

# 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

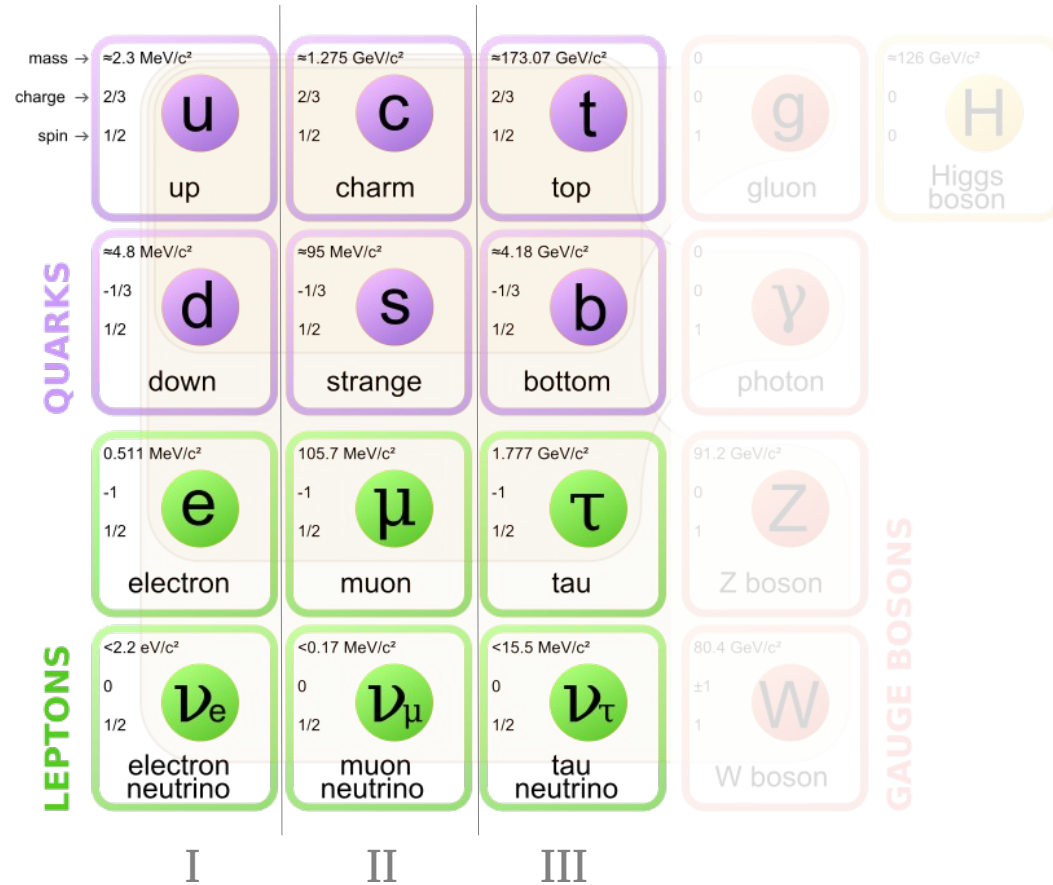
+ l'équivalent en anti-matière

=> 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

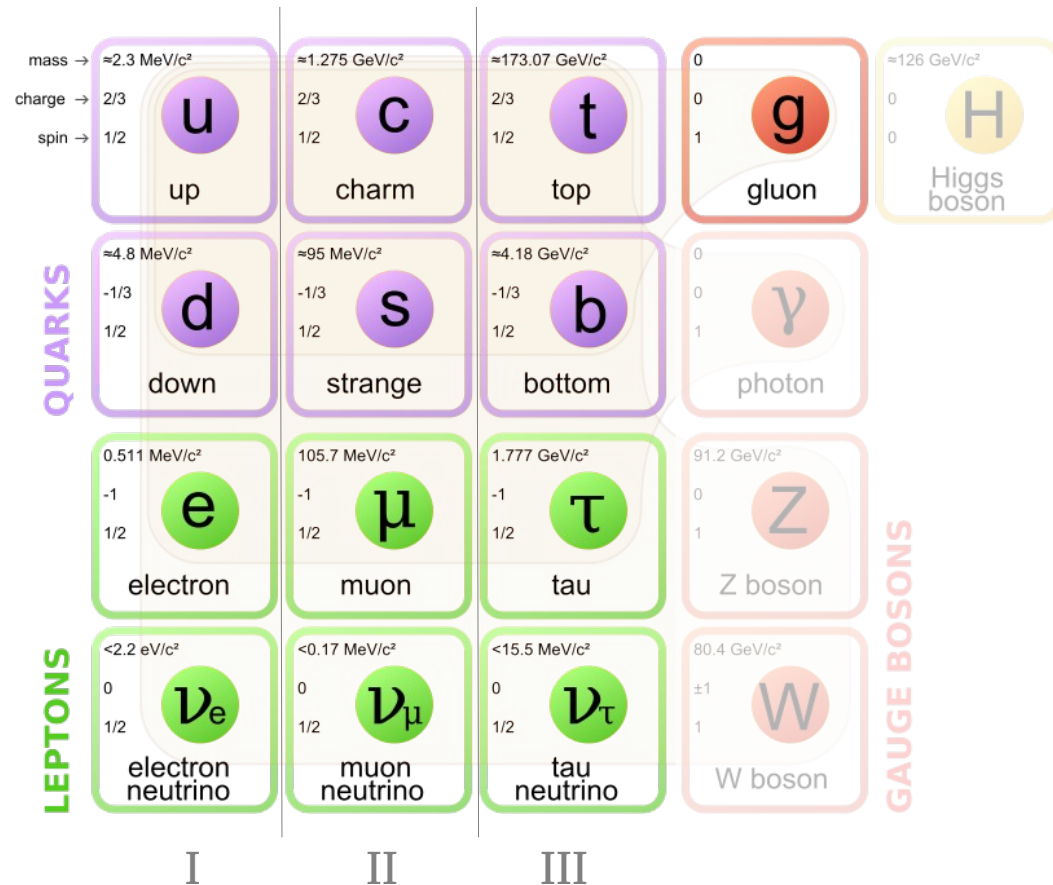
=> 12 particules de matière

+ 12 particules d'anti-matière

forment l'ensemble de la matière visible

↘ simple ?

↘ l'interaction forte entre les quarks complique la donne



# Comparaison : forces électromagnétique -VS- forte

## La force électromagnétique

- charges électriques (2)
- +1
- - 1
- force 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)

## La force forte

- charges de « couleur » (6)
- rouge, vert, bleu (3 charges « + »)
- $\overline{\text{rouge}}, \overline{\text{vert}}, \overline{\text{bleu}}$  (3 charges « - »)
- force s'exerce entre les charges
- toutes les charges de couleurs s'attirent
- objet neutre (charge = BLANC)
- $r\overline{v}b = \overline{r}vb = r\overline{r} = \overline{v}v = b\overline{b} = \text{BLANC}$
- insensible à la force forte
- vecteur : les gluons
- intensité :
- augmente avec la distance !!

# Comparaison : forces électromagnétique -VS- forte

## La force électromagnétique

- charges électriques (2)
- +1
- - 1
- force 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)

## La force forte

- charges de « couleur » (6)
- rouge, vert, bleu (3 charges « + »)
- $\overline{\text{rouge}}, \overline{\text{vert}}, \overline{\text{bleu}}$  (3 charges « - »)
- force s'exerce entre les charges
- toutes les charges de couleurs s'attirent
- objet neutre (charge = BLANC)
- $r\overline{v}\overline{b} = \overline{r}\overline{v}\overline{b} = r\overline{r} = \overline{v}\overline{v} = b\overline{b} = \text{BLANC}$
- insensible à la force forte
- vecteur : les gluons
- intensité :
- augmente avec la distance !!**
- conséquences ?**

# Quarks et interaction forte

## Leptons :

→ pas de charge de couleur

## Quarks

→ charge de couleur :  $r$ ,  $v$  ou  $b$

→ antiquarks → anticouleur :  $\bar{r}$ ,  $\bar{v}$  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 →	I	II	III	
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	g gluon
				d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\gamma$ photon
				e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	Z Z boson
				$\nu_e$ electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	W W boson
				$\mu$ muon			H Higgs boson
				$\nu_\mu$ muon neutrino			
LEPTONS							GAUGE BOSONS

# Les assemblages de quarks

---

Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

$$\rightarrow r\bar{v}b = \overline{r\bar{v}b} = \text{BLANC}$$

$$\rightarrow \bar{r}r = \bar{v}v = \bar{b}b = \text{BLANC}$$

Les quarks s'assemblent pour former des objets BLANC : les hadrons

→ différents types de hadrons :

# Les assemblages de quarks

Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

→  $rgb = \overline{r\overline{g}\overline{b}} = \text{BLANC}$  : 3 couleurs ou 3 anti-couleurs → 3 quarks

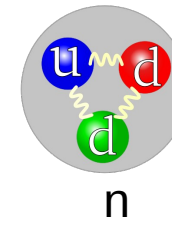
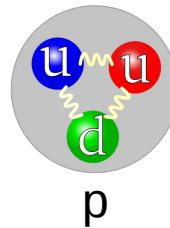
→  $\overline{r\overline{r}} = \overline{g\overline{g}} = \overline{b\overline{b}} = \text{BLANC}$

Les quarks s'assemblent pour former des objets BLANC : 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

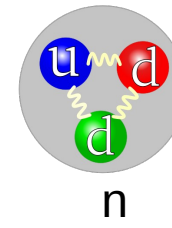
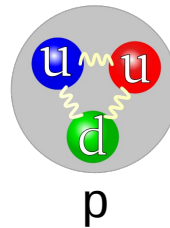
## Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

- $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$  : 3 couleurs ou 3 anti-couleurs → 3 quarks
- $r\bar{r} = v\bar{v} = b\bar{b} = \text{BLANC}$  : 1 couleur et son anti-couleur → quark + anti-quark

## Les quarks s'assemblent pour former des objets BLANC : les hadrons

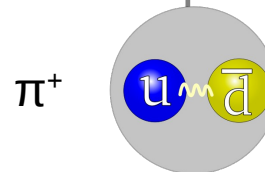
- différents types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



- les *mésons* contiennent 1 quark et 1 anti-quark; ex : pion ( $\pi$ ), Kaon (K),...

Un méson léger :  
le pion chargé



# Les assemblages de quarks

## Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

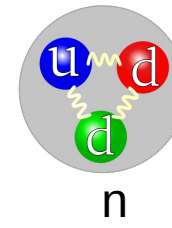
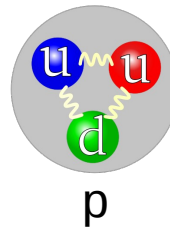
- $rgb = \overline{r\overline{g}\overline{b}} = \text{BLANC}$  : 3 couleurs ou 3 anti-couleurs → 3 quarks
- $r\overline{r} = v\overline{v} = b\overline{b} = \text{BLANC}$  : 1 couleur et son anti-couleur → quark + anti-quark

## Les quarks s'assemblent pour former des objets BLANC : les hadrons

→ différents types de hadrons :

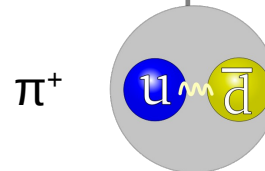
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



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

Un méson léger :  
le pion chargé



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

# Les assemblages de quarks

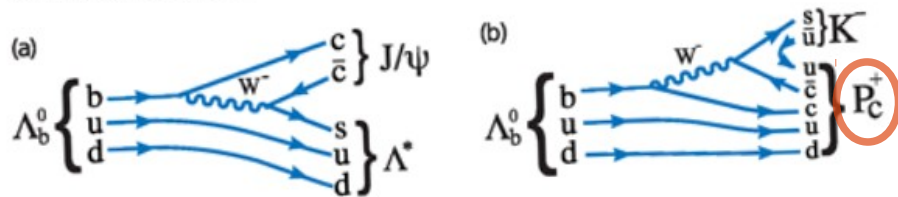
14 July 2015: Observation of particles composed of five quarks, pentaquark-charmonium states, seen in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  decays.



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

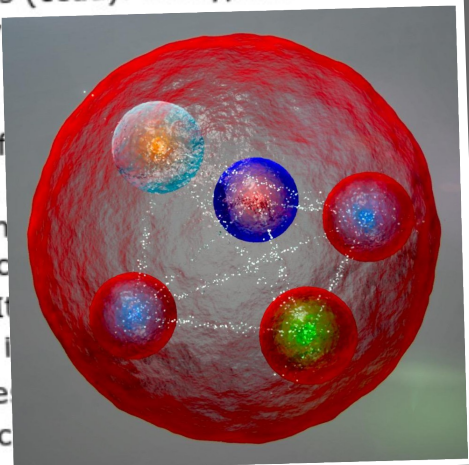
$$[ m(P_c^+(4380)) = 4380 \pm 8 \pm 29 \text{ MeV}, \Gamma = 205 \pm 18 \pm 86 \text{ MeV} ]$$

The LHCb collaboration submitted today a paper based on run 1 data which reports the observation of pentaquark-charmonium states decaying into a  $J/\psi$  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



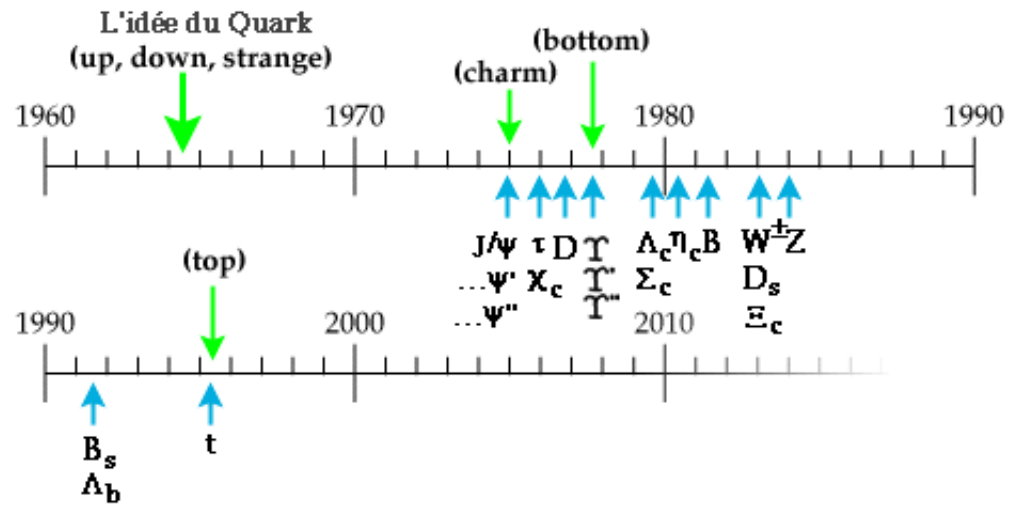
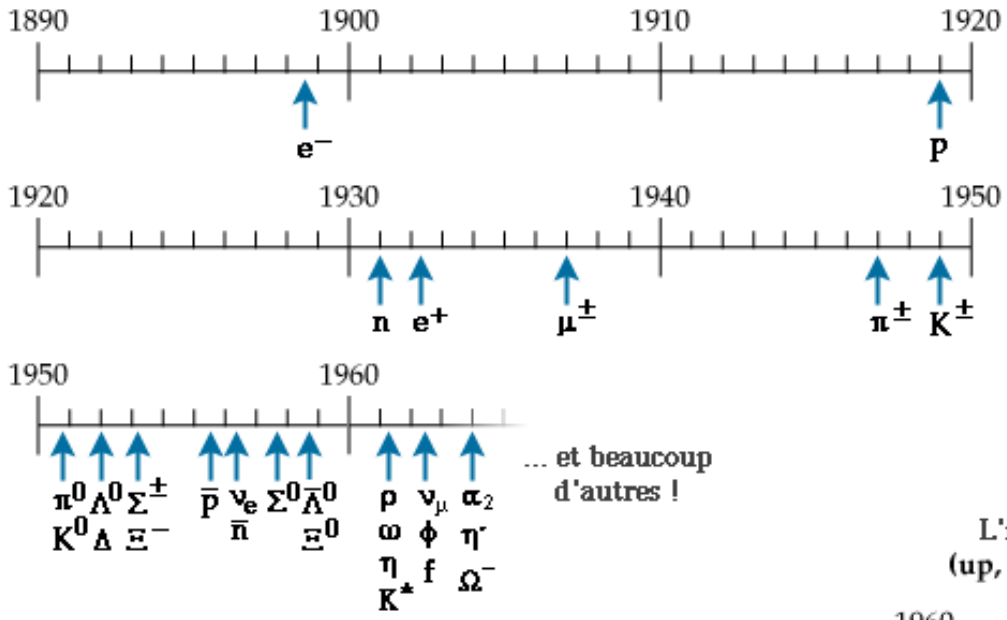
LHCb physicists have analyzed a  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  decays with only 5% of the  $\Lambda_b^0$  baryon is like a neutron, quark in place of one of the down quarks. The decay proceeds by the diagram (a), which

hadrons and is dominated by  $\Lambda^*$  resonances that decay in turn into a proton  $p$  and  $K^-$  meson. If there are 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-



# 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)

-  $\pi^+(u\bar{d})$  /  $\pi^-(\bar{u}d)$  /  $\pi^0(u\bar{u}$  ou  $d\bar{d})$  → « pions »

→ avec un quark étrange : **s**

-  $K^+(u\bar{s})$  /  $K^-(\bar{u}s)$  /  $K^0(d\bar{s})$  /  $\bar{K}^0(\bar{d}s)$  → « kaons »

→ 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**

-  $B^+(u\bar{b})$  /  $B^-(\bar{u}b)$  /  $B^0(d\bar{b})$  /  $\bar{B}^0(\bar{d}b)$

-  $B_S^0(s\bar{b})$  /  $\bar{B}_S^0(\bar{s}b)$

-  $B_C^+(c\bar{b})$  /  $B_C^-(\bar{c}b)$

↳ TD de l'après-midi :

-  $D^0 \rightarrow K^{+/-} \pi^{-/+}$

↳ 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 (1/2)

---

Quel est la masse d'un hadron ?

→ la somme des masses des quarks qui le composent

# La masse des hadrons (1/2)

---

Quel est la masse d'un hadron ?

- la somme des masses des quarks qui le composent  
... et de l'**énergie de liaison** entre ces quarks ! ( $E = mc^2$ )  
(cf. fission nucléaire)

# La masse des hadrons (1/2)

## Quel est la masse d'un hadron ?

- la somme des masses des quarks qui le composent  
... et de l'**énergie de liaison** entre ces quarks ! ( $E = mc^2$ )

(cf. fission nucléaire)

- exemple : le proton (uud)

- masse des quarks uud qui composent le proton  
(venant du mécanisme de Higgs)

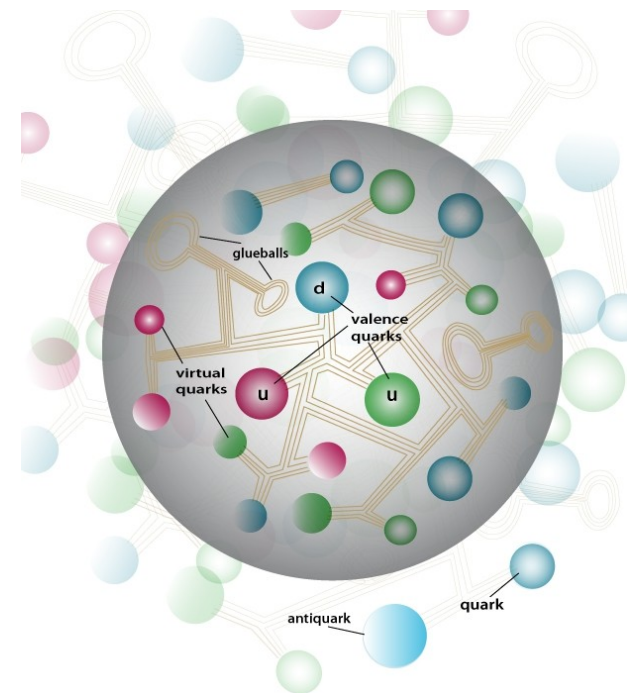
- $m(u) \approx 2 \text{ MeV}$  ;  $m(d) \approx 5 \text{ MeV}/c^2$

- $m(u+u+d) \approx 10 \text{ MeV}/c^2$

- masse du proton :

- $m(p) \approx 1000 \text{ MeV}/c^2$

- ↘ **l'essentiel de la masse est en fait donné par l'énergie de l'interaction forte entre les quarks**

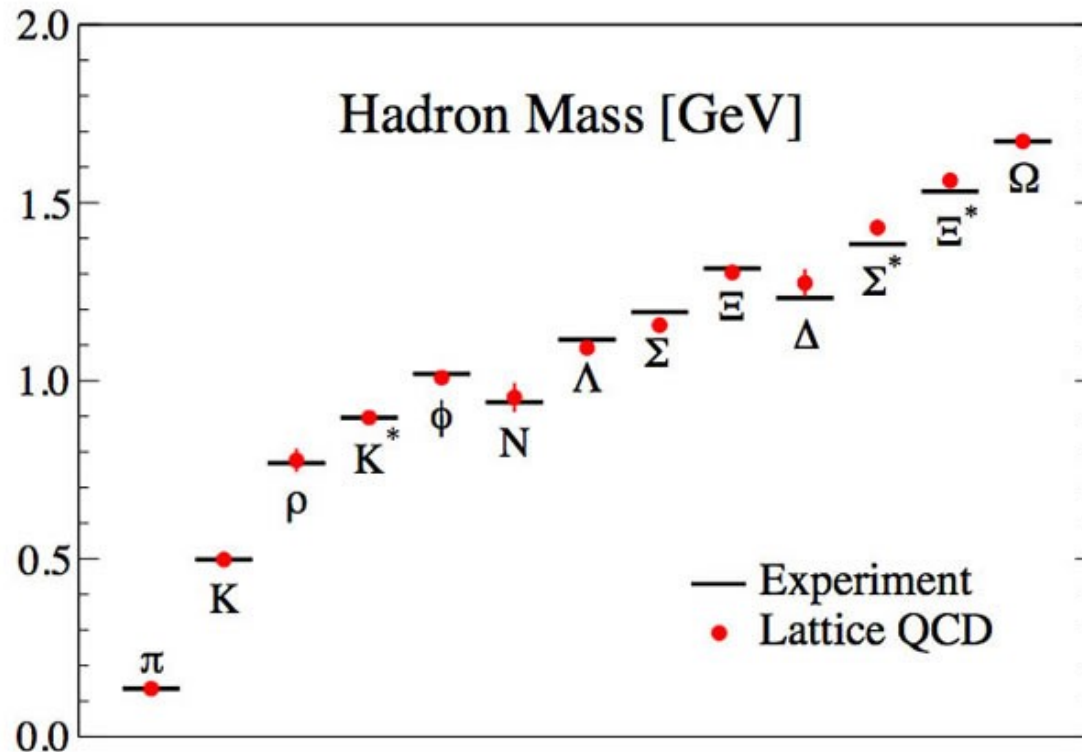




# La masse des hadrons (2/2)

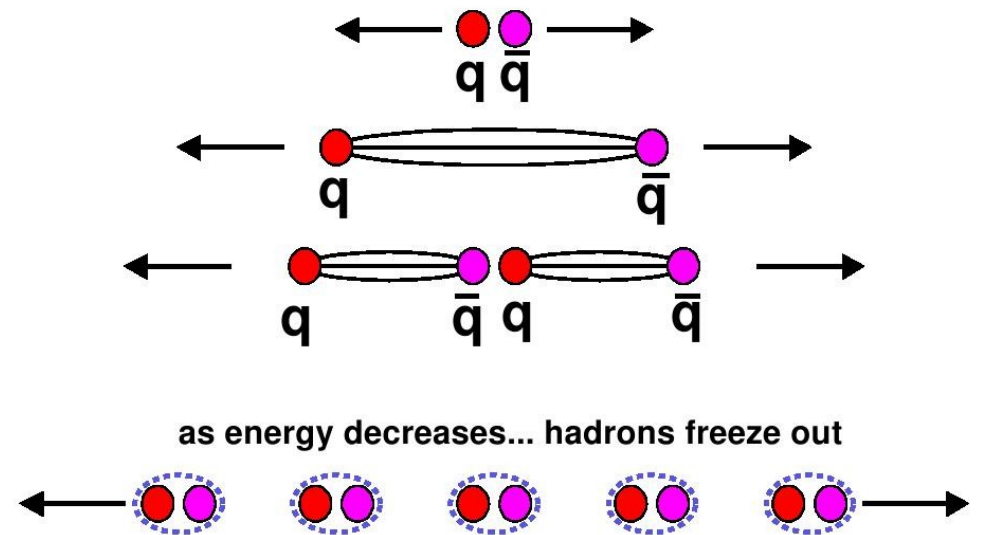
## Quel est la masse d'un hadron ?

- c'est une 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 ?

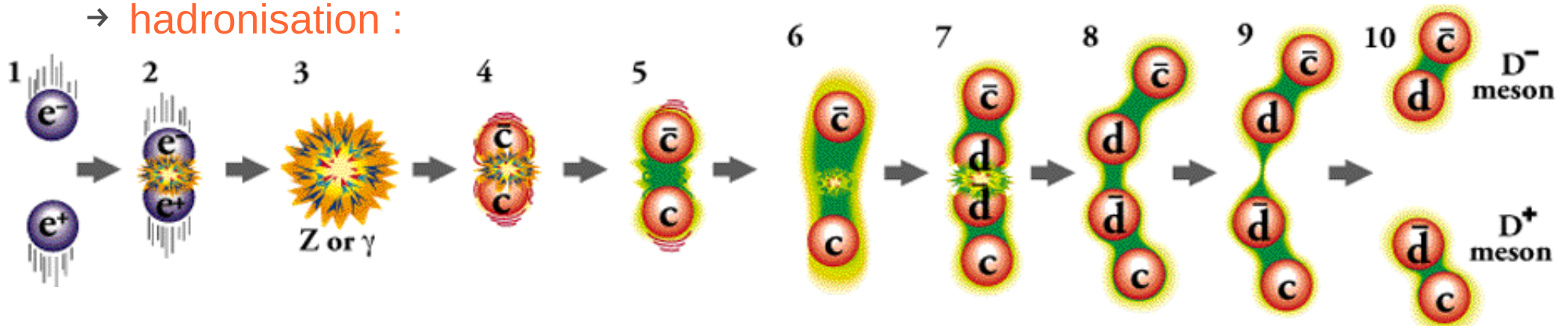
Si on tire très fort sur les quarks à l'intérieur d'un hadron, peut-on les séparer ?



L'interaction forte agit comme un élastique :

- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante, des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )

→ **hadronisation :**



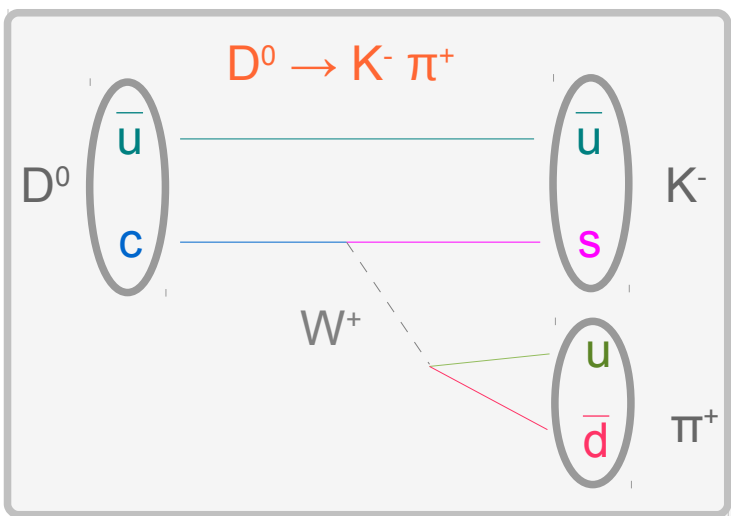
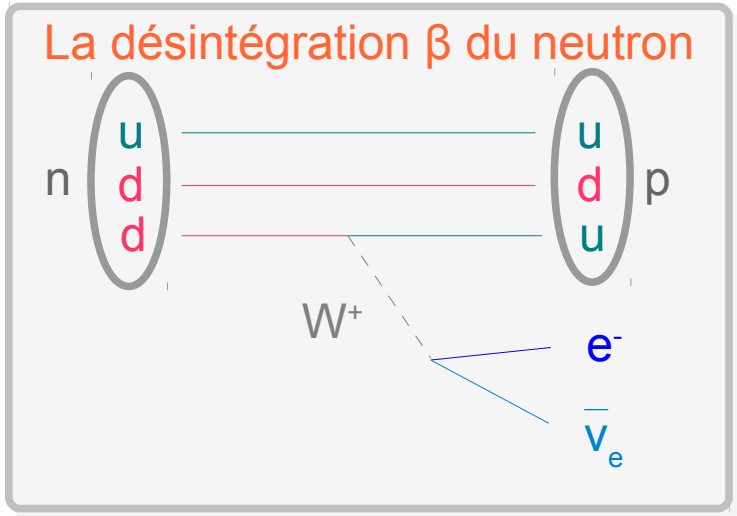
# Désintégration des hadrons (1/3)

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

→ exemples



# 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  
→ exemples

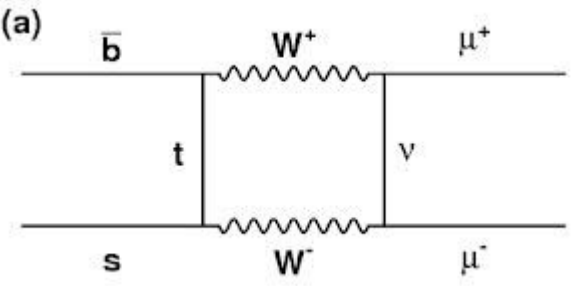


diagramme « en boîte »

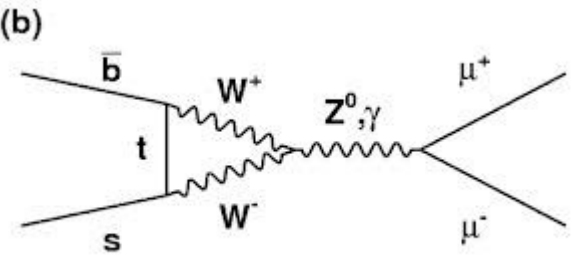


diagramme « pingouin »



# 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  $2\Gamma(K_S^0) = \Gamma(\bar{K}^0)$ .

$D^0$ DECAY MODES	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level(MeV/c)	$\rho$
<b>Topological modes</b>			
0-prongs	[j] (15 ± 6 )%	-	-
2-prongs	(70 ± 6 )%	-	-
4-prongs	[k] (14.5 ± 0.5 )%	-	-
6-prongs	[l] ( 6.4 ± 1.3 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	-
<b>Inclusive modes</b>			
$e^+$ anything	[n] ( 6.49 ± 0.11 )%	-	-
$\mu^+$ anything	( 6.7 ± 0.6 )%	-	-
$K^-$ anything	(54.7 ± 2.8 )%	S=1.3	-
$\bar{K}^0$ anything + $K^0$ anything	(47 ± 4 )%	-	-
$K^+$ anything	( 3.4 ± 0.4 )%	-	-
$K^*(892)^-$ anything	(15 ± 9 )%	-	-
$\bar{K}^*(892)^0$ anything	( 9 ± 4 )%	-	-
$K^*(892)^+$ anything	< 3.6 %	CL=90%	-
$K^*(892)^0$ anything	( 2.8 ± 1.3 )%	-	-
$\eta$ anything	( 9.5 ± 0.9 )%	-	-
$\eta'$ anything	( 2.48 ± 0.27 )%	-	-
$\phi$ anything	( 1.05 ± 0.11 )%	-	-
<b>Semileptonic modes</b>			
$K^- e^+ \nu_e$	( 3.55 ± 0.05 )%	S=1.2	867
$K^- \mu^+ \nu_\mu$	( 3.31 ± 0.13 )%	-	864
$K^*(892)^- e^+ \nu_e$	( 2.16 ± 0.16 )%	-	719
$K^*(892)^- \mu^+ \nu_\mu$	( 1.91 ± 0.24 )%	-	714
$K^- \pi^0 e^+ \nu_e$	( 1.6 ± 0.5 )%	-	861
$\bar{K}^0 \pi^- e^+ \nu_e$	( 2.7 ± 0.9 )%	-	860
$K^- \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e$	( 2.8 ± 1.4 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	843
$K_1(1270)^- e^+ \nu_e$	( 7.6 ± 4.0 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	498
$K^- \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.2 × 10 <sup>-3</sup>	CL=90%	821
$(\bar{K}^*(892)\pi)^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.4 × 10 <sup>-3</sup>	CL=90%	692
$\pi^- e^+ \nu_e$	( 2.89 ± 0.08 ) × 10 <sup>-3</sup>	S=1.1	927
$\pi^- \mu^+ \nu_\mu$	( 2.37 ± 0.24 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	924
$\rho^- e^+ \nu_e$	( 1.9 ± 0.4 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	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 ± 0.05 )%	S=1.1	861
$K^+ \pi^-$	( 1.37 ± 0.06 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	861
$K_S^0 \pi^0$	( 1.19 ± 0.04 )%	-	860
$K_S^0 \pi^0$	(10.0 ± 0.7 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	860
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$	[c] ( 2.83 ± 0.20 )%	S=1.1	842
$K_S^0 \rho^0$	( 6.3 ± 0.7 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	674
$K_S^0 \omega, \omega \rightarrow \pi^+ \pi^-$	( 2.1 ± 0.6 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	670
$K_S^0 (\pi^+ \pi^-)_{S\text{-wave}}$	( 3.4 ± 0.8 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	842
$K_S^0 f_0(980),$ $f_0(980) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	( 1.22 ± 0.40 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	549
$K_S^0 f_0(1370),$ $f_0(1370) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	( 2.8 ± 0.9 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	†
$K_S^0 f_2(1270),$ $f_2(1270) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	( 9 ± 10 ) × 10 <sup>-5</sup>	-	262
$K^*(892)^- \pi^+,$ $K^*(892)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	( 1.66 ± 0.15 )%	-	711
$K_0^*(1430)^- \pi^+,$ $K_0^*(1430)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	( 2.70 ± 0.40 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	378
$K_2^*(1430)^- \pi^+,$ $K_2^*(1430)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	( 3.4 ± 1.9 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	367
$K^*(1680)^- \pi^+,$ $K^*(1680)^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$	( 4 ± 4 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	46
$K^*(892)^+ \pi^-,$ $K^*(892)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] ( 1.14 ± 0.60 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	711
$K_0^*(1430)^+ \pi^-,$ $K_0^*(1430)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] < 1.4 × 10 <sup>-5</sup>	CL=95%	-
$K_2^*(1430)^+ \pi^-,$ $K_2^*(1430)^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	[o] < 3.4 × 10 <sup>-5</sup>	CL=95%	-
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$ nonresonant	( 2.5 ± 6.0 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	842
$K^- \pi^+ \pi^0$	[c] (13.9 ± 0.5 )%	S=1.7	844
$K^- \rho^+$	(10.8 ± 0.7 )%	-	675
$K^- \rho(1700)^+,$ $\rho(1700)^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	( 7.9 ± 1.7 ) × 10 <sup>-3</sup>	-	†
$K^*(892)^- \pi^+,$ $K^*(892)^- \rightarrow K^- \pi^0$	( 2.22 ± 0.40 )%	-	711
$\bar{K}^*(892)^0 \pi^0,$ $\bar{K}^*(892)^0 \rightarrow K^- \pi^+$	( 1.88 ± 0.23 )%	-	711

HTTP://PDG.LBL.GOV

Page 11

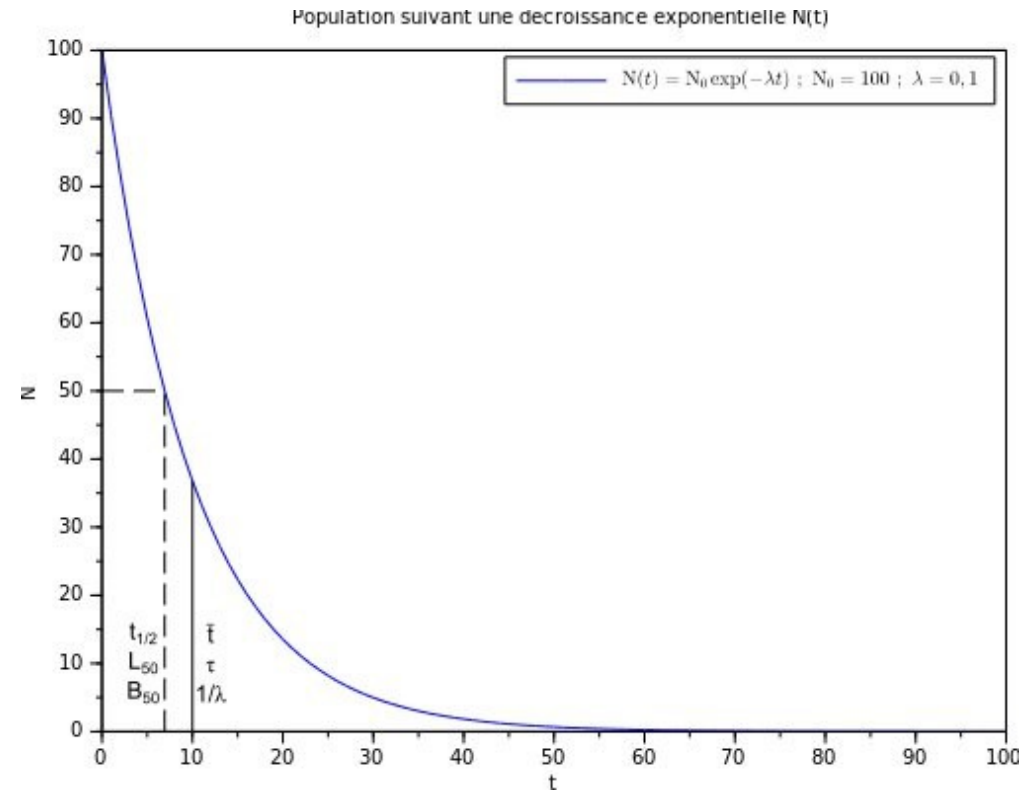
Created: 7/12/2013 14:49

... + 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 hadron de même type suit une *loi exponentielle*



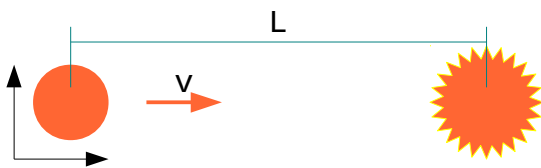
# Interlude : l'espace-temps en relativité restreinte

## Contraction des longueurs et dilatation du temps

- L'écoulement du temps dépend du référentiel
- temps propre ( $t_0$ ): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
- temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse  $v$  :

$$t = \gamma t_0 \text{ où } \gamma = 1./\sqrt{1-v^2/c^2} > 1 \text{ (d'autant plus grand que } v \text{ est grand)}$$

- exemple : une bombe programmée pour exploser après 1 s



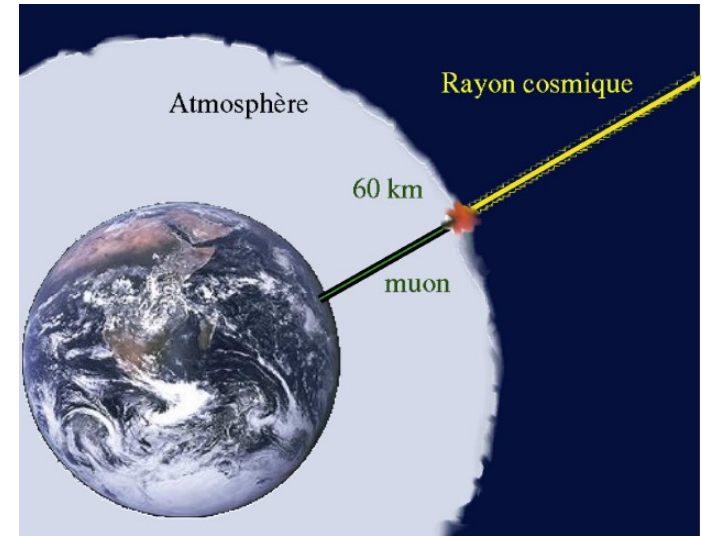
1) $v =$	300 km/s (0,1 % $c$ )	→ $L =$	300 km ( $t = 1$ s)
2) $v =$	29 979 km/s (10 % $c$ )	→ $L =$	30 130 km ( $t = 1$ s)
3) $v =$	269 813 km/s (90 % $c$ )	→ $L =$	618 994 km ( $t = 2$ s)
4) $v =$	296 794 km/s (99 % $c$ )	→ $L =$	2 103 921 km ( $t = 7$ s)
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % $c$ )	→ $L =$	6 698 534 km ( $t = 22$ s)

➤ relativité restreinte à prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse de la lumière (vitesse limite)

# 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 rayon cosmique avec le gaz atmosphérique
  - vitesse caractéristique de ces muons :
    - $v = 299985 \text{ km/s}$  (99.995%  $c$ )
  - temps propre du muon :
    - $t_0 = 2 \mu\text{s}$  ( $2 \cdot 10^{-6}\text{s}$ )
  - 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
    - $t = \gamma * t_0 = 200 \mu\text{s}$
    - 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 :

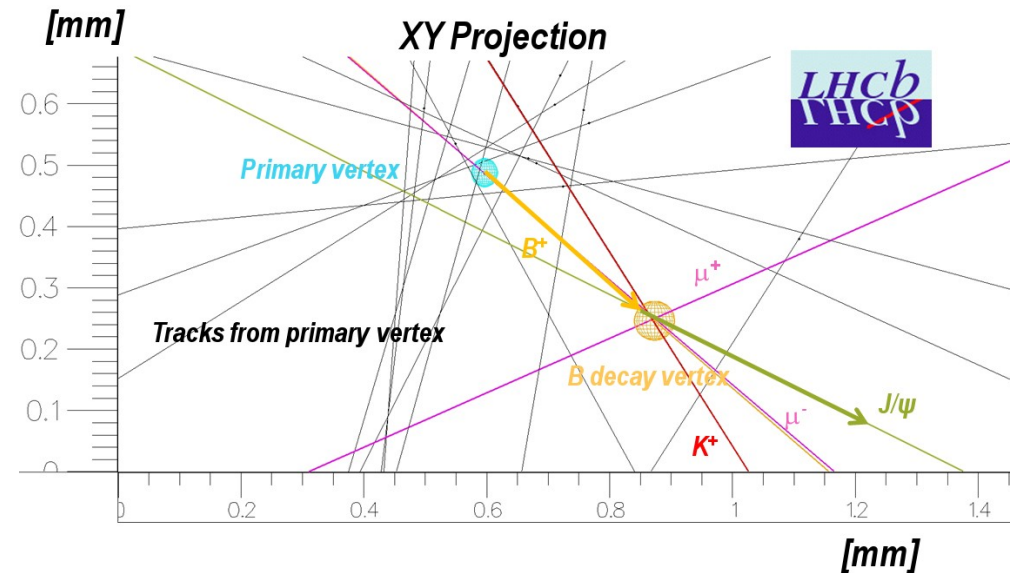
$$E = 100 \text{ GeV (typiquement)}$$

→ 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)

# Temps de vol et temps propre (2/2)

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

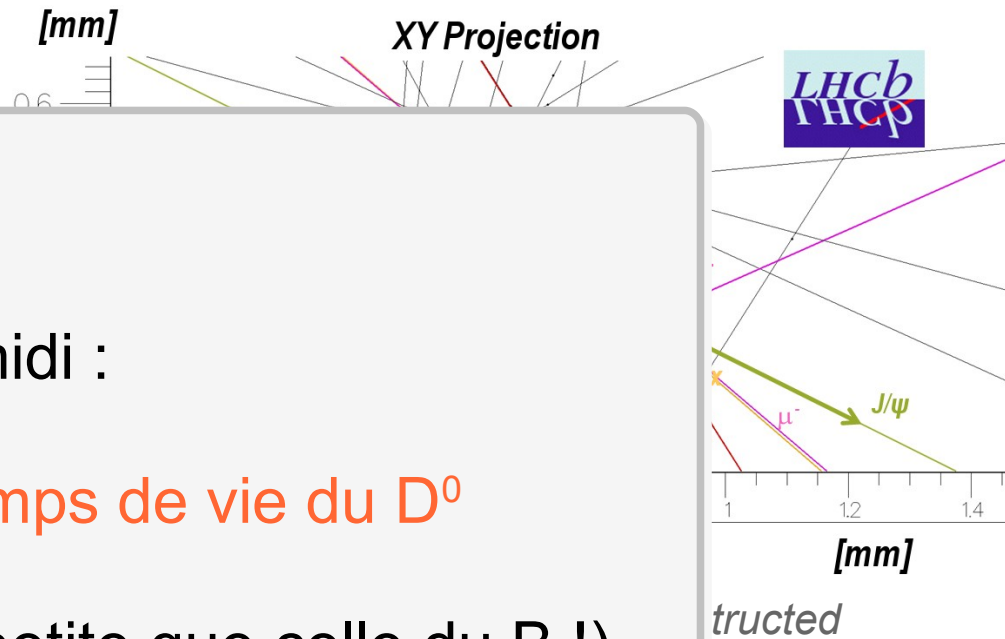
- masse  
 $m = 5 \text{ GeV}$
- temps de vie propre  
 $t_0 = 1,47 \cdot 10^{-12} \text{ s}$
- énergie des  $B_s$   
 $E = 100 \text{ GeV}$  (typique)
- facteur relativiste  
 $\gamma = E/mc^2 = 20$
- distance parcourue  
 $d = \gamma \cdot t_0 \cdot c = 9 \text{ cm}$

Teaser :

Cette après-midi :

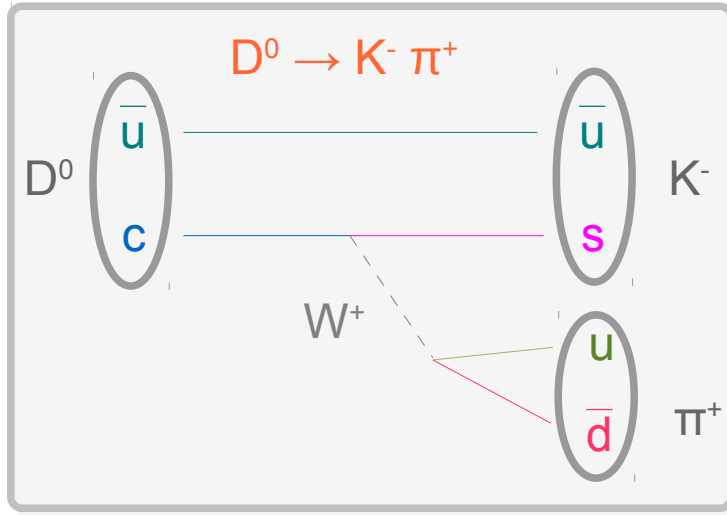
mesure du temps de vie du  $D^0$

(encore plus petite que celle du B !)



# Masse et conservation de l'énergie

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



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

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

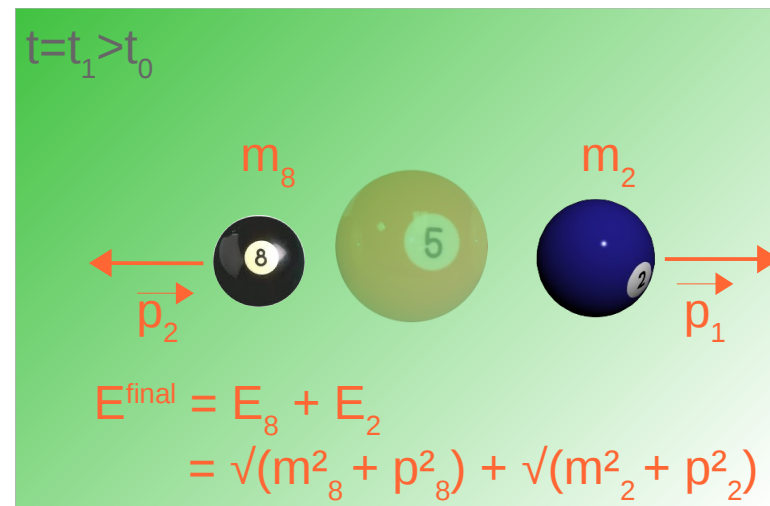
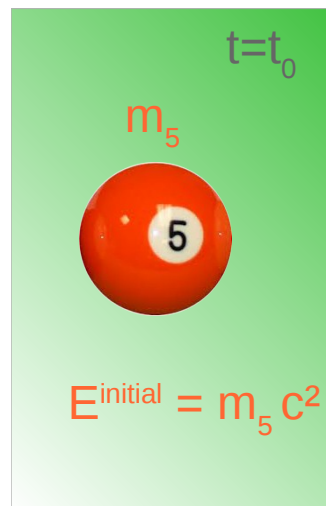
l'énergie (de masse,  $E=mc^2$ ) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégrations

→ sous forme de masse :

$$M(K) \text{ \& \ } M(\pi)$$

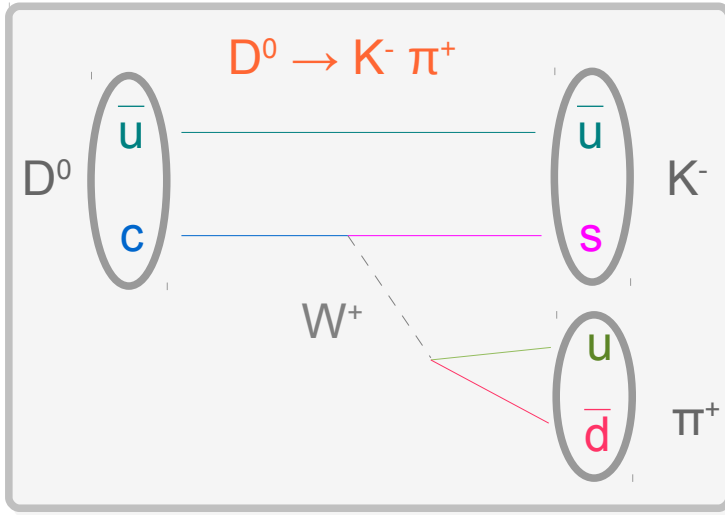
→ et d'énergie cinétique :

$$P(K) \text{ \& \ } P(\pi)$$



# Masse et conservation de l'énergie

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



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

↳ 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 désintégrations

→ sous forme de masse :

$M(K)$  &  $M(\pi)$

→ et d'énergie cinétique :

$P(K)$  &  $P(\pi)$

- 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

E

$\vec{p}_1$

$+ p_2^2$ )

# Conclusions

---

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 (en outre) 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 ?