

Chapitre 8: Interactions forte et faible

- Quarks et gluons (chromodynamique)
- Saveurs lourdes
- Interaction électrofaible: bosons W, Z
- Boson de Higgs

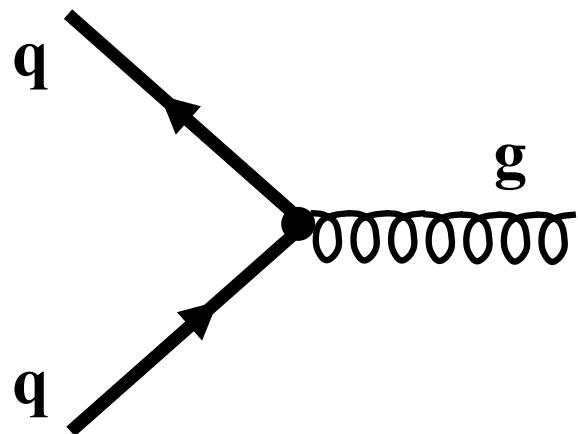
Chromodynamique quantique (QCD)

	Electrodynamique quantique (QED)	Chromodynamique quantique (QCD)
Charges	électriques	de couleur
Type de charges & anticharges	négative – positive +	rouge vert bleu antirouge antivert antibleu
Particule d'échange (de masse nulle)	le photon, qui est neutre électriquement	8 gluons, qui ne sont pas neutres de couleur (pas incolores)
Forces exercées entre	particules chargées électriquement	particules avec charge(s) de couleur, c'est-à-dire les quarks et les gluons

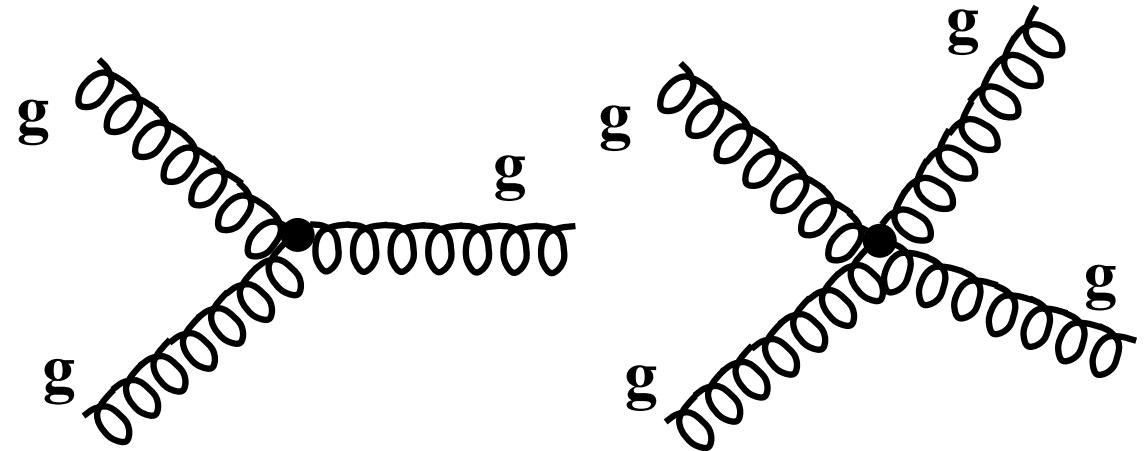
- Chaque quark porte une des trois couleurs
- Chaque antiquarks pour une des trois anticoloreurs
- Chaque gluon porte une couleur et une anticoloreur
 - il existe 8 combinaisons non-incolores → 8 gluons

Diagrammes de Feynman en QCD

- 3 processus élémentaires:



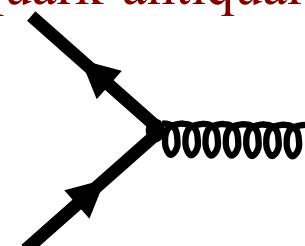
couplage quark-gluon



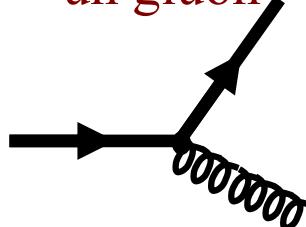
auto-couplage du gluon

- La flèche du quark représente le flux du nombre baryonique +1/3

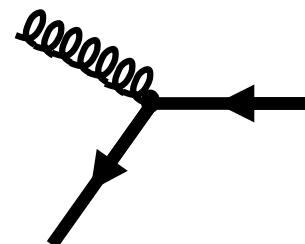
annihilation
quark-antiquark



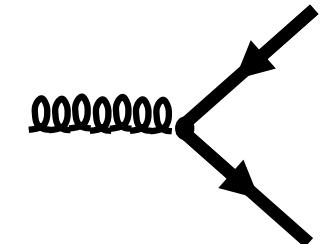
quark émettant
un gluon



antiquark absorbant
un gluon

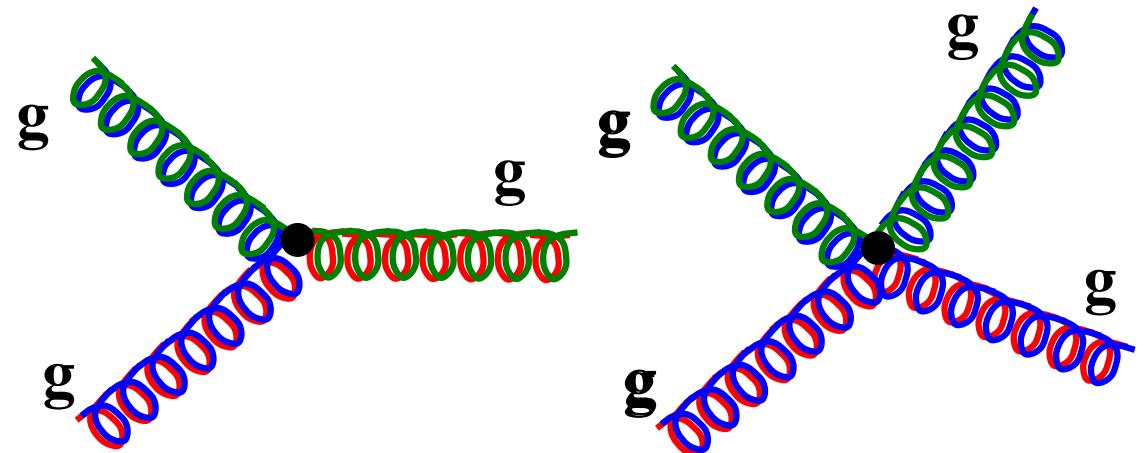
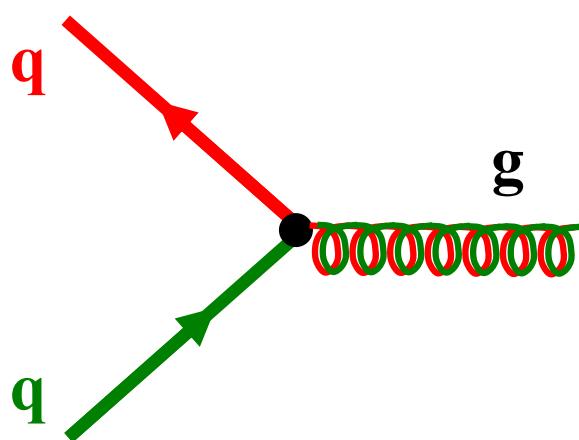


création paire
quark-antiquark



Diagrammes de Feynman en QCD (suite)

- La couleur est conservée à chaque vertex:



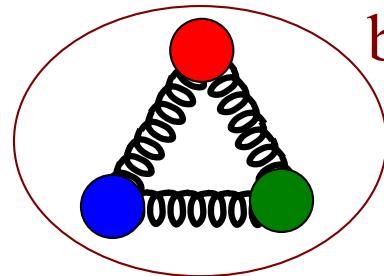
- La constante de couplage à chaque vertex est beaucoup plus grande qu'en QED

→ l'amplitude de probabilité d'un diagramme en QCD ne décroît pas avec le nombre de vertex

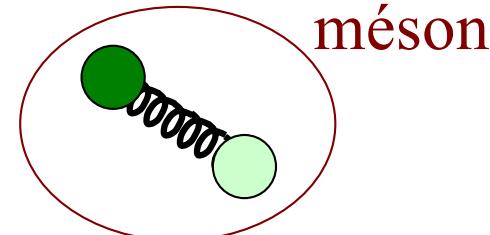
$$\alpha_{\text{QCD}} \sim 1 \gg \alpha_{\text{QED}} \sim \frac{1}{137}$$

Hadrons

- Naïvement:

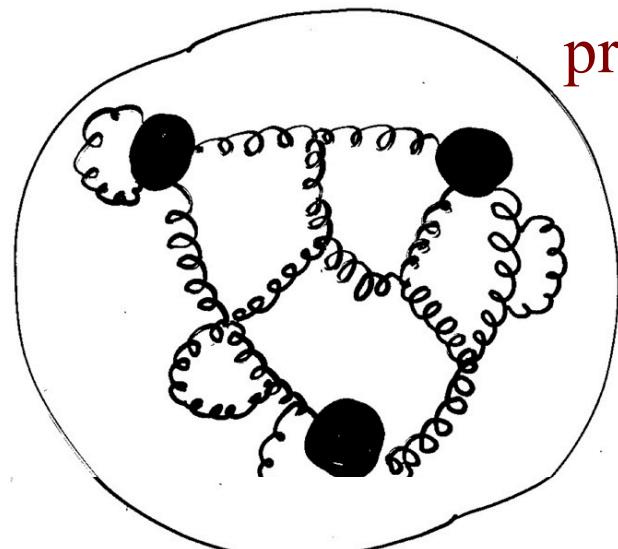


baryon

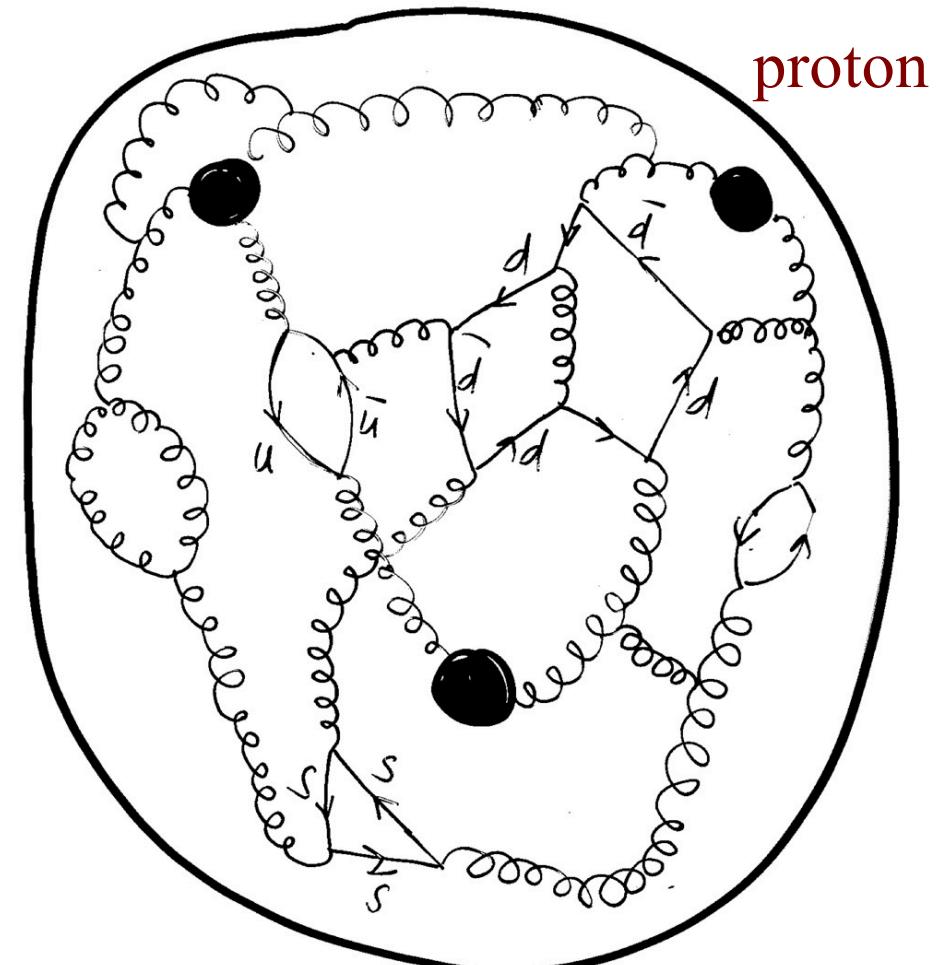


méson

- Mais, si on y regarde de plus près (sans couleurs) ...



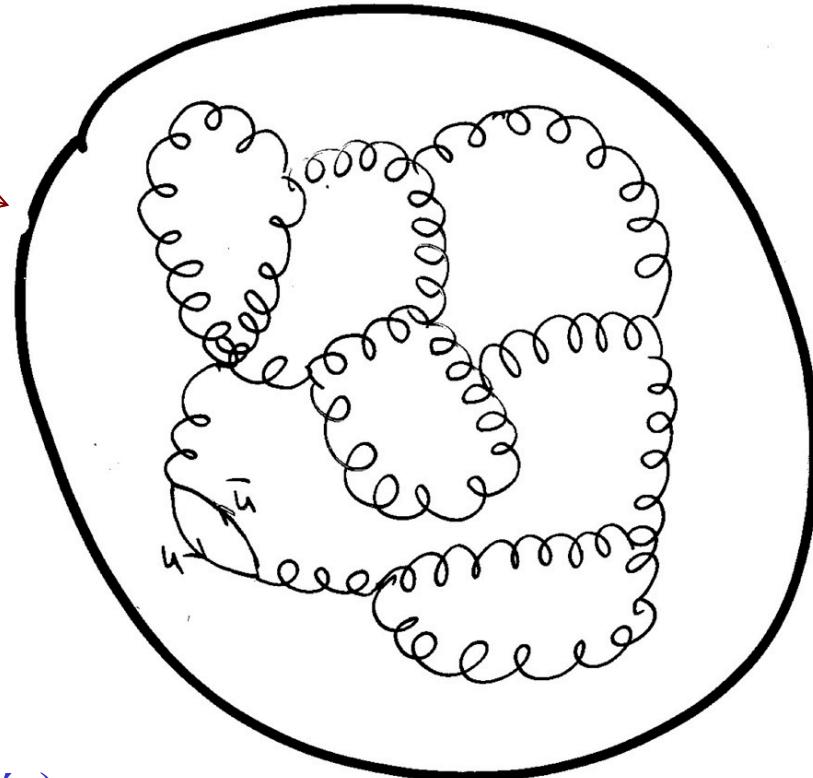
proton



proton

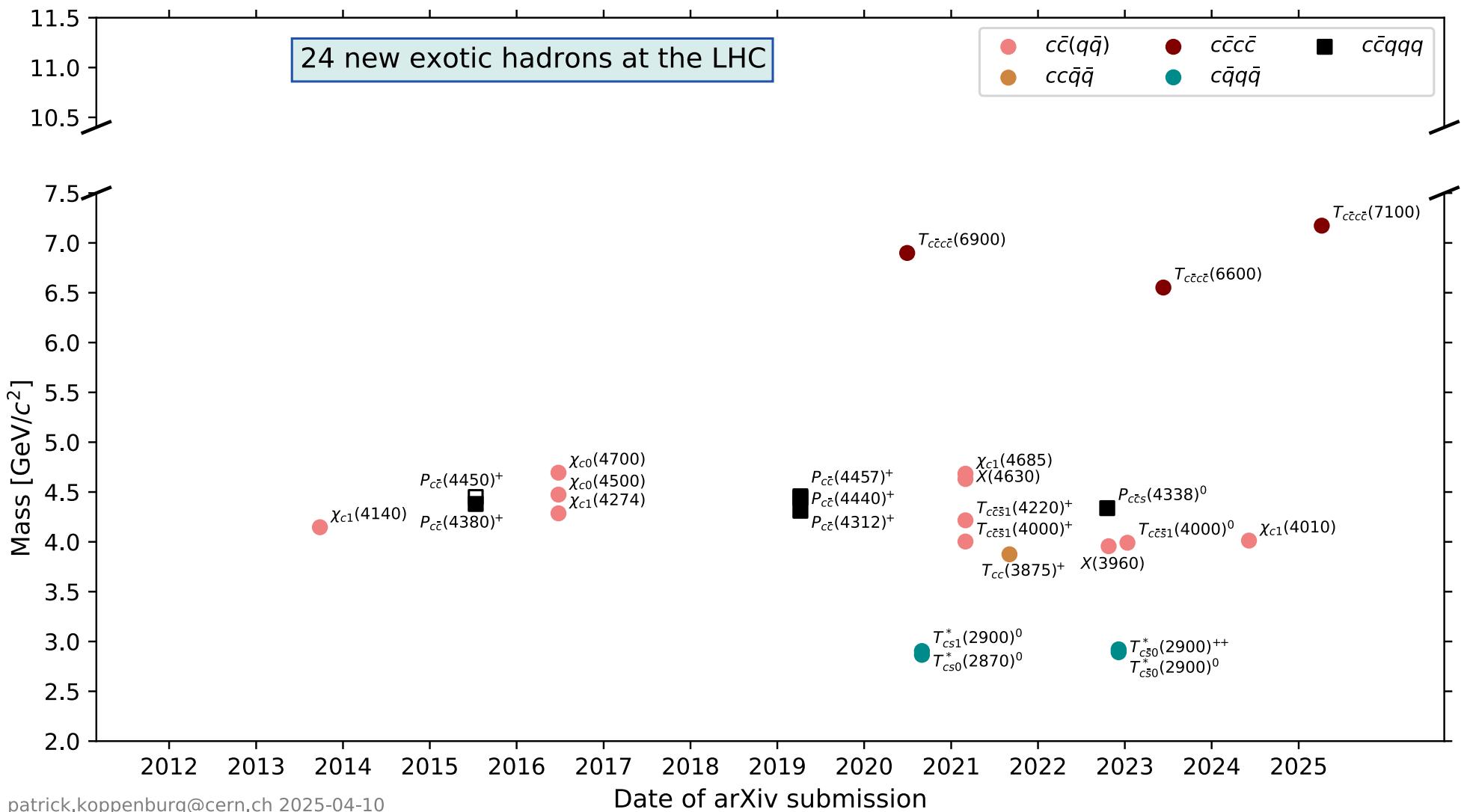
Hadrons “exotiques”

- Boules de glu:
 - 0 quark
- Tétraquarks
 - 2 quarks + 2 antiquarks
(comme deux mésons liés)
- Pentaquarks
 - 4 quark + 1 antiquark
(comme un baryon et un méson liés)
- Hybrides



... mais toujours incolores !

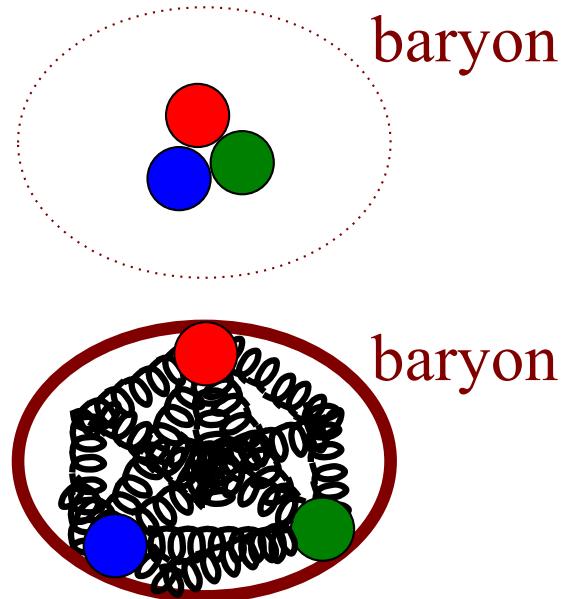
Hadrons “exotiques”



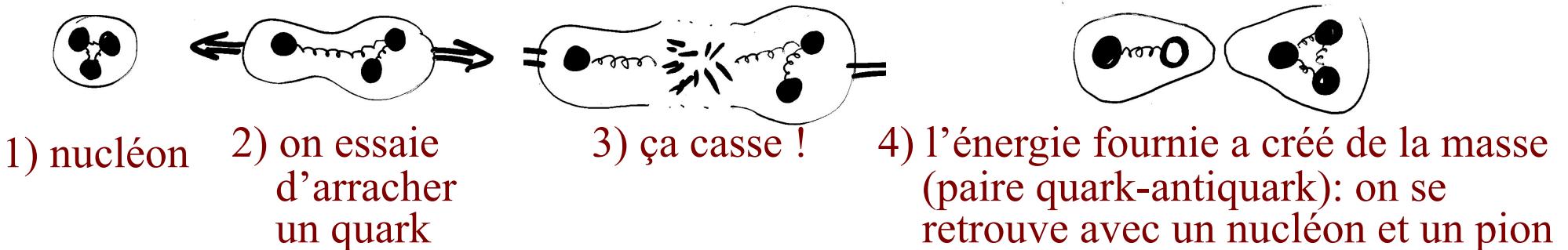
patrick.koppenburg@cern.ch 2025-04-10

Forces de couleur entre quarks

- **Liberté asymptotique**
 - à très faible distance (ou haute énergie) les quarks sont comme libres !
- **Confinement**
 - à grande distance (basse énergie) la force devient si intense que les quarks ne peuvent pas sortir de leur hadron

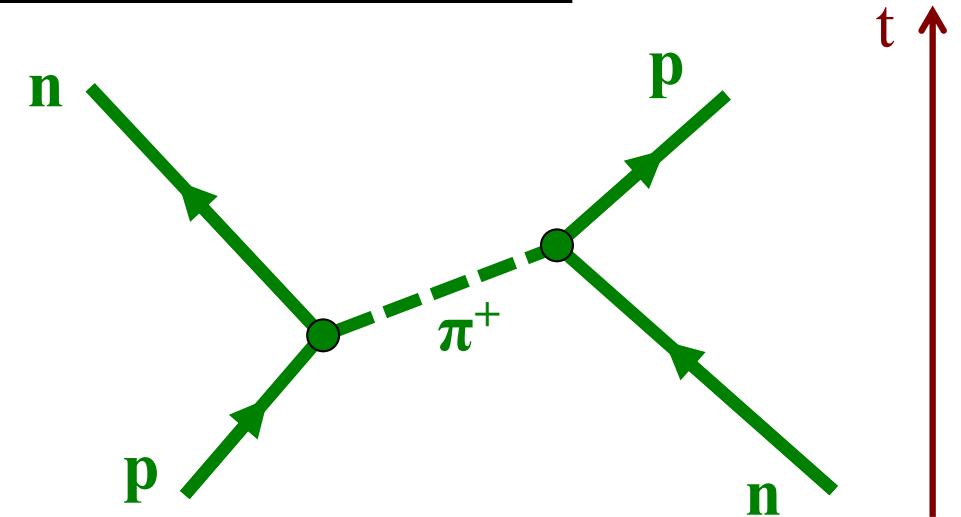


→ on ne peut pas isoler un quark !

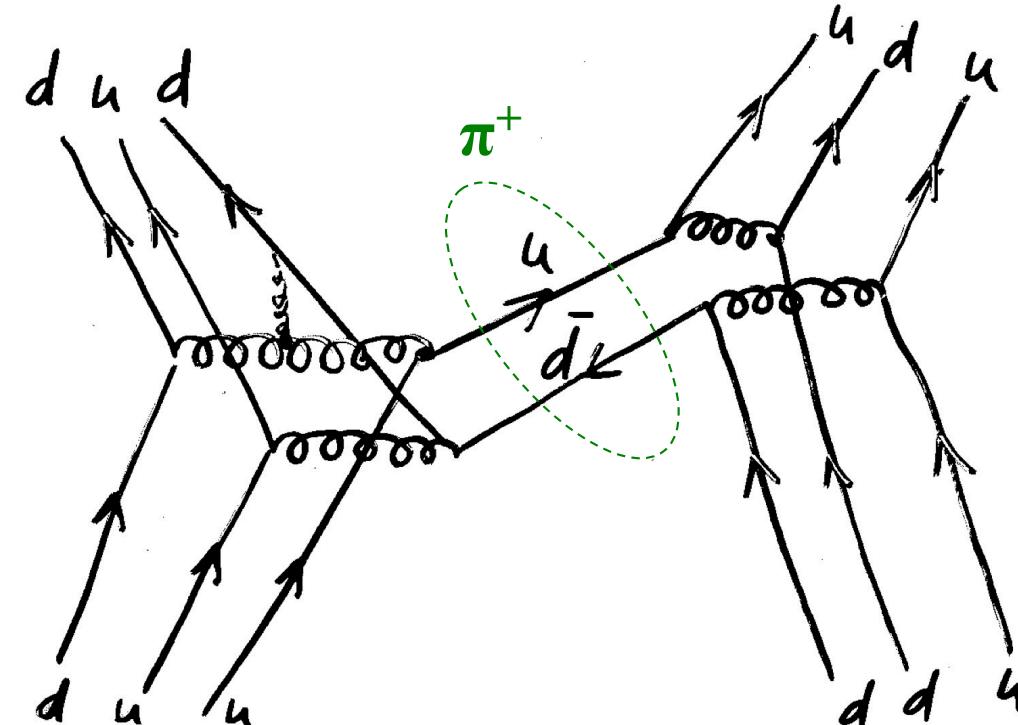


Forces fortes entre hadrons

- Echange d'un pion de Yukawa entre un proton et un neutron

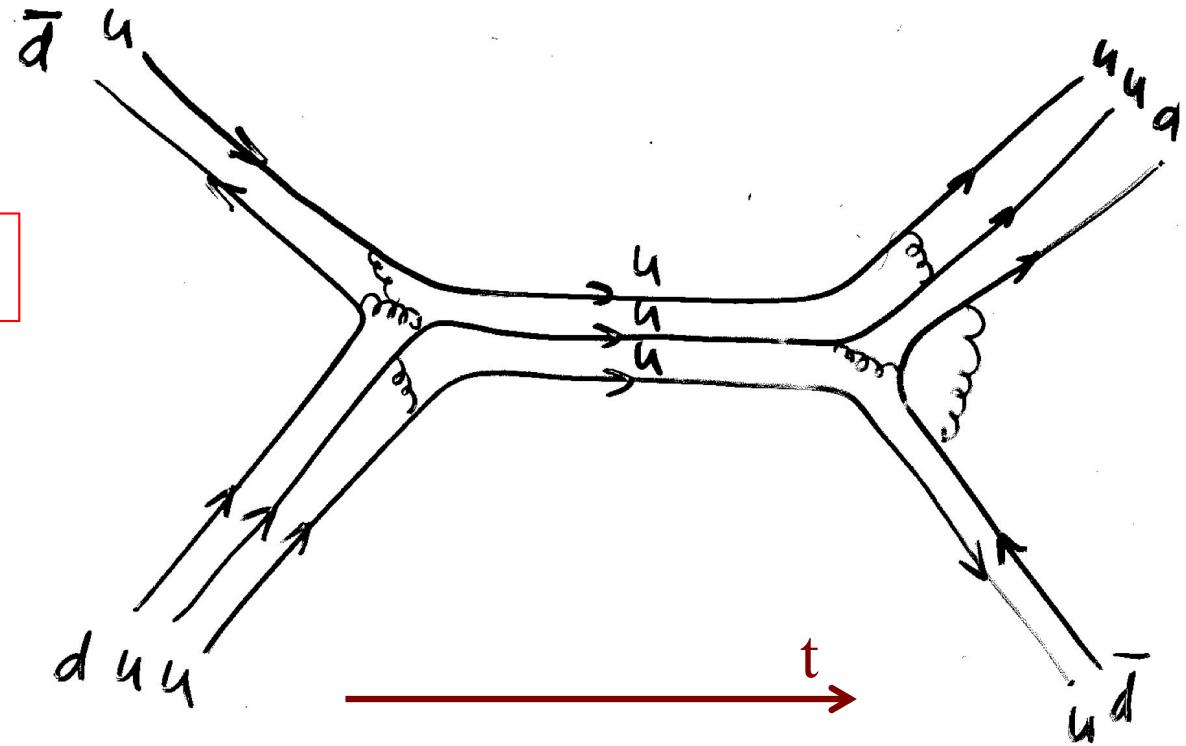


- Cette interaction résulte des forces de couleur !

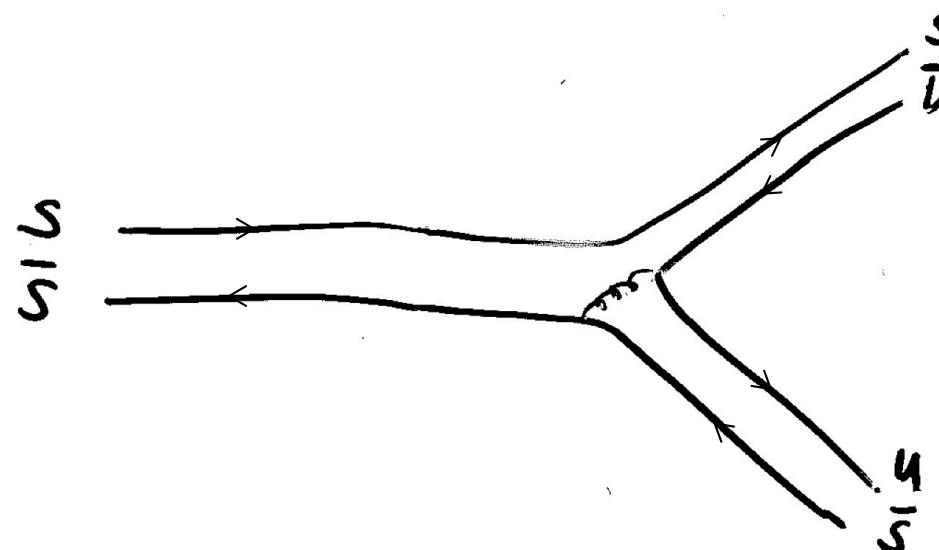


Exemples: interaction forte

$$\pi^+ p \rightarrow \Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p$$



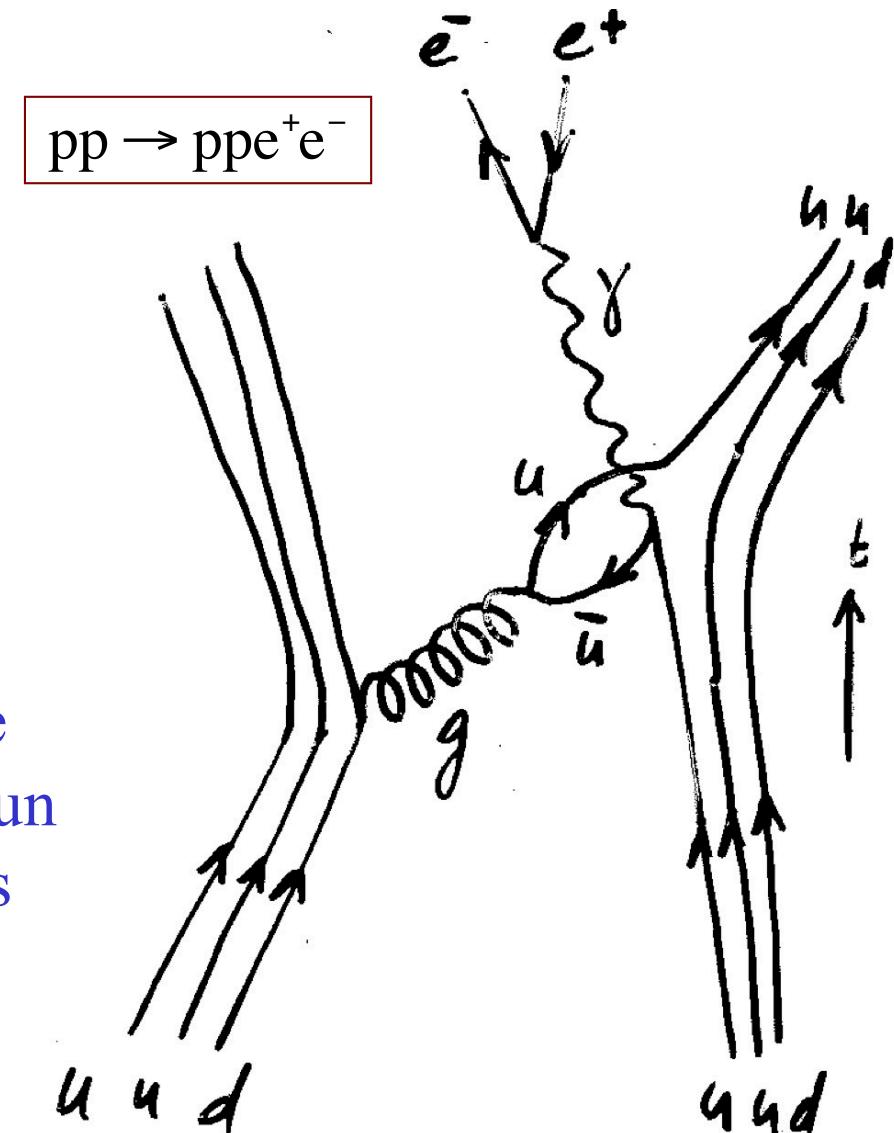
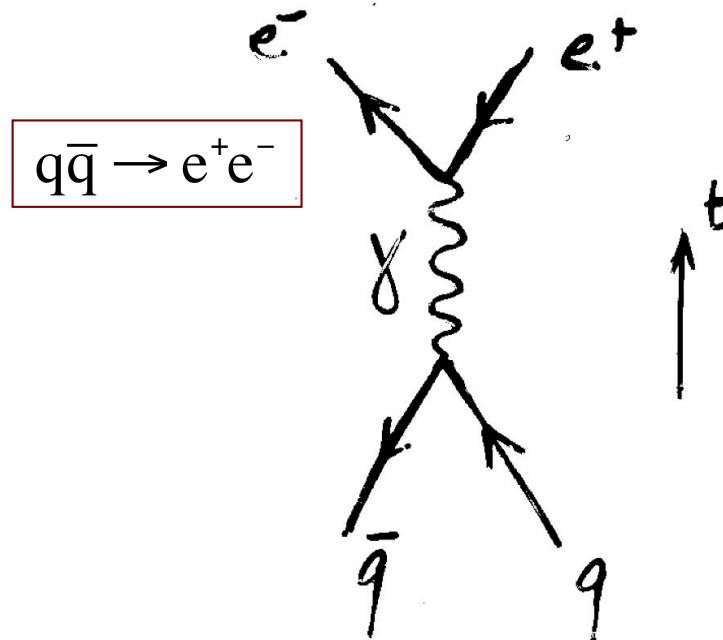
$$\phi \rightarrow K^+ K^-$$



Processus de Drell-Yan

Drell & Yan
1971

- Création paire leptons chargés par annihilation quark-antiquark

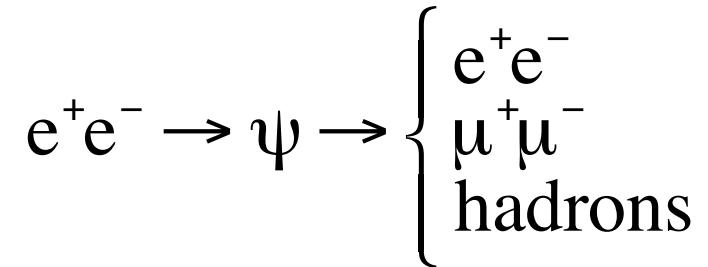
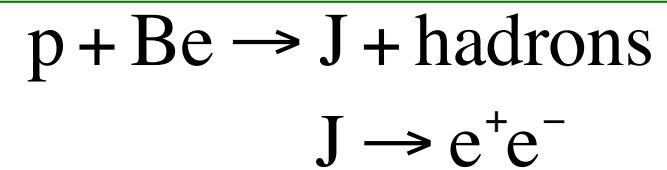


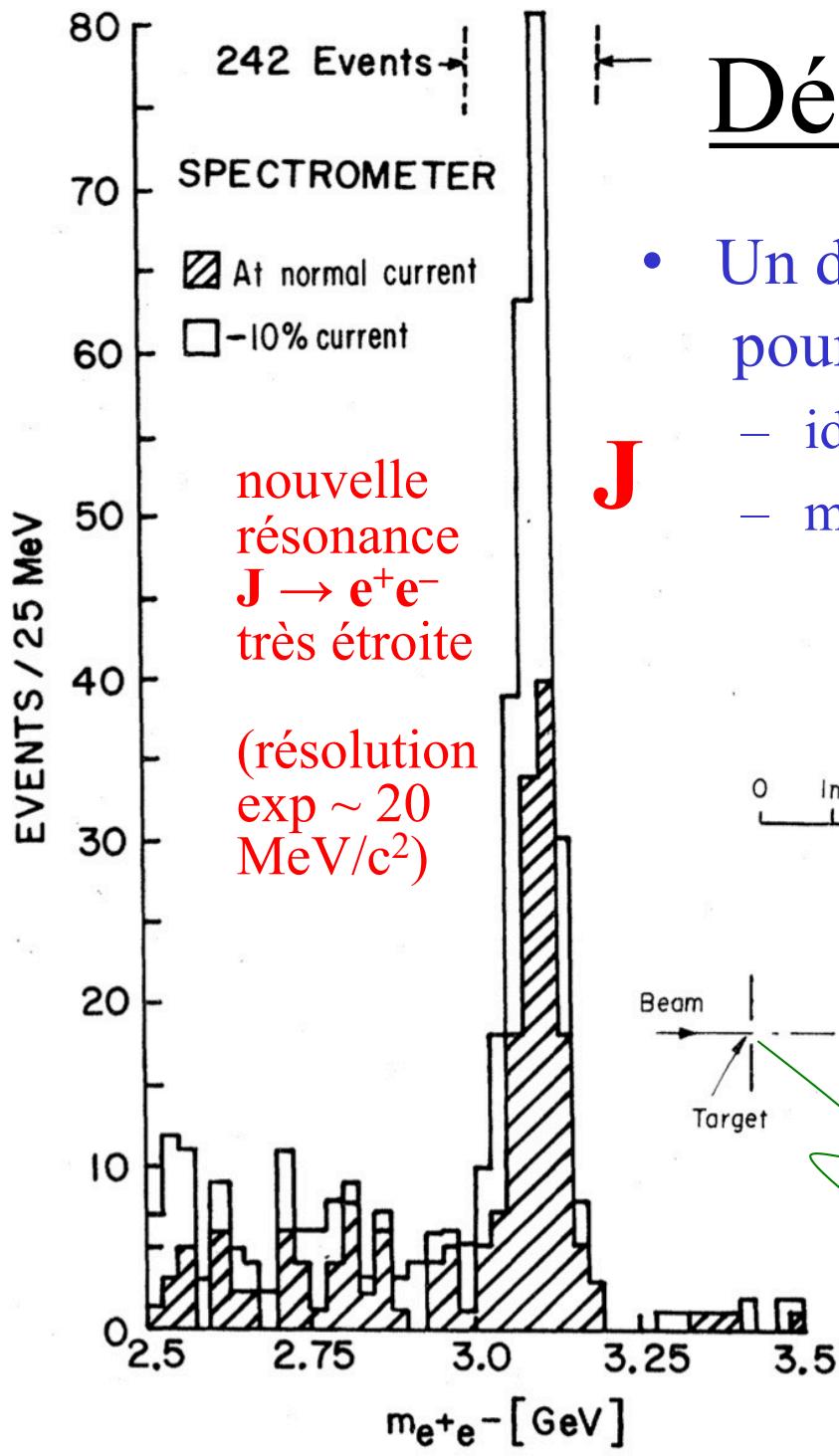
- Ce processus est possible dans une collision entre deux nucléons, car un hadron contient toujours des paires virtuelles $q\bar{q}$ (quarks de la “mer”) en plus des quarks de valence

Découvertes (simultanées) du J/ ψ

été
1974

- Ting et al. à Brookhaven
 - expérience avec faisceau de protons (28 GeV) sur cible de béryllium
 - découverte d'une résonance étroite, baptisée J, avec $m_J \sim 3.1 \text{ GeV}/c^2$
- Richter et al. à SLAC
 - expérience au collisionneur e^+e^- SPEAR
 - découverte d'une résonance très étroite, baptisée ψ , avec $\Gamma_\psi < 1.3 \text{ MeV}$ et $m_\psi = 3.105 \pm 0.003 \text{ GeV}/c^2$
- Les deux découvertes sont publiées simultanément le 2.12.1974
 - Prix Nobel décerné en 1976 à Ting et Richter pour la découverte du J/ ψ



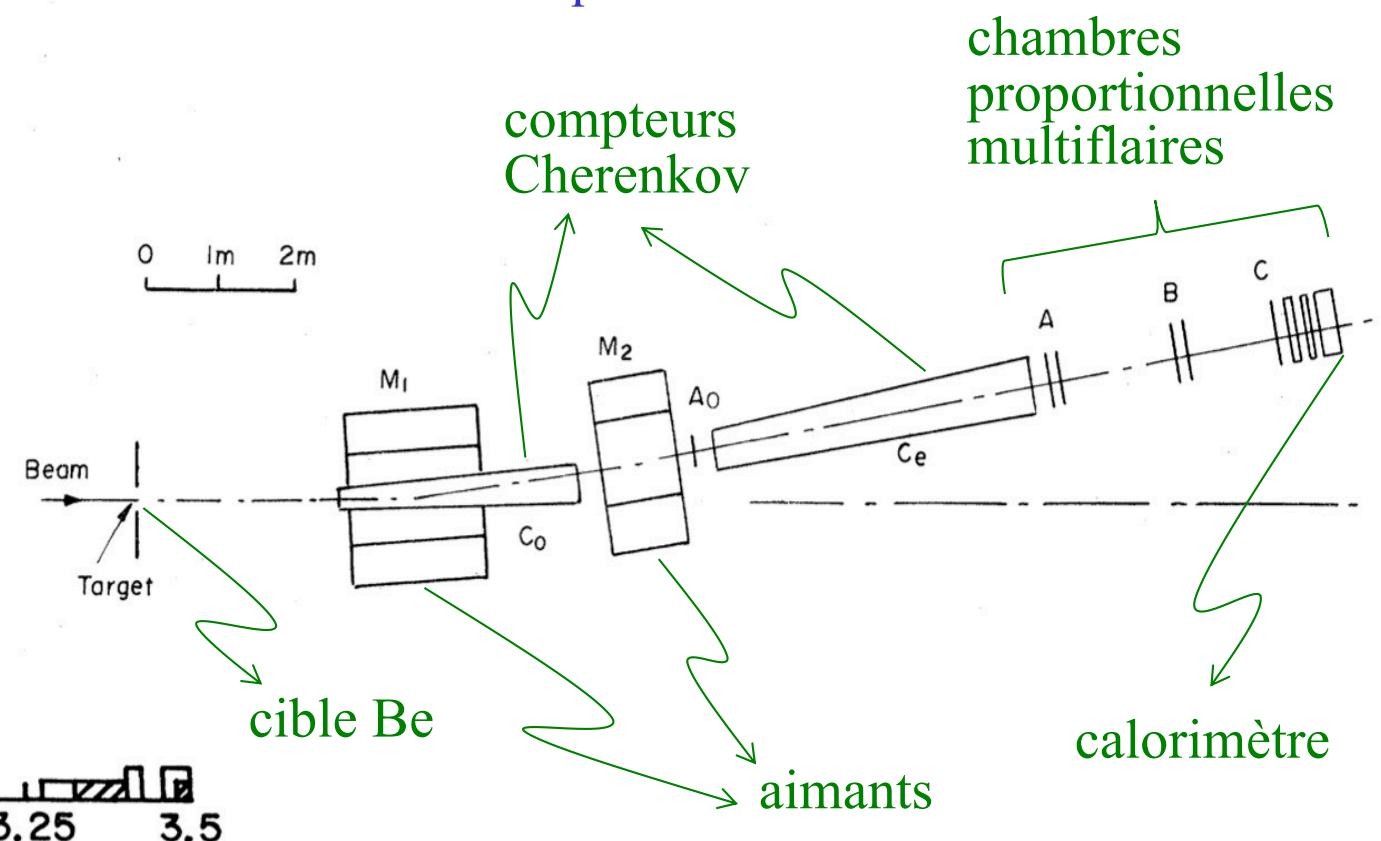


Découverte J

J.-J. Aubert et al.,
Phys. Rev. Lett. 33
(1974) 1404

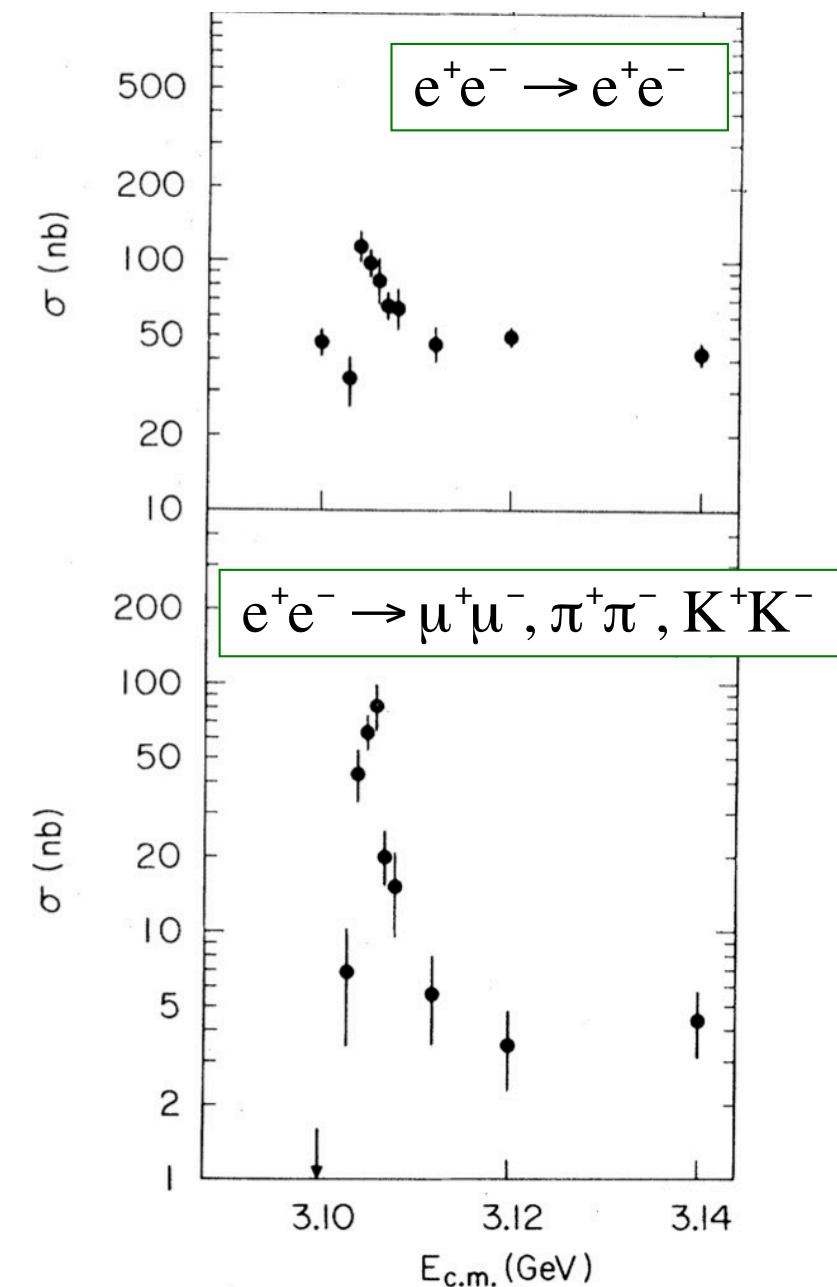
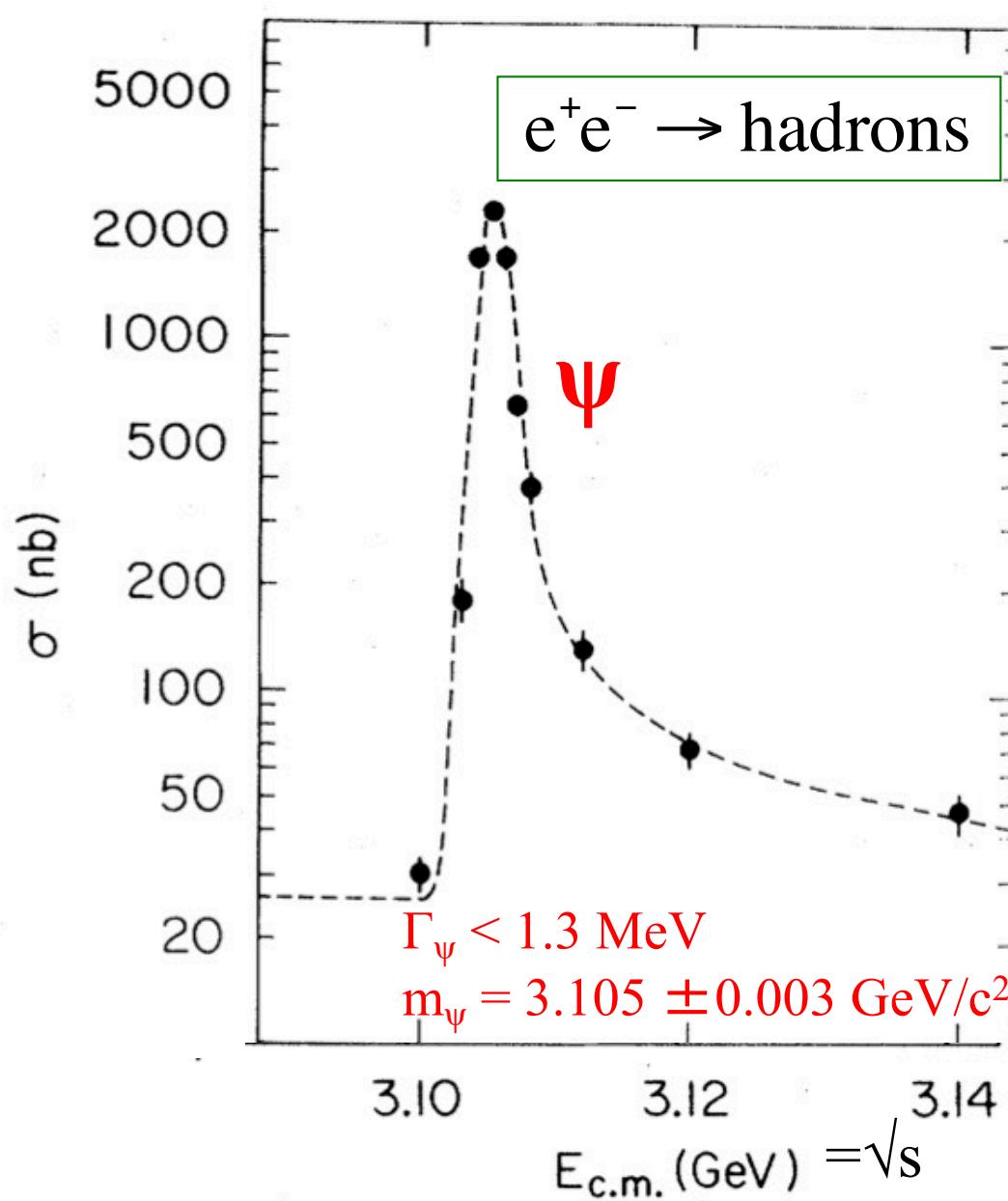
- Un des deux bras du spectromètre e^+e^- pour étudier les collisions $p(28 \text{ GeV}) + \text{Be}$
 - identification des électrons
 - mesure de leurs quantités de mouvement

J



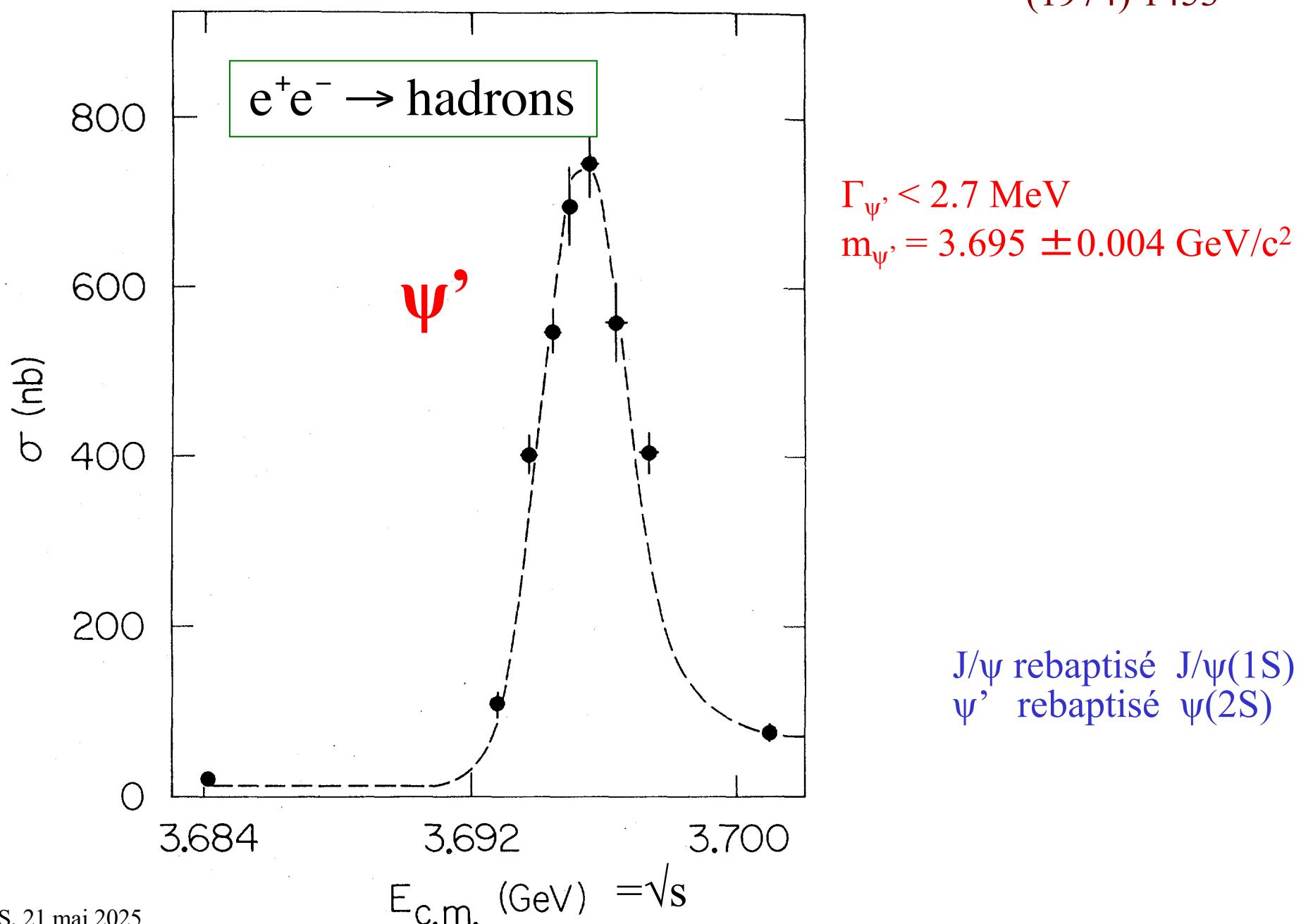
Découverte ψ

J.-E. Augustin et al.,
Phys. Rev. Lett. 33
(1974) 1406



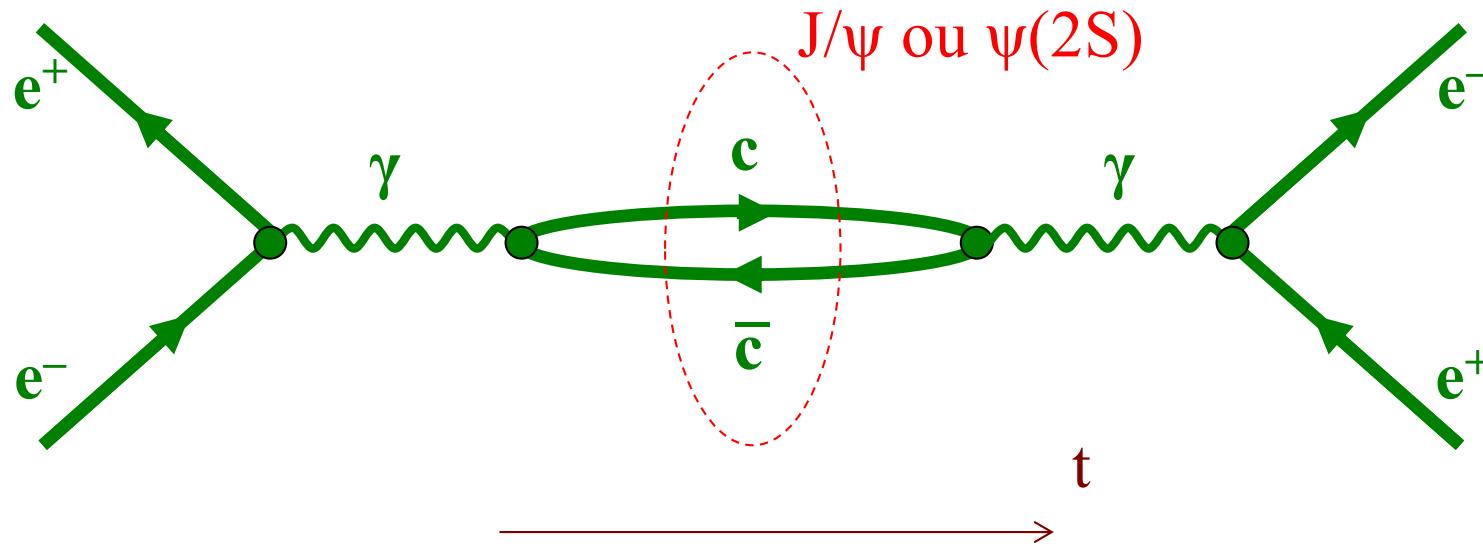
Découverte ψ'

G.S. Abrams et al.,
Phys. Rev. Lett. 33
(1974) 1453



Qu'est-ce que le J/ ψ ou $\psi(2S)$?

- Ne peut s'interpréter qu'à l'aide d'une nouvelle saveur de quark, le quark “c” (= charme)
 - J/ ψ est un méson $c\bar{c}$ (état fondamental),
 - $\psi(2S)$ est un méson $c\bar{c}$ (état excité)



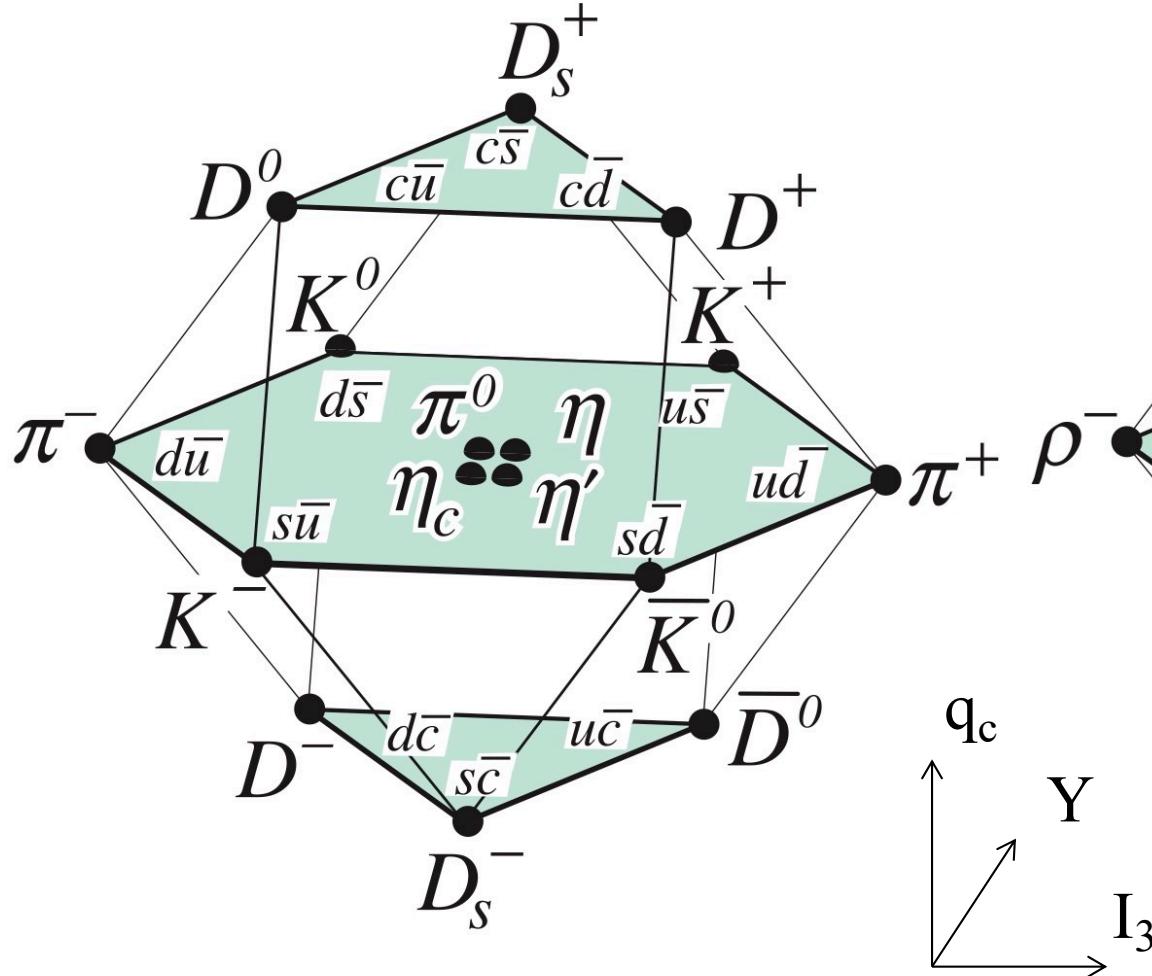
- Glashow et Bjørken avaient supposé l'existence d'un quatrième quark en 1964 déjà (4 quarks, car 4 leptons)
- En 1970, Glashow-Illiopoulos-Maiani (GIM) ont montré qu'un 4ème quark doit exister pour expliquer la non-observation de $K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Charme

- 1975–1977: découvertes de baryons et mésongs contenant un quark c (ou antiquark \bar{c})
- Le charme, comme l'étrangeté, est stable vis-à-vis de l'interaction forte, mais se désintègre par interaction faible
 - “longue” durée de vie moyenne: $\tau \sim 10^{-13}\text{--}10^{-12}$ s
- Nouveau nombre quantique, le charme (q_c)
- Nouvelle loi de conservation du charme, violée par l'interaction faible et respectée par les autres interactions

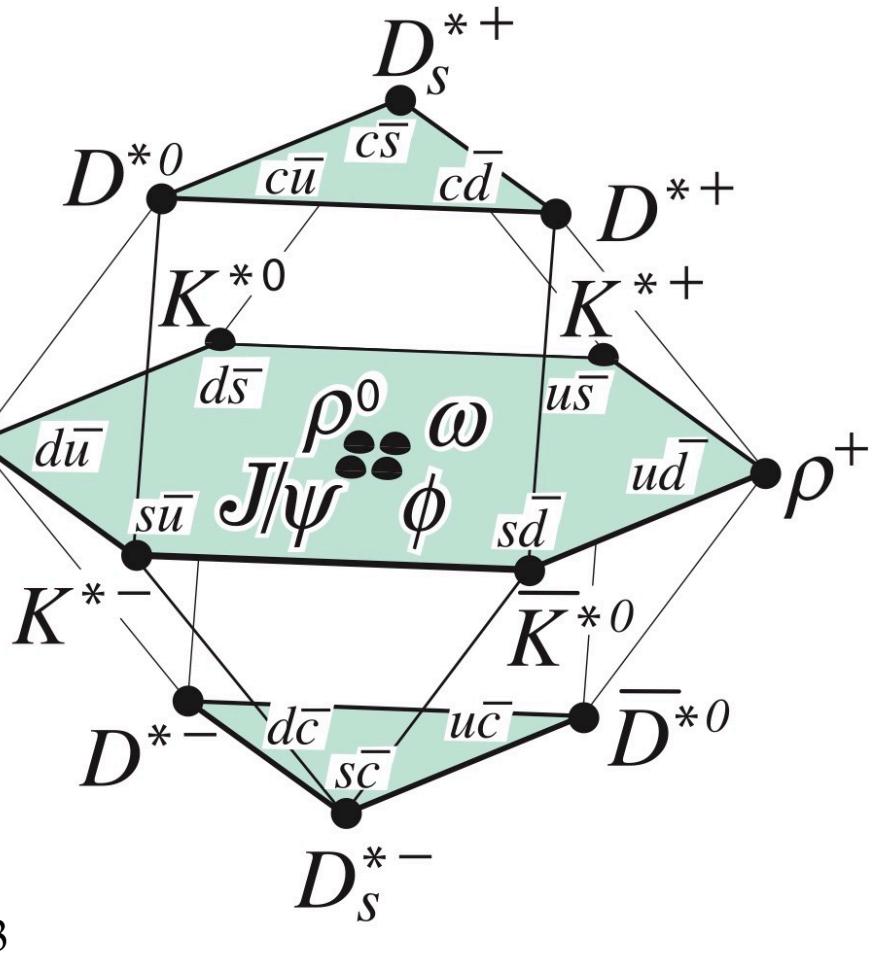
Multiplets de mésons de SU(4)

$J^P = 0^- (\ell=0)$



16 mésons pseudoscalaires

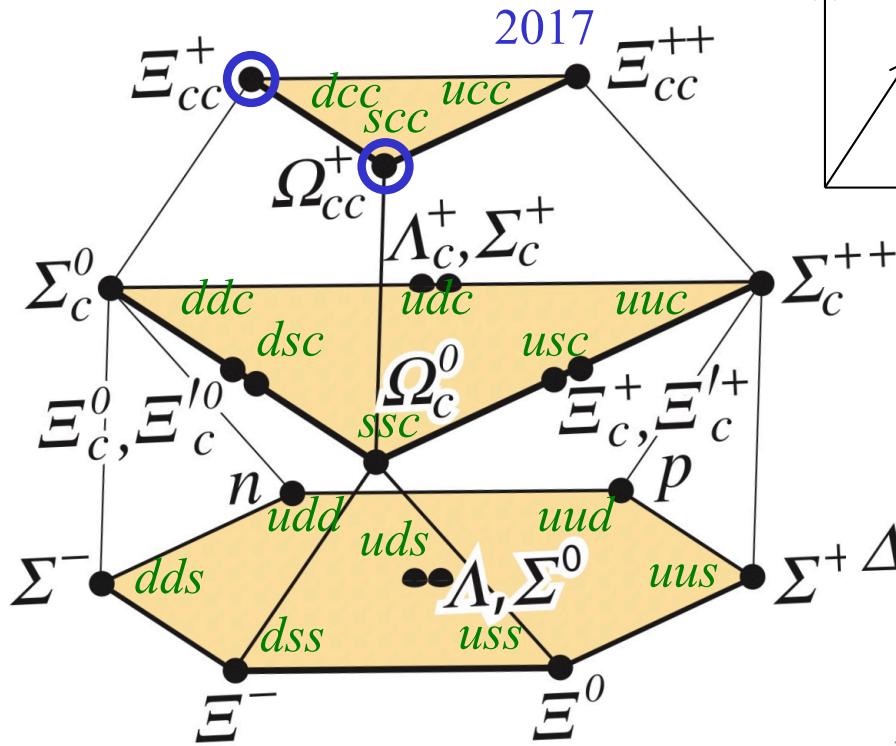
$J^P = 1^- (\ell=0)$



16 mésons vecteurs

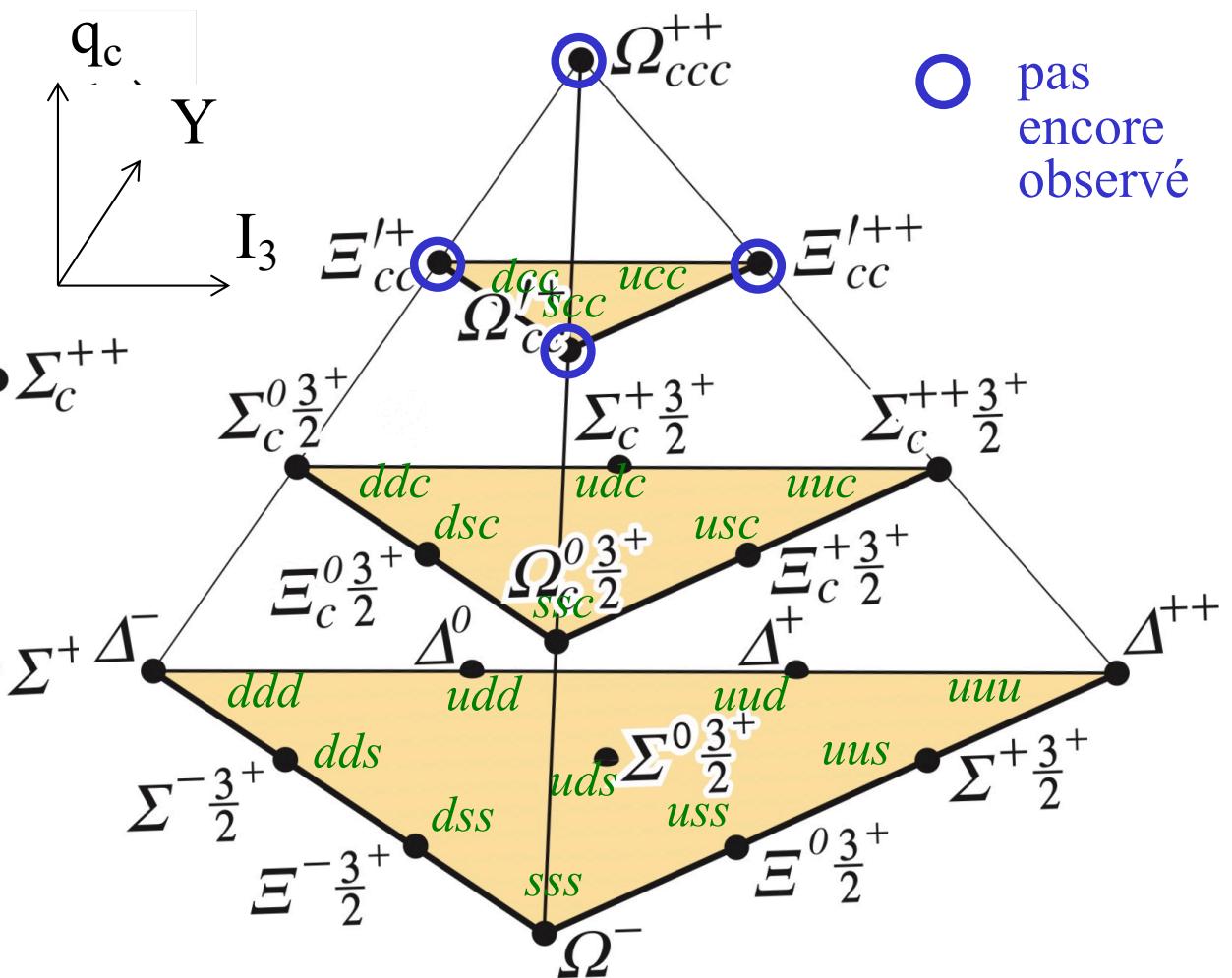
Multiplets de baryons de SU(4)

J^P= 1/2⁺ ($\ell=0$)



20 baryons de spin 1/2

J^P= 3/2⁺ ($\ell=0$)



20 baryons de spin 3/2

Découverte du lepton τ

M.L. Perl et al.,
Phys. Rev. Lett. 35
(1975) 1489

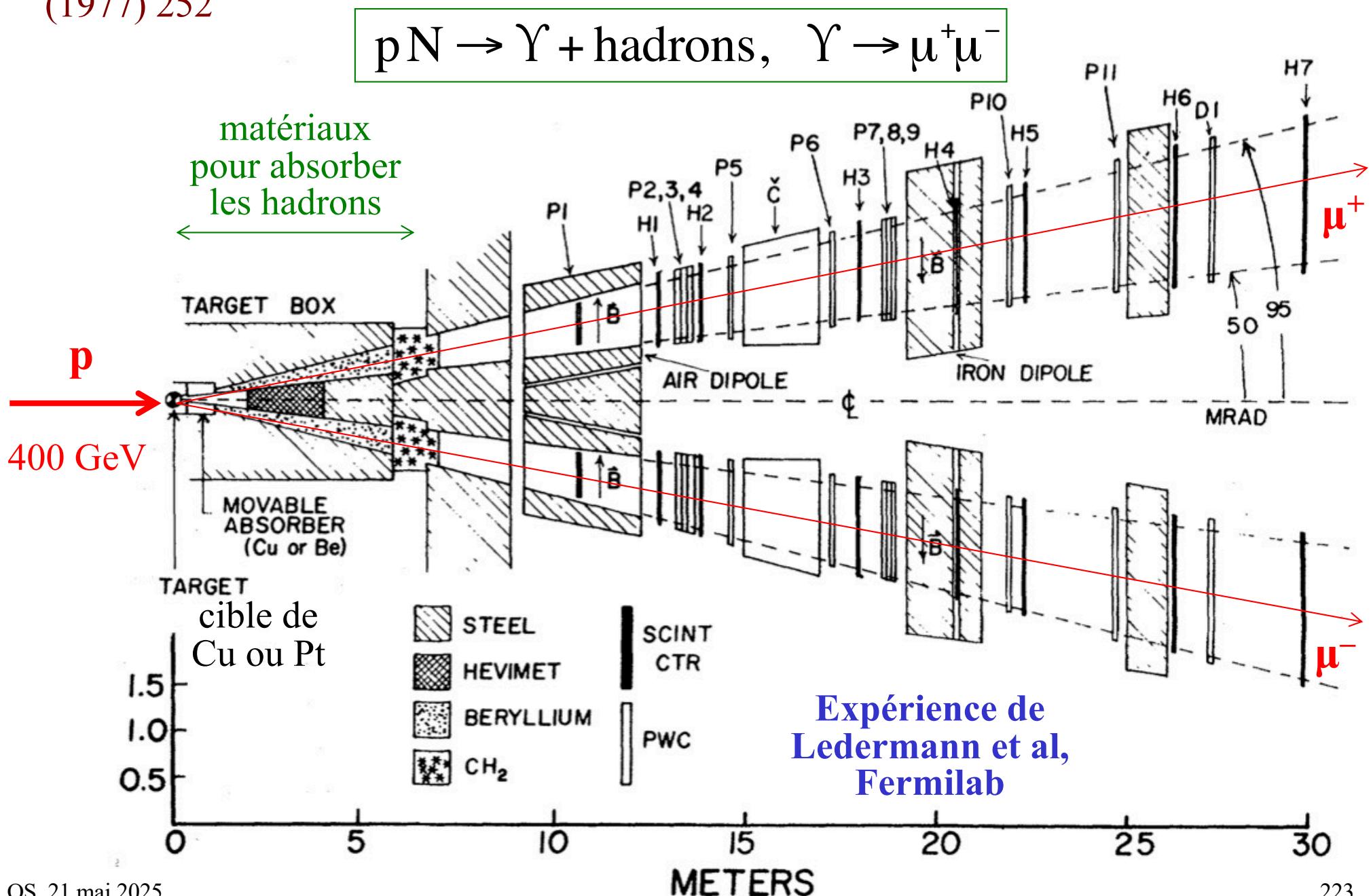
- Perl et al. à SLAC
 - étude de la production de J/ψ et $\psi(2S)$ au collisionneur e^+e^- SPEAR
 - observation
$$e^+e^- \rightarrow e^+\mu^- \text{ ou } e^-\mu^+$$
sans hadron ou photon dans l'état final,
mais seulement pour $\sqrt{s} > 3.56 \text{ GeV}$ (effet de seuil)
 - confirmation en 1976 par la collaboration PLUTO à DESY
- Interprétation des événements $e\mu$
 - $\tau = \text{nouveau type de lepton chargé}$
 - $\nu_\tau = \text{neutrino associé}$
 - $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow \text{très massif}$
 - $\tau_\tau = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$

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

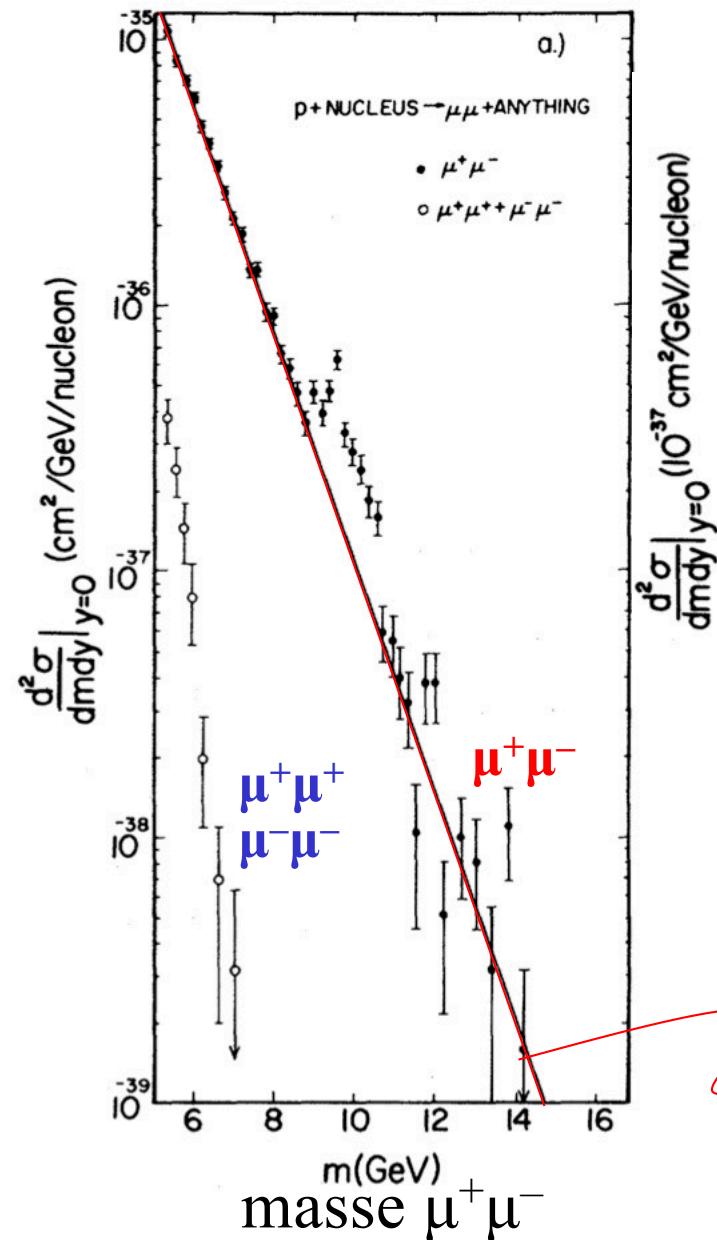
```
graph LR; A[e+e-] --> B[tau+tau-]; B --> C[mu- nu_mu bar nu_tau]; B --> D[e+ nu_e bar nu_tau]
```

[s'il y a 6 leptons, pourquoi pas 6 quarks ?]

Découverte γ

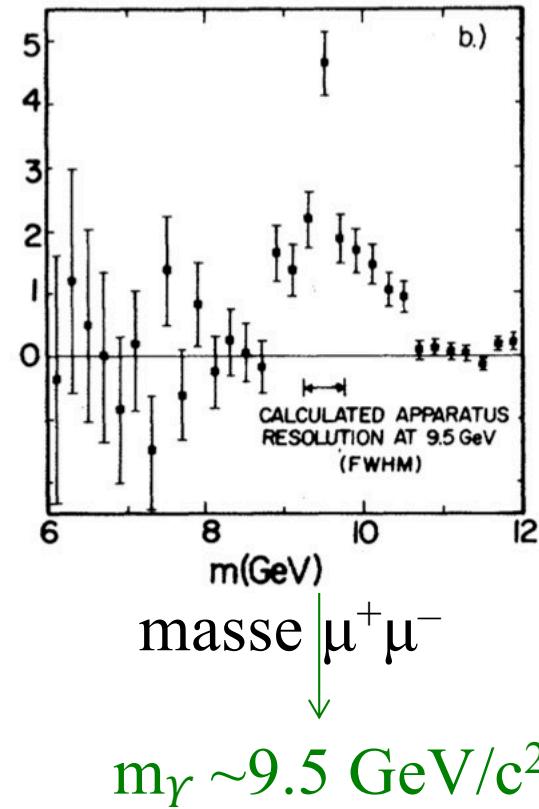


S.W. Herb et al.,
Phys. Rev. Lett. 39
(1977) 252



Méson γ

$\mu^+\mu^-$ – fit

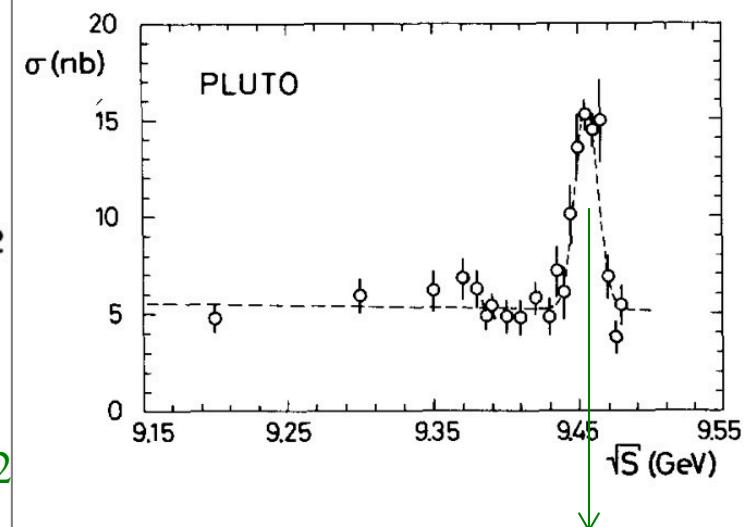


$m_\gamma \sim 9.5 \text{ GeV}/c^2$

fit

C. Berger et al.,
Phys. Lett. B 76
(1978) 243

- 1978: confirmation au collisionneur e^+e^- DORIS (à DESY) par la collab. PLUTO



$m_\gamma = 9.46 \pm 0.01 \text{ GeV}/c^2$

+ observation γ' ($=\gamma(2S)$)

$m_{\gamma'} = 10.02 \pm 0.02 \text{ GeV}/c^2$

Beauté

- Nouvelle saveur de quark: b = “bottom” ou “beauty”
 - $\Upsilon=\Upsilon(1S)$, $\Upsilon'=\Upsilon(2S)$: mésons $b\bar{b}$
 - le quark b est très massif ($\sim 5 \text{ GeV}/c^2$)
- La beauté, comme l’étrangeté et le charme, est stable vis-à-vis de l’interaction forte, mais se désintègre par interaction faible
 - durée de vie moyenne: $\tau \sim 10^{-12} \text{ s}$
- Nouveau nombre quantique, la beauté (q_b)
- Nouvelle loi de conservation de la beauté, violée par l’interaction faible, et respectée par les autres interactions

Exemples de hadrons “beaux”:

$$\left. \begin{array}{l} B^- = \bar{u}b \\ \bar{B}^0 = \bar{d}\bar{b} \\ B^0 = d\bar{b} \\ B^+ = u\bar{b} \\ B_s^0 = s\bar{b} \\ B_c^+ = c\bar{b} \\ \Lambda_b^0 = udb \\ \Xi_b^0 = usb \\ \Xi_b^- = dsb \\ \Omega_b^- = ssb \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{mésons} \\ \text{baryons} \end{array}$$

Génération	Saveur du quark	Q	B	I_3	$S=q_s$	q_c	q_b	q_t
1ère	d = down	-1/3	+1/3	-1/2	0	0	0	0
	u = up	+2/3	+1/3	+1/2	0	0	0	0
2ème	s = strange	-1/3	+1/3	0	-1	0	0	0
	c = charm	+2/3	+1/3	0	0	+1	0	0
3ème	b = bottom	-1/3	+1/3	0	0	0	-1	0
	t = top	+2/3	+1/3	0	0	0	0	+1

Génération	Saveur du lepton	Q	L_e	L_μ	L_τ
1ère	e = électron	-1	+1	0	0
	ν_e	0	+1	0	0
2ème	$\mu = \text{muon}$	-1	0	+1	0
	ν_μ	0	0	+1	0
3ème	$\tau = \text{tau}$	-1	0	0	+1
	ν_τ	0	0	0	+1

Pour les quarks et les hadrons:

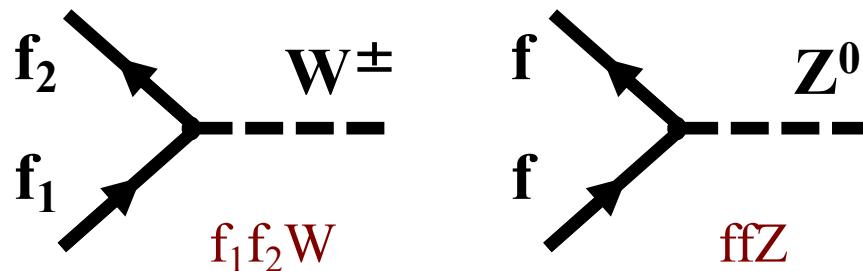
$$Q = I_3 + \frac{B + q_s + q_c + q_b + q_t}{2}$$

Toutes les charges changent de signe pour un antifermion

Direction flèche fermion dans un diagramme de Feynman:
– flux de B pour les quarks
– flux de L pour les leptons

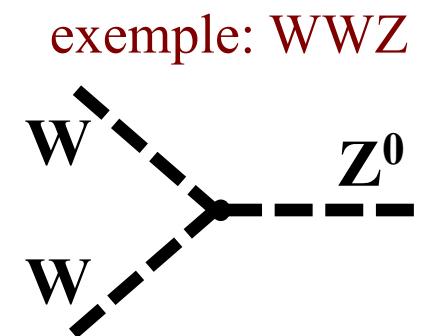
Interaction faible

- Tous les fermions y sont sensibles
- Couplages (vertex) entre fermions (f) et bosons:
- Couplages (vertex) entre bosons uniquement:

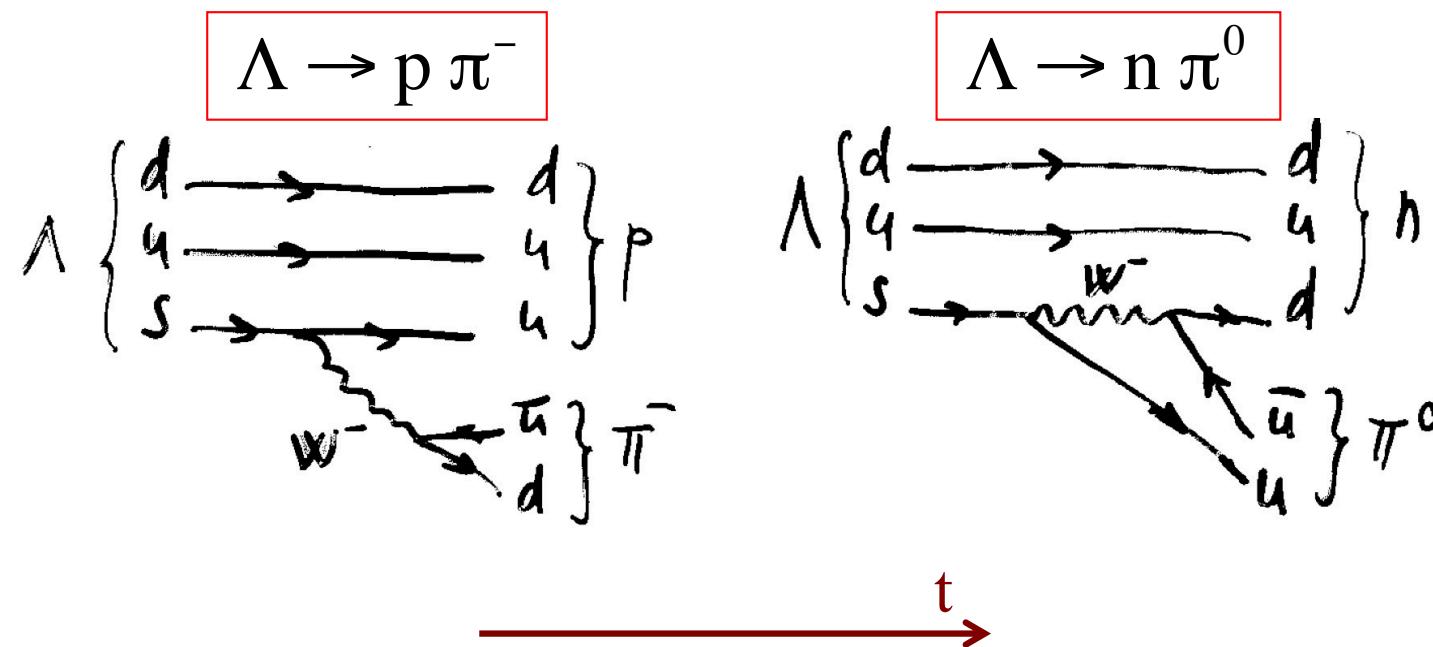
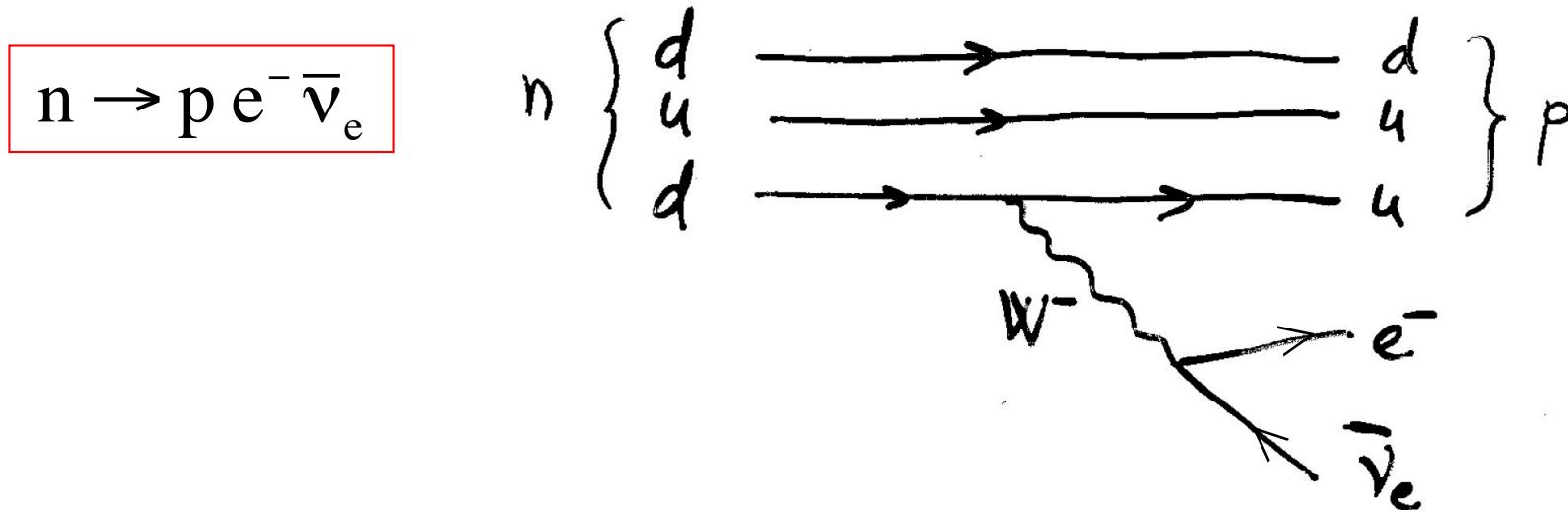


- Lois de conservation respectées à chaque vertex $f_1 f_2 W$ ou $f_1 f_2 Z$
 - Q, B, L_e, L_μ, L_τ
 - couleur (si f_1 et f_2 sont des quarks)
 - saveur, seulement si « courant neutre » (Z)
- Note:
 - les saveurs de f_1 et f_2 sont différentes si « courant chargé » (W)

WW γ
WWZ
WWWW
WWZZ
WWZ γ
WW $\gamma\gamma$



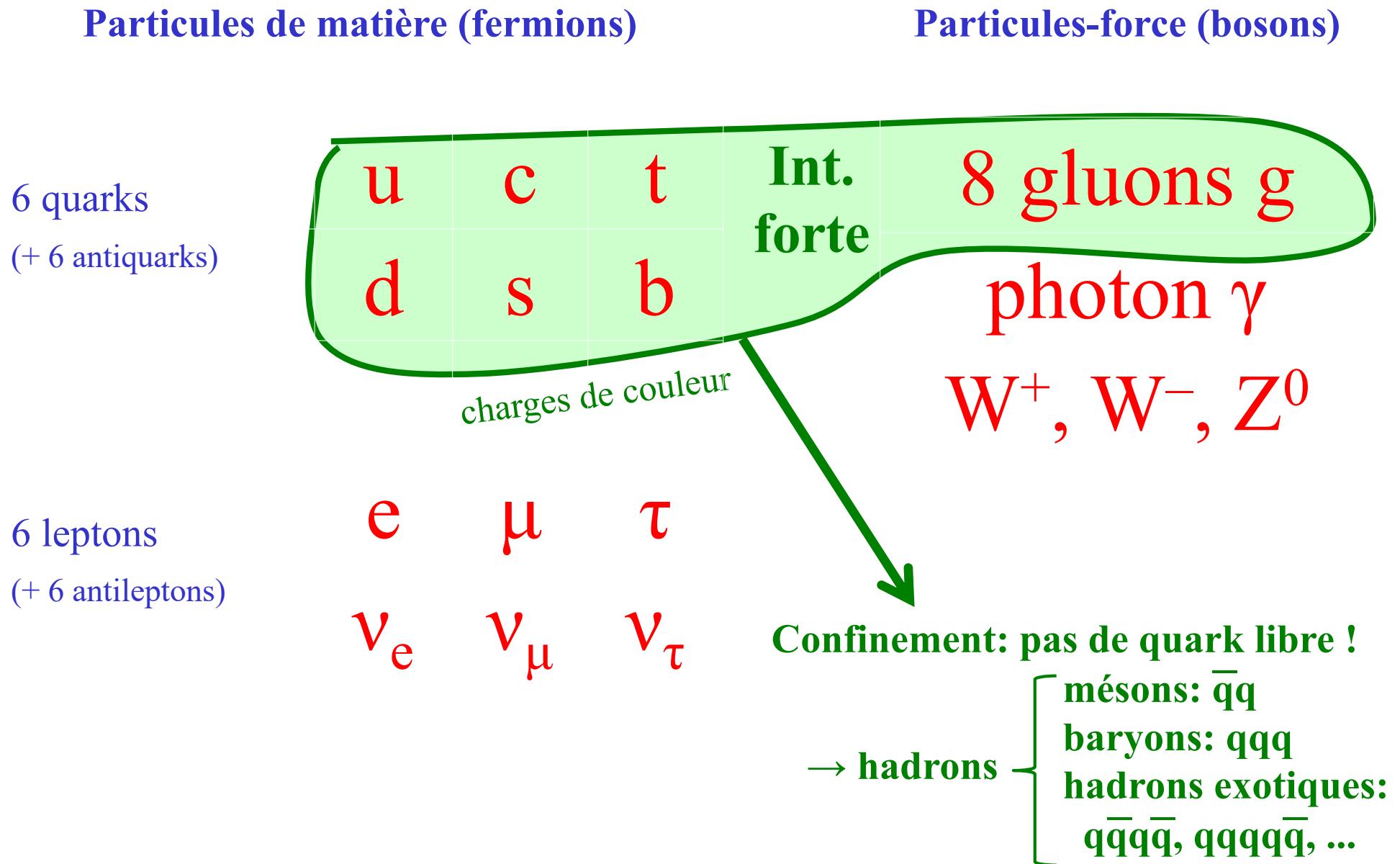
Exemples: interaction faible



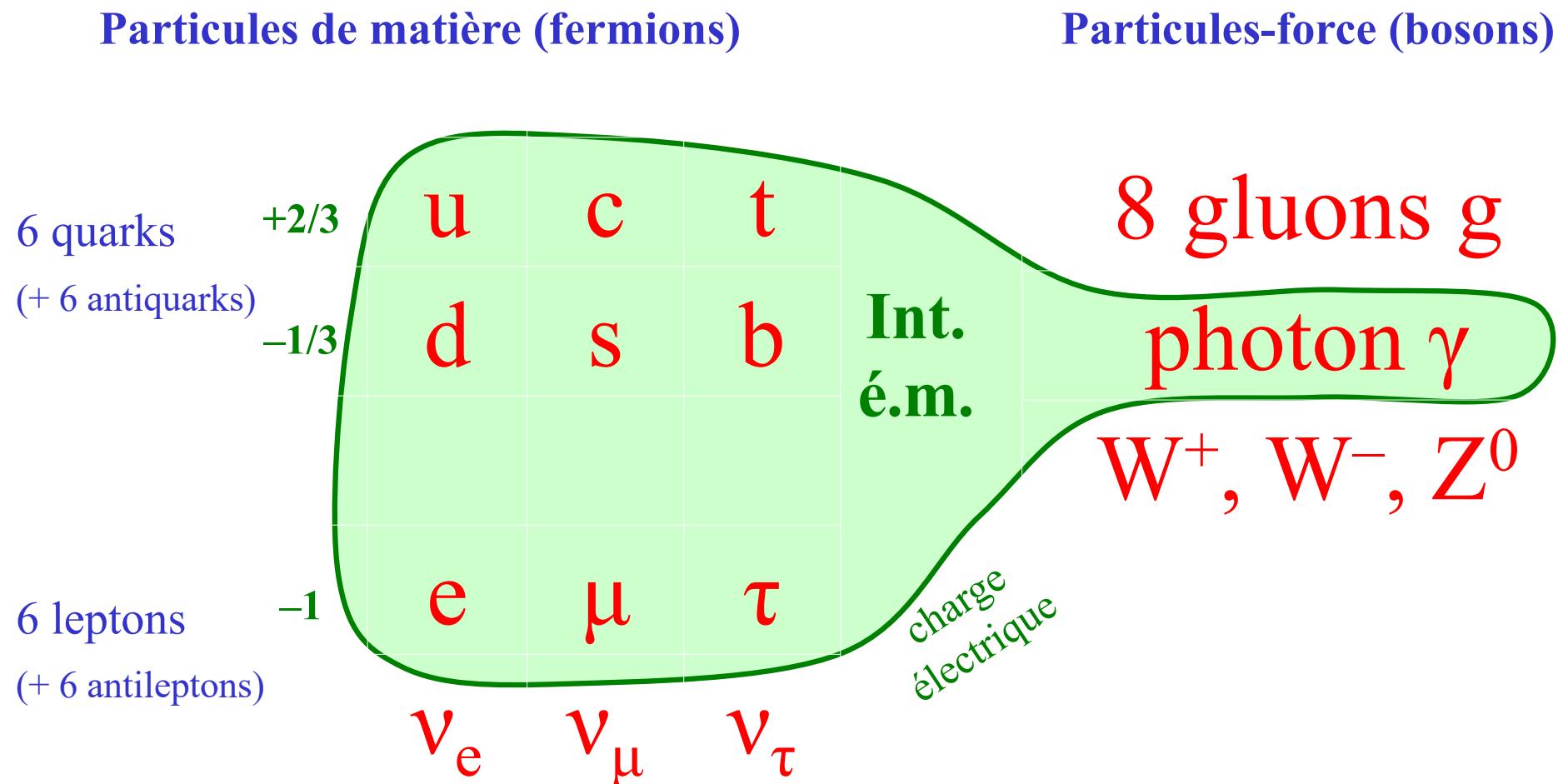
Modèle standard des particules

Particules de matière (fermions)	Particules-force (bosons)
6 quarks (+ 6 antiquarks)	u c t d s b
6 leptons (+ 6 antileptons)	e μ τ ν_e ν_μ ν_τ
	 3 « générations » de quarks et de leptons

Modèle standard des particules



Modèle standard des particules



Modèle standard des particules

