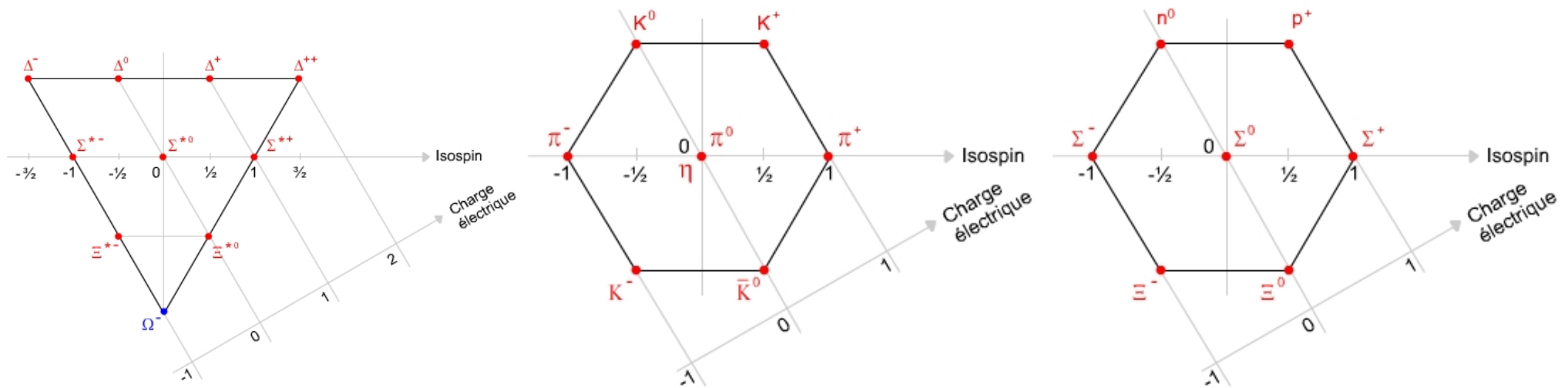


# Particulologie



- 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

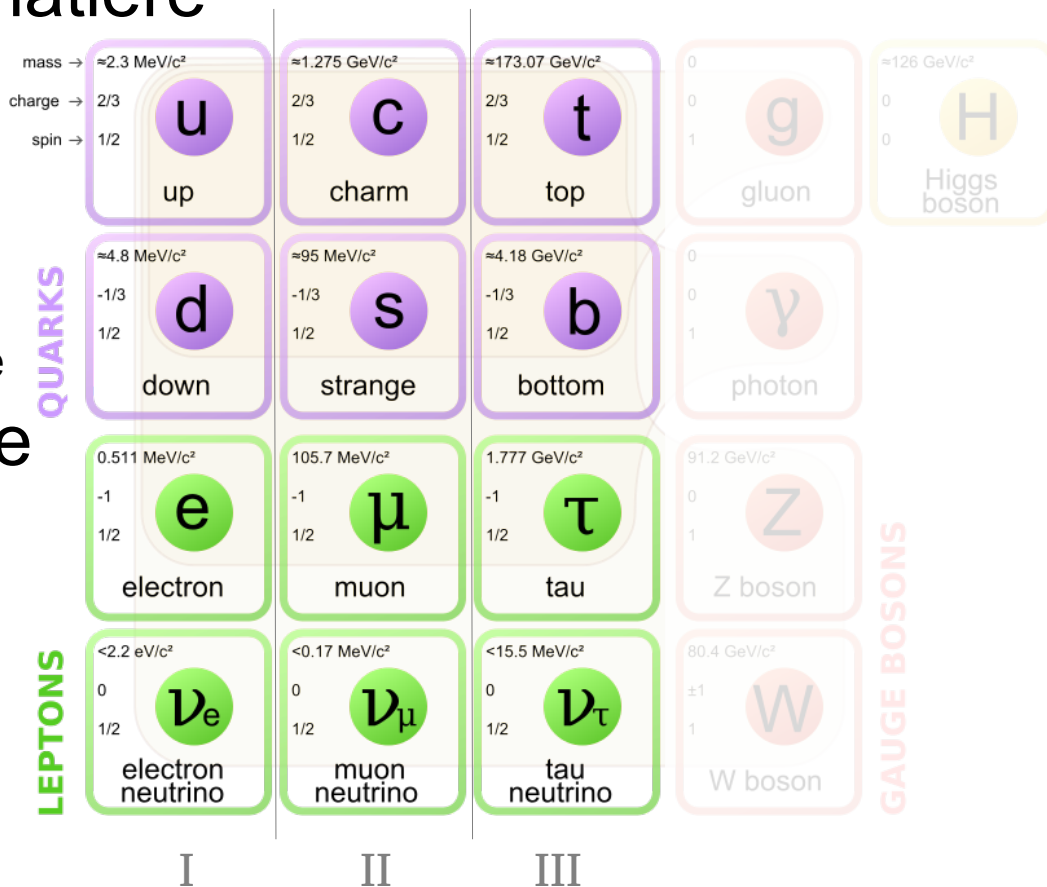
- dans chaque famille :
  - 2 quarks
    - sensibles à l'interaction forte
  - 2 leptons
    - *insensibles* à l'interaction forte

- + 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

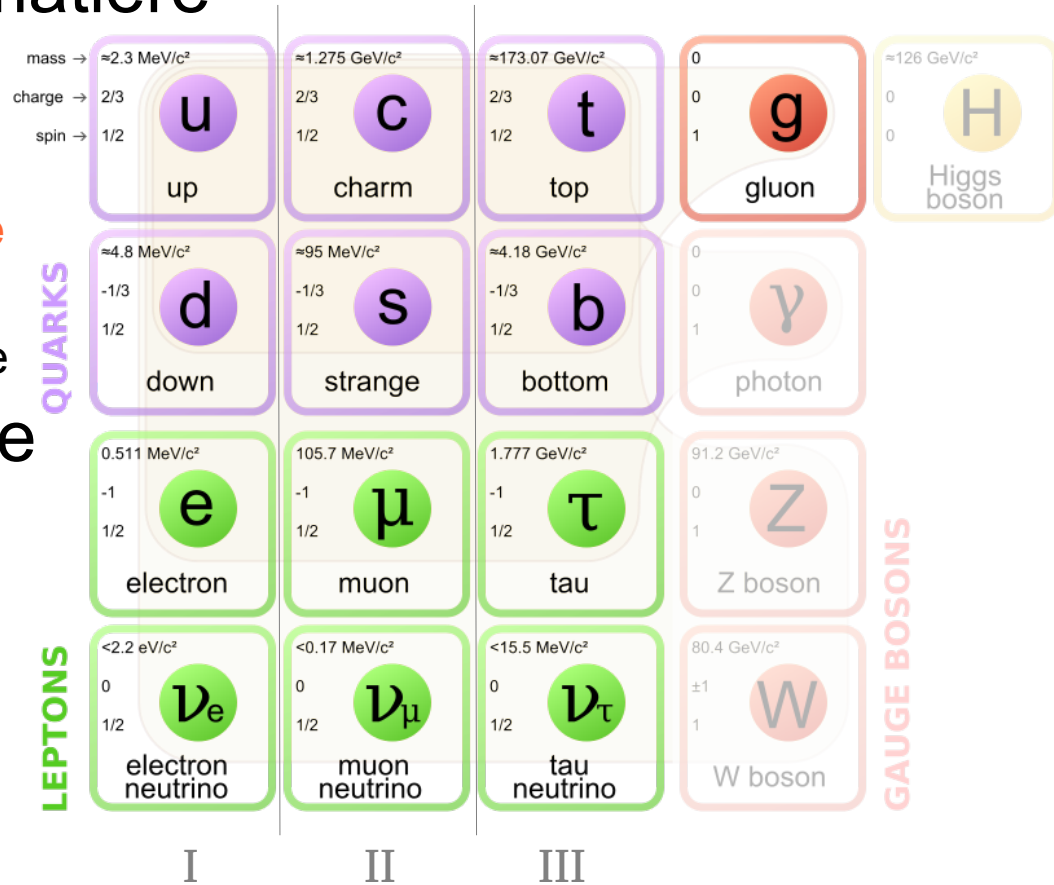
- dans chaque famille :
  - 2 quarks
    - sensibles à l'**interaction forte**
  - 2 leptons
    - *insensibles* à l'interaction forte

- + l'équivalent en anti-matière

=> 12 particules de matière

+ 12 particules d'anti-matière

forment l'ensemble de la matière visible



▶ simple ?

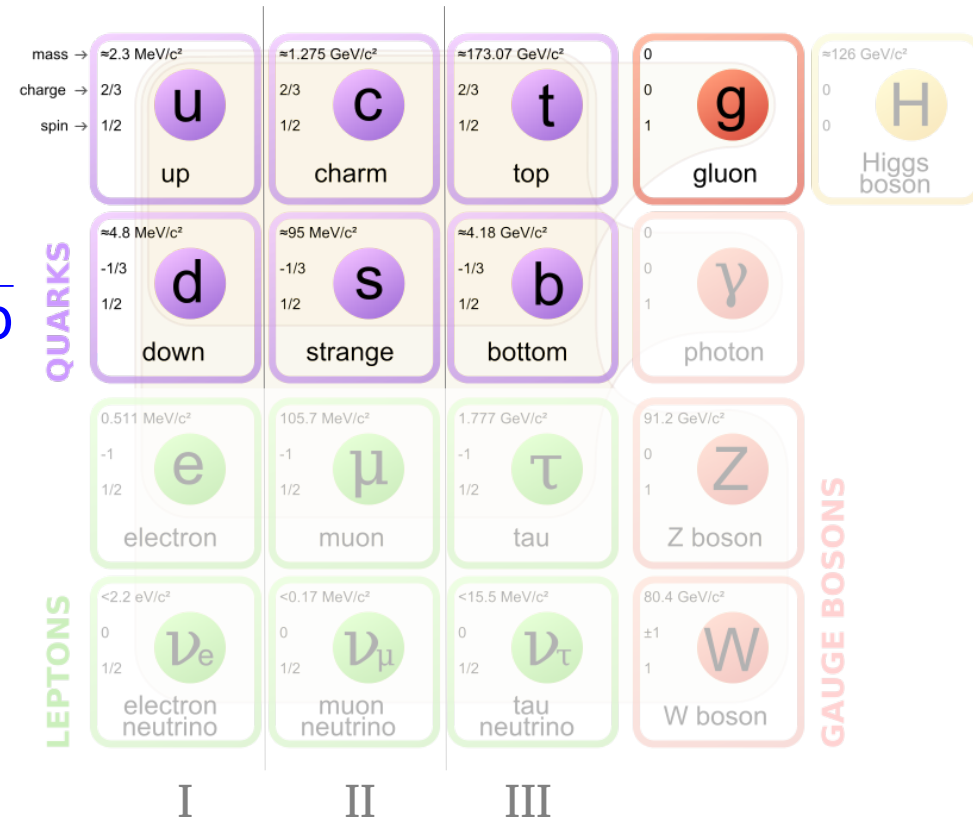
▶ l'interaction forte entre les quarks complique la donne

# 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 « + »)
    - $\overline{\text{rouge}}, \overline{\text{vert}}, \overline{\text{bleu}}$  (3 charges « - »)
  - ▶ s'exerce entre les charges
    - toutes les charges de couleurs s'attirent
  - ▶ objet neutre (charge = BLANC)
    - $\text{rvb} = \overline{\text{rvb}} = \overline{\text{rr}} = \overline{\text{vv}} = \overline{\text{bb}} = \text{BLANC}$
    - insensible à la force forte
  - ▶ vecteur : les gluons
  - ▶ intensité :
    - augmente avec la distance !!

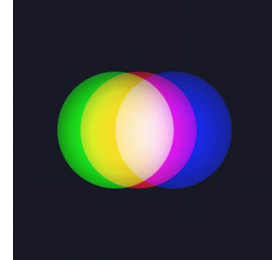
# Quarks et interaction forte

- Leptons :
  - ▶ pas de charge de couleur
- Quarks
  - ▶ charge de couleur :  $r$ ,  $v$  ou  $b$
  - ▶ antiquarks  $\rightarrow$  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 !



# Les assemblages de quarks

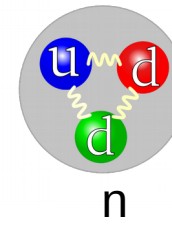
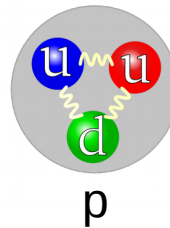
- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
  - $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$
  - $\overline{rr} = \overline{vv} = \overline{bb} = \text{BLANC}$
- Les quarks s'assemblent pour former des objets **BLANCS** : les hadrons
  - différents types de hadrons :



# 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, ...

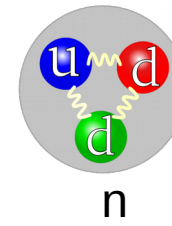
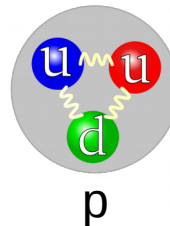
Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



# Les assemblages de quarks

- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
  - $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$  : 3 couleurs ou 3 anti-couleurs  $\rightarrow$  3 quarks ou anti-quarks
  - $r\bar{r} = v\bar{v} = b\bar{b} = \text{BLANC}$  : 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, ...

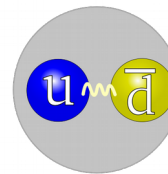
Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



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

Un méson léger :  
le pion chargé

$\pi^+$

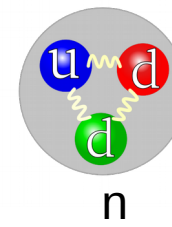
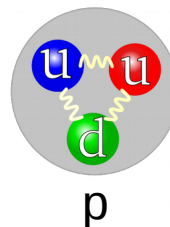




# Les assemblages de quarks

- Seuls les objets blancs peuvent circuler librement
  - $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$  : 3 couleurs ou 3 anti-couleurs  $\rightarrow$  3 quarks ou anti-quarks
  - $r\bar{r} = \overline{v\bar{v}} = \overline{bb} = \text{BLANC}$  : 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, ...

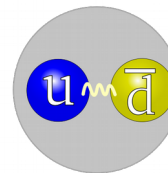
Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



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

Un méson léger :  
le pion chargé

$\pi^+$



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

# Les assemblages de quarks

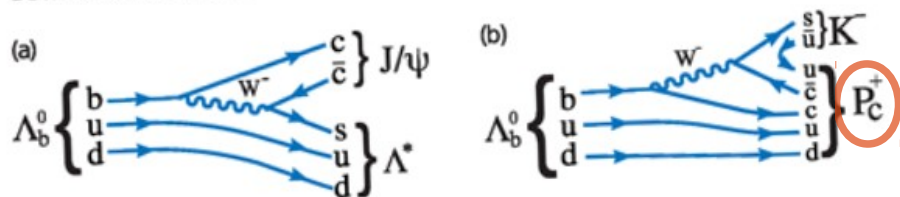
14 July 2015: Observation of particles composed of five quarks, pentaquark-charmonium states, seen in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  decays.



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

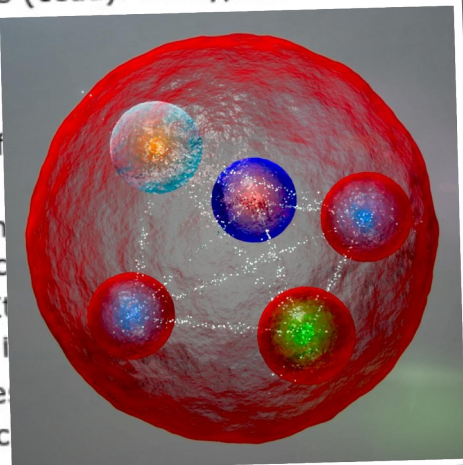
$$[ m(P_c^+(4380)) = 4380 \pm 8 \pm 29 \text{ MeV}, \Gamma = 205 \pm 18 \pm 86 \text{ MeV} ]$$

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, quark in place of one of the down quarks. The decay proceeds by the diagram (a), which

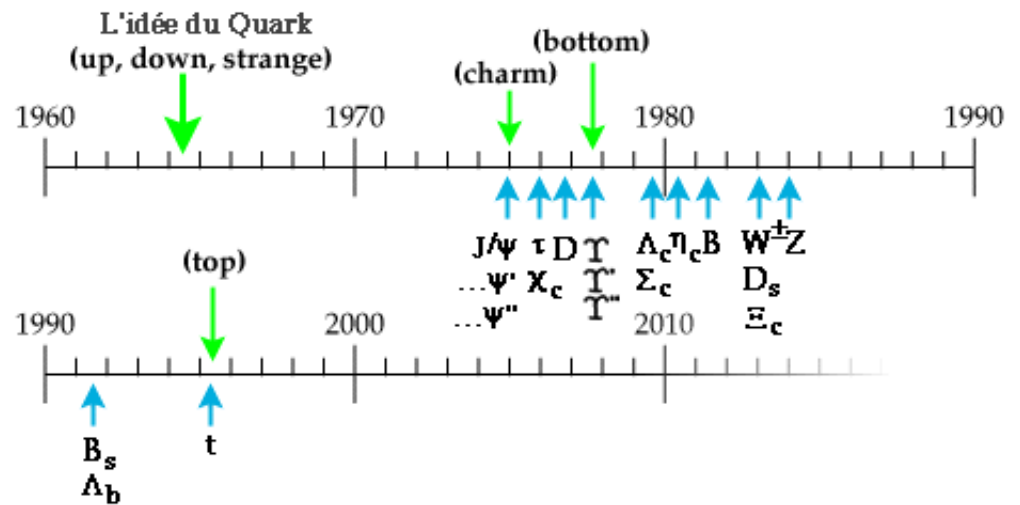
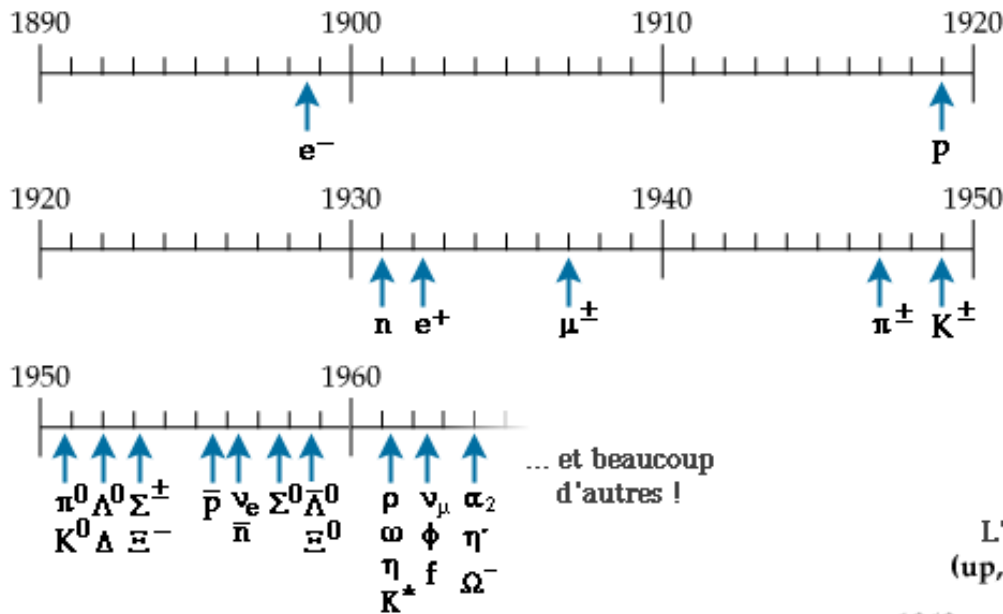
hadrons and is dominated by  $\Lambda^*$  resonances that decay in turn into a proton  $p$  and  $K^-$  meson. If there are pentaquark contributions, shown in diagram (b), that result in resonant structures (called  $P_c^+$ ) at 4450 MeV in the  $J/\psi p$  invariant mass spectrum shown in the left image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



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)**

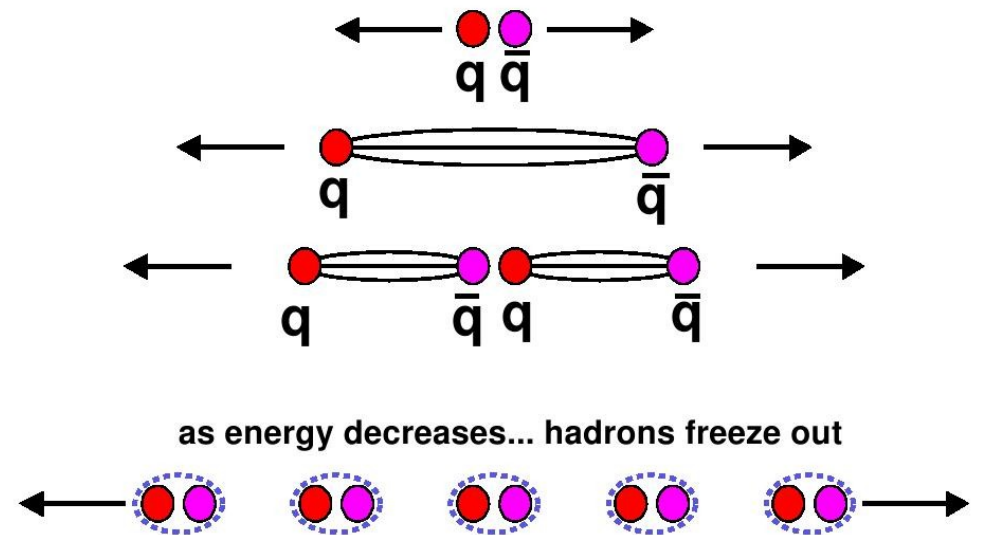
- avec les quarks **u** & **d** (matière ordinaire)
  - $\pi^+(\bar{u}d)$  /  $\pi^-(\bar{d}u)$  /  $\pi^0(u\bar{u}$  ou  $d\bar{d}) \rightarrow$  « *pions* »
- avec un quark étrange : **s**
  - $K^+(u\bar{s})$  /  $K^-(\bar{u}s)$  /  $K^0(d\bar{s})$  /  $\bar{K}^0(\bar{d}s)$   $\rightarrow$  « *kaons* »
- 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**
  - $B^+(u\bar{b})$  /  $B^-(\bar{u}b)$  /  $B^0(d\bar{b})$  /  $\bar{B}^0(\bar{d}b)$
  - $B_S^0(s\bar{b})$  /  $\bar{B}_S^0(\bar{s}b)$
  - $B_C^+(c\bar{b})$  /  $B_C^-(\bar{c}b)$

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

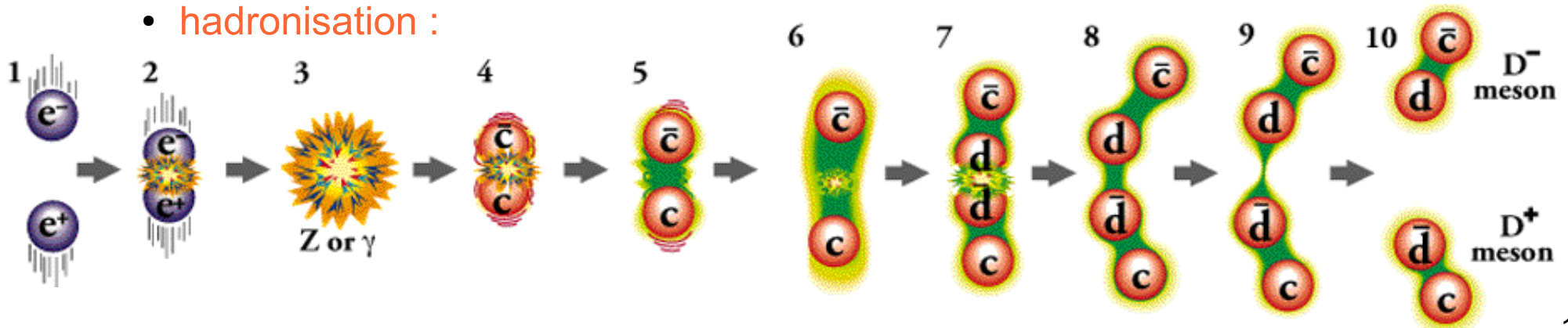
- ... et beaucoup d'autres avec les mêmes quarks dans des configurations angulaires différentes

# Désassembler les hadrons ?

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

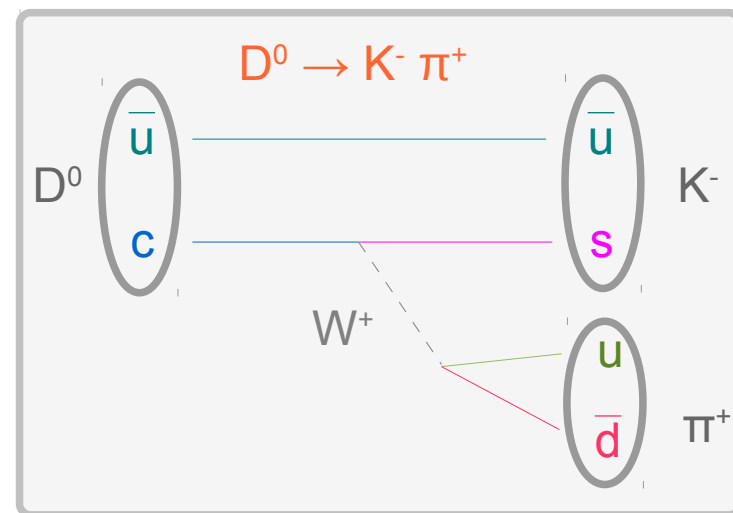
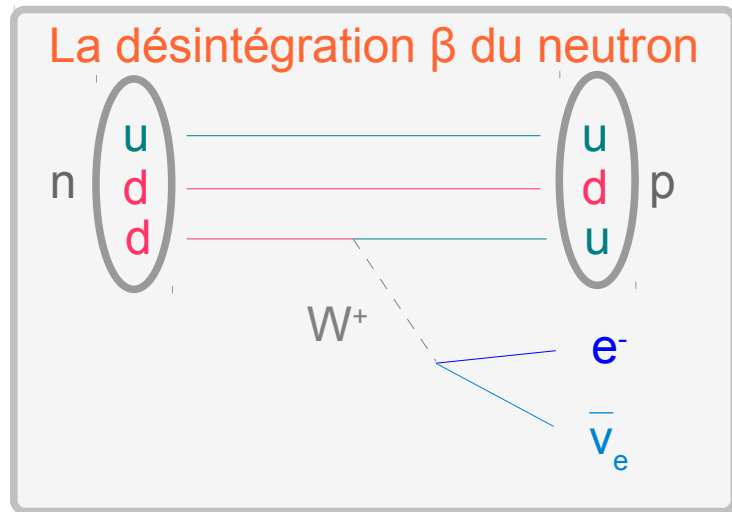


- L'interaction forte agit comme un élastique :
  - son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
  - quand l'énergie disponible est suffisante, de nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )
  - **hadronisation** :



# 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

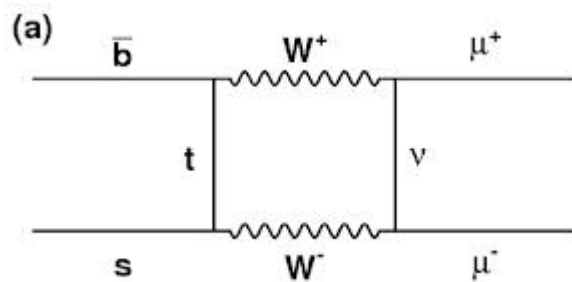


diagramme « en boîte »

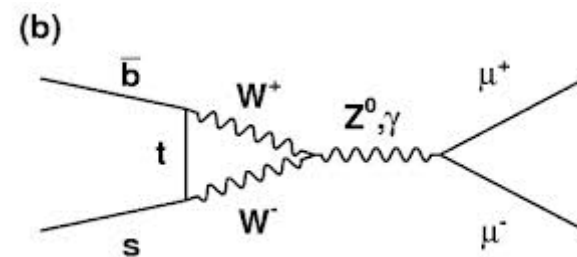


diagramme « pingouin »



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

$D^0$ 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>)

<b>Hadronic modes with one <math>\bar{K}</math></b>			
$K^- \pi^+$	( 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

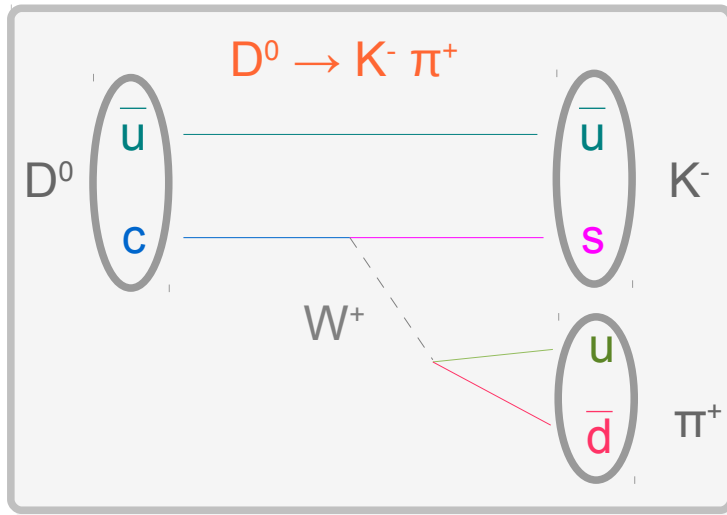
Created: 7/12/2013 14:49

... + qq pages suppl. !



# 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)

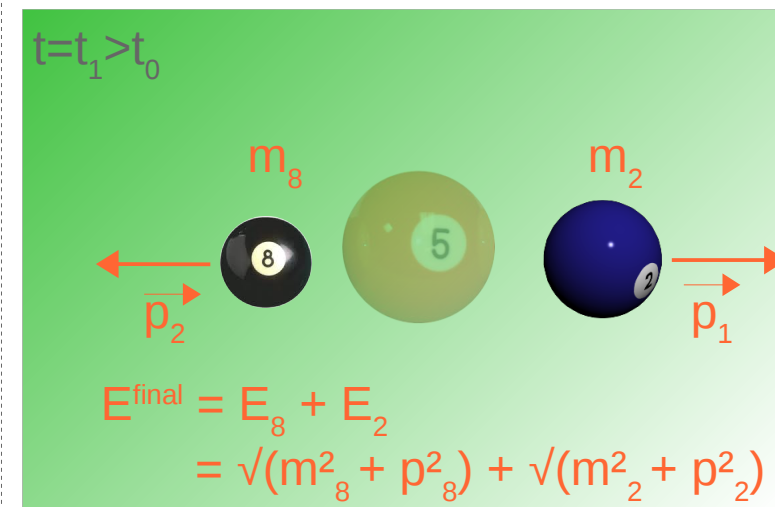
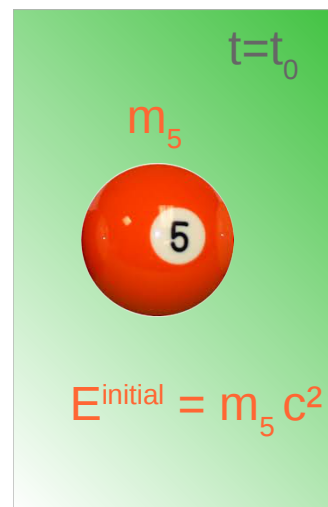
L'énergie (de masse,  $E=mc^2$ ) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégration

- sous forme de masse :

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

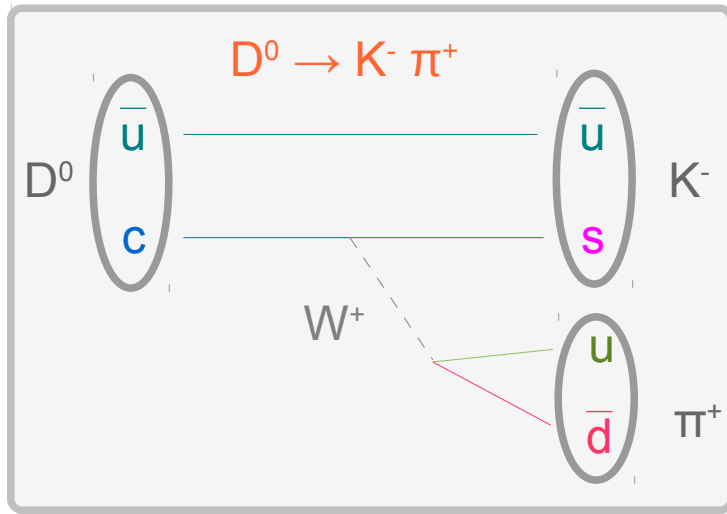
- et d'énergie cinétique :

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



# 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

E

$\vec{p}_1$

+  $p_2^2$ )

# 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 ?