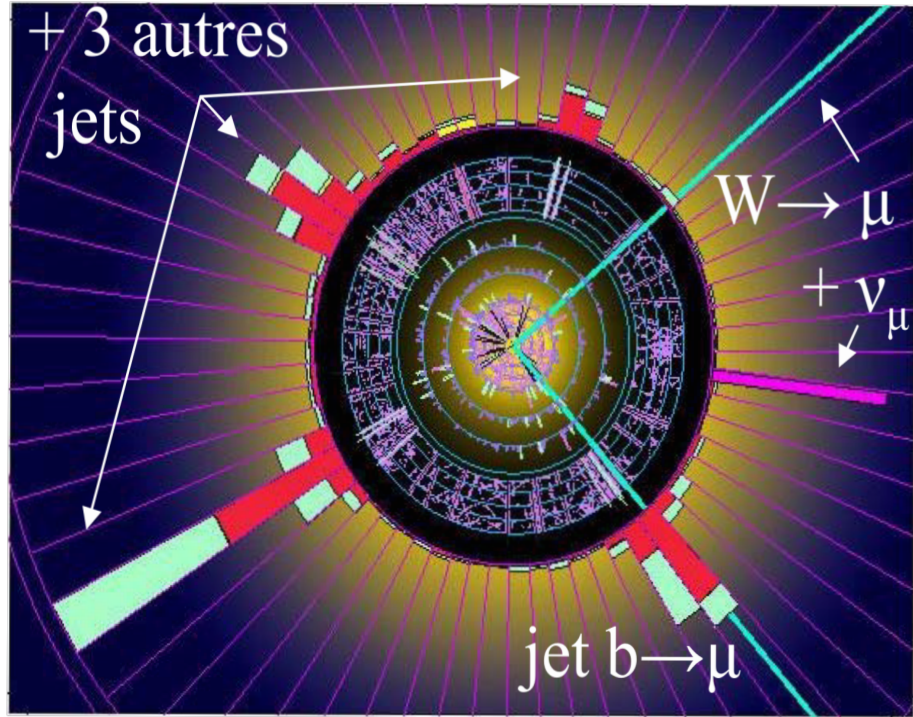
20 ans plus tard...

- le quark t est extraordinairement massif, $m_t \sim 174 \text{ GeV}/c^2 \sim 40 \times m_b$
- le temps de vie du quark t est extrêmement court ce qui l'empêche de former des états liés; apparemment, **il n'y a ni méson top ni baryon top.**

CDF et D0 au TeVatron (Fermilab) $\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$



Découverte du quark t (1995)



topologie demandée : 1 jet issus d'un quark b (avec un μ)

3 autres jets

1 muon isolé (issu d'un W)

de l'impulsion transverse manquante (un ν)

Résumé de la situation début des années 2000

Particules élémentaires

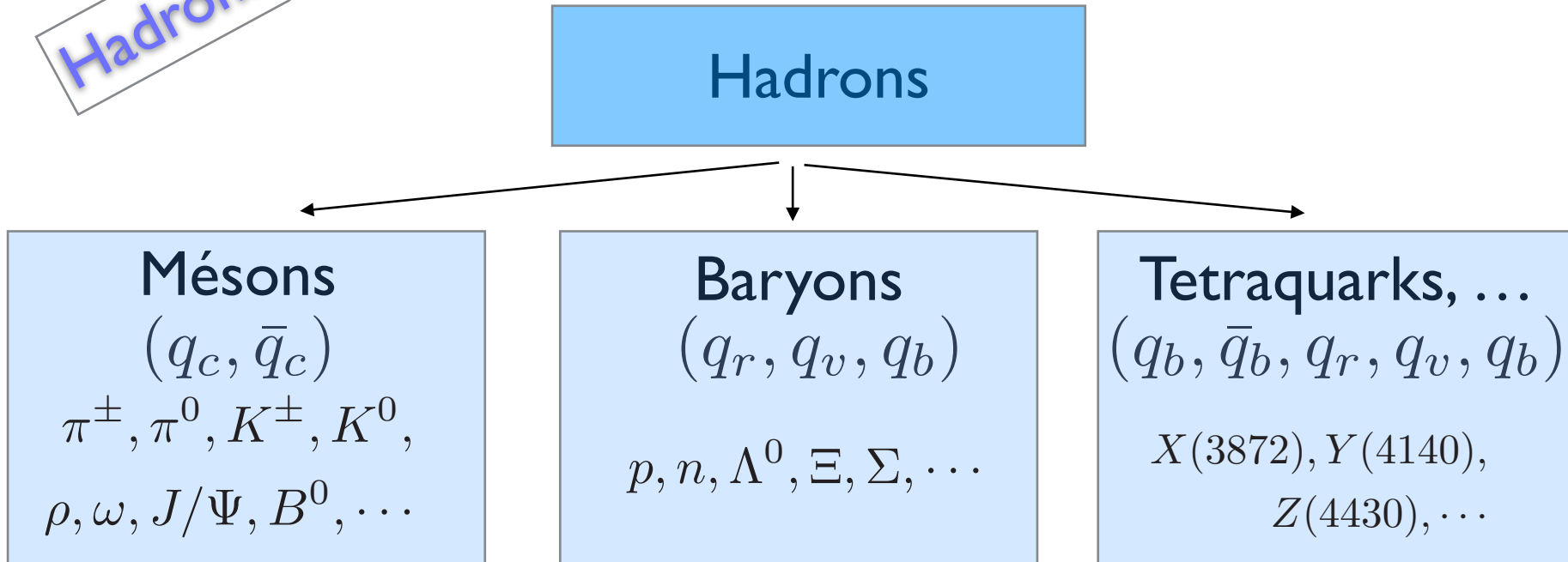
Les constituants de base de la matière comprennent 12 fermions de spin 1/2 et leurs antiparticules. Ils se divisent en 6 quarks, sensibles à l'interaction forte, et 6 leptons, sensibles aux seules forces é.m. (pour les leptons chargés) et faibles

2.3 MeV u up RGB 2/3	1.28 GeV c charme RGB 2/3	173.2 GeV t top RGB 2/3	← masse ← couleurs ← charge	interaction forte (couleur)
4.8 MeV d down RGB -1/3	95 MeV s étrange RGB -1/3	4.7 GeV b beauté RGB -1/3	g gluon	
511 keV e électron -1	105.7 MeV μ muon -1	1.777 GeV τ tau -1	γ photon	
< 2 eV ν_e e neutrino	< 190 keV ν_μ μ neutrino	< 18 MeV ν_τ τ neutrino	80.4 GeV $W^\pm$ ± 1	91.2 GeV Z

Les masses indiquées pour les quarks sont approximatives. Il est très difficile de les déterminer ou même de définir la masse d'un objet qui n'existe pas à l'état libre.

Résumé de la situation début des années 2000

Hadrons



- Les hadrons ne pas de particules élémentaires
- Ils sont composés de quarks qui eux sont élémentaires
- Les quarks portent une charge de couleur
- Les hadrons sont des états neutres (singlet) de couleur

Résumé de la situation début des années 2000

Interactions

		intensité
Interaction Forte	- entre hadrons - courte portée - conservation de S, C, B, T	1
Interaction E-M	- entre particules chargées - portée infinie - conservation de S, C, B, T	10^{-2}
Interaction faible	- entre toutes les particules (sauf γ, g) - courte portée - PAS de conservation de S, C, B, T	10^{-5}

Toutes les interactions conservent : $E, \vec{P}, Q, \vec{J} = \vec{L} + \vec{S}, B, L_e, L_\mu, \mathbf{L}_\tau$