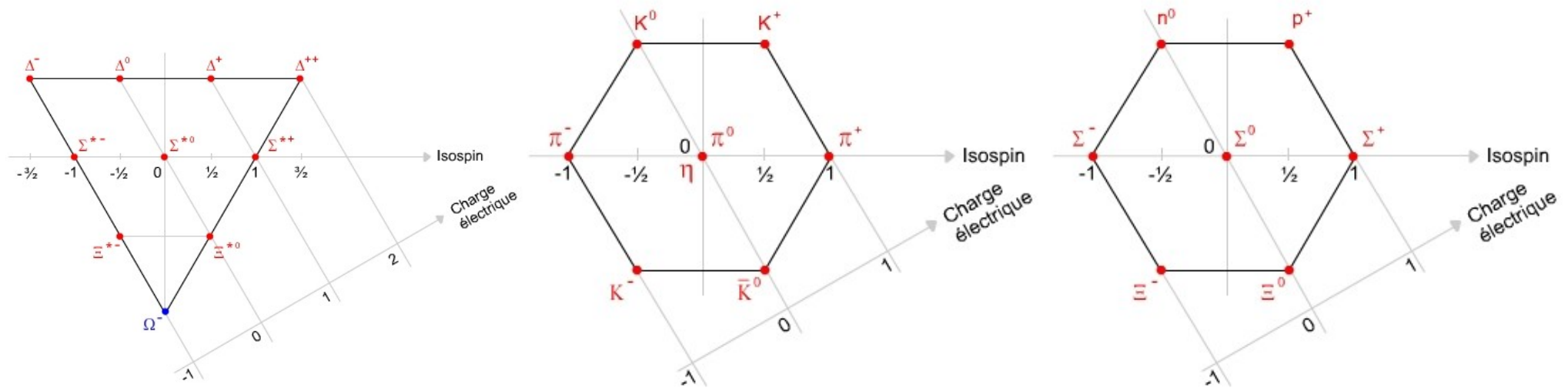


Particulologie



- Les assemblages de quarks

- ▶ l'interaction forte en action
- ▶ le bestiaire des hadrons
- ▶ la masse des hadrons
- ▶ désassemblage
- ▶ désintégration et temps de vie

Les particules élémentaires

- 3 familles de particules de matière

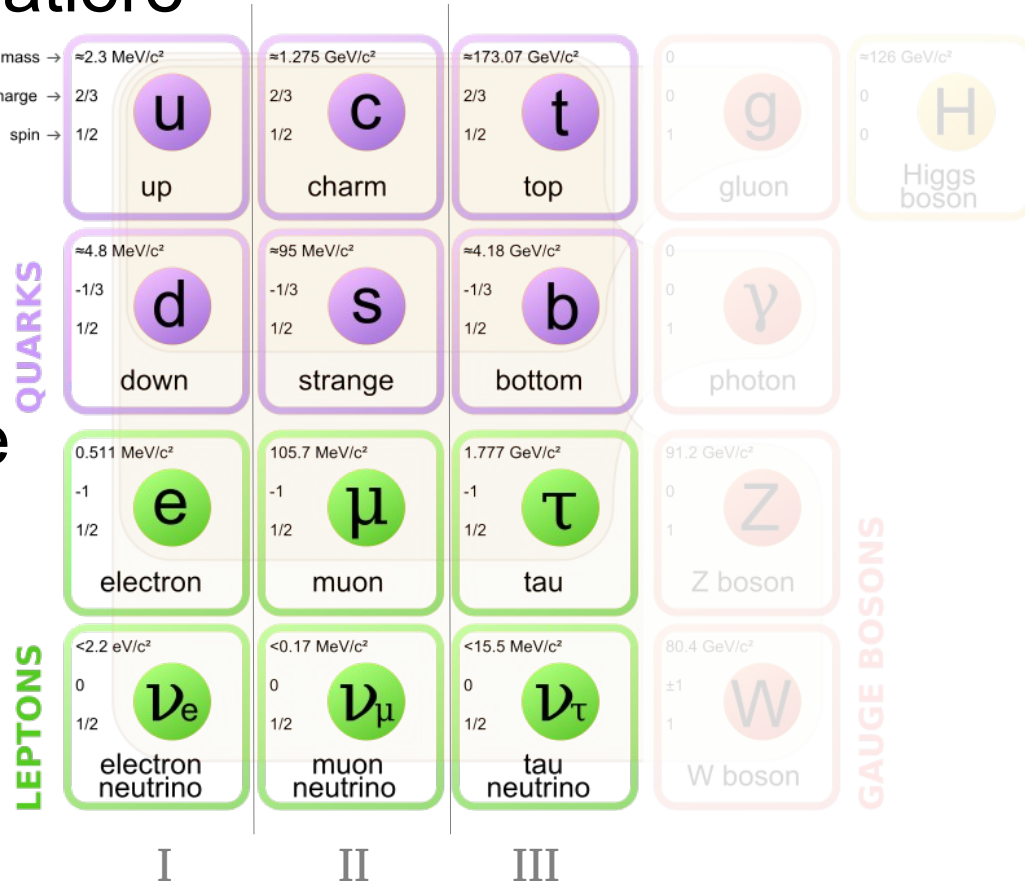
- dans chaque famille :
 - 2 quarks
 - sensibles à l'interaction forte
 - 2 leptons
 - *insensibles* à l'interaction forte

- + l'équivalent en anti-matière

=> 12 particules de matière

+ 12 particules d'anti-matière

forment l'ensemble de la matière visible



► simple !

Les particules élémentaires

- 3 familles de particules de matière

- dans chaque famille :

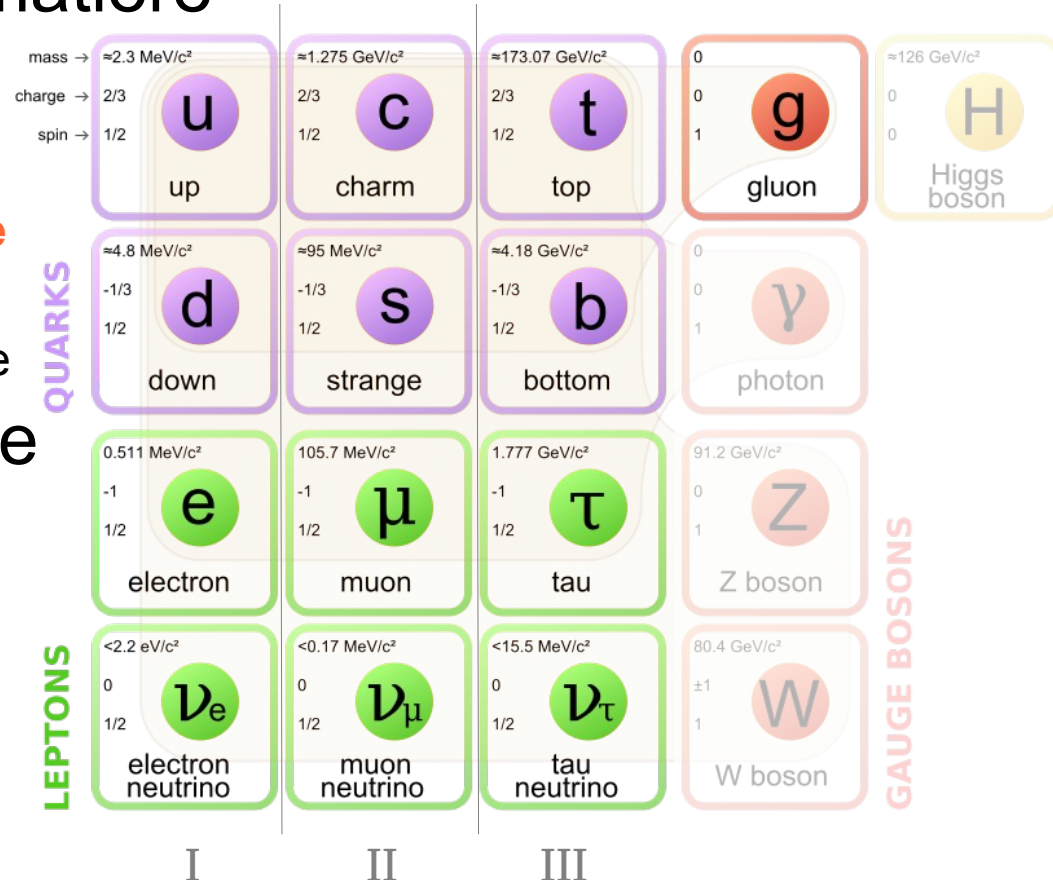
- 2 quarks
→ sensibles à l'**interaction forte**
 - 2 leptons
→ *insensibles* à l'interaction forte

- + l'équivalent en anti-matière

=> 12 particules de matière

+ 12 particules d'anti-matière

forment l'ensemble de la matière visible



► simple ?

► l'interaction forte entre les quarks complique la donne

Comparaison : force électromagnétique – force forte

- La force électromagnétique
 - ▶ charges électriques (2)
 - +1
 - - 1
 - ▶ s'exerce entre les charges
 - charges opposées s'attirent
 - charges identiques se repoussent
 - ▶ objet neutre (charge = 0)
 - insensible à la force électromagnétique
 - ▶ vecteur : le photon
 - ▶ intensité :
 - diminue avec la distance ($1/d^2$)
- La force forte
 - ▶ charges de « couleur » (6)
 - rouge, vert, bleu (3 charges « + »)
 - rouge, vert, bleu (3 charges « - »)
 - ▶ s'exerce entre les charges
 - toutes les charges de couleurs s'attirent
 - ▶ objet neutre (charge = BLANC)
 - rvb=rvb=rr=vv=bb=BLANC
 - insensible à la force forte
 - ▶ vecteur : les gluons
 - ▶ intensité :
 - augmente avec la distance !!

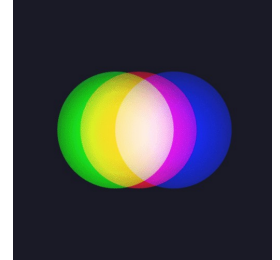
Quarks et interaction forte

- Leptons :
 - pas de charge de couleur
- Quarks
 - charge de couleur : r , g ou b
 - antiquarks → anticouleur : $\bar{r}$, $\bar{g}$ ou $\bar{b}$
 - les quarks sont attirés *fortement* entre eux
 - « le vide est opaque à la couleur »
 - on ne peut pas les observer isolément
 - ils s'assemblent pour former des objets blancs : les « *hadrons* »
 - on n'observe pas directement les quarks, on ne voit que des hadrons !

	mass → charge → spin →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs boson
QUARKS		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	0 0 1 Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS
		I	II	III		

Les assemblages de quarks

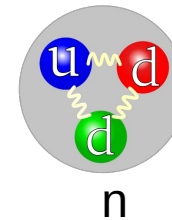
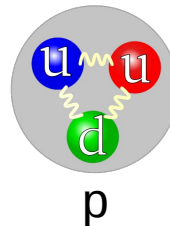
- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
 - $r\bar{v}b = \bar{r}v\bar{b} = \text{BLANC}$
 - $\bar{r}r = \bar{v}v = \bar{b}b = \text{BLANC}$
- Les quarks s'assemblent pour former des objets BLANCS : les hadrons
 - différents types de hadrons :



Les assemblages de quarks

- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
 - $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$: 3 couleurs ou 3 anti-couleurs $\rightarrow$ 3 quarks ou anti-quarks
 - $\overline{rr} = \overline{vv} = \overline{bb} = \text{BLANC}$
- Les quarks s'assemblent pour former des objets **BLANCS** : les hadrons
 - différents types de hadrons :
 - les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

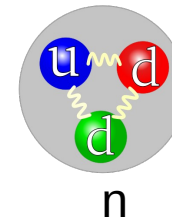
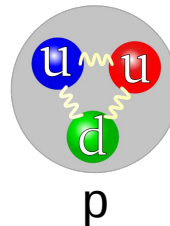
Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



Les assemblages de quarks

- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
 - $r\bar{v}b = \overline{r}\bar{v}\bar{b} = \text{BLANC}$: 3 couleurs ou 3 anti-couleurs $\rightarrow$ 3 quarks ou anti-quarks
 - $r\bar{r} = \overline{v}\bar{v} = \overline{b}\bar{b} = \text{BLANC}$: 1 couleur et son anti-couleur $\rightarrow$ quark + anti-quark
- Les quarks s'assemblent pour former des objets **BLANCS** : les hadrons
 - différents types de hadrons :
 - les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

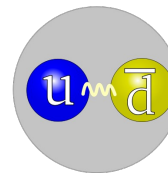
Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...

Un méson léger :
le *pion* chargé

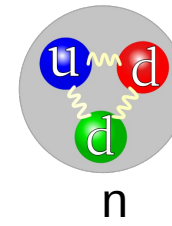
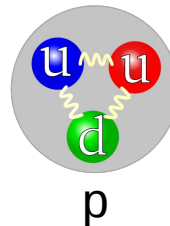
π^+



Les assemblages de quarks

- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
 - $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$: 3 couleurs ou 3 anti-couleurs $\rightarrow$ 3 quarks ou anti-quarks
 - $r\bar{r} = \overline{v\bar{v}} = \overline{b\bar{b}} = \text{BLANC}$: 1 couleur et son anti-couleur $\rightarrow$ quark + anti-quark
- Les quarks s'assemblent pour former des objets **BLANCS** : les hadrons
 - différents types de hadrons :
 - les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

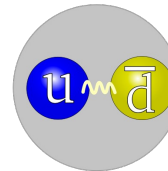
Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...

Un méson léger :
le *pion* chargé

π^+



► il existe également des états à 4 ou 5 quarks !

Les assemblages de quarks

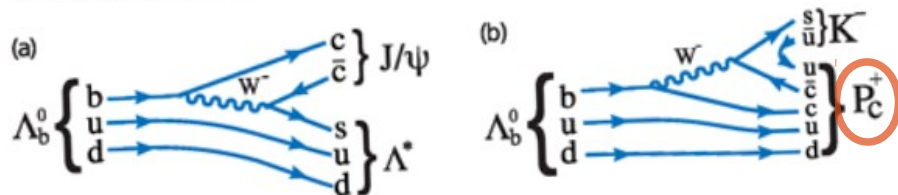
14 July 2015: Observation of particles composed of five quarks, pentaquark-charmonium states, seen in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ decays.



$$[m(P_c^+(4450)) = 4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5 \text{ MeV}, \Gamma = 39 \pm 5 \pm 19 \text{ MeV}]$$

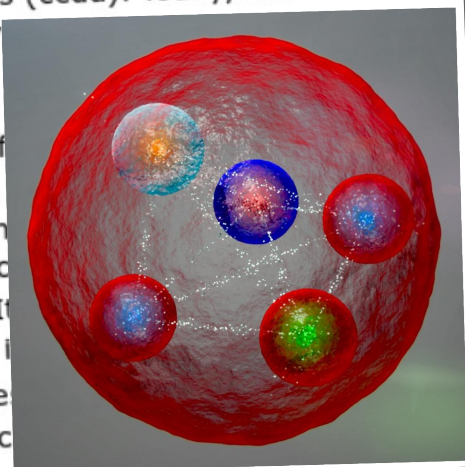
$$[m(P_c^+(4380)) = 4380 \pm 8 \pm 29 \text{ MeV}, \Gamma = 205 \pm 18 \pm 86 \text{ MeV}]$$

The LHCb collaboration submitted today a paper based on run 1 data which reports the observation of pentaquark-charmonium states decaying into a J/ψ meson and a proton p . In the traditional quark model, the strongly interacting particles (hadrons) are formed either from quark-antiquark pairs (mesons) or three quarks (baryons). Particles which cannot be classified within this scheme are called exotic hadrons. In his fundamental 1964 [paper](#), in which he proposed the quark model, [Gell-Mann](#) mentioned the possibility of adding a quark-antiquark pair to a minimal meson or baryon quark configuration. It has taken 50 years, however, for measurements to be performed that unambiguously demonstrate the existence of these exotics. In [April 2014](#) the LHCb collaboration published results of measurements which demonstrated that the $Z(4430)^+$ particle, first observed by the Belle collaboration, is composed of four quarks ($c\bar{c}d\bar{u}$). Today, the collaboration has announced the observation of a pentaquark, that is a hadron consisting of five



LHCb physicists have analyzed a $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ decays with only 5% of the data. The Λ_b^0 baryon is like a neutron, composed of two down quarks and one up quark in place of one of the down quarks. The decay proceeds by the diagram (a), which

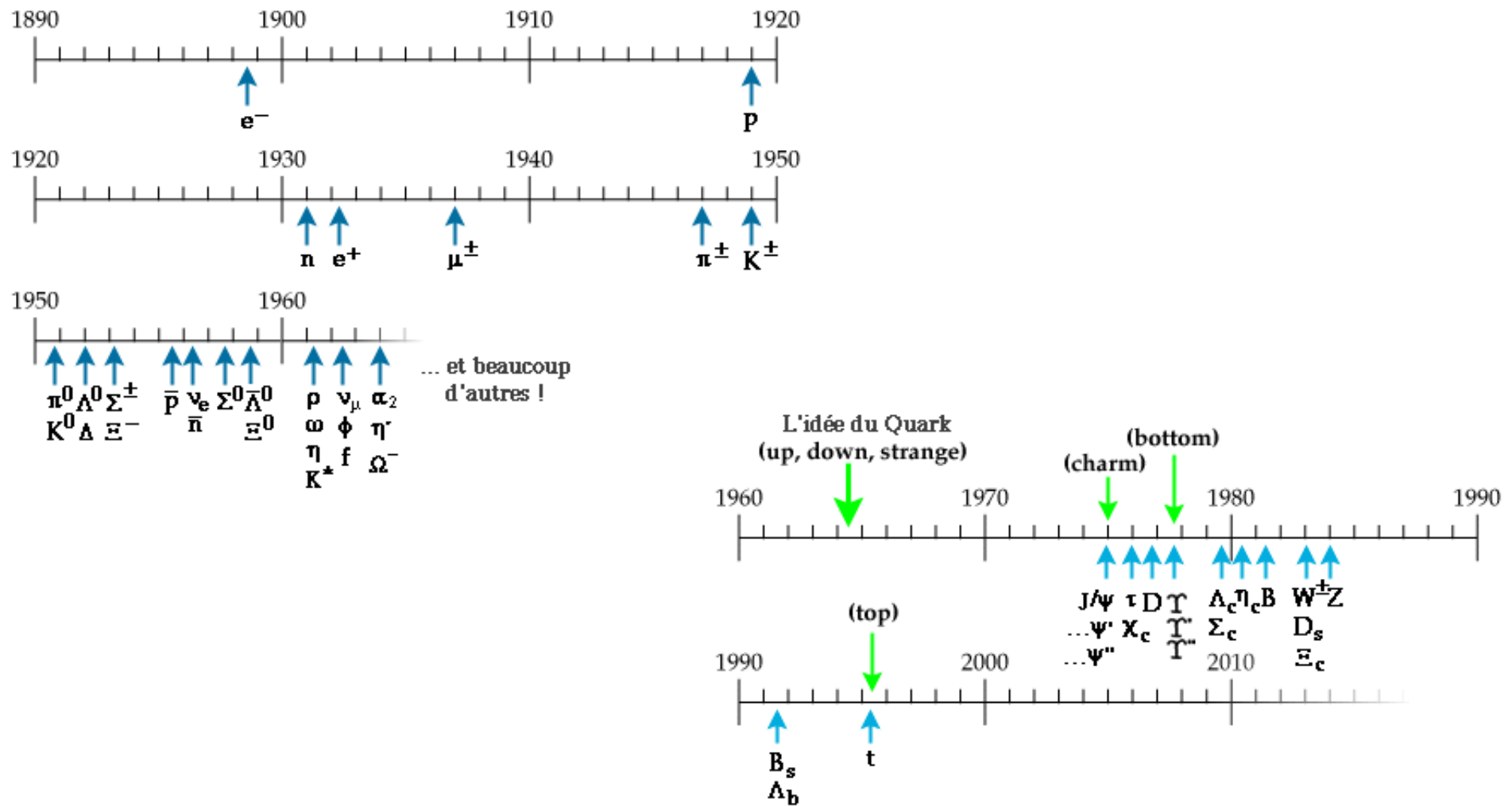
hadrons and is dominated by Λ^* resonances that decay in turn into a proton p and K^- meson. If the decay is dominated by pentaquark contributions, shown in diagram (b), that result in resonant structures (called P_c^+) at 4450 MeV in the $J/\psi p$ [invariant mass](#) spectrum shown in the left image below. The P_c^+ particle and a proton must have a minimal quark content $c\bar{c}uud$, and are therefore called pentaquark-c



arks

Le bestiaires des hadrons (1/2)

- 6 quarks + 6 antiquarks → de multiples assemblages possibles !



Le bestiaires des hadrons (2/2)

- Quelques exemples (incontournables !) :

- ▶ baryons (3 quarks)

- avec les quarks u & d (matière ordinaire)
 - proton (uud) / neutron (udd)
- ...

- ▶ mésons (quark+anti-quark)

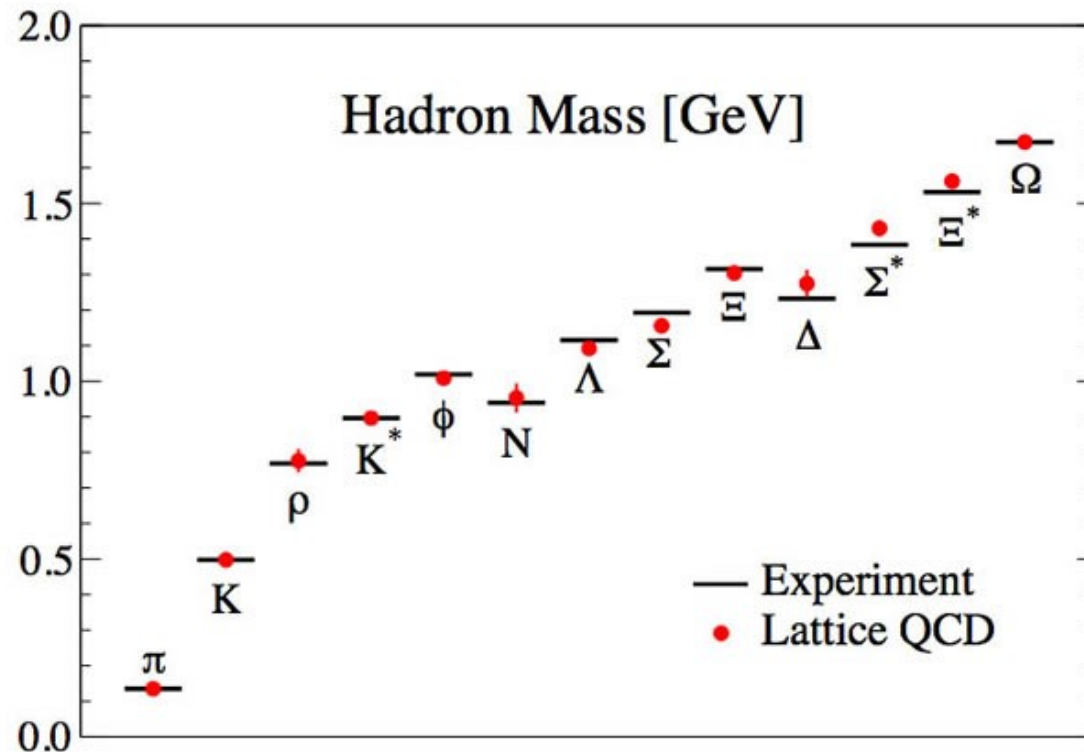
- avec les quarks u & d (matière ordinaire)
 - $\pi^+(u\bar{d})$ / $\pi^-(\bar{u}d)$ / $\pi^0(u\bar{u} \text{ ou } d\bar{d}) \rightarrow \ll \text{pions} \gg$
- avec un quark étrange : s
 - $K^+(u\bar{s})$ / $K^-(\bar{u}s)$ / $K^0(d\bar{s})$ / $\bar{K}^0(\bar{d}s) \rightarrow \ll \text{kaons} \gg$
- avec un quark charmé : c
 - $D^+(c\bar{d})$ / $D^-(\bar{c}d)$ / $D^0(c\bar{u})$ / $\bar{D}^0(\bar{c}u)$
 - $D_s^+(c\bar{s})$ / $D_s^-(\bar{c}s)$
- avec un quark beau : b
 - $B^+(u\bar{b})$ / $B^-(\bar{u}b)$ / $B^0(d\bar{b})$ / $\bar{B}^0(\bar{d}b)$
 - $B_s^0(s\bar{b})$ / $\bar{B}_s^0(\bar{s}b)$
 - $B_c^+(c\bar{b})$ / $B_c^-(\bar{c}b)$

} Les hadrons beaux, une spécialité de l'expérience LHCb !

- ... et beaucoup d'autres avec les mêmes quarks dans des configurations angulaires différentes

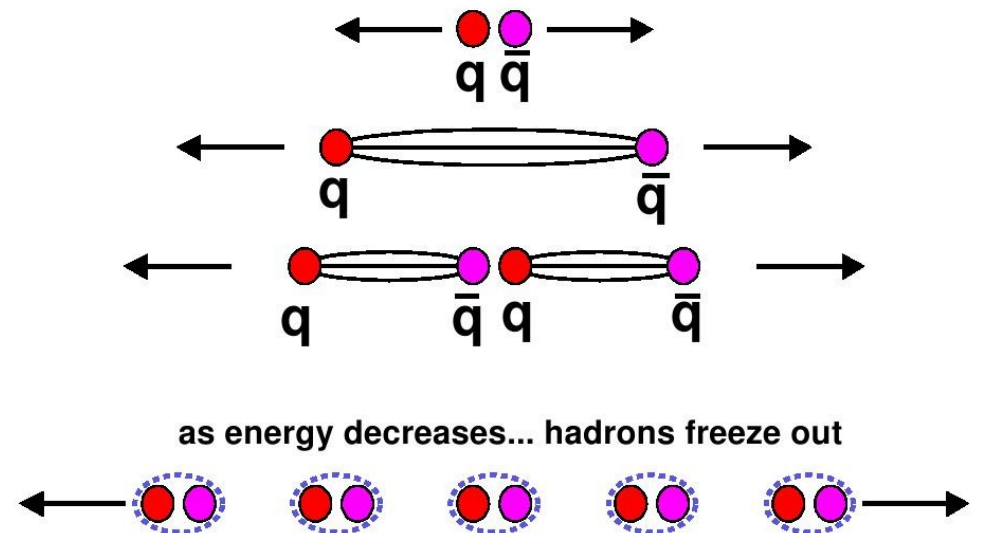
La masse des hadrons

- Caractéristique intrinsèque des particules
 - chaque type de hadron est caractérisé par une masse qui lui est propre
- tous les hadrons du même type ont la même masse

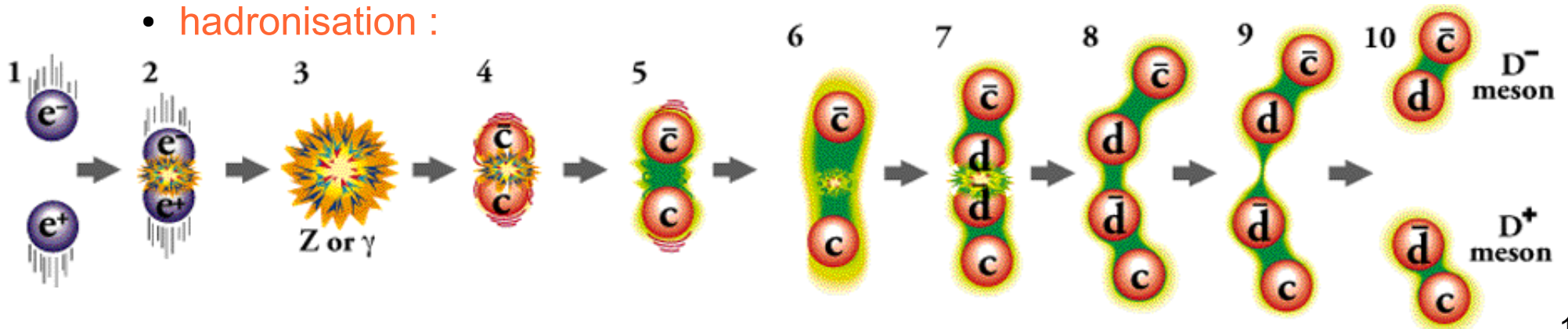


Désassembler les hadrons ?

Si on tire très fort sur les quarks à l'intérieur d'un hadron, peut-on les séparer ?

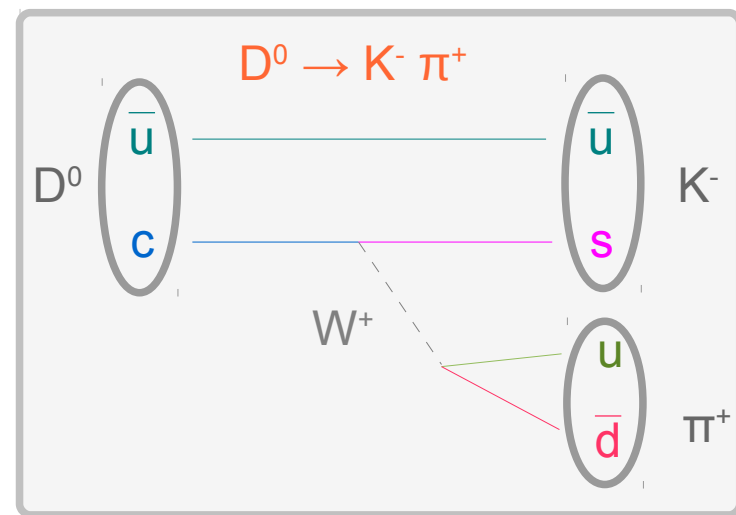
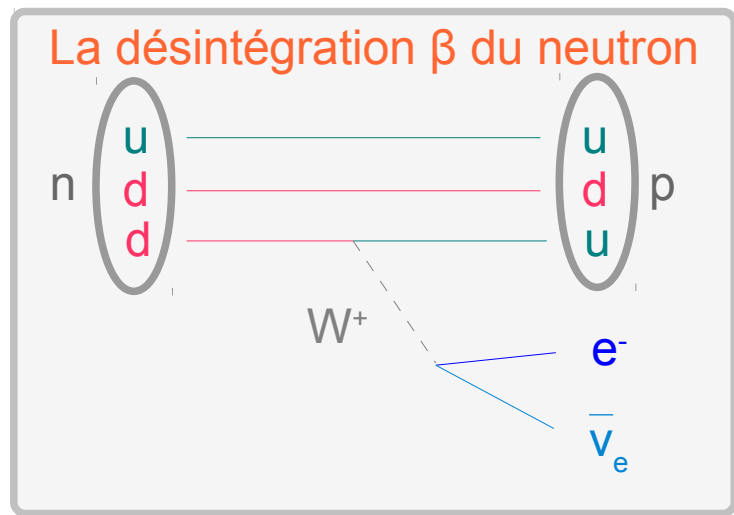


- L'interaction forte agit comme un élastique :
 - son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
 - quand l'énergie disponible est suffisante, de nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)
 - **hadronisation :**



Désintégration des hadrons (1/3)

- Les quarks sont liés entre eux dans les hadrons par l'interaction forte
- Mais, ils sont aussi soumis à l'interaction faible !
 - les quarks lourds et instables peuvent se désintégrer donnant lieu à la désintégration des hadrons dont ils font partie



Désintégration des hadrons (2/3)

- Les quarks sont liés entre eux dans les hadrons par l'interaction forte.
- Mais, ils sont aussi soumis à l'interaction faible !
 - ▶ des processus plus complexes peuvent avoir lieu

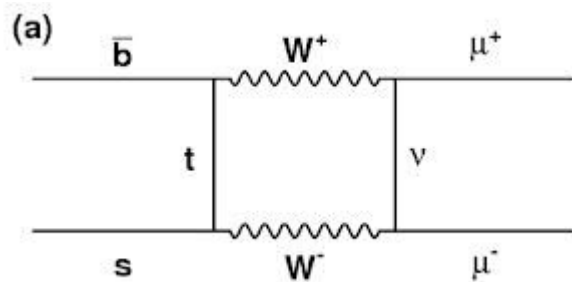


diagramme « en boîte »

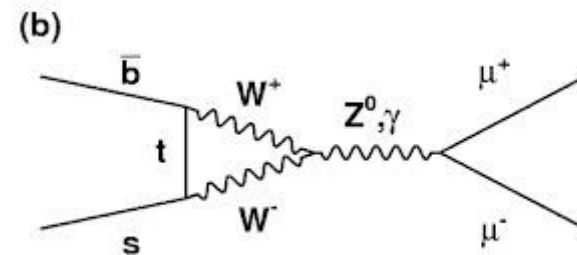


diagramme « pingouin »



Désintégration des hadrons (3/3)

De multiples états finaux possibles → lois probabilistes

Ex : le D^0

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR **D86**, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

Most decay modes (other than the semileptonic modes) that involve a neutral K meson are now given as K_S^0 modes, not as $\bar{K}^0$ modes. Nearly always it is a K_S^0 that is measured, and interference between Cabibbo-allowed and doubly Cabibbo-suppressed modes can invalidate the assumption that $2\Gamma(K_S^0) = \Gamma(K^0)$.

D^0 DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ ρ Confidence level(MeV/c)	
Topological modes			
0-prongs	[ν] (15 $\pm$ 6) %	—	—
2-prongs	(70 $\pm$ 6) %	—	—
4-prongs	[k] (14.5 $\pm$ 0.5) %	—	—
6-prongs	[l] (6.4 $\pm$ 1.3) $\times 10^{-4}$	—	—
Inclusive modes			
e^+ anything	[n] (6.49 $\pm$ 0.11) %	—	—
μ^+ anything	(6.7 $\pm$ 0.6) %	—	—
K^- anything	(54.7 $\pm$ 2.8) %	S=1.3	—
$\bar{K}^0$ anything + K^0 anything	(47 $\pm$ 4) %	—	—
K^+ anything	(3.4 $\pm$ 0.4) %	—	—
$K^*(892)^-$ anything	(15 $\pm$ 9) %	—	—
$\bar{K}^*(892)^0$ anything	(9 $\pm$ 4) %	—	—
$K^*(892)^+$ anything	< 3.6 %	CL=90%	—
$K^*(892)^0$ anything	(2.8 $\pm$ 1.3) %	—	—
η anything	(9.5 $\pm$ 0.9) %	—	—
η' anything	(2.48 $\pm$ 0.27) %	—	—
ϕ anything	(1.05 $\pm$ 0.11) %	—	—
Semileptonic modes			
$K^- e^+ \nu_e$	(3.55 $\pm$ 0.05) %	S=1.2	867
$K^- \mu^+ \nu_\mu$	(3.31 $\pm$ 0.13) %	—	864
$K^*(892)^- e^+ \nu_e$	(2.16 $\pm$ 0.16) %	—	719
$K^*(892)^- \mu^+ \nu_\mu$	(1.91 $\pm$ 0.24) %	—	714
$K^- \pi^0 e^+ \nu_e$	(1.6 $\pm$ 0.5) %	—	861
$\bar{K}^0 \pi^- e^+ \nu_e$	(2.7 $\pm$ 0.9) %	—	860
$K^- \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	(2.8 $\pm$ 1.4) $\times 10^{-4}$	—	843
$K_1(1270)^- e^+ \nu_e$	(7.6 $\pm$ 4.0) $\times 10^{-4}$	—	498
$K^- \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.2 $\times 10^{-3}$	CL=90%	821
$(\bar{K}^*(892) \pi)^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.4 $\times 10^{-3}$	CL=90%	692
$\pi^- e^+ \nu_e$	(2.89 $\pm$ 0.08) $\times 10^{-3}$	S=1.1	927
$\pi^- \mu^+ \nu_\mu$	(2.37 $\pm$ 0.24) $\times 10^{-3}$	—	924
$\rho^- e^+ \nu_e$	(1.9 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$	—	771

HTTP://PDG.LBL.GOV

Page 10

Created: 7/12/2013 14:49

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR **D86**, 010001 (2012) and 2013 partial update for the 2014 edition (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

Hadronic modes with one $\bar{K}$

$K^- \pi^+$	(3.88 $\pm$ 0.05) %	S=1.1	861
$K^+ \pi^-$	(1.37 $\pm$ 0.06) $\times 10^{-4}$	—	861
$K_S^0 \pi^0$	(1.19 $\pm$ 0.04) %	—	860
$K_L^0 \pi^0$	(10.0 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$	—	860
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$	[c] (2.83 $\pm$ 0.20) %	S=1.1	842
$K_S^0 \rho^0$	(6.3 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$	—	674
$K_S^0 \omega, \omega \rightarrow \pi^+ \pi^-$	(2.1 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-4}$	—	670
$K_S^0 (\pi^+ \pi^-)_{S\text{-wave}}$	(3.4 $\pm$ 0.8) $\times 10^{-3}$	—	842
$K_S^0 f_0(980),$ $f_0(980) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	(1.22 $\pm$ 0.40) $\times 10^{-3}$	—	549
$K_S^0 f_0(1370),$ $f_0(1370) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	(2.8 $\pm$ 0.9) $\times 10^{-3}$	—	†
$K_S^0 f_2(1270),$ $f_2(1270) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	(9 $\pm$ 10) $\times 10^{-5}$	—	262
$K^*(892)^- \pi^+,$ $K^*(892)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	(1.66 $\pm$ 0.15) %	—	711
$K_0^*(1430)^- \pi^+,$ $K_0^*(1430)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	(2.70 $\pm$ 0.40) $\times 10^{-3}$	—	378
$K_2^*(1430)^- \pi^+,$ $K_2^*(1430)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	(3.4 $\pm$ 1.9) $\times 10^{-4}$	—	367
$K^*(1680)^- \pi^+,$ $K^*(1680)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	(4 $\pm$ 4) $\times 10^{-4}$	—	46
$K^*(892)^+ \pi^-,$ $K^*(892)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] (1.14 $\pm$ 0.60) $\times 10^{-4}$	—	711
$K_0^*(1430)^+ \pi^-,$ $K_0^*(1430)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] < 1.4 $\times 10^{-5}$	CL=95%	—
$K_2^*(1430)^+ \pi^-,$ $K_2^*(1430)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] < 3.4 $\times 10^{-5}$	CL=95%	—
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$ nonresonant	(2.5 $\pm$ 6.0) $\times 10^{-4}$	—	842
$K^- \pi^+ \pi^0$	[c] (13.9 $\pm$ 0.5) %	S=1.7	844
$K^- \rho^+$	(10.8 $\pm$ 0.7) %	—	675
$K^- \rho(1700)^+,$ $\rho(1700)^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	(7.9 $\pm$ 1.7) $\times 10^{-3}$	—	†
$K^*(892)^- \pi^+,$ $K^*(892)^- \rightarrow K^- \pi^0$	(2.22 $\pm$ 0.40) %	—	711
$\bar{K}^*(892)^0 \pi^0,$ $\bar{K}^*(892)^0 \rightarrow K^- \pi^+$	(1.88 $\pm$ 0.23) %	—	711

HTTP://PDG.LBL.GOV

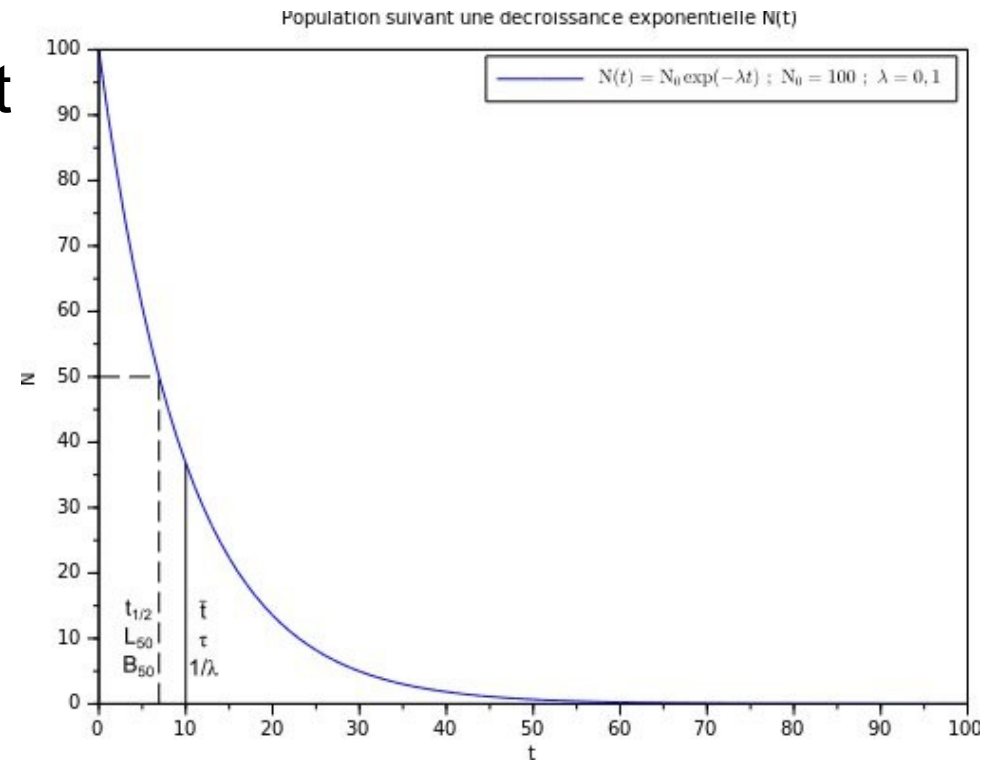
Page 11

Created: 7/12/2013 14:49

... + qq pages suppl. !

Espérance de vie

- Les hadrons sont instables (sauf le proton ?)
- Ils se désintègrent spontanément
- Le moment où un hadron va se désintégrer n'est pas prédictible
 - comportement probabiliste
- Ils sont caractérisés par un temps de vie (espérance de vie)
 - *temps propre* de la particule
- Ils ne vieillissent pas
 - leur espérance de vie est la même à chaque instant
 - la durée de vie d'une population de hadrons de même type suit une loi exponentielle



Temps de vol et temps propre (1/2)

- Un exemple « courant » : le muon
 - de nombreux muons sont produits dans la haute atmosphère (60 km d'altitude) lors de l'interaction de rayons cosmiques avec le gaz atmosphérique

- vitesse caractéristique de ces muons :

$$v = 299985 \text{ km/s} \text{ (99.995\% c)}$$

- temps propre du muon :

$$t_0 = 2 \text{ } \mu\text{s} \text{ (} 2 \cdot 10^{-6} \text{ s)}$$

- distance parcourue classiquement :

$$d = v * t = 600 \text{ m}$$

► pourtant on les observe à la surface de la terre !

- en relativité restreinte :

- dilatation du temps et contraction des longueurs

$$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} = 100$$

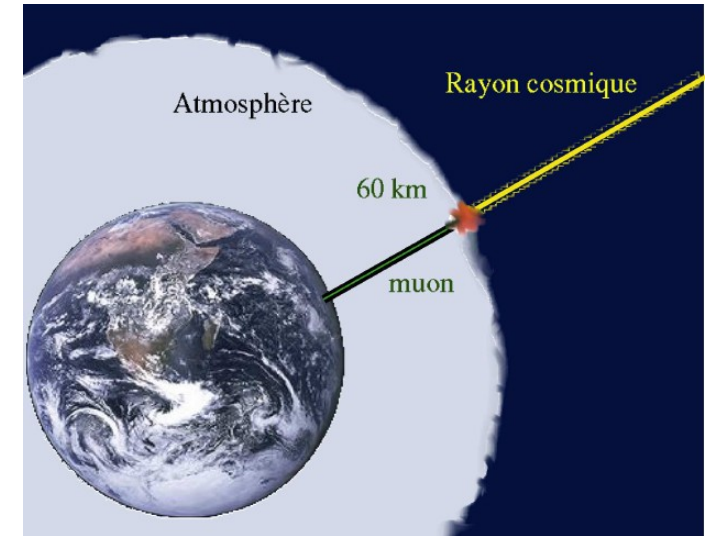
- durée de vie pour un observateur terrestre

$$t = \gamma * t_0 = 200 \text{ } \mu\text{s}$$

- distance parcourue :

$$d = 60 \text{ km !}$$

On est bombardé de muons en permanence !!!



Temps de vol et temps propre (2/2)

- Exemple : un méson étudié en détail dans LHCb :
le méson B_s

- ▶ masse

$$m = 5 \text{ GeV}$$

- ▶ temps de vie propre:

$$t_0 = 1,47 \cdot 10^{-12} \text{ s (1.47 ps) !!}$$

- ▶ énergie des B_s produits au LHC

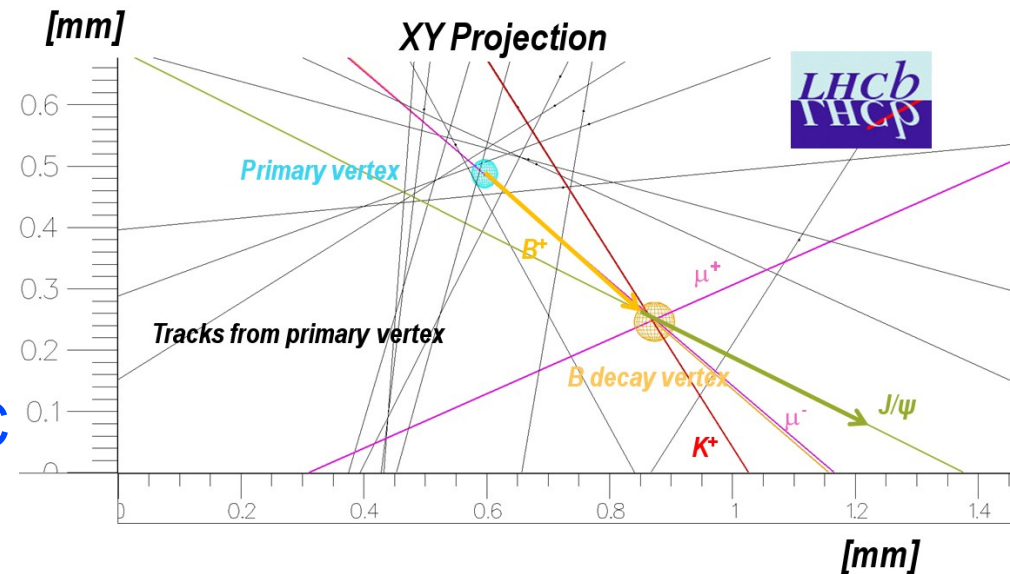
$$E = 100 \text{ GeV (typiquement)}$$

- ▶ facteur relativiste :

$$\gamma = E/mc^2 = 20$$

- ▶ distance parcourue (à la vitesse c) :

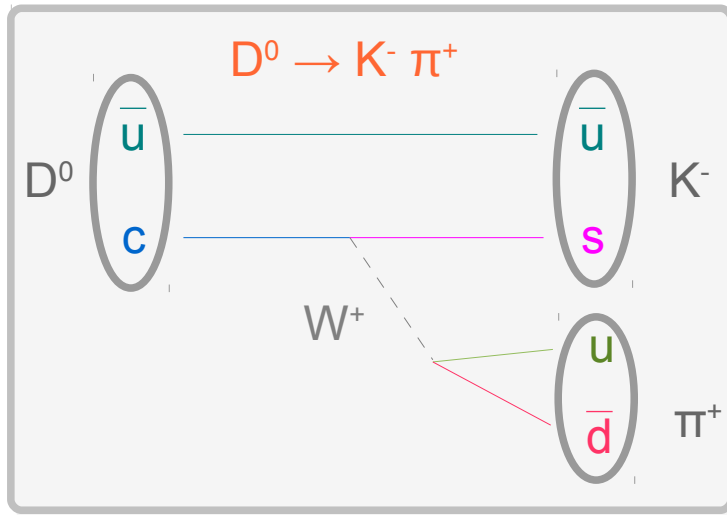
$$d = \gamma \cdot t_0 \cdot c = 9 \text{ mm (en moyenne)}$$



« 21 April 2010: First reconstructed Beauty Particle » (LHCb)

Masse et conservation de l'énergie

exemple : la désintégration $D \rightarrow K \pi$

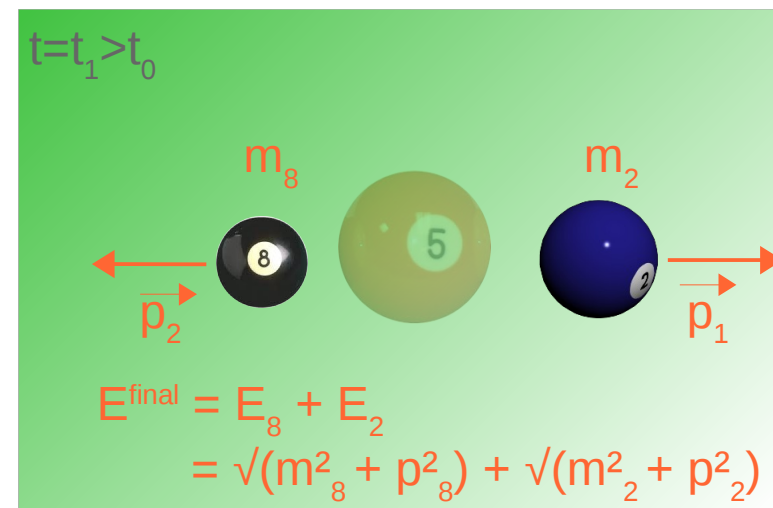
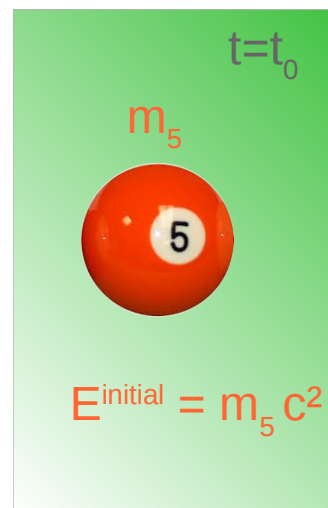


$$\begin{aligned} M(D^0) &= 1864.86 \pm 0.13 \text{ MeV} \\ M(K^-) &= 493.677 \pm 0.016 \text{ MeV} \\ M(\pi^+) &= 139.57018 \pm 0.00035 \text{ MeV} \end{aligned}$$

► L'énergie d'un système isolé est conservée (c.à.d. constante)

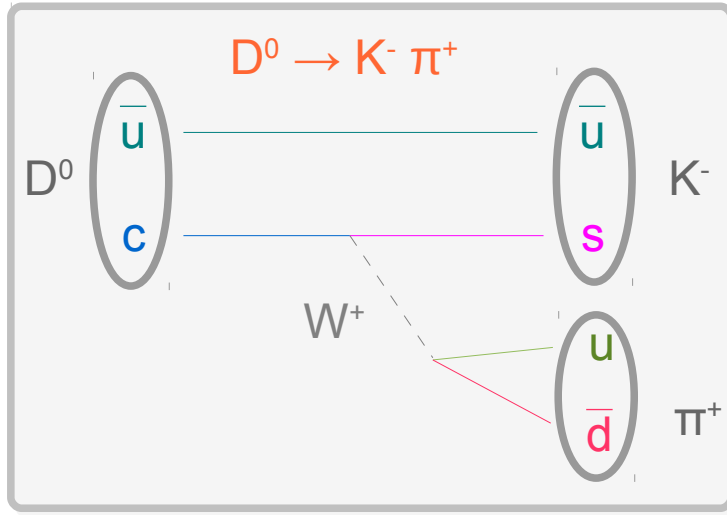
L'énergie (de masse, $E=mc^2$) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégration

- sous forme de masse :
 $M(K) \text{ \& } M(\pi)$
- et d'énergie cinétique :
 $P(K) \text{ \& } P(\pi)$



Masse et conservation de l'énergie

exemple : la désintégration $D \rightarrow K \pi$



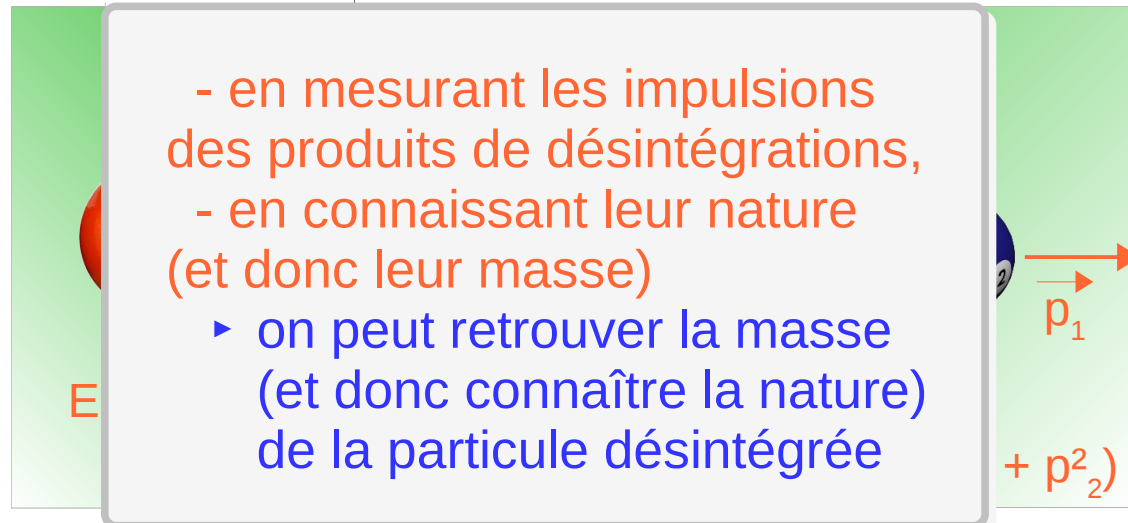
$$\begin{aligned} M(D^0) &= 1864.86 \pm 0.13 \text{ MeV} \\ M(K^-) &= 493.677 \pm 0.016 \text{ MeV} \\ M(\pi^+) &= 139.57018 \pm 0.00035 \text{ MeV} \end{aligned}$$

► L'énergie d'un système isolé est conservée (c.à.d. constante)

L'énergie (de masse, $E=mc^2$) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégration

- sous forme de masse :
 $M(K) \text{ \& } M(\pi)$
- et d'énergie cinétique :
 $P(K) \text{ \& } P(\pi)$

- en mesurant les impulsions des produits de désintégrations,
- en connaissant leur nature (et donc leur masse)
 - on peut retrouver la masse (et donc connaître la nature) de la particule désintégrée



Conclusion

- Les quarks ne circulent pas librement, ils sont groupés dans des assemblages appelés hadrons.
- La plupart des hadrons sont instables, ils se désintègrent spontanément en donnant des particules plus légères.
- Chaque hadron est caractérisé (entre autres) par :
 - sa composition en quarks
 - sa masse
 - son temps de vie
- L'étude des désintégrations des hadrons permet de comprendre les processus fondamentaux sous-jacents
 - vérification des prédictions du Modèle Standard
 - mise en évidence de phénomènes nouveaux ?