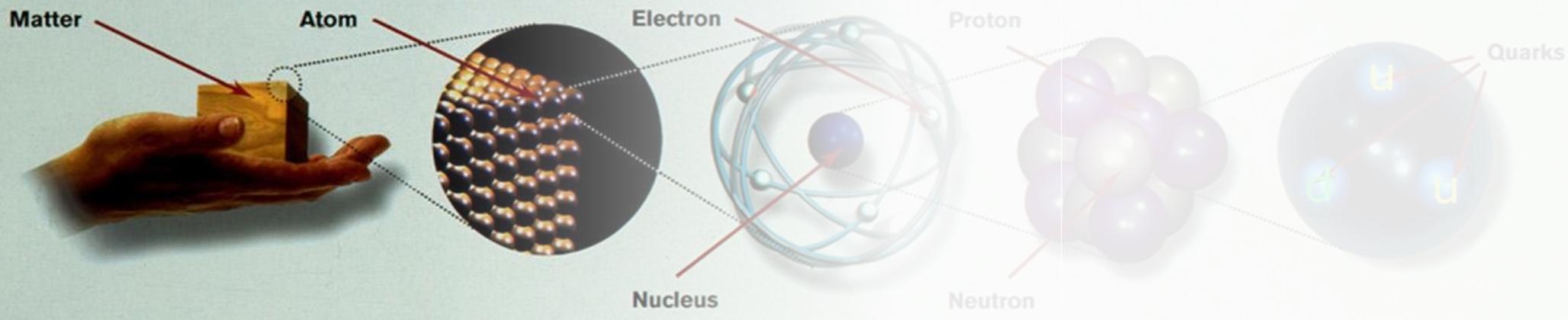
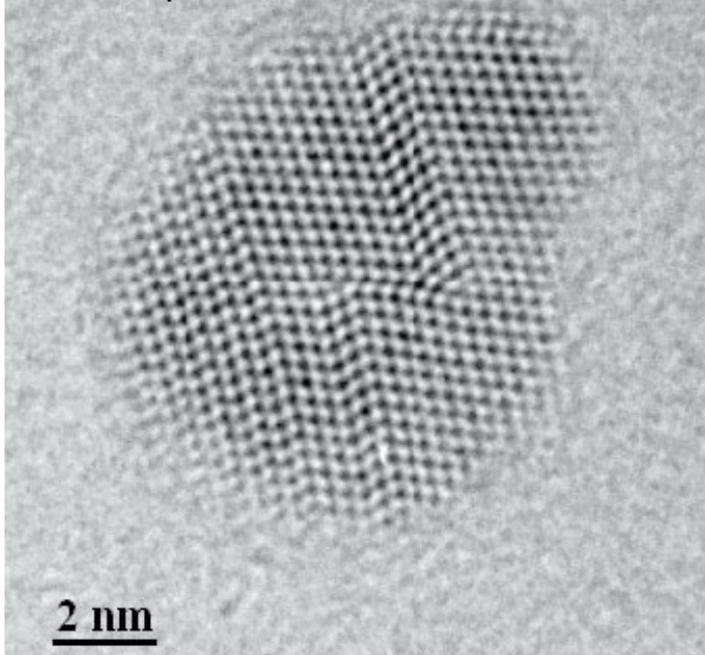


Descente vers l'infiniment petit

Les constituants élémentaires et leurs interactions,
de la matière ordinaire à l'univers primordial



Cristal de CdSe vu par un microscope électronique

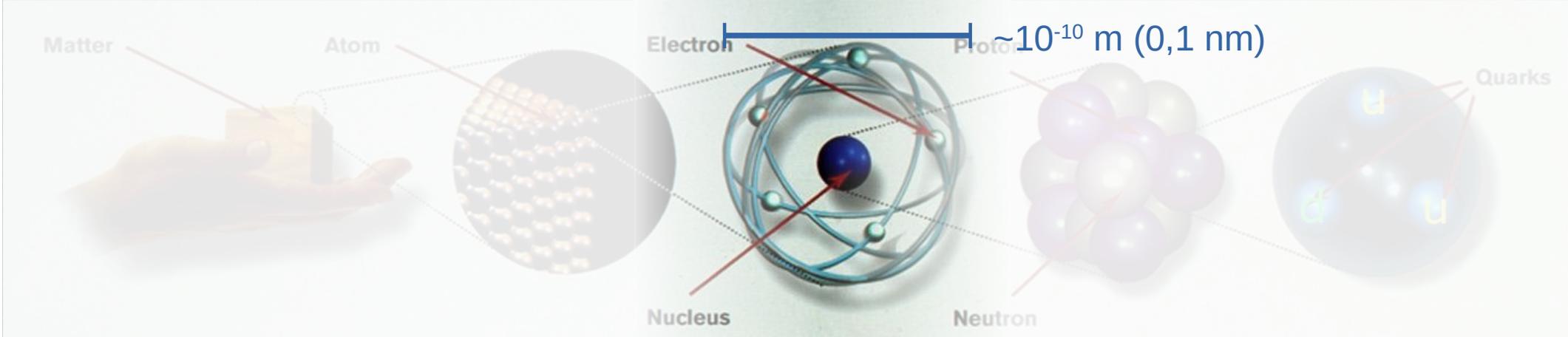


La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.

Les **molécules** sont un assemblage d'atomes.

- Comment ces molécules se forment
- Comment interagissent-elles ?
- D'où tirent-t-elles leurs propriétés ?

→ *structure de l'atome*



Éléments atomiques :

Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)		SOLIDE					LIQUIDE					GAZEUX					SYNTHESE	
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									

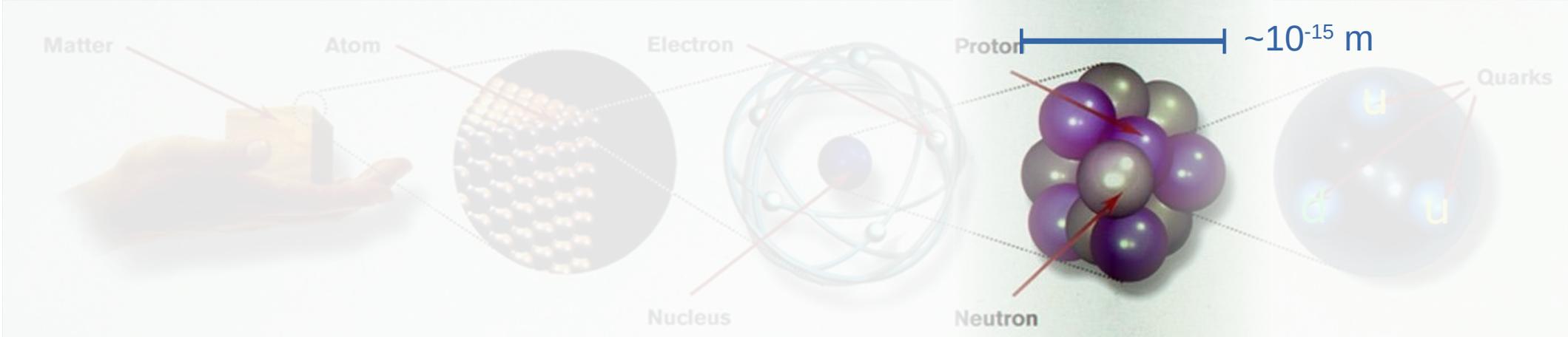
Atomes composés :

- d'un noyau (+)
 - $\sim 100\ 000$ x plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électrons (-)
 - en orbite autour du noyau
 - régit les interactions entre atomes

→ **interaction électromagnétique**

→ Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?

→ *structure du noyau*

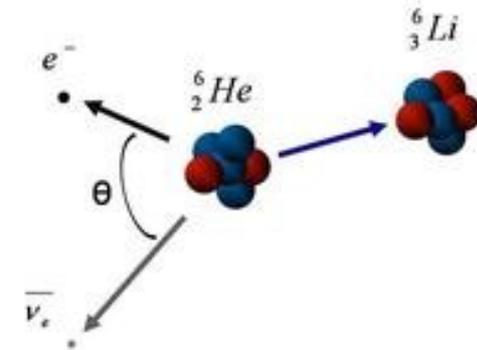


Noyau atomique formé de nucléons: **protons & neutrons**

- Le nombre de protons => la nature de l'élément chimique
- La cohésion du noyau est assurée par l'**interaction forte**
- La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

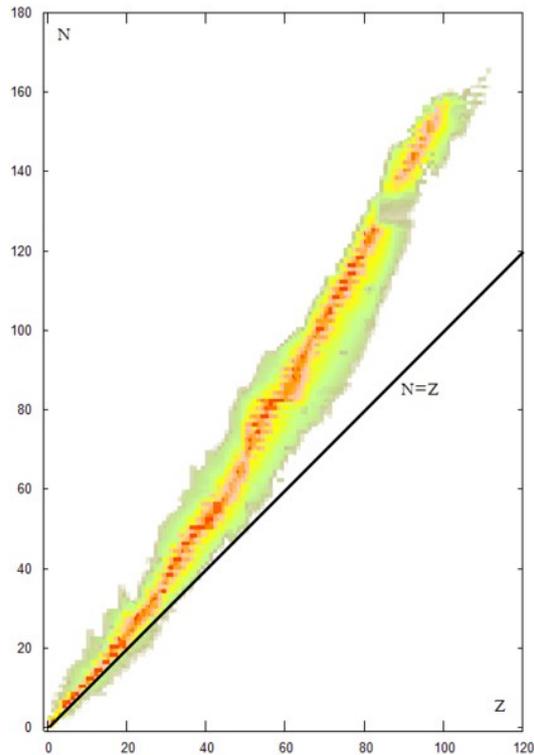
Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un **neutrino** :

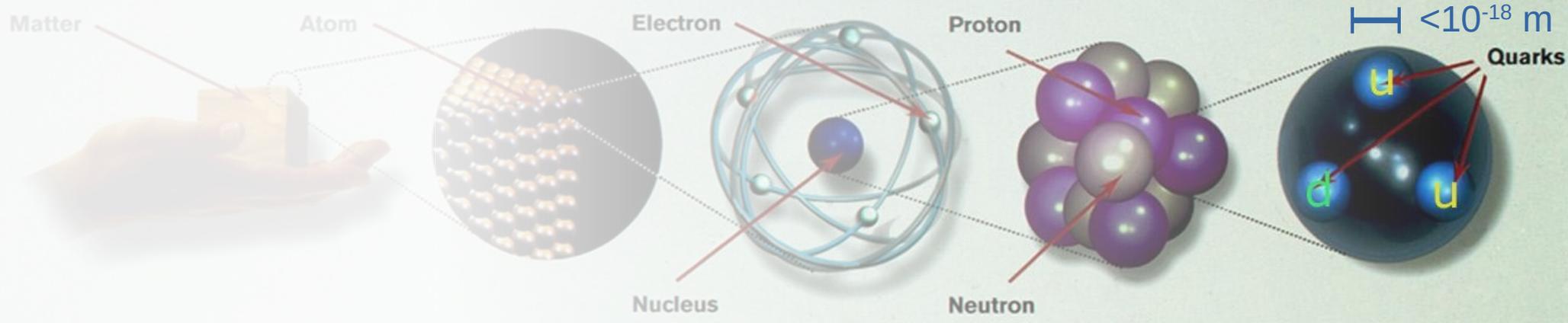
interaction faible



→ Qu'est-ce qui différencie les protons et les neutrons ?

→ *structure du nucléon*





Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de **quarks**

2 types de quarks (à ce stade) :

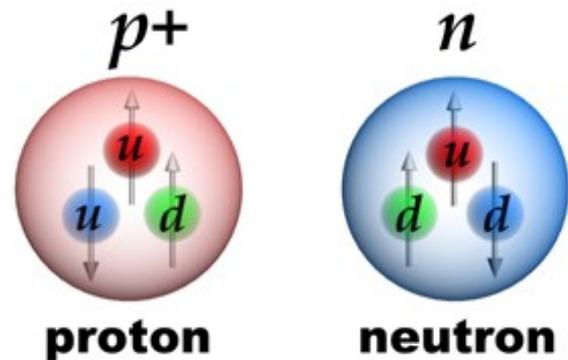
→ **Up** ($q=+2/3$) : u

→ **Down** ($q=-1/3$) : d

Teneur en quarks des nucléons :

→ proton ($q=1$) : uud

→ neutron ($q=0$) : udd



© 3xplus.com

Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par **l'interaction forte**

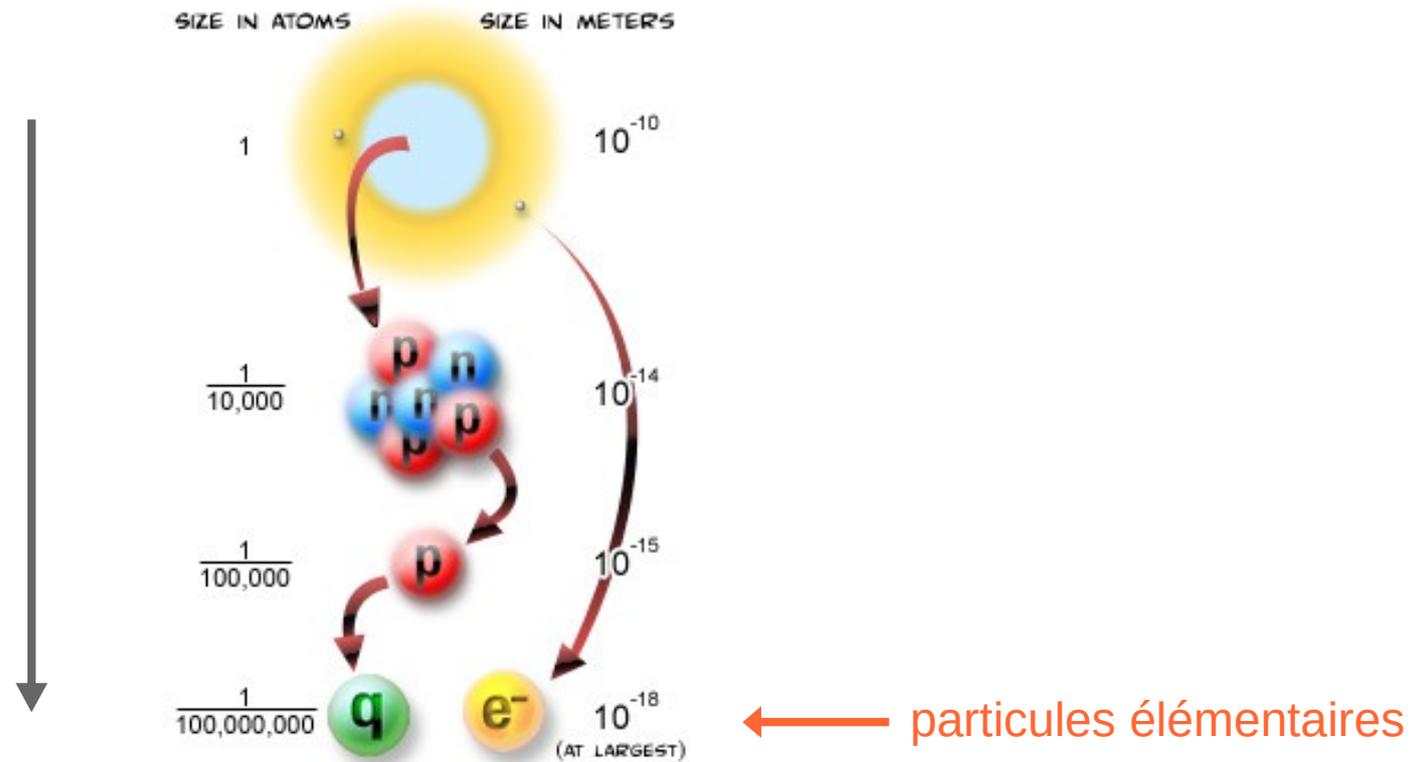
→ les quarks sont élémentaires : pas de sous-structure connue

→ les quarks ne se déplacent pas librement : ils forment des **hadrons**

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

8 ordres de grandeur



Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

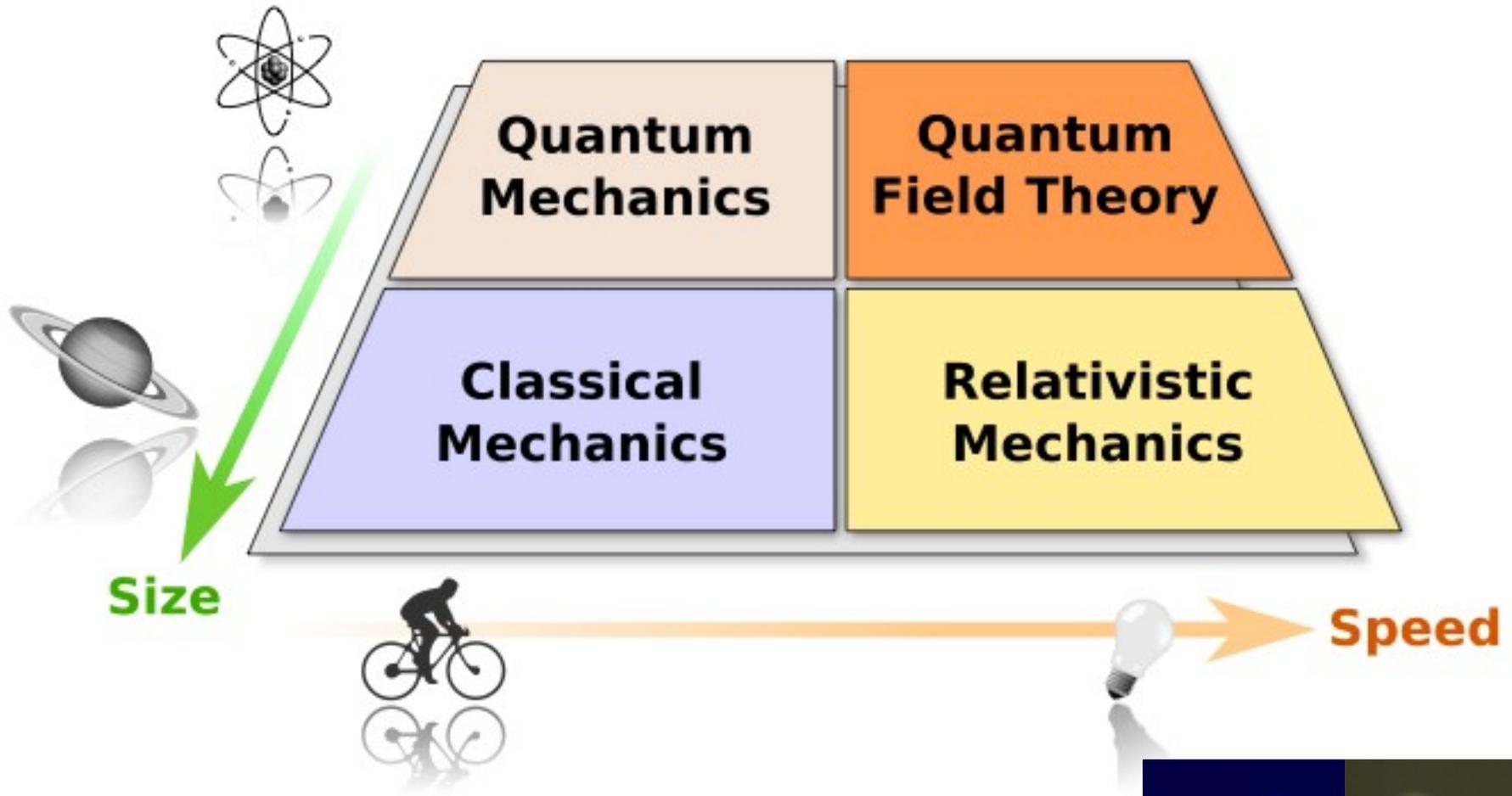
Constituants élémentaires :

	q	nom	
Quarks	+2/3	up	} sensible à l'interaction forte
	-1/3	down	
Leptons	-1	electron	} ne réagissent pas à l'interaction forte
	0	neutrino	

Interactions fondamentales entre ces constituants :

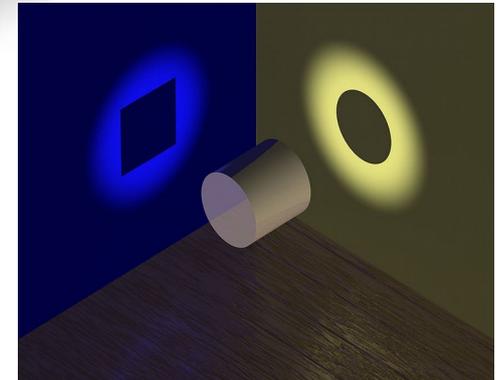
- gravitation (trop faible : pas de rôle en physique des particules)
- **faible** (agit sur toutes les particules)
- **électromagnétique** (agit sur les particules chargées électriquement)
- **forte** (agit sur les quarks seulement)

A la croisée de 2 théories fondamentales



Relativité restreinte : $E = mc^2$ ($E^2 = M^2 + P^2$)

Mécanique quantique : $E = \hbar \omega$



L'énergie

Définition (Wikipedia): « *capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière ou de la chaleur. C'est une grandeur physique qui caractérise l'état d'un système et qui est d'une manière globale conservée au cours des transformations* »

Formes:

- énergie cinétique d'une masse en mouvement :
→ mécanique classique : $E_c = 1/2 mv^2$
- énergie potentielle des divers types de forces s'exerçant entre systèmes
- **énergie de masse** : $E_0 = mc^2$ (c vitesse de la lumière)
→ l'énergie d'un système au repos est reliée à sa masse

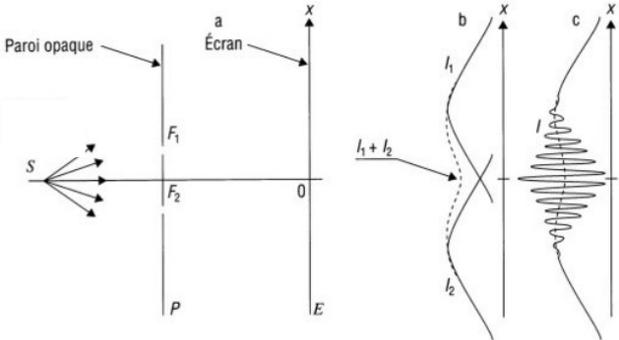
Unités :

- SI : le *Joule* - $1J = 1N \times m = 1 kg \times m^2 / s$
- Physique des particules : l'électronvolt - $1eV = 1.6 \cdot 10^{-19} J$ (énergie acquise par un électron accéléré dans un champ électrique de 1V)

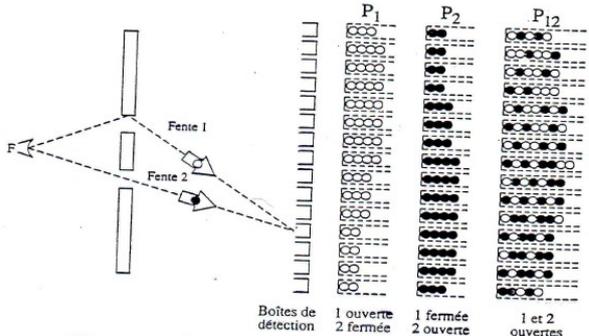
Mécanique quantique : illustration

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

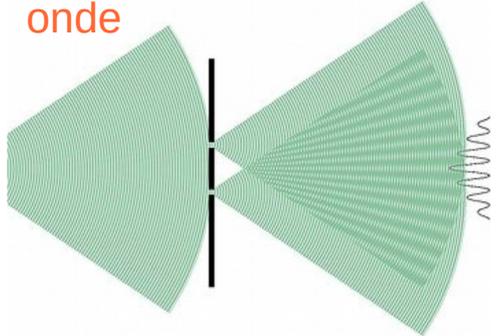
L'expérience :



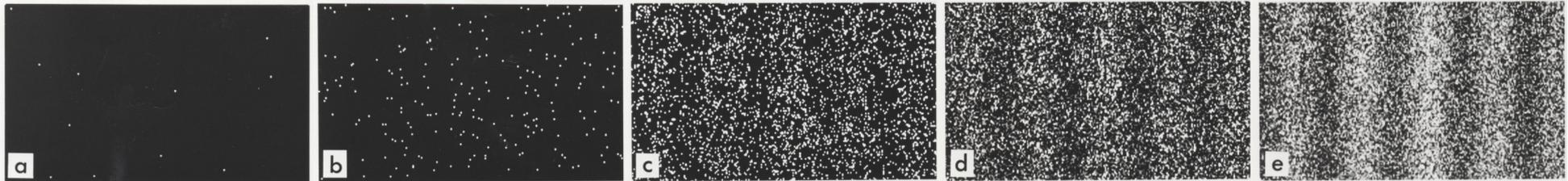
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



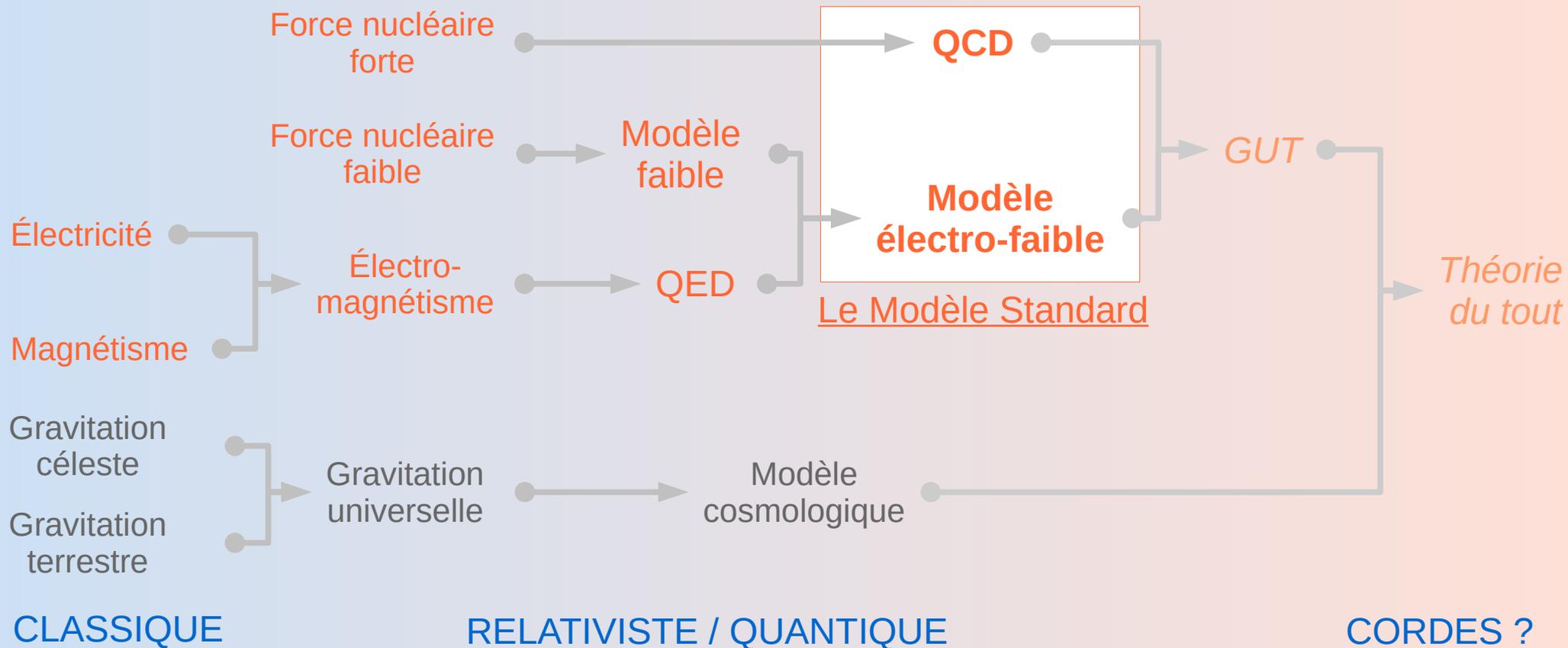
Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

Les théories fondamentales



Le Modèle Standard décrit les interactions entre les particules élémentaires

- QCD : interaction entre les charges de couleurs
- **Modèle électro-faible** : unification des forces faible et électromagnétique

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

Constituants élémentaires :

	q	nom	
Quarks	+2/3	up	} sensible à l'interaction forte
	-1/3	down	
Leptons	-1	electron	} ne réagissent pas à l'interaction forte
	0	neutrino	

Interactions fondamentales entre ces constituants :

- gravitation (trop faible : pas de rôle en physique des particules)
- **faible** (agit sur toutes les particules)
- **électromagnétique** (agit sur les particules chargées électriquement)
- **forte** (agit sur les quarks seulement)

Constituants élémentaires

Autres formes de matière

1^{ère} famille

2^{ème} famille

Quarks	+2/3	up	u	charm	c
	-1/3	down	d		strange
Leptons	-1	electron	e	muon	μ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ

Constituants élémentaires

Autres formes de matière

		1 ^{ère} famille		2 ^{ème} famille		3 ^{ème} famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom (beauty)	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tau	τ
	0	neutrino	ν_e	neutrino muon	ν_μ	neutrino tau	ν_τ

Il existe 2 autres générations de particules en plus de celles composant la matière ordinaire :

- même structure (même contenue en quarks et leptons)
 - ↘ une organisation remarquable !
- dont les particules sont :
 - ↘ plus lourdes
 - ↘ instables : vont se désintégrer spontanément en donnant des particules plus légères

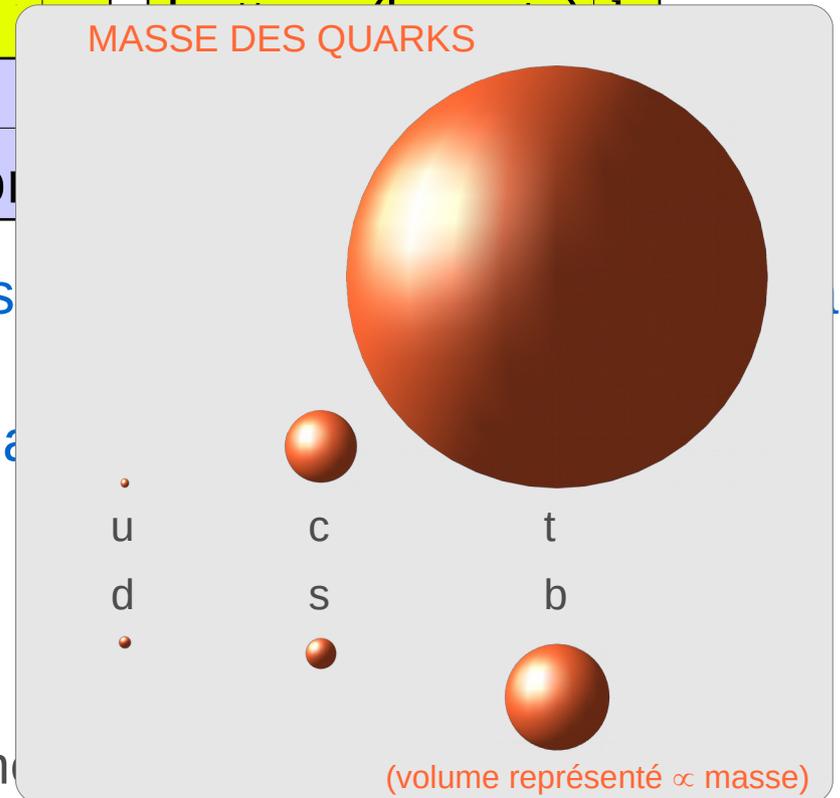
Constituants élémentaires

Autres formes de matière

		1 ^{ère} famille		2 ^{ème} famille		3 ^{ème} famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom	b
Leptons	-1	electron	e	muon	μ	tauon	τ
	0	neutrino	ν _e	neutrino muon	ν _μ	neutrino tauon	ν _τ

Il existe 2 autres générations de particules de matière ordinaire :

- même structure (même contenue en quarks)
 - ↳ une organisation remarquable !
- dont les particules sont :
 - ↳ plus lourdes
 - ↳ instables : vont se désintégrer spontanément en particules plus légères



Les interactions

Principe

Interaction :

→ résultat d'une force exercée entre 2 corps

Caractéristiques :

→ **nature des corps** sur lesquels elles s'exercent

→ **intensité**

→ **portée**

Exemples :

→ interaction électrostatique

$$\mathbf{F}_{12} = 1/(4\pi\epsilon_0) \times q_1q_2/r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

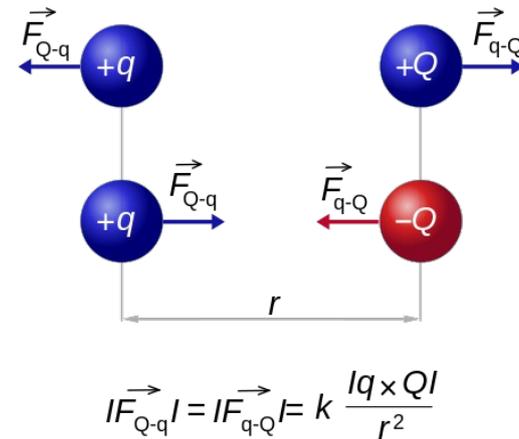
$$1/(4\pi\epsilon_0) = 9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{C}^2$$

→ interaction gravitationnelle

$$\mathbf{F}_{12} = -G \times m_1m_2/r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

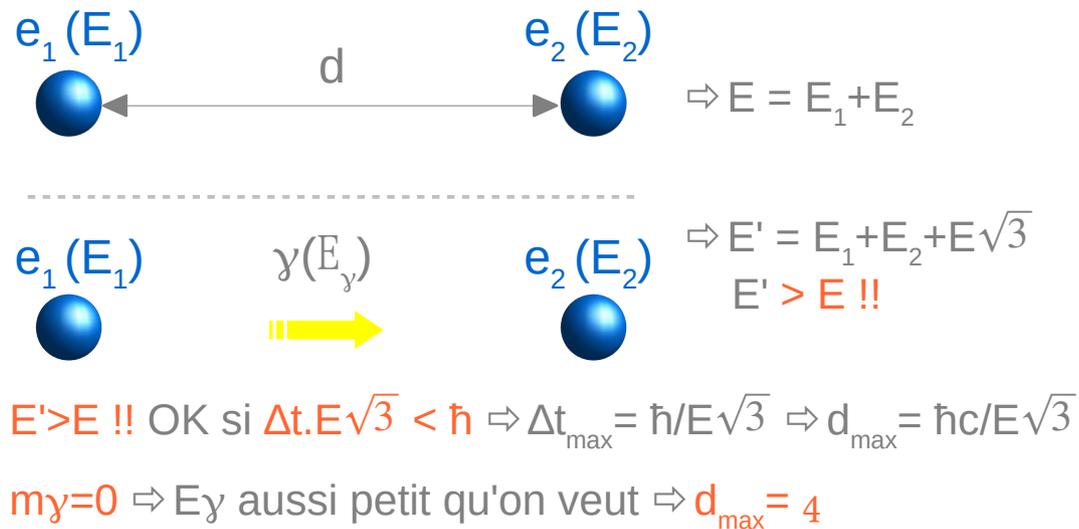
$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$$

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules



Les interactions

Les messagers

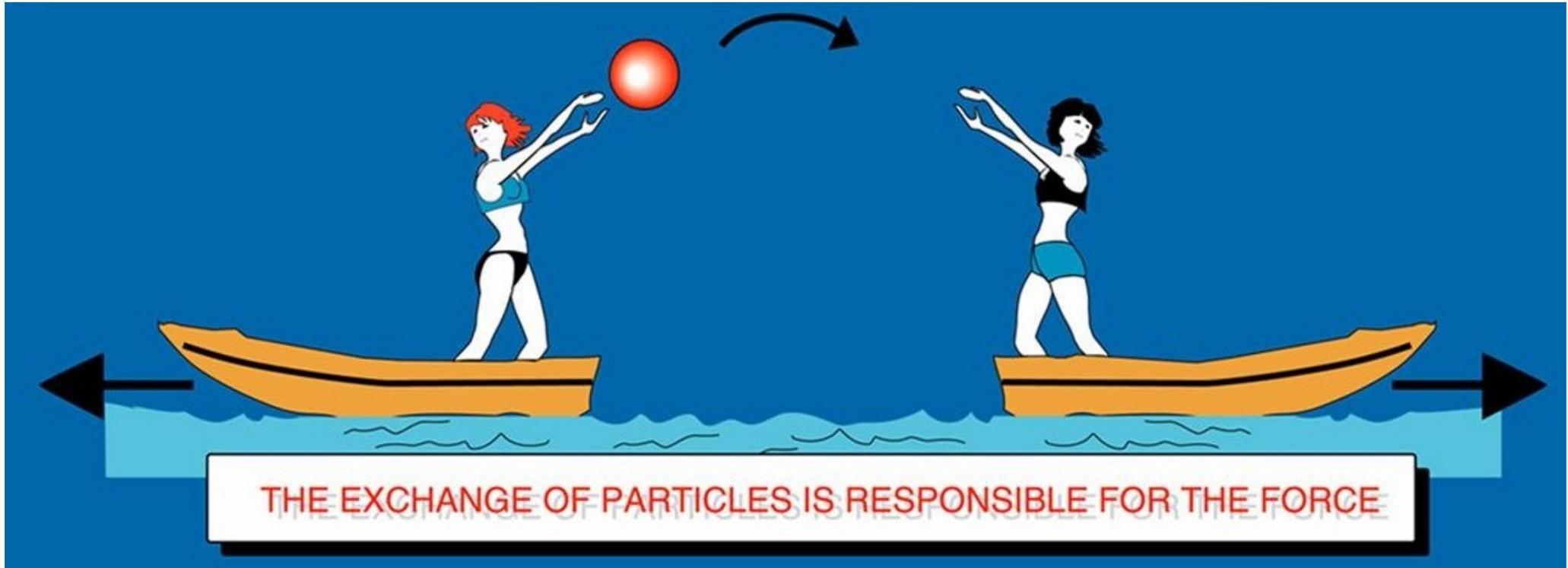


Force électrostatique entre 2 électrons e_1 et e_2 :

- comment e_1 sait-il que e_2 existe et qu'il est donc soumis à une force ?
- échange d'information à la vitesse de propagation du champ électromagnétique
⇔ échange d'un photon *virtuel*

Les interactions

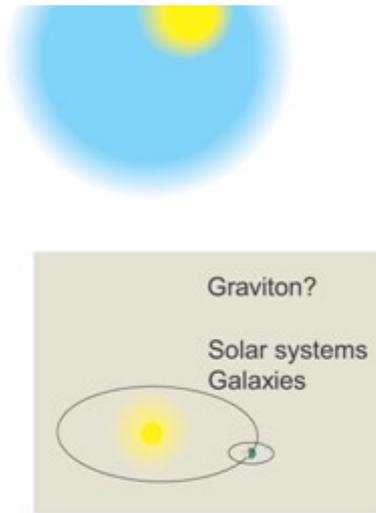
Les messagers



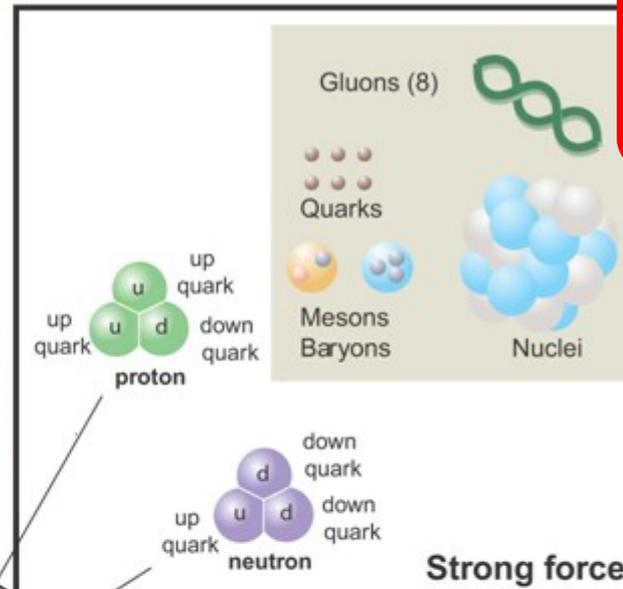
- Interaction fondamentale:
 - échange de particules
 - particule échangée = vecteur de l'interaction
 - portée de l'interaction $\propto 1/m_{\text{vecteur}}$

Les interactions fondamentales

10^{-40}



Gravity Force



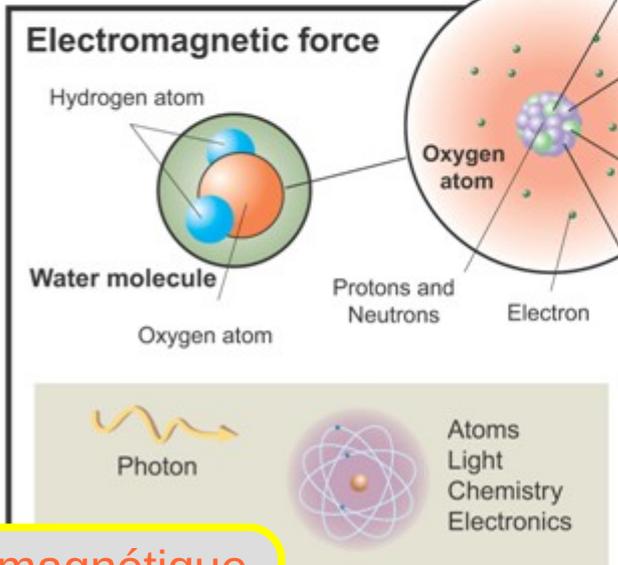
Strong force

Interaction **forte**

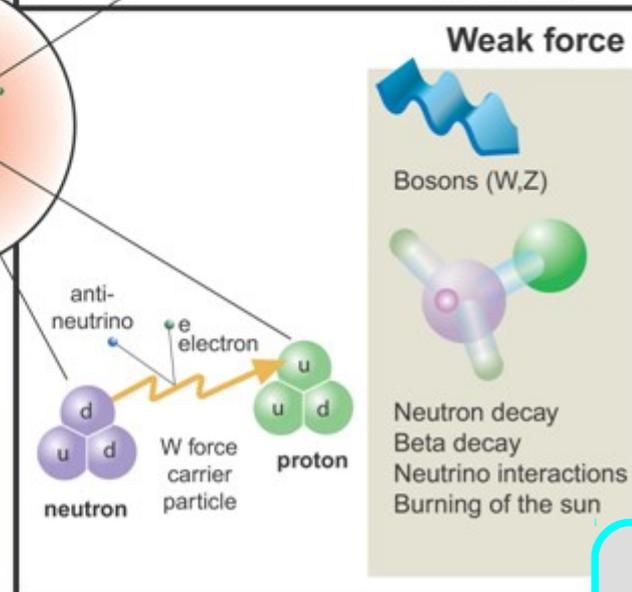
vecteur : gluon (g)
M=0
charge : couleur

10^3

1



Electromagnetic force



Weak force

10^{-5}

Interaction **électromagnétique**

vecteur : photon (γ) ; M=0
charge : charge électrique

Interaction **faible**

vecteur : Z^0, W^+, W^-
M= 80 à 90 GeV !!!
charge : isospin

L'antimatière !?



L'antimatière

Le positron

Équation du mouvement d'un électron [1928, Dirac]

- mécanique quantique
- cas relativiste

→ Equation de Dirac

$$i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$$

$$\text{où } H(t) = mc^2\alpha_0 - c\boldsymbol{\alpha}\cdot\mathbf{p}$$

→ 2 solutions :

positive \Rightarrow électron

négative \Rightarrow **positron**

Observation [1932, Anderson]

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les même caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

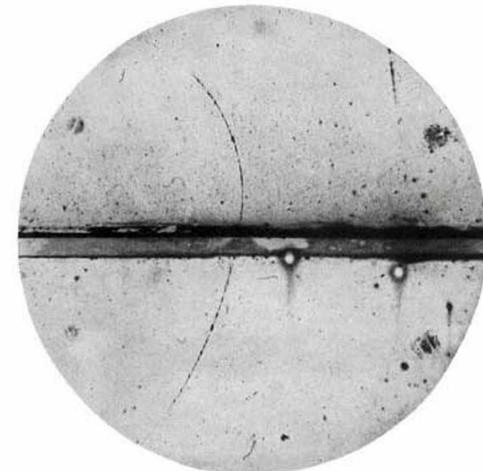
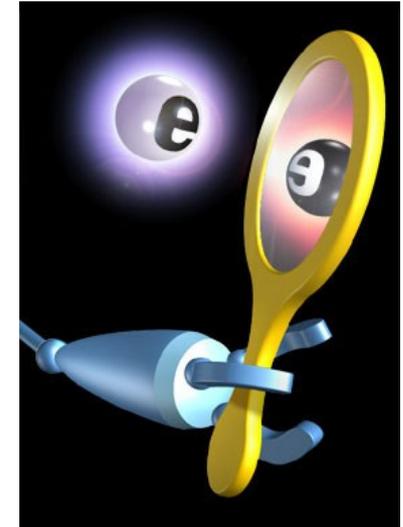


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

L'antimatière

Les antiparticules

Le positron = l'anti-électron

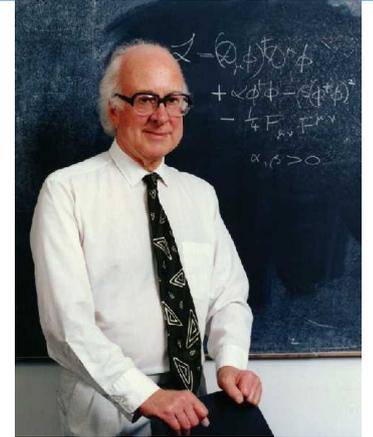
Généralisation :

- A toute ces particules, il faut adjoindre une **antiparticule**, c.à.d. une particule :
 - de même masse et de même spin
 - autres nombres quantiques renversés
 - e.g. : charge électrique
 - notation courante : \bar{b} antiparticule associée au quark **b**
- Certaines particules sont leurs propres antiparticules, e.g. :
 - le photon
- Les antiparticules se comportent comme les particules (vu dans un miroir)
 - en première approximation seulement !
 - en réalité, la symétrie n'est pas parfaite
 - sujet d'étude très actif
 - une question fondamentale : **où est passée l'antimatière ? !**

Le boson de Higgs

L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse.
Pour les faire apparaître : **mécanisme de Higgs**



Le physicien britannique
Peter Higgs



Le boson de Higgs

L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse.

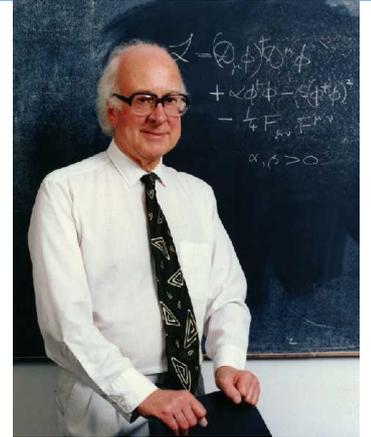
Pour les faire apparaître : mécanisme de Higgs

Implique l'existence d'un bosons supplémentaire :

→ le boson de Higgs

Postulé en 1964

Découvert en 2012 au CERN



Le physicien britannique
Peter Higgs



La physique des particules

Le Modèle Standard

Tout est là :

→ la matière : les fermions

- ↘ 6 quarks + 6 antiquarks
- ↘ 6 leptons + 6 antileptons

→ les vecteurs des interaction (bosons de jauge)

- ↘ interaction forte :
8 gluons
- ↘ interaction électrofaible
 W^+ , W^- , Z^0 , γ

→ le boson de Higgs

- ↘ par lequel les particules élémentaires acquièrent leur masse

		Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions	boson de masse				
		I	II	III						
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2	u up	1.27 GeV +2/3 1/2	c charm	171.2 GeV +2/3 1/2	t top	0 0 1	γ photon	125 GeV 0 0	H boson de Higgs
	4.8 MeV -1/3 1/2	d down	104 GeV -1/3 1/2	s strange	4.2 GeV -1/3 1/2	b bottom	0 0 1	g gluon		
	<2.2 eV 0 1/2	ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2	ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2	ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1	Z^0 boson Z		
LEPTONS	511 KeV -1 1/2	e électron	105.7 MeV -1 1/2	μ muon	1.777 GeV -1 1/2	τ tau	80.4 GeV ± 1 1	W^\pm bosons W	125 GeV 0 0	H boson H
					BOSONS DE JAUGE					

nom
spin
charge électrique
masse
symbole

Le Modèle Standard

Une théorie remarquable ...

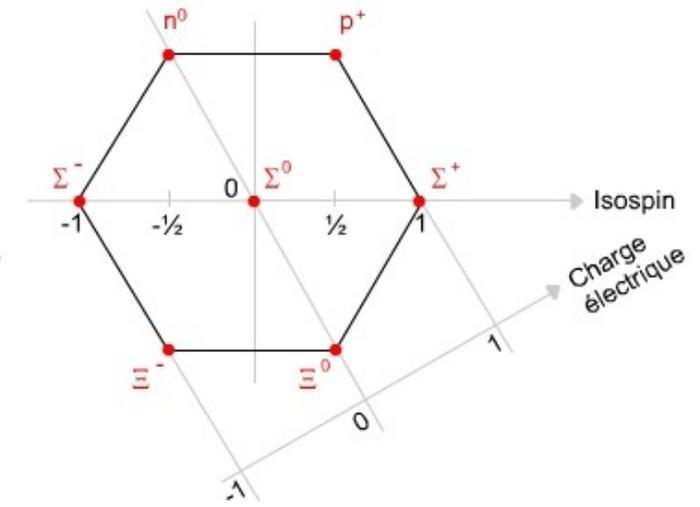
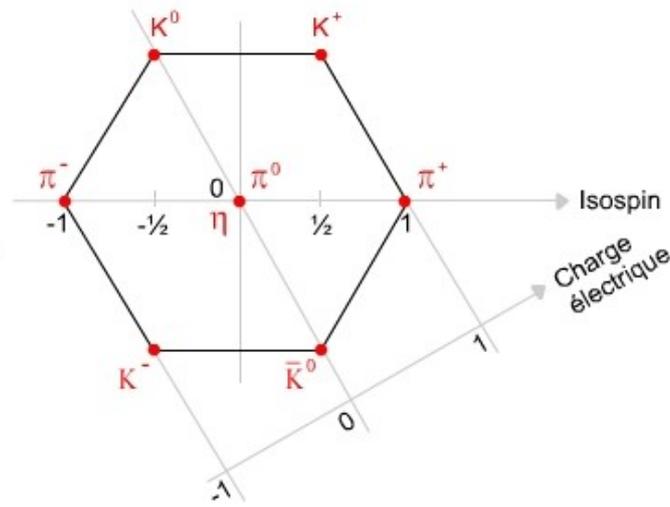
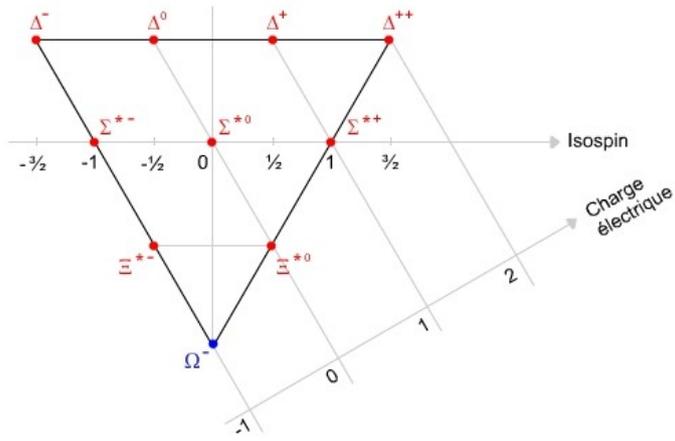
- testée avec une grande précision
- rend compte de toutes les observations effectuées en laboratoire sur une gamme d'énergie allant de l'eV au TeV (10^{15} eV)

... qui laissent de nombreuses questions en suspens

- pourquoi 3 familles de particules ?
- pourquoi des masses si différentes ?
- le MS unifie la force électromagnétique et la force faible mais pourquoi la force forte est-elle si différente ?
- et la gravitation ?
- la disparition de l'anti-matière ?

De plus, l'astronomie et la cosmologie montrent que

- le MS ne décrit que ~ 4 % du contenu énergétique de l'Univers
- la matière noire ?
- l'énergie noire ?



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

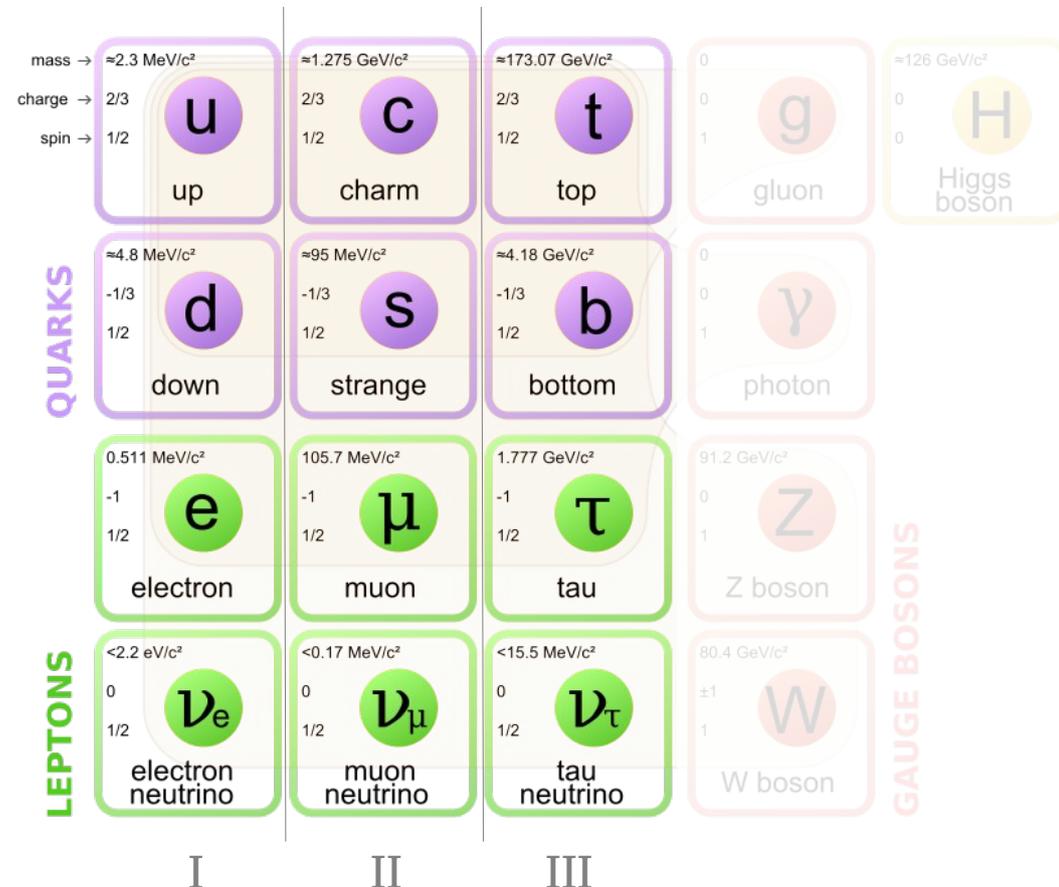
+ l'équivalent en anti-matière

=> 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

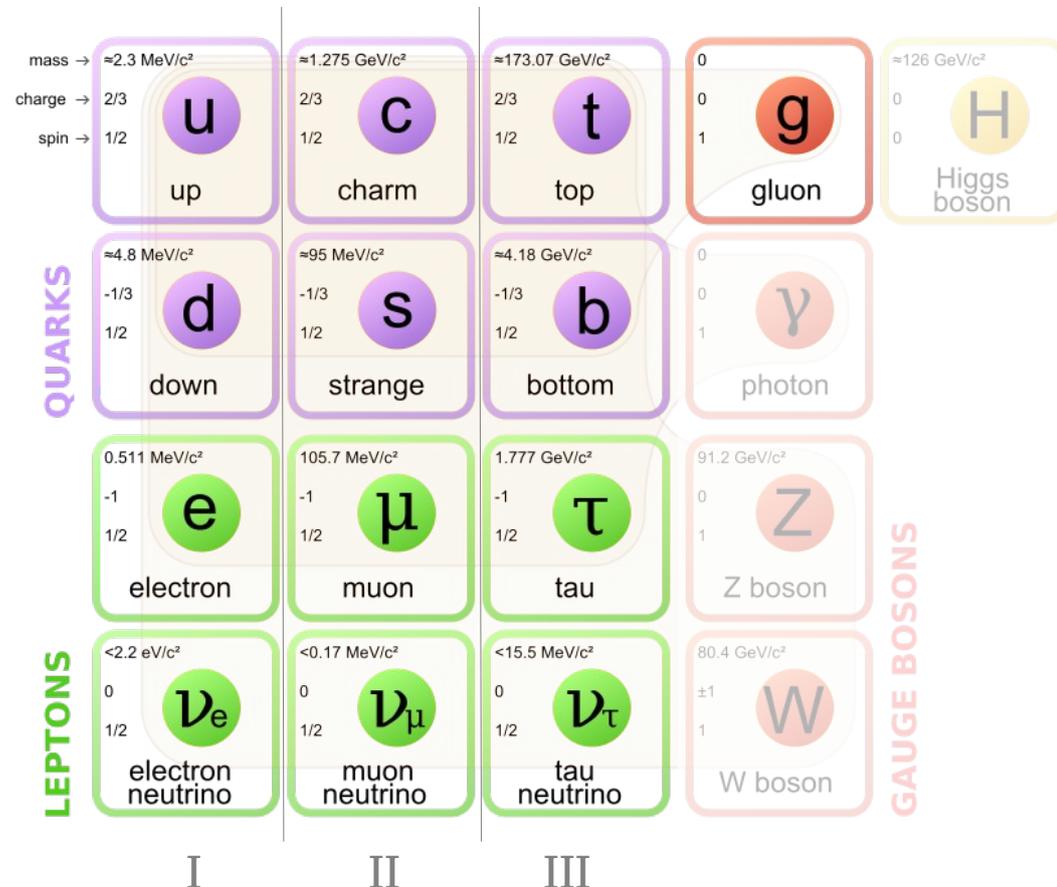
=> 12 particules de matière

+ 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)
- $r\bar{v}b = \overline{r\bar{v}b} = \overline{r\bar{r}} = \overline{v\bar{v}} = \overline{b\bar{b}} = \text{BLANC}$
- 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)
- $r\overline{v}b = \overline{r}vb = r\overline{r} = \overline{v}v = b\overline{b} = \text{BLANC}$
- insensible à la force forte
- vecteur : les gluons
- intensité :
- augmente avec la distance !!**
- conséquences ?**

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

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

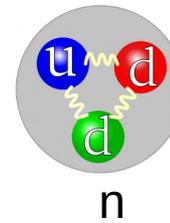
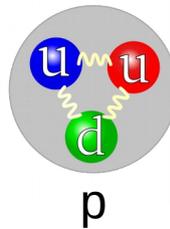
→ $\overline{r\overline{r}} = \overline{v\overline{v}} = \overline{b\overline{b}} = \text{BLANC}$

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

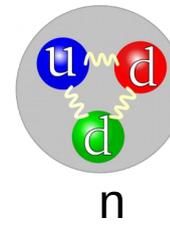
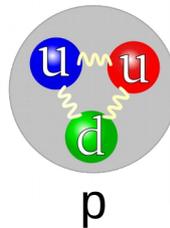
Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

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

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

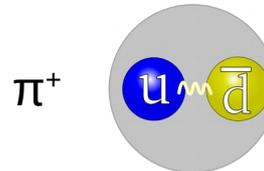
- différents types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



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

Un méson léger :
le *pion* chargé



Les assemblages de quarks

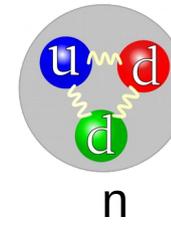
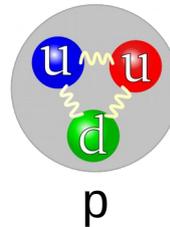
Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

- $rgb = \overline{r\overline{g}\overline{b}} = \text{BLANC}$: 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

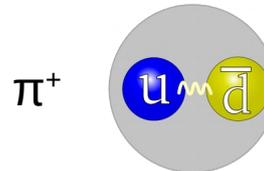
- différents types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



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

Un méson léger :
le *pion* chargé



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

Les assemblages de quarks

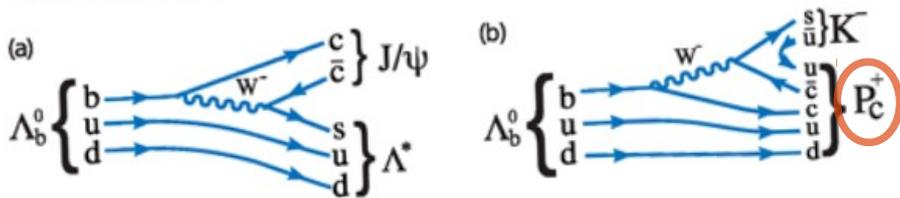
14 July 2015: Observation of particles composed of five quarks, pentaquark-charmonium states, seen in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ decays.



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

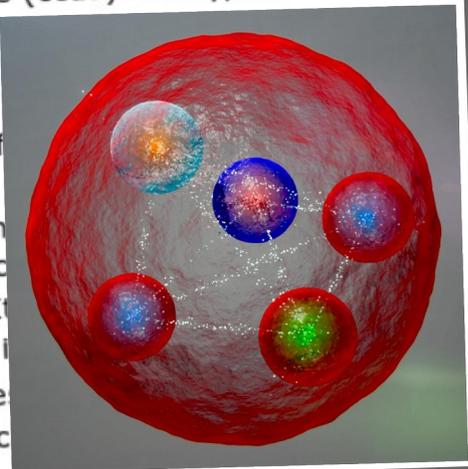
$$[m(P_c^+(4380)) = 4380 \pm 8 \pm 29 \text{ MeV}, \Gamma = 205 \pm 18 \pm 86 \text{ MeV}]$$

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



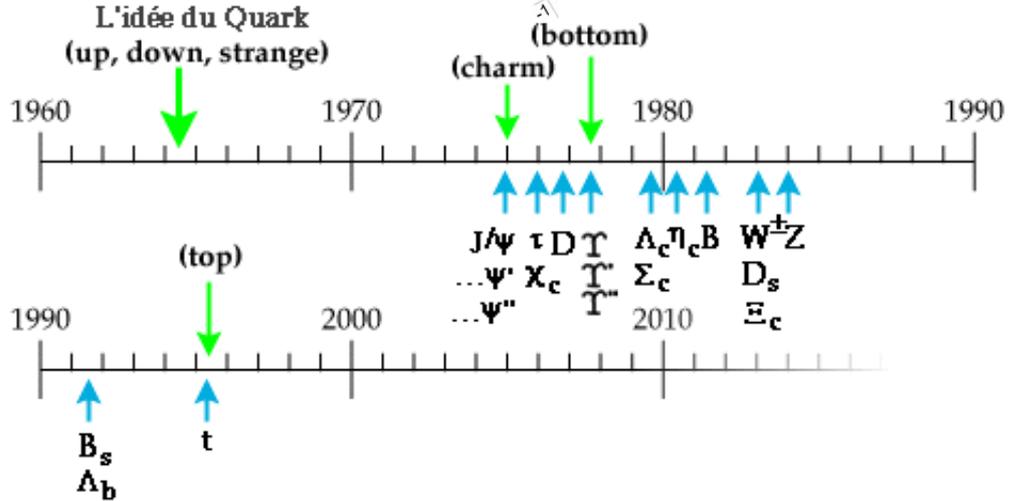
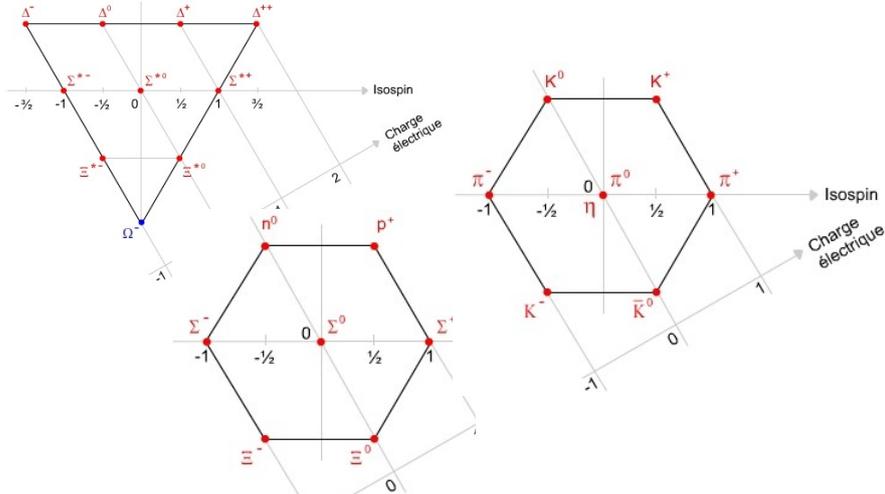
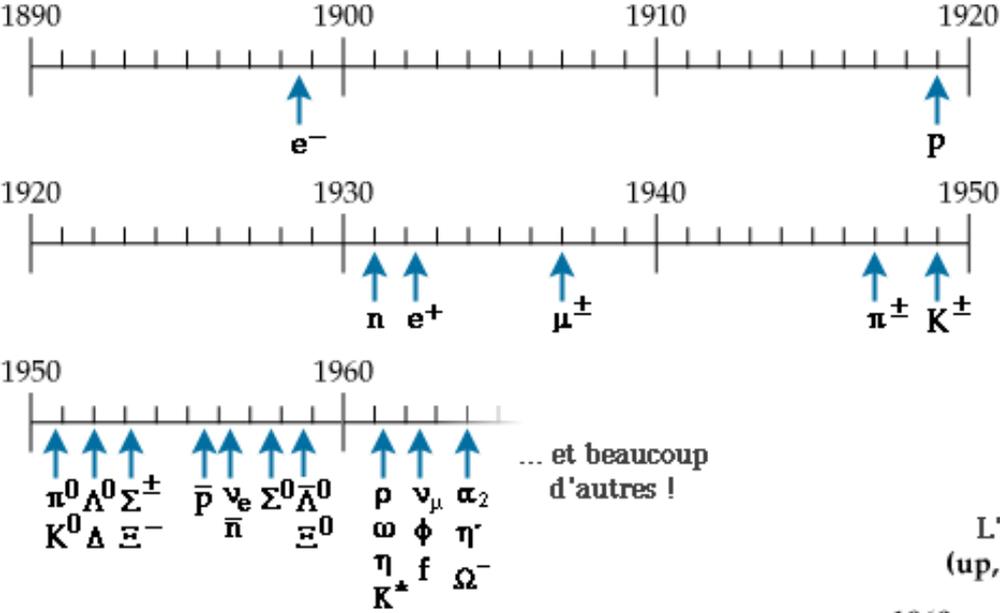
LHCb physicists have analyzed a $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ decays with only 5% of the Λ_b^0 baryon is like a neutron, quark in place of one of the down quarks. The decay proceeds by the diagram (a), which

hadrons and is dominated by Λ^* 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)

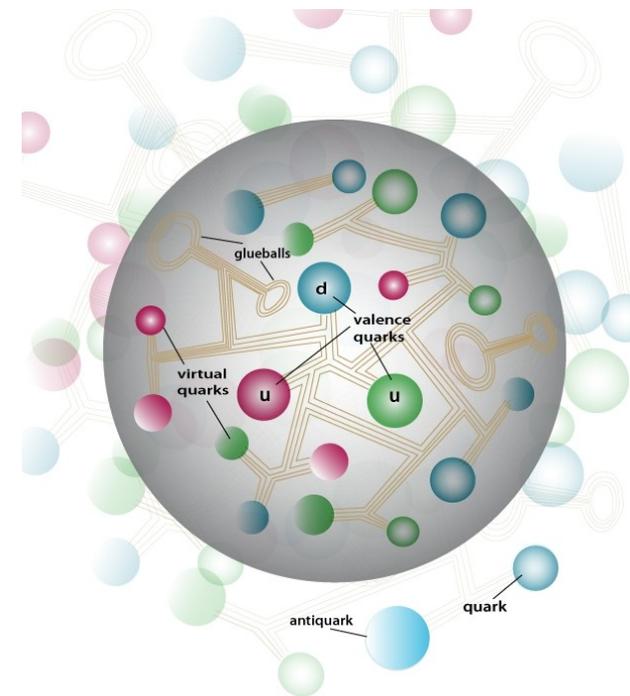
- $m(u) \approx 2 \text{ MeV}$; $m(d) \approx 5 \text{ MeV}/c^2$

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

- masse du proton :

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

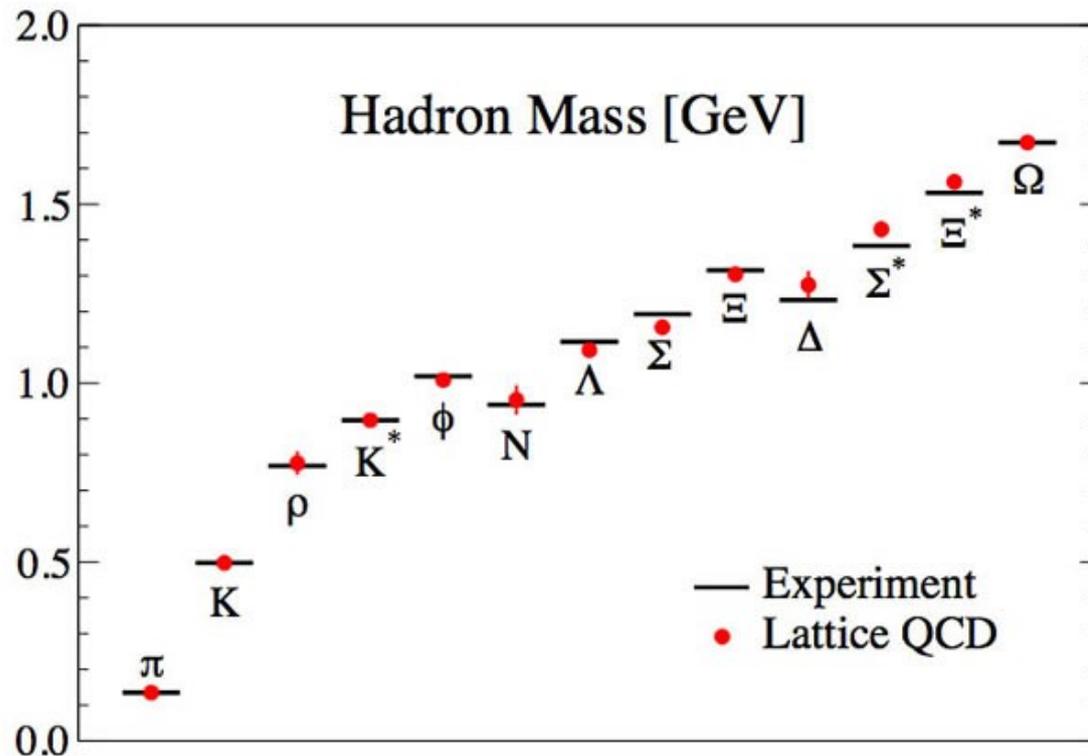
↘ l'essentiel de la masse est en fait donné par l'énergie de l'interaction forte entre les quarks



La masse des hadrons (2/2)

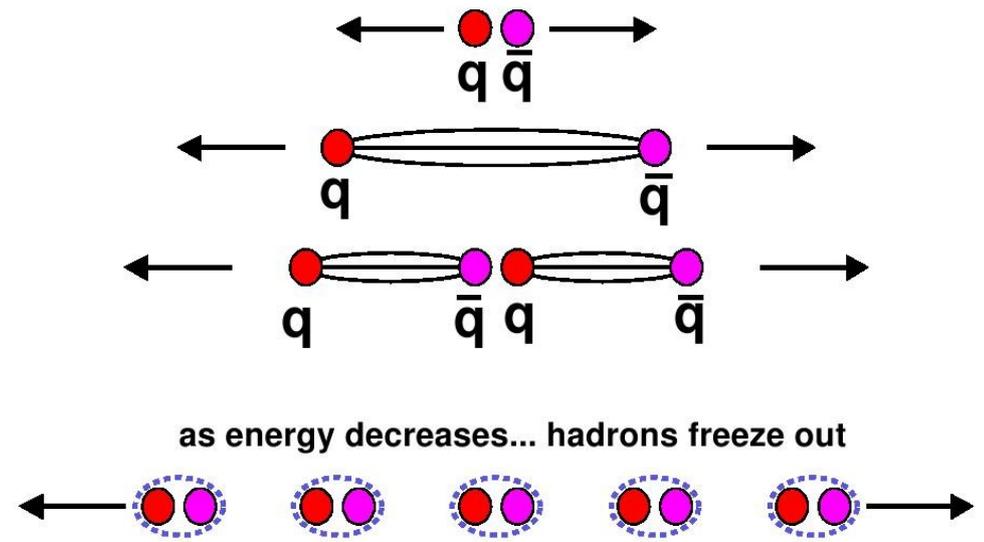
Quel est la masse d'un hadron ?

- 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 ?

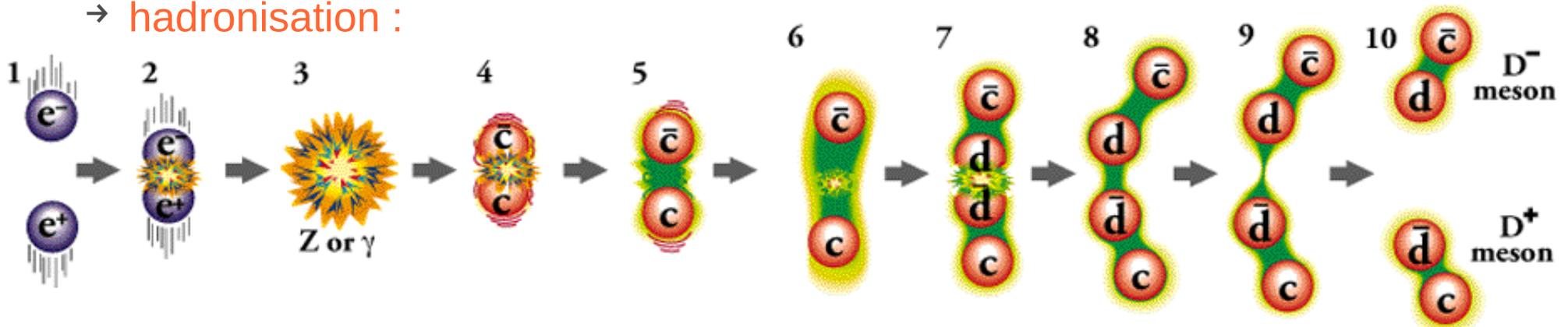
Si on tire très fort sur les quarks à l'intérieur d'un hadron, peut-on les séparer ?



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 :**



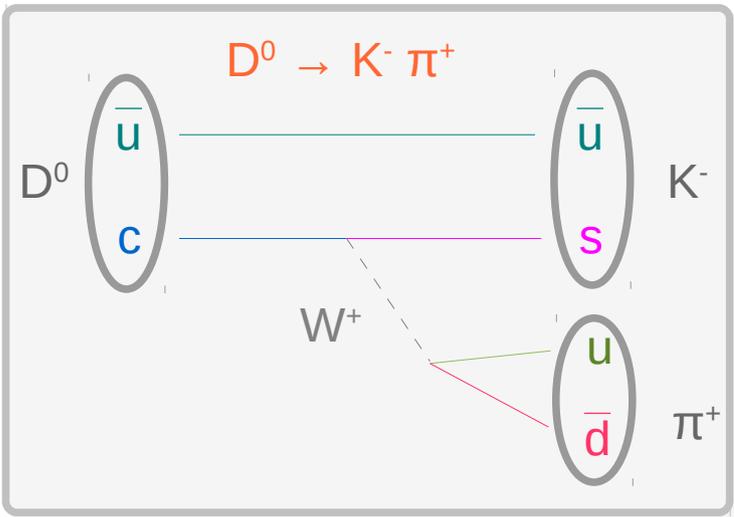
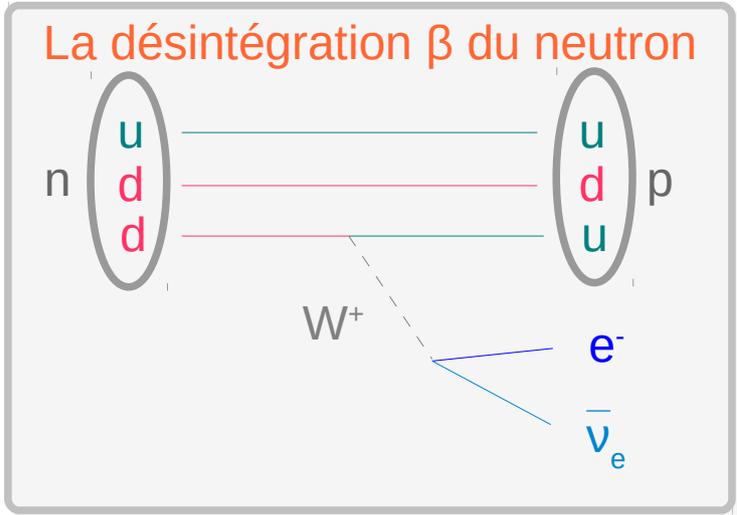
Désintégration des hadrons (1/3)

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



→ L'interaction faible est la seule qui permette de changer la saveur des quarks

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

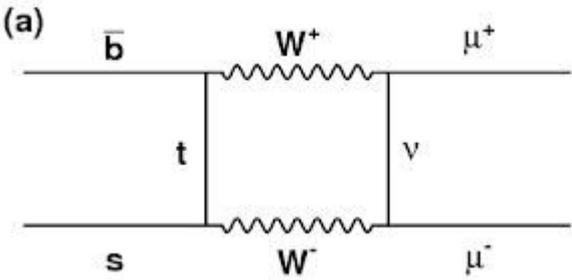


diagramme « en boîte »

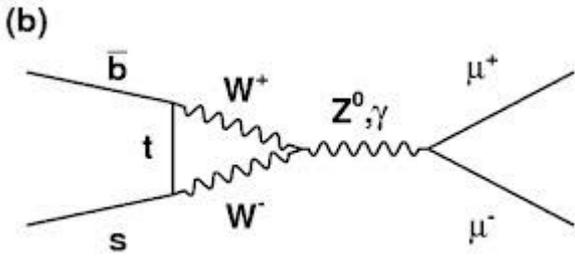
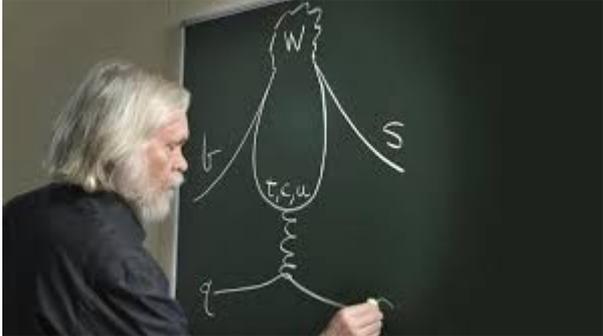


diagramme « pingouin »



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 (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level(MeV/c)	ρ
Topological modes			
0-prongs	[j] (15 ± 6)%	-	-
2-prongs	(70 ± 6)%	-	-
4-prongs	[k] (14.5 ± 0.5)%	-	-
6-prongs	[l] (6.4 ± 1.3) × 10 ⁻⁴	-	-
Inclusive modes			
e^+ anything	[n] (6.49 ± 0.11)%	-	-
μ^+ 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)%	-	-
η anything	(9.5 ± 0.9)%	-	-
η' anything	(2.48 ± 0.27)%	-	-
ϕ anything	(1.05 ± 0.11)%	-	-
Semileptonic modes			
$K^- e^+ \nu_e$	(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 ⁻⁴	-	843
$K_1(1270)^- e^+ \nu_e$	(7.6 ± 4.0) × 10 ⁻⁴	-	498
$K^- \pi^+ \pi^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.2 × 10 ⁻³	CL=90%	821
$(\bar{K}^*(892)\pi)^- \mu^+ \nu_\mu$	< 1.4 × 10 ⁻³	CL=90%	692
$\pi^- e^+ \nu_e$	(2.89 ± 0.08) × 10 ⁻³	S=1.1	927
$\pi^- \mu^+ \nu_\mu$	(2.37 ± 0.24) × 10 ⁻³	-	924
$\rho^- e^+ \nu_e$	(1.9 ± 0.4) × 10 ⁻³	-	771

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

[HTTP://PDG.LBL.GOV](http://pdg.lbl.gov)

Page 11

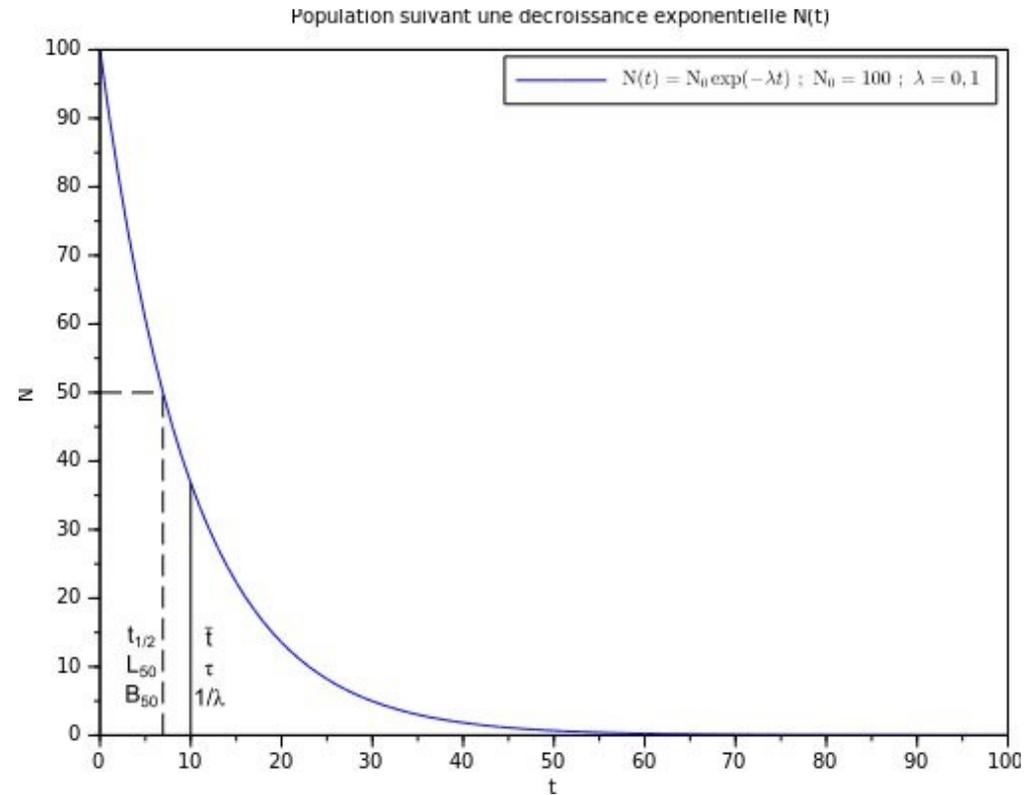
Created: 7/12/2013 14:49

... + qq pages suppl. !

Espérance de vie

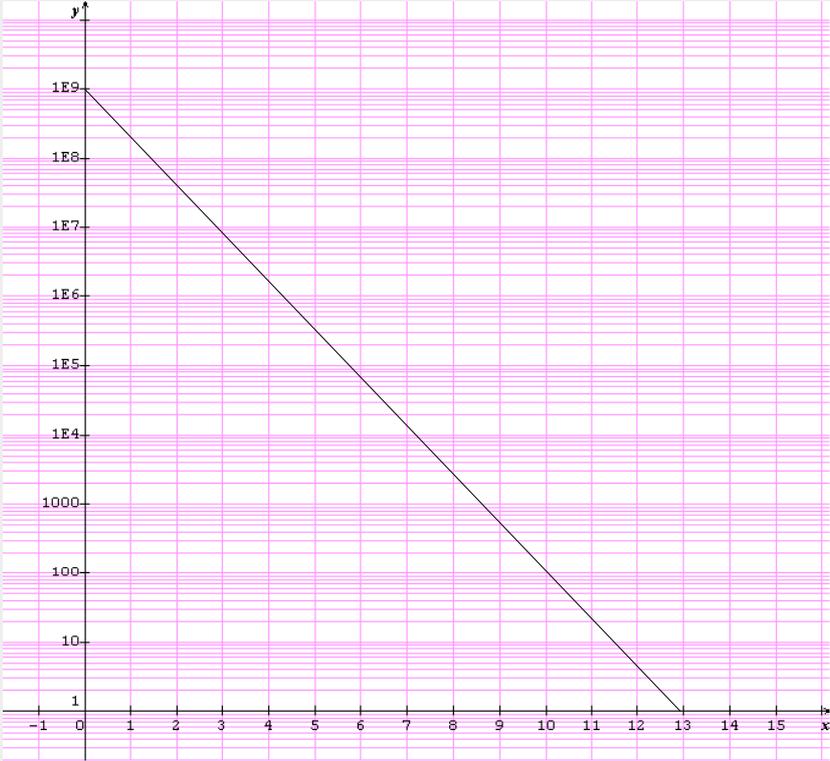
Les hadrons sont instables (sauf le proton ?)

- 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*

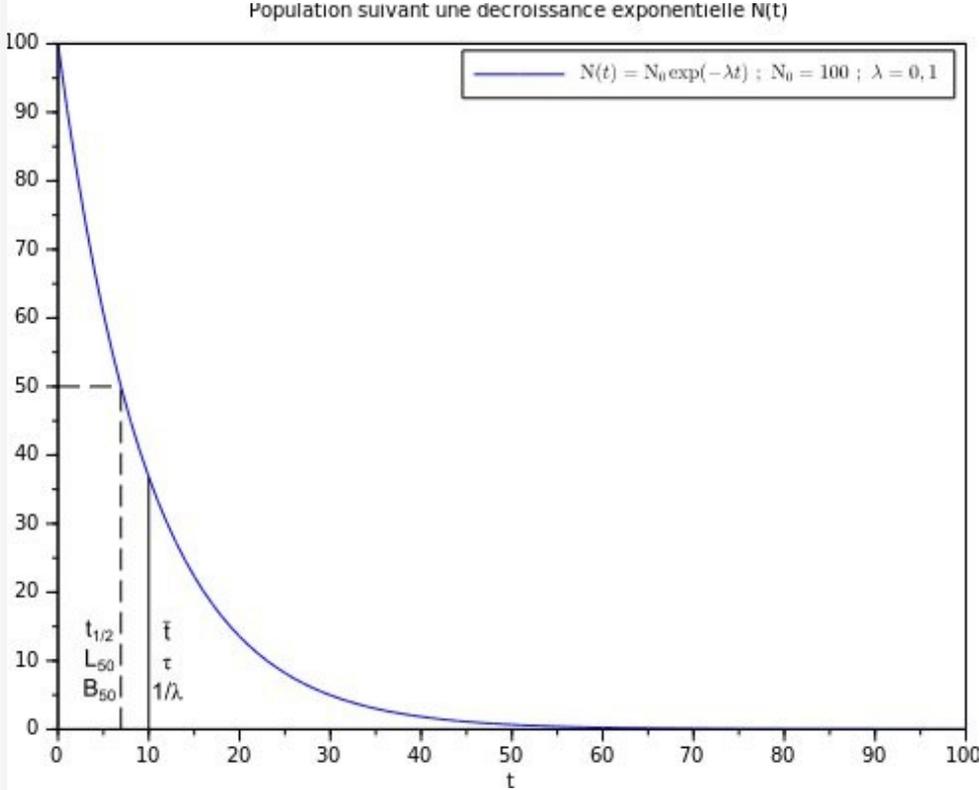


Espérance de vie

$$y = 10^9 \exp^{-1,6x}$$



Loi exponentielle et échelle logarithmique



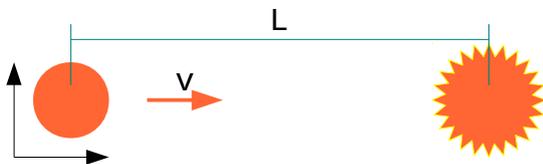
Interlude : l'espace-temps en relativité restreinte

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



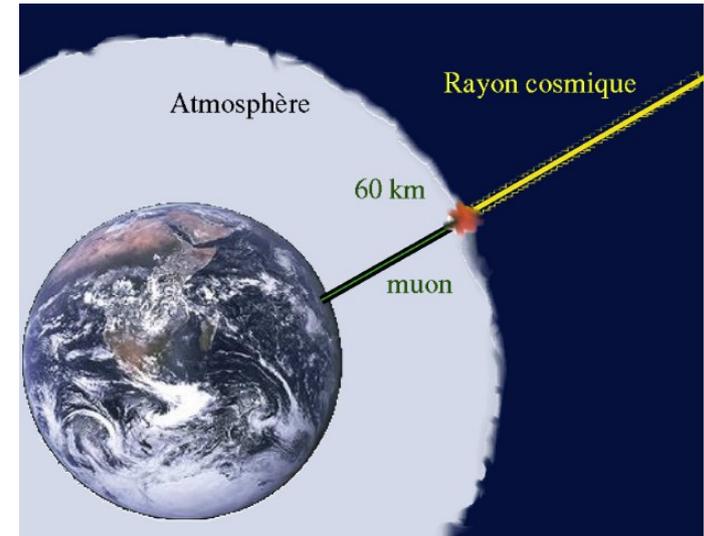
1) $v =$	300 km/s (0,1 % c)	→ $L =$	300 km ($t = 1s$)
2) $v =$	29 979 km/s (10 % c)	→ $L =$	30 130 km ($t = 1s$)
3) $v =$	269 813 km/s (90 % c)	→ $L =$	618 994 km ($t = 2s$)
4) $v =$	296 794 km/s (99 % c)	→ $L =$	2 103 921 km ($t = 7s$)
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % c)	→ $L =$	6 698 534 km ($t = 22s$)

⇒ 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 :

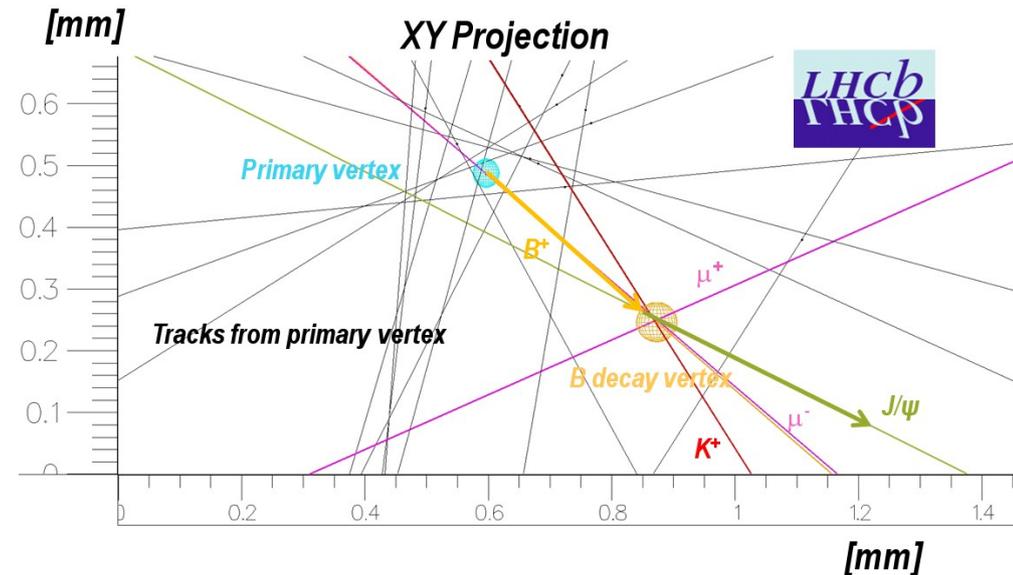
$$E = 100 \text{ GeV (typiquement)}$$

→ facteur relativiste :

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

→ distance parcourue (à la vitesse c) :

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



« 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

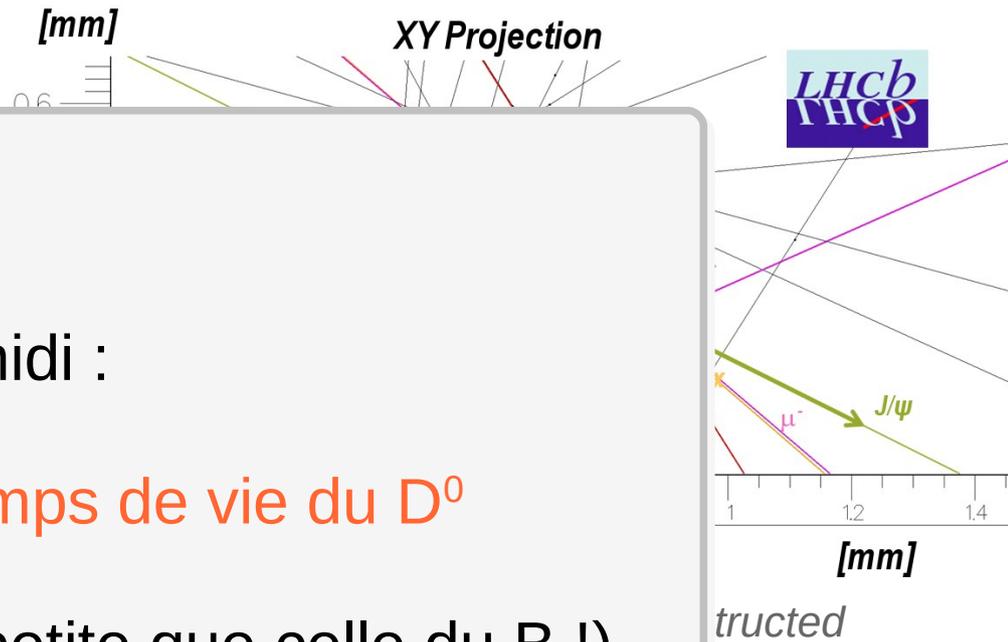
- masse
 $m = 5 \text{ GeV}$
- temps de vie propre
 $t_0 = 1,47 \cdot 10^{-12} \text{ s}$
- énergie des B_s
 $E = 100 \text{ GeV}$ (typique)
- facteur relativiste
 $\gamma = E/mc^2 = 20$
- distance parcourue
 $d = \gamma \cdot t_0 \cdot c = 9 \text{ cm}$

Teaser :

Cette après-midi :

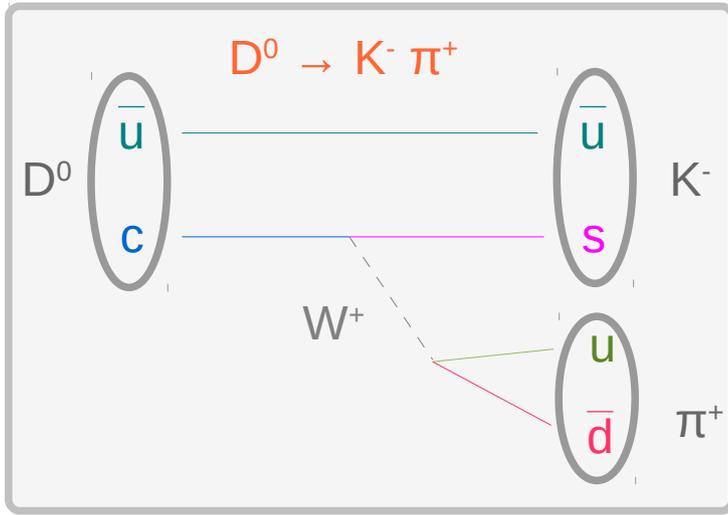
mesure du temps de vie du D^0

(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	± 0.13	MeV
$M(K^-) =$	493.677	± 0.016	MeV
$M(\pi^+) =$	139.57018	± 0.00035	MeV

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

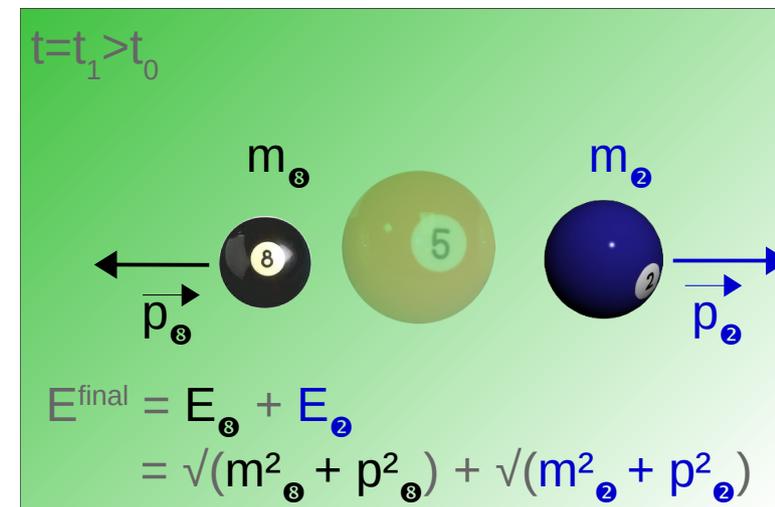
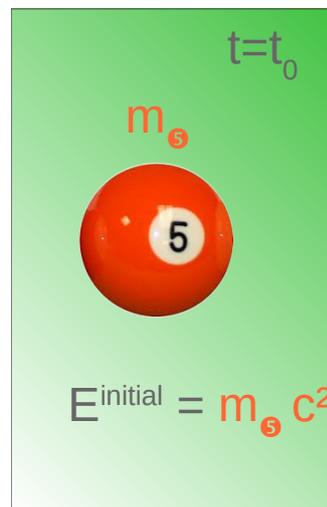
l'énergie (de masse, $E=mc^2$) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégrations

→ sous forme de masse :

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

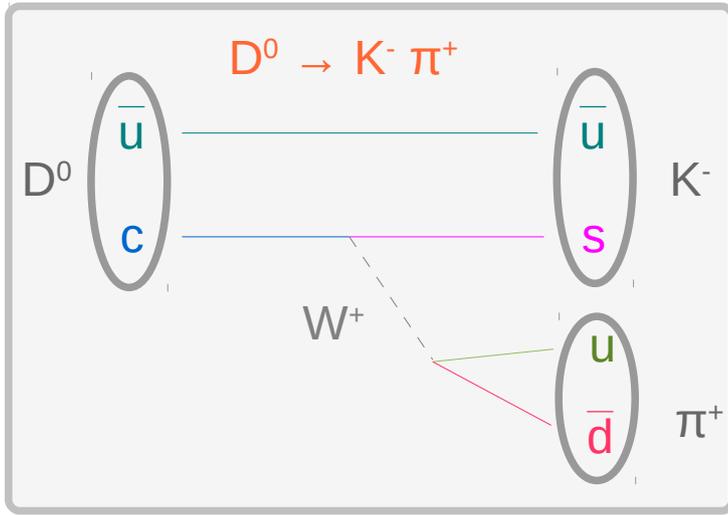
→ et d'énergie cinétique :

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



Masse et conservation de l'énergie

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



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

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 ?