

Chapitre 8: Interactions forte et faible

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

OS, 21 mai 2025

203

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

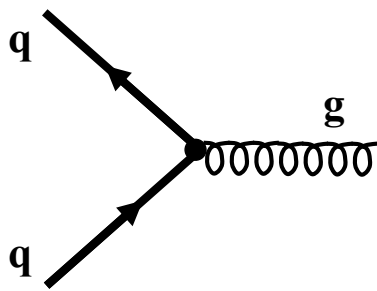
- Chaque quark porte une des trois couleurs
- Chaque antiquarks pour une des trois anticouleurs
- Chaque gluon porte une couleur et une anticouleur
 - il existe 8 combinaisons non-incolores → 8 gluons

OS, 21 mai 2025

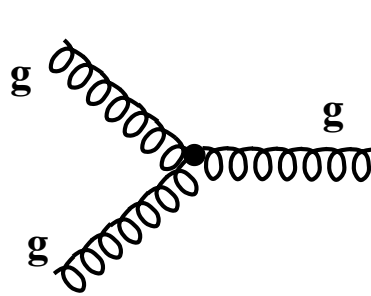
204

Diagrammes de Feynman en QCD

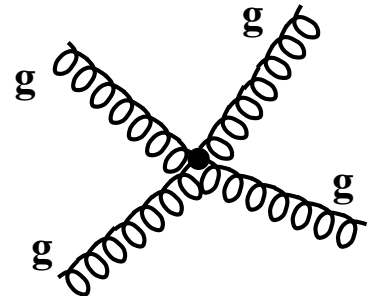
- 3 processus élémentaires:



couplage quark-gluon

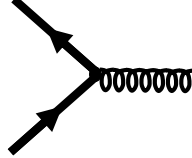


auto-couplage du gluon

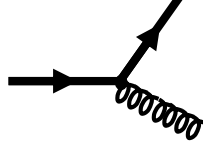


- La flèche du quark représente le flux du nombre baryonique $+1/3$

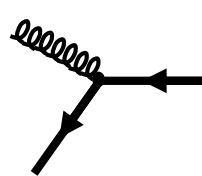
annihilation
quark-antiquark



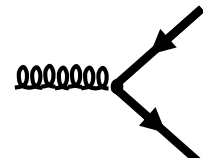
quark émettant
un gluon



antiquark absorbant
un gluon



création paire
quark-antiquark

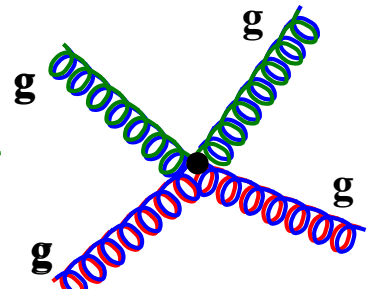
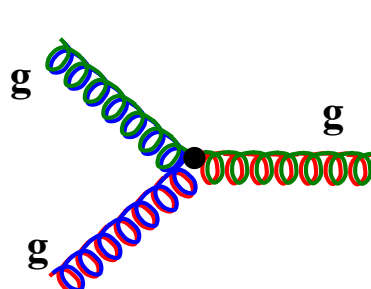
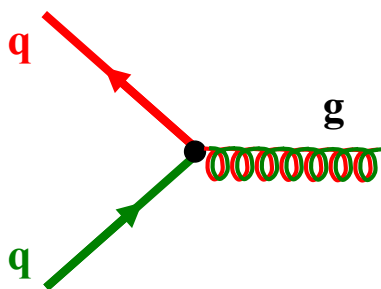


OS, 21 mai 2025

205

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

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

OS, 21 mai 2025

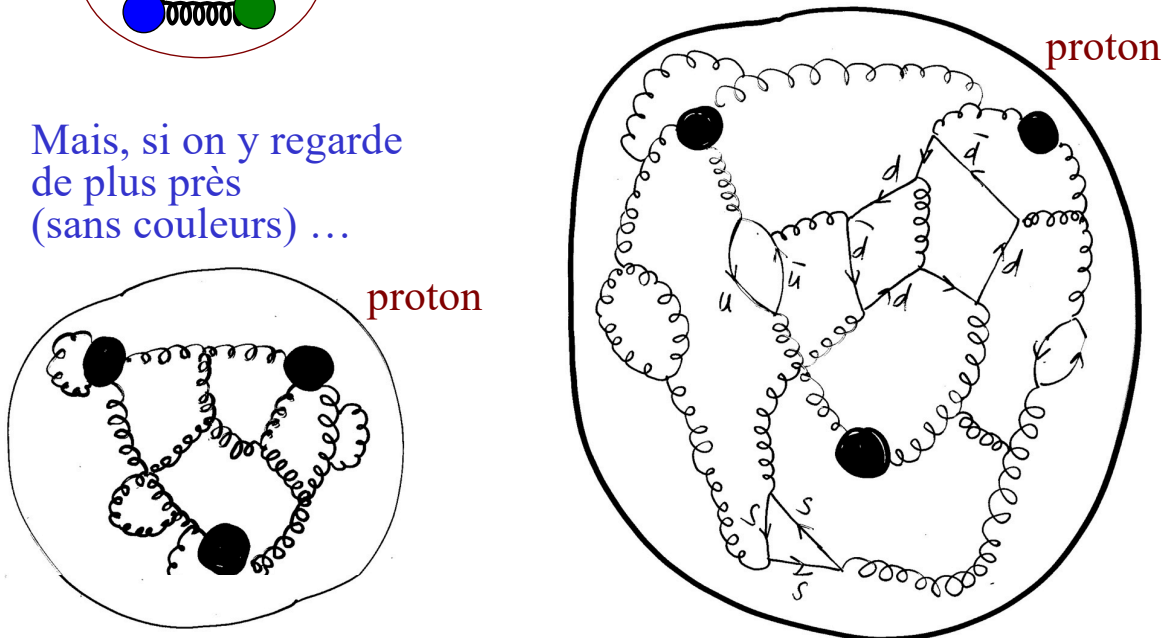
206

Hadrons

- Naïvement:



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

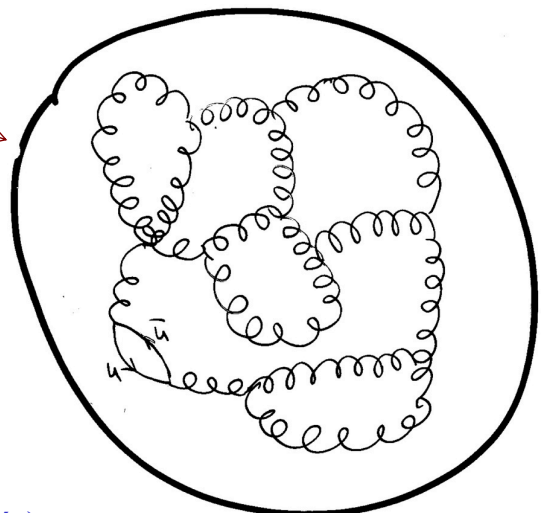


OS, 21 mai 2025

207

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

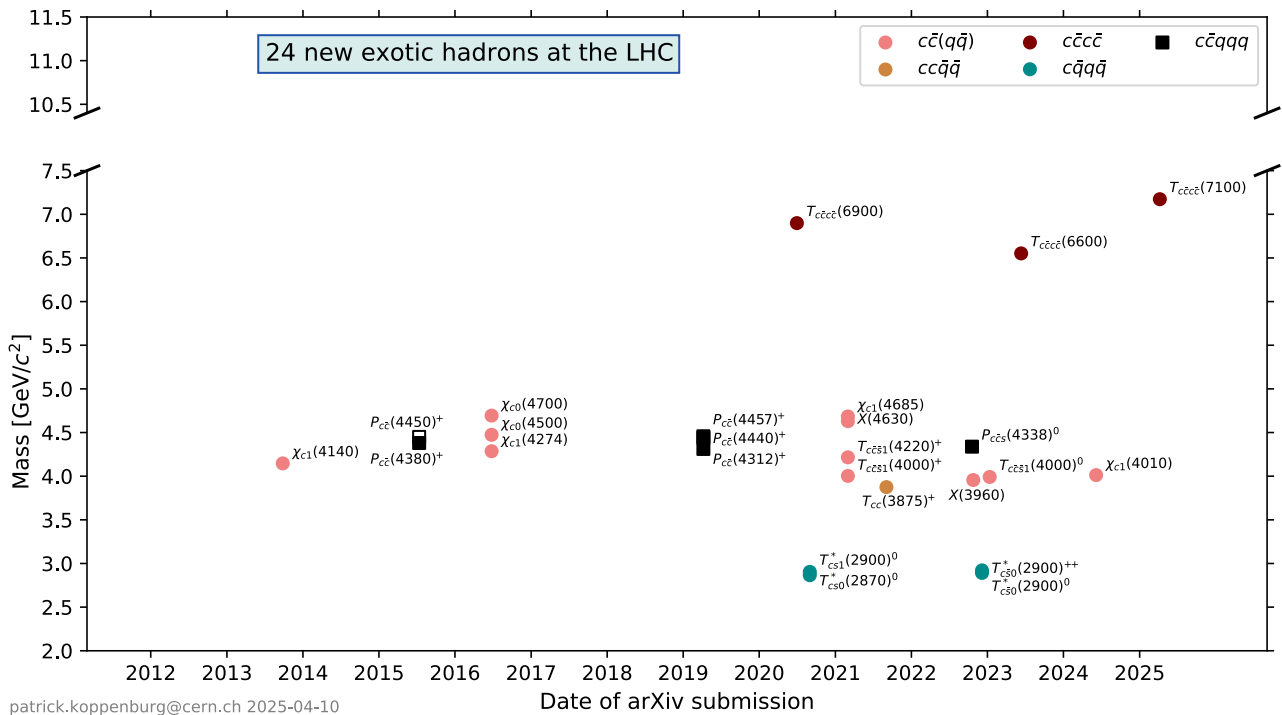


... mais toujours incolores !

OS, 21 mai 2025

208

Hadrons “exotiques”

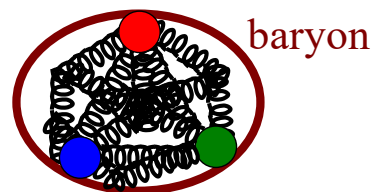
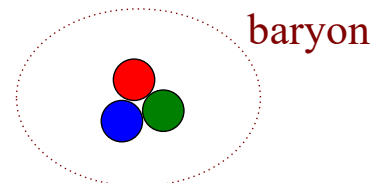


OS, 21 mai 2025

209

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 !



1) nucléon



2) on essaie d'arracher un quark



3) ça casse !



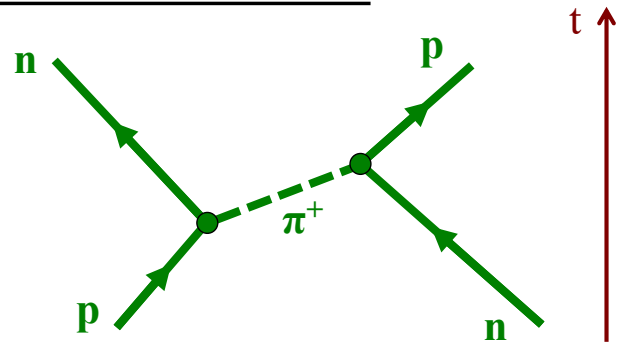
4) l'énergie fournie a créé de la masse (paire quark-antiquark): on se retrouve avec un nucléon et un pion

OS, 21 mai 2025

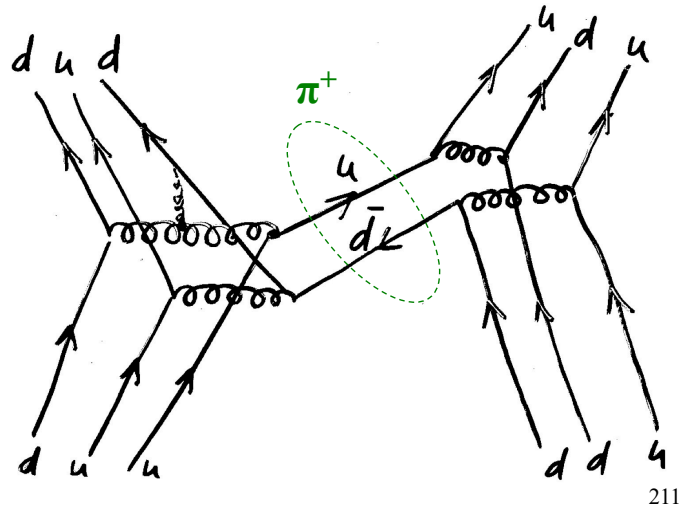
210

Forces fortes entre hadrons

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



- Cette interaction résulte des forces de couleur !

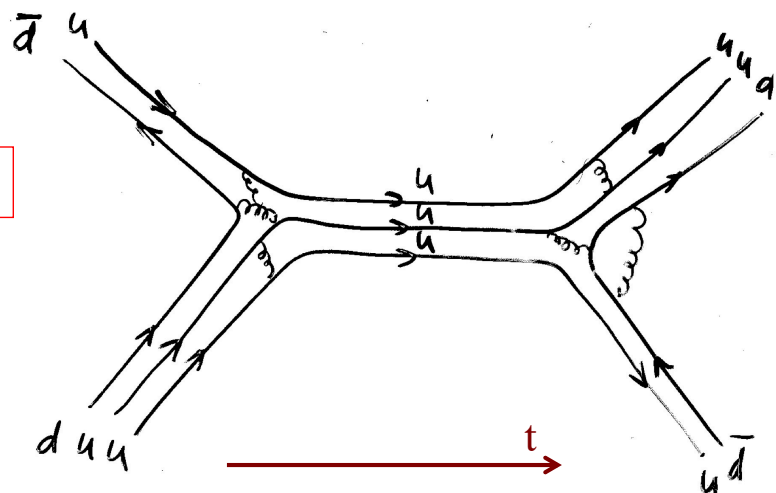


OS, 21 mai 2025

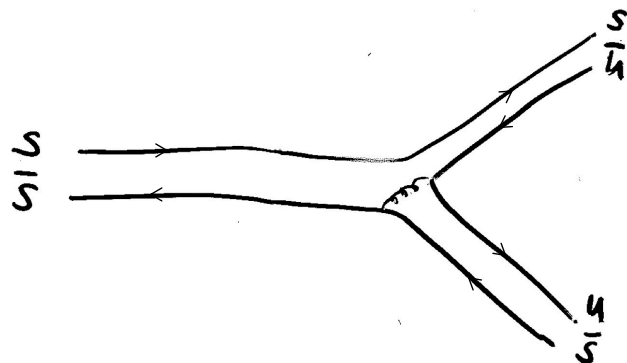
211

Exemples: interaction forte

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



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



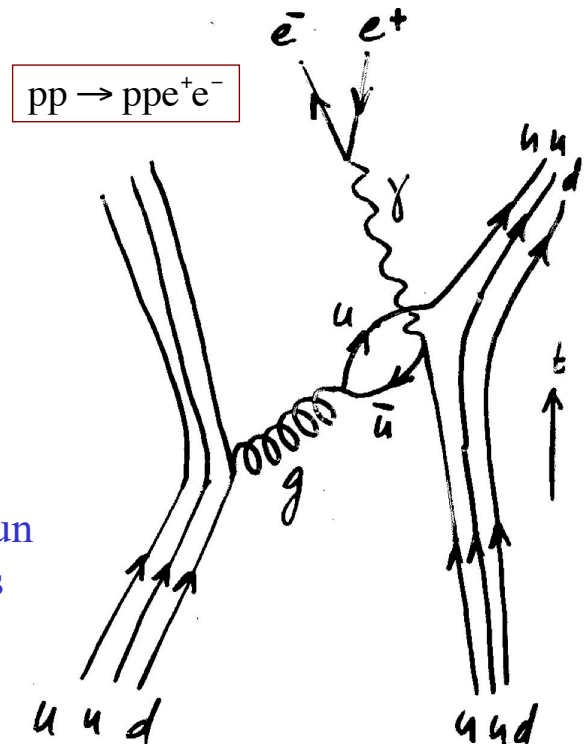
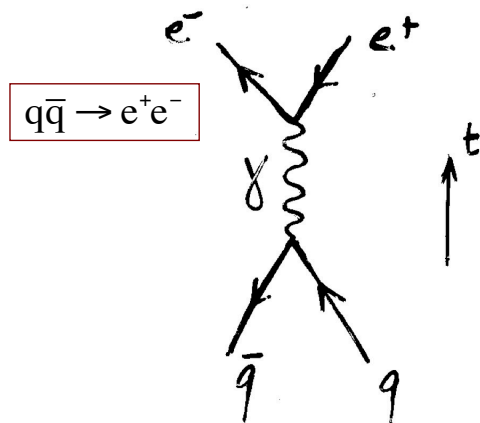
OS, 21 mai 2025

212

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

OS, 21 mai 2025

213

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 $m_J \sim 3.1 \text{ GeV}/c^2$

$$p + \text{Be} \rightarrow J + \text{hadrons}$$

$$J \rightarrow e^+e^-$$

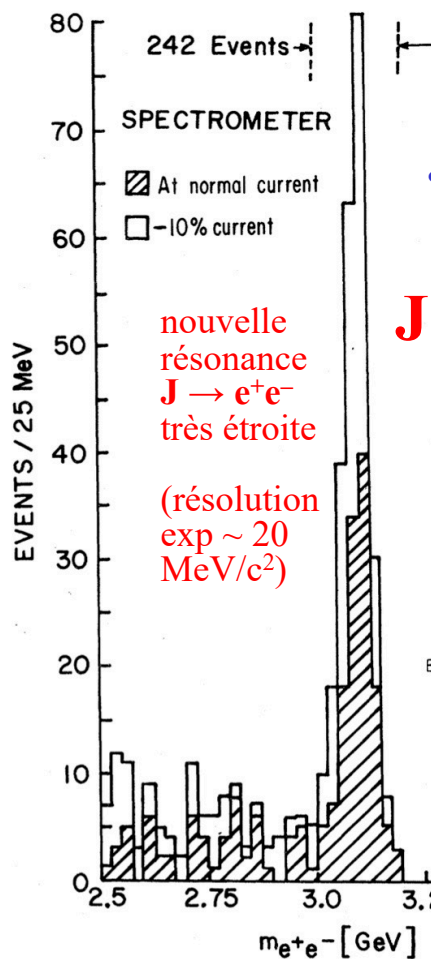
- Richter et al. à SLAC
 - expérience au collisionneur e^+e^- SPEAR
 - découverte d'une résonance très étroite, baptisée ψ , avec $\Gamma_\psi < 1.3 \text{ MeV}$ et $m_\psi = 3.105 \pm 0.003 \text{ GeV}/c^2$

$$e^+e^- \rightarrow \psi \rightarrow \begin{cases} e^+e^- \\ \mu^+\mu^- \\ \text{hadrons} \end{cases}$$

- 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

OS, 21 mai 2025

214

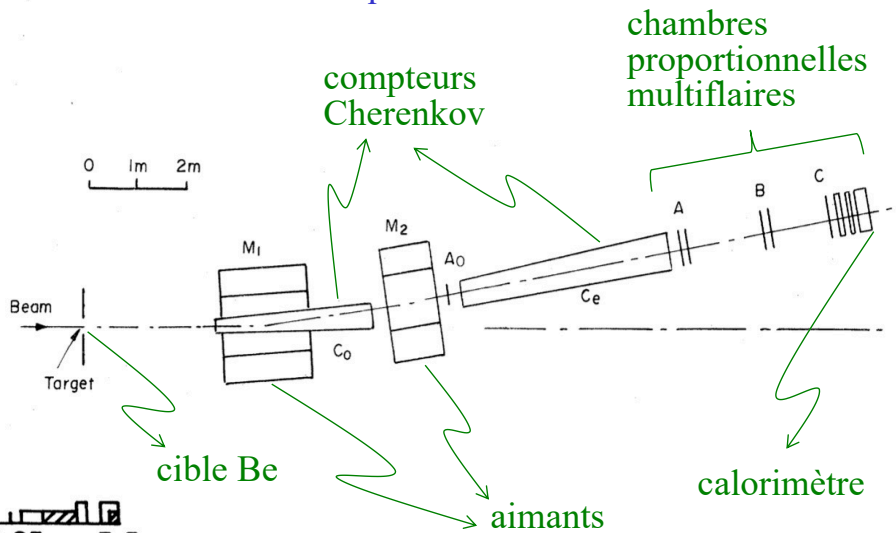


Découverte J

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

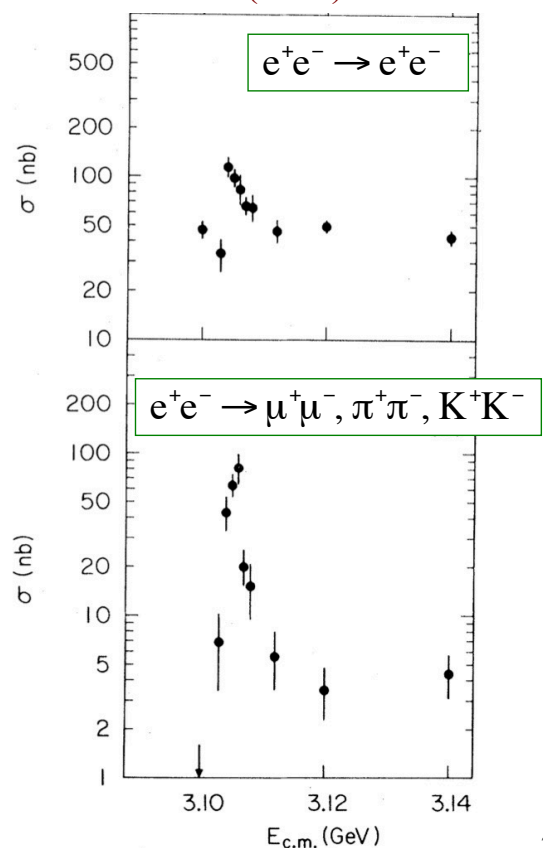
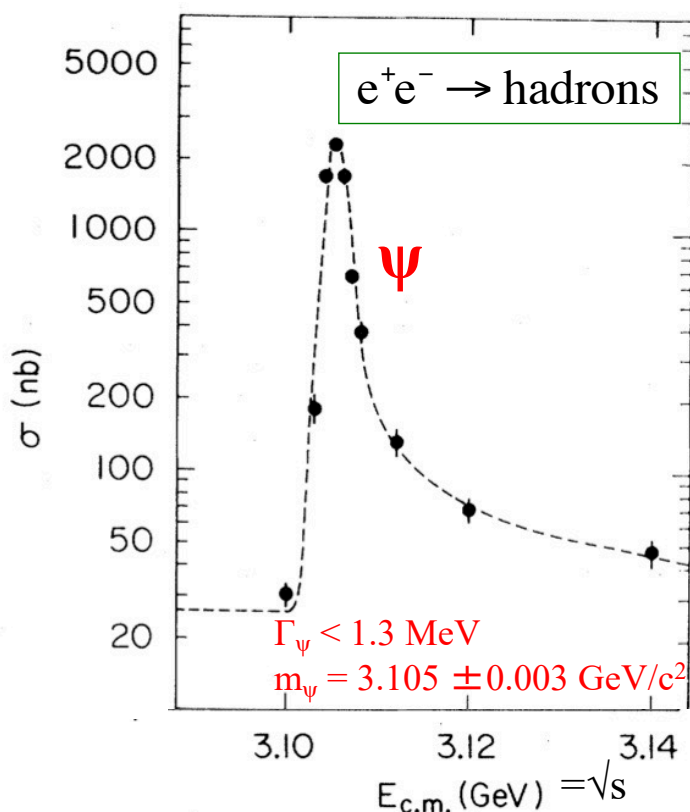
- Un des deux bras du spectromètre e^+e^- pour étudier les collisions $p(28 \text{ GeV}) + \text{Be}$
 - identification des électrons
 - mesure de leurs quantités de mouvement

J



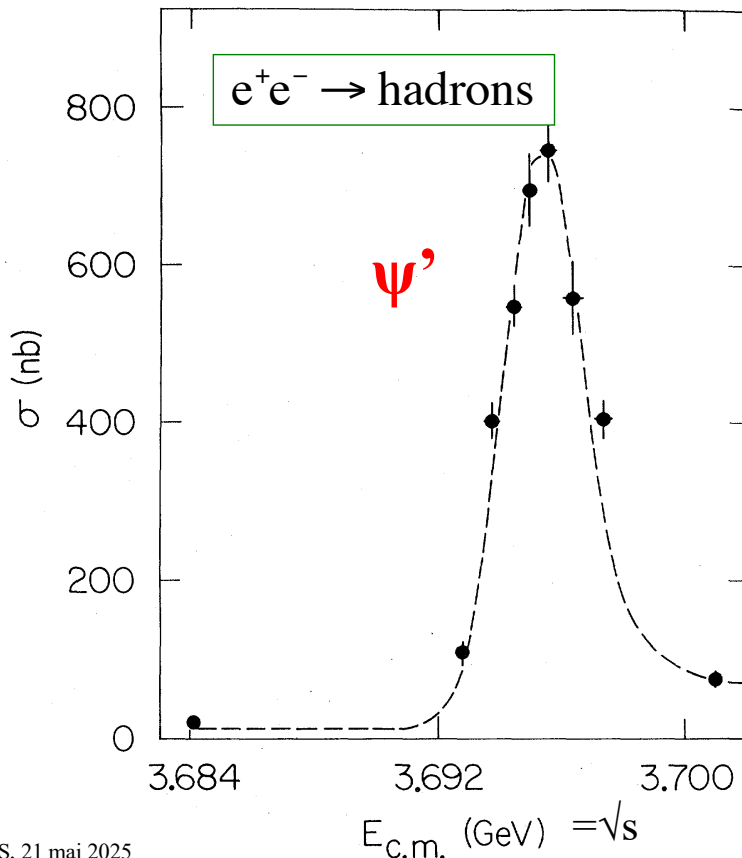
Découverte ψ

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



Découverte ψ'

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



$\Gamma_{\psi'} < 2.7 \text{ MeV}$
 $m_{\psi'} = 3.695 \pm 0.004 \text{ GeV}/c^2$

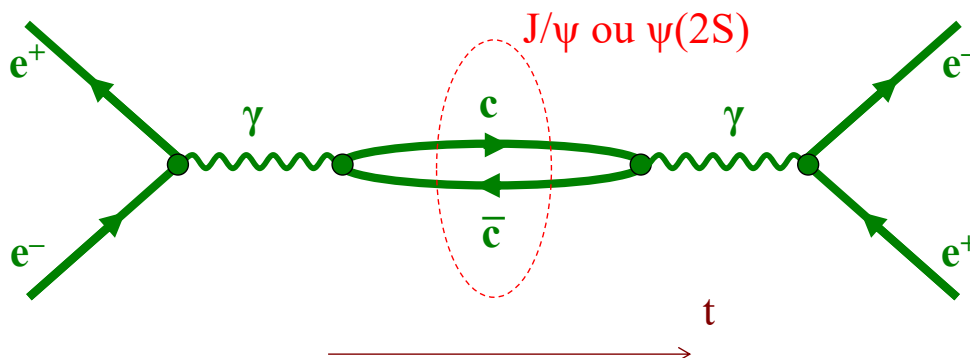
J/ψ rebaptisé $J/\psi(1S)$
 ψ' rebaptisé $\psi(2S)$

OS, 21 mai 2025

217

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 Björken 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 $K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

OS, 21 mai 2025

218

Charme

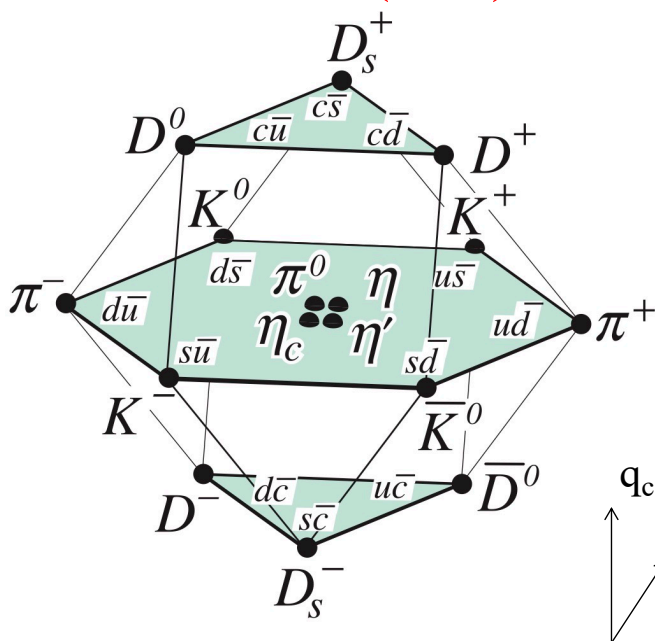
- 1975–1977: découvertes de baryons et mésons contenant un quark c (ou antiquark \bar{c})
- Le charme, comme l'étrangeté, est stable vis-à-vis de l'interaction forte, mais se désintègre par interaction faible
 - “longue” durée de vie moyenne: $\tau \sim 10^{-13} - 10^{-12}$ s
- Nouveau nombre quantique,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

OS, 21 mai 2025

219

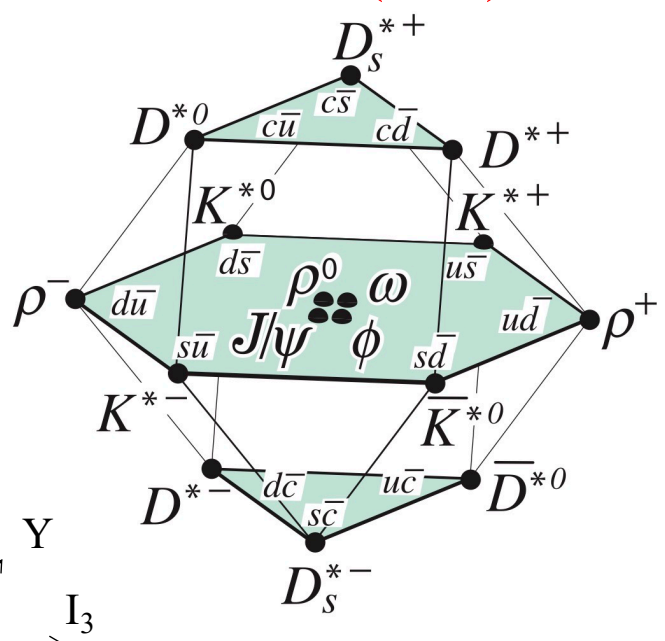
Multiplets de mésons de SU(4)

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



16 mésons pseudoscalaires

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



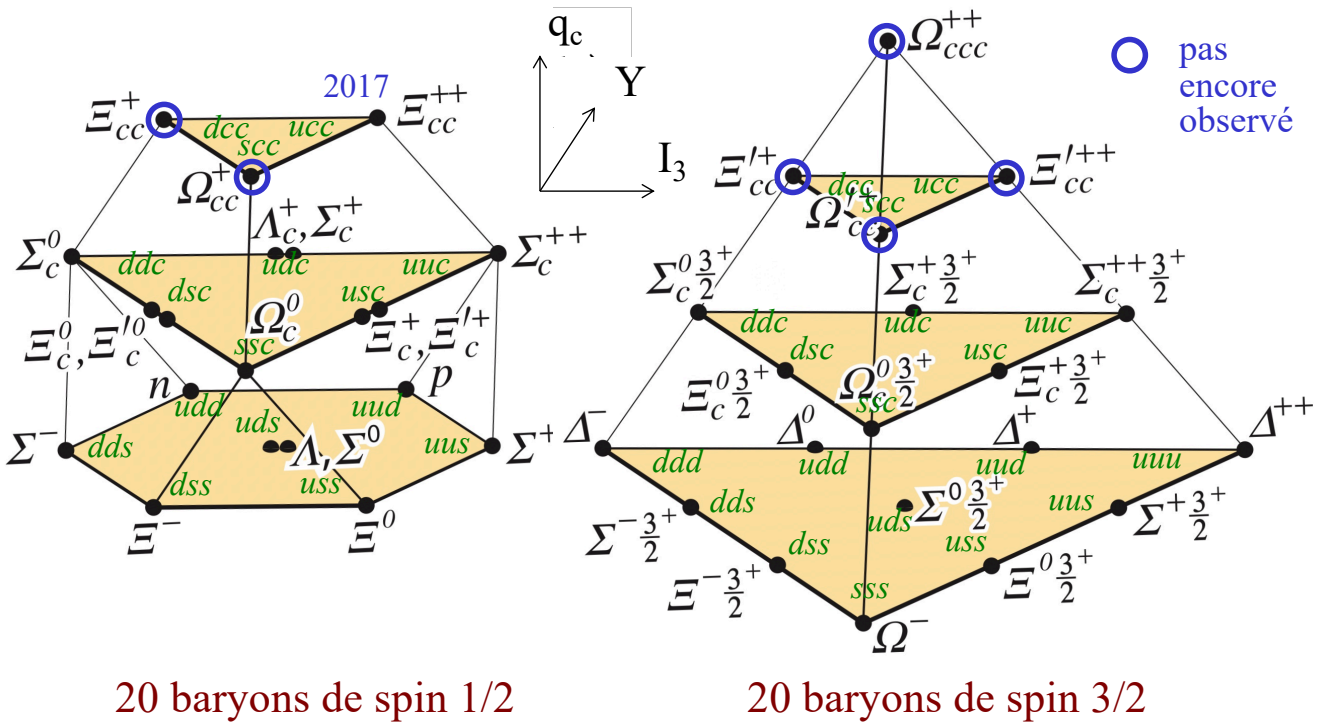
16 mésons vecteurs

OS, 21 mai 2025

220

Multiplets de baryons de SU(4)

$J^P = 1/2^+ \quad (\ell=0)$

$$\mathbf{J}^P = 3/2^+ \quad (\ell=0)$$


OS, 21 mai 2025

221

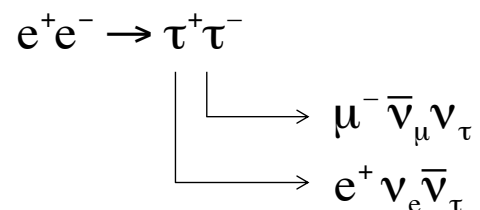
Découverte du lepton τ

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 $e^+e^- \rightarrow e^+\mu^-$ ou $e^-\mu^+$

sans hadron ou photon dans l'état final,
mais seulement pour $\sqrt{s} > 3.56$ GeV (effet de seuil)

- Interprétation des événements $e\mu$
 - τ = nouveau type de lepton chargé
 - ν_τ = neutrino associé
 - $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow$ très massif
 - $\tau_\tau = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$

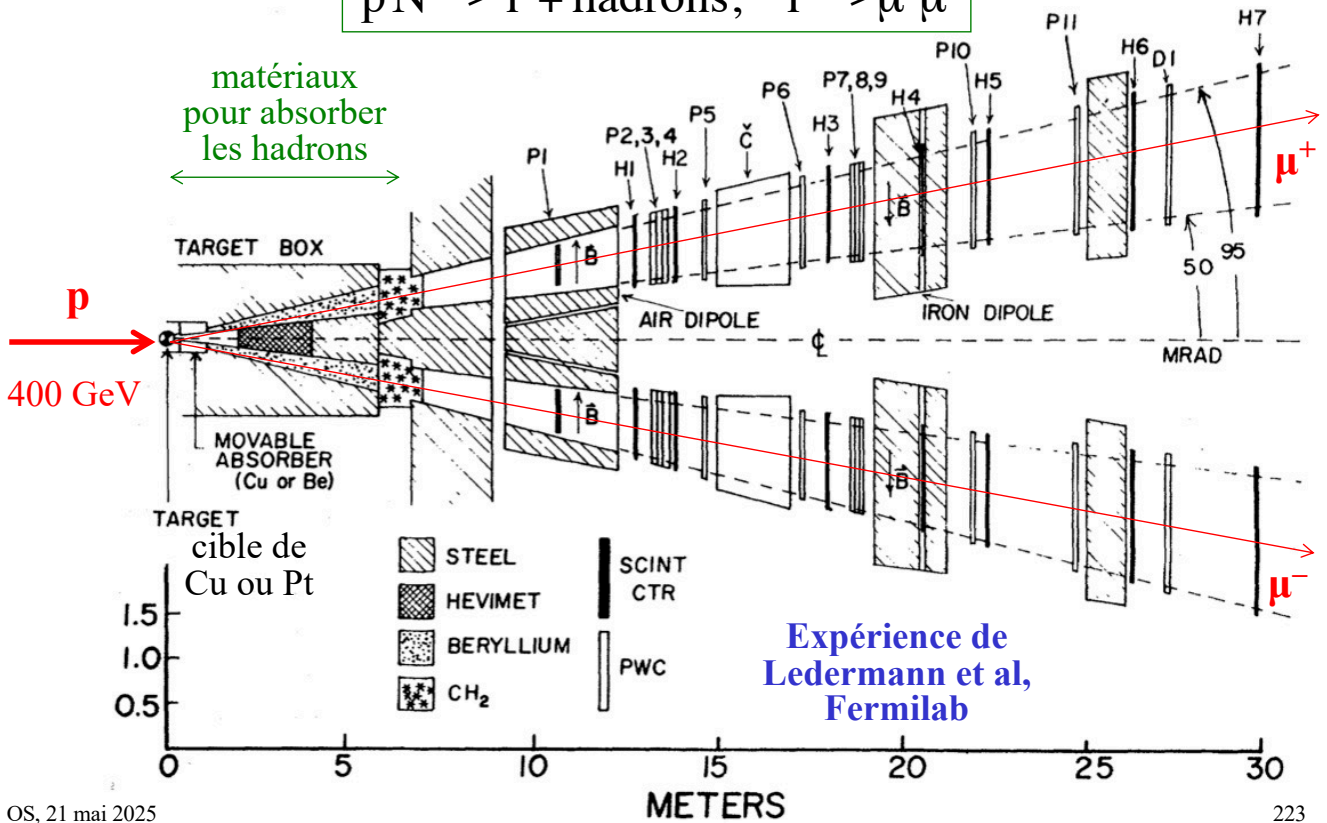


[s'il y a 6 leptons, pourquoi pas 6 quarks ?]

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

Découverte Υ

$$pN \rightarrow \Upsilon + \text{hadrons}, \quad \Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



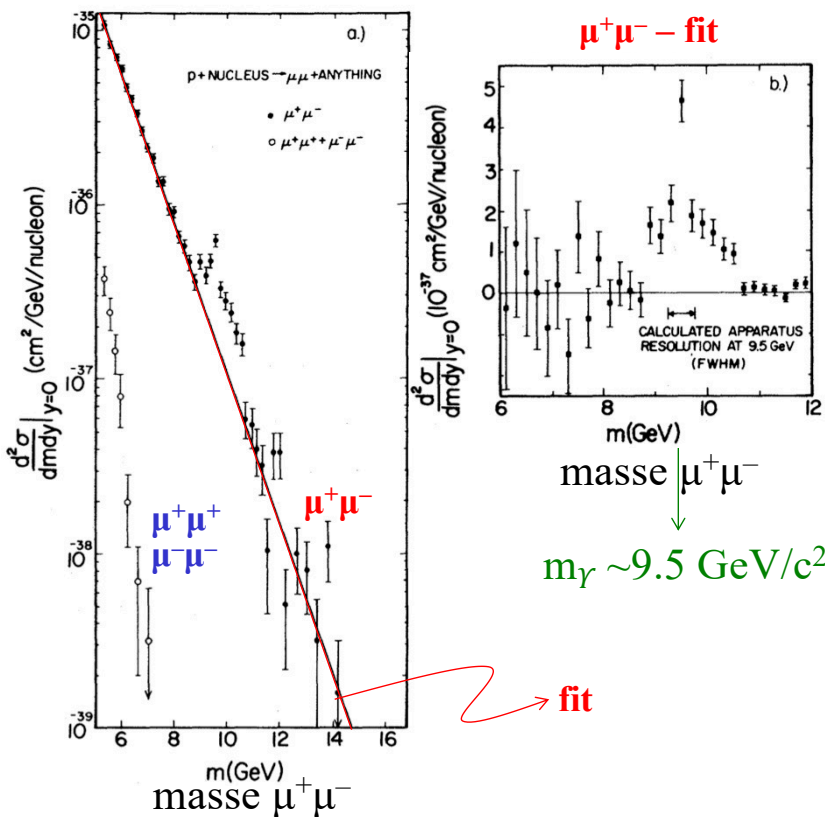
OS, 21 mai 2025

223

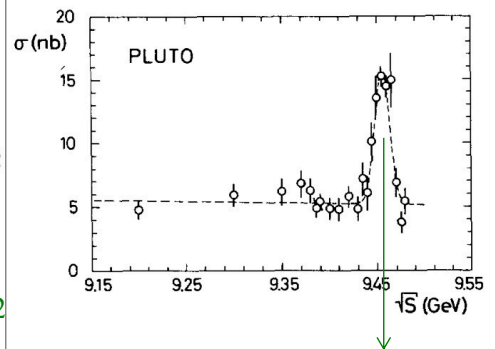
S.W. Herb et al.,
Phys. Rev. Lett. 39
(1977) 252

Méson Υ

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



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



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

+ observation Υ' ($=\Upsilon(2S)$)

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

OS, 21 mai 2025

224

Beauté

- Nouvelle saveur de quark: b = “bottom” ou “beauty”
 - $Y=Y(1S), Y'=Y(2S)$: mésons $b\bar{b}$
 - le quark b est très massif ($\sim 5 \text{ GeV}/c^2$)

Exemples de hadrons “beaux”:

$B^- = \bar{u}b$	} mésons
$\bar{B}^0 = \bar{d}b$	
$B^0 = d\bar{b}$	
$B^+ = u\bar{b}$	
$B_s^0 = s\bar{b}$	
$B_c^+ = c\bar{b}$	
$\Lambda_b^0 = udb$	} baryons
$\Xi_b^0 = usb$	
$\Xi_b^- = dsb$	
$\Omega_b^- = ssb$	

- 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

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	μ = muon	-1	0	+1	0
	ν_μ	0	0	+1	0
3ème	τ = tau	-1	0	0	+1
	ν_τ	0	0	0	+1

Pour les quarks et les hadrons:

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

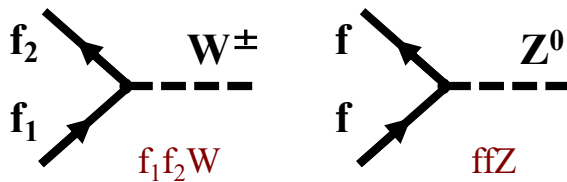
Toutes les charges changent de signe pour un antifermion

Direction flèche fermion dans un diagramme de Feynman:

- flux de B pour les quarks
- flux de L pour les leptons

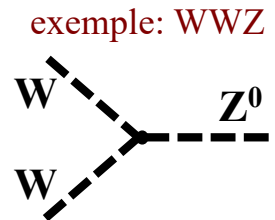
Interaction faible

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



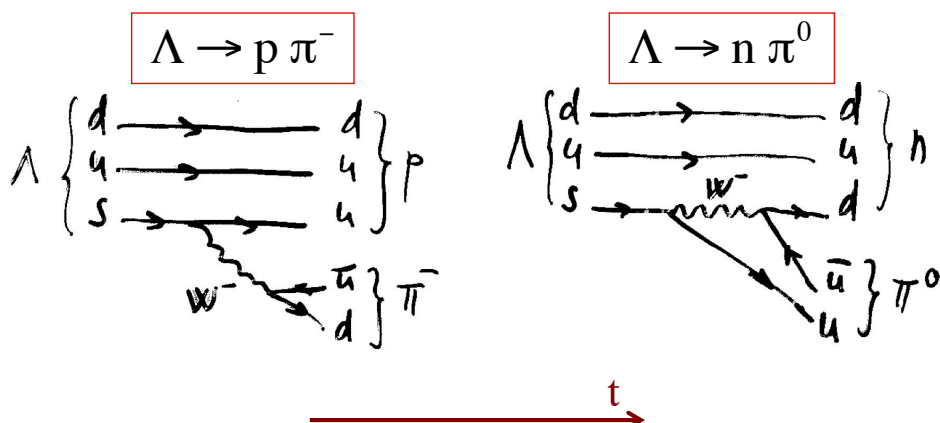
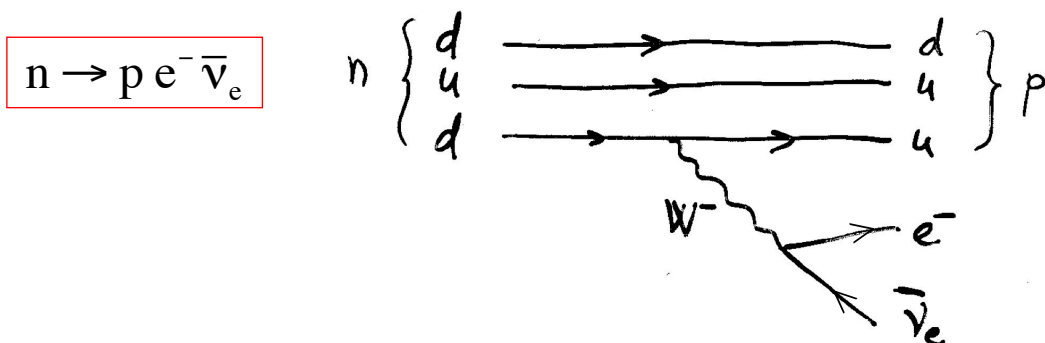
- Couplages (vertex)
entre bosons uniquement:

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



- 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)

Exemples: interaction faible



Modèle standard des particules

Particules de matière (fermions)

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

Particules-force (bosons)

8 gluons g

photon γ

W⁺, W⁻, Z⁰

Modèle standard des particules

Particules de matière (fermions)

6 quarks
(+ 6 antiquarks)

u c t
d s b

charges de couleur

6 leptons
(+ 6 antileptons)

e μ τ
ν_e ν_μ ν_τ

Particules-force (bosons)

8 gluons g

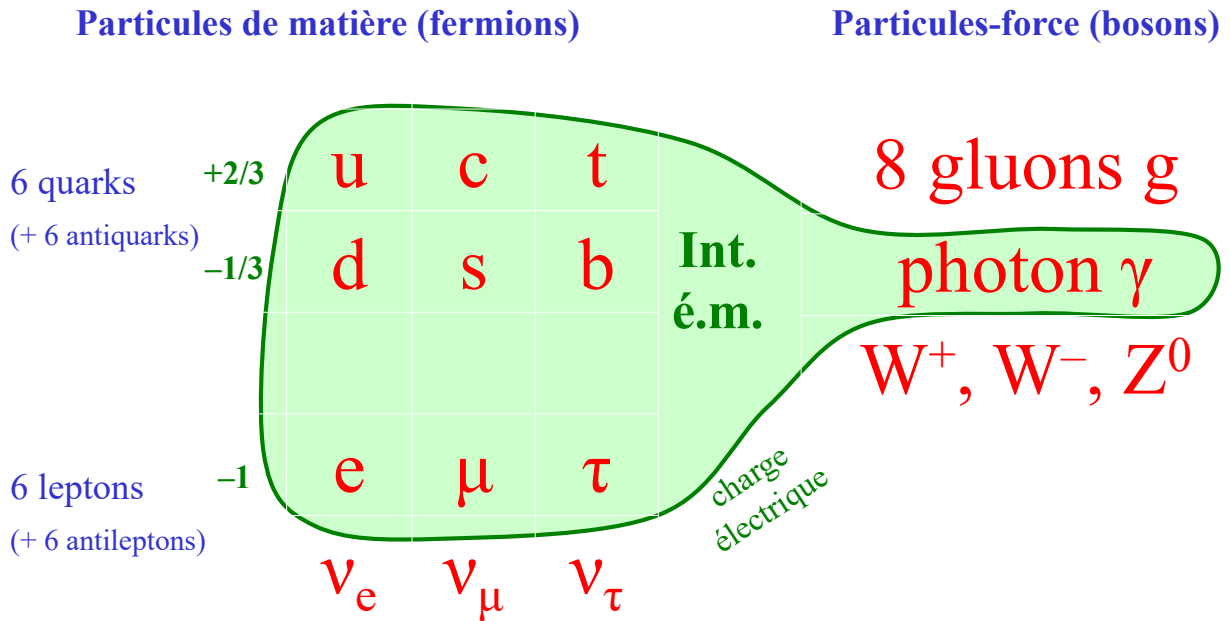
photon γ

W⁺, W⁻, Z⁰

Confinement: pas de quark libre !

→ hadrons {
mésons: q̄q
baryons: qqq
hadrons exotiques:
qq̄qq̄, qq̄qq̄q̄, ...

Modèle standard des particules



Modèle standard des particules

