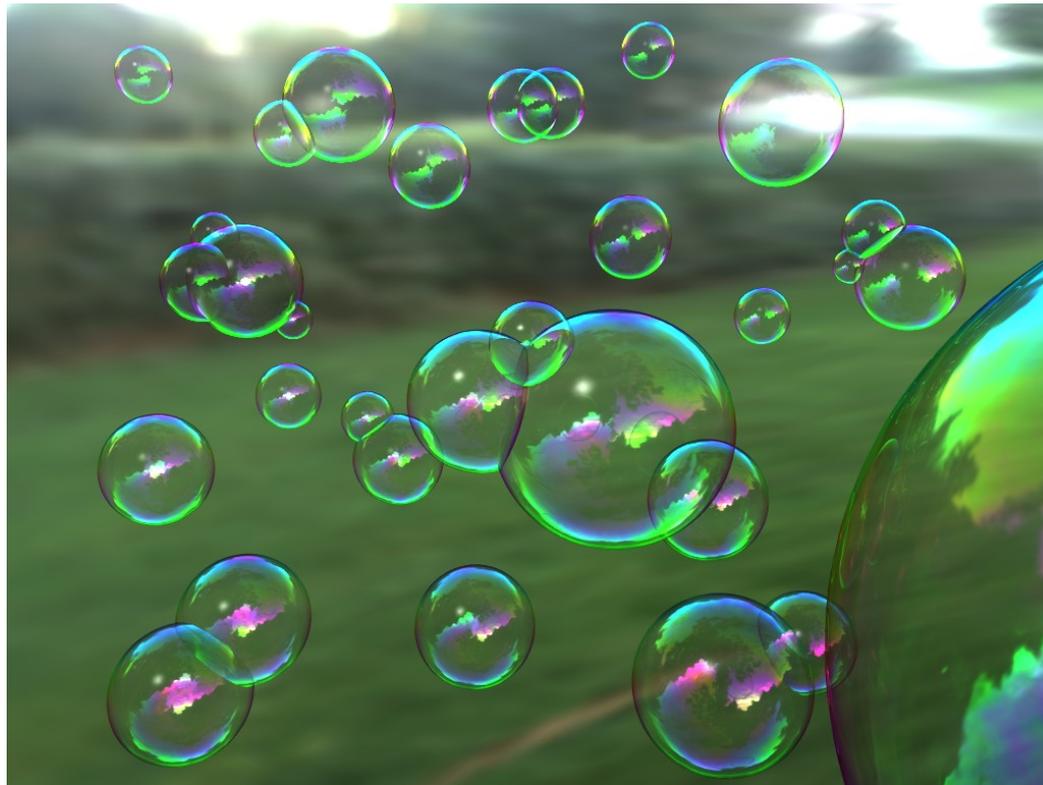


## Descente vers l'infiniment petit

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

# Les particules

Toute la matière qui nous entoure est constituée de particules

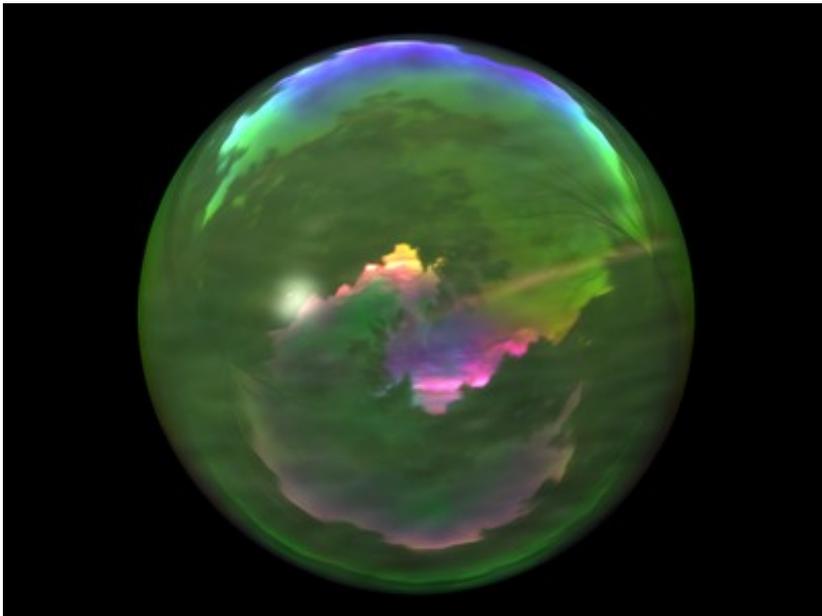


# Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

## Élémentaires

Elles n'ont pas de structure interne



## Composites

Existence d'une structure interne

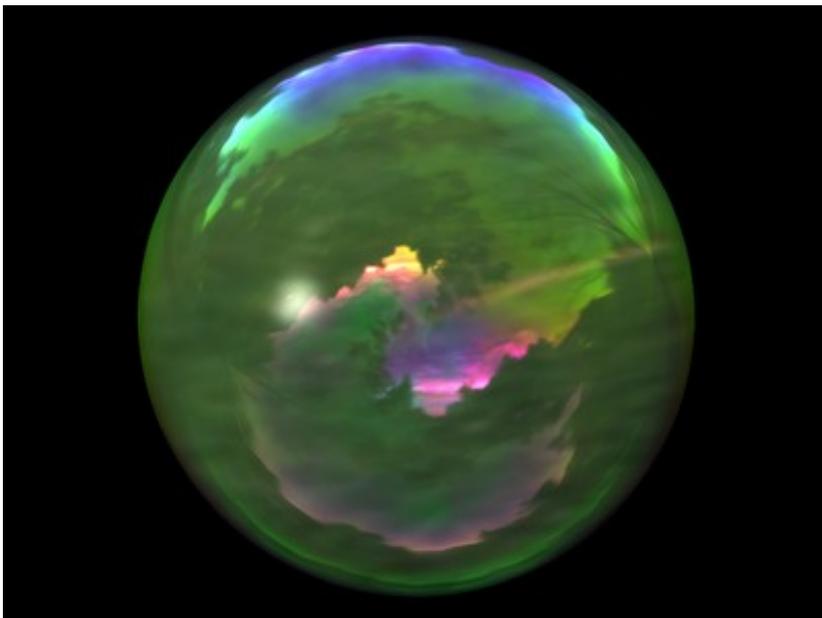


# Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

## Élémentaires

Elles n'ont pas de structure interne



## Composites

Existence d'une structure interne



# *Les questions*

1. **Combien et quelles** sont-elles ?
2. **Comment interagissent-elles** entre elles ?
3. D'où vient leur **masse** ?

# Au début on ne connaissait que l'atome

Atome : άτομος [atomos], « qui ne peut être divisé »

**Tableau périodique des éléments**

Groupe → 1 2 13 14 15 16 17 18  
 IA IIA IIIA IVA VA VIA VIIA VIIIA  
 Période ↓

← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)  
 ← numéro atomique  
 ← symbole chimique  
 ← masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]

1	hydrogène 1 H 1,00794																	hélium 2 He 4,002602
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182											bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050											aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29
6	césium 55 Cs 132,9054519	baryum 56 Ba 137,327	lanthanides 57–71	hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rhénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [208,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]
7	francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89–103	rutherfordium 104 Rf [263,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnérium 109 Mt [268,1388]	darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	flérovium 114 Fl [289]	ununpentium 115 Uup [288]	livermorium 116 Lv [292]	ununseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]
			lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praséodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967	
			actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03588	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	méndélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]	

métaux alcalins    alcalino-terreux    lanthanides    actinides    métaux de transition    métaux pauvres    métalloïdes    non-métaux    halogènes    gaz nobles    primordial    désintégration d'autres éléments    synthétique

# Au début on ne connaissait que l'atome

Atome : άτομος [atomos], « qui ne peut être divisé »

Charge électrique nulle

Ils s'organisent en molécules

Object d'étude de la *chimie*

**Il doit exister quelque chose plus fondamental...**

# L'électron

En 1897 J-J. Thomson découvre l'électron :

$$\text{Charge électrique} = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

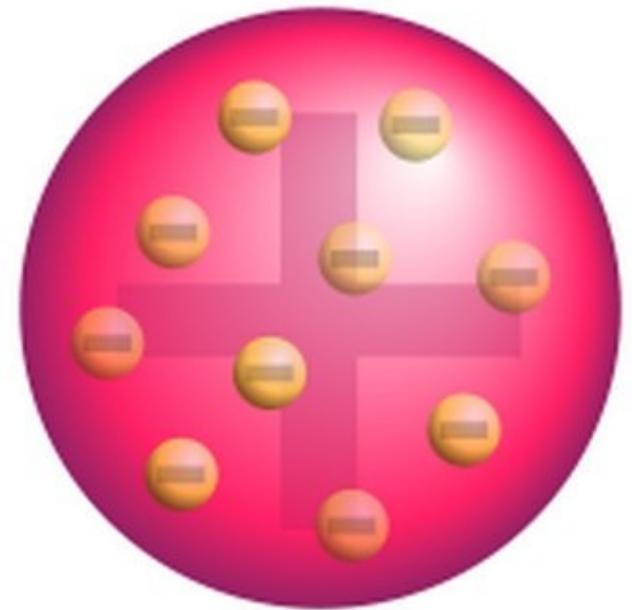
(charge électrique élémentaire = -1)

La charge électrique est « *quantisée* » : on ne peut avoir que des multiples entiers de charge électrique élémentaire (on ne peut pas les diviser !)

# L'électron

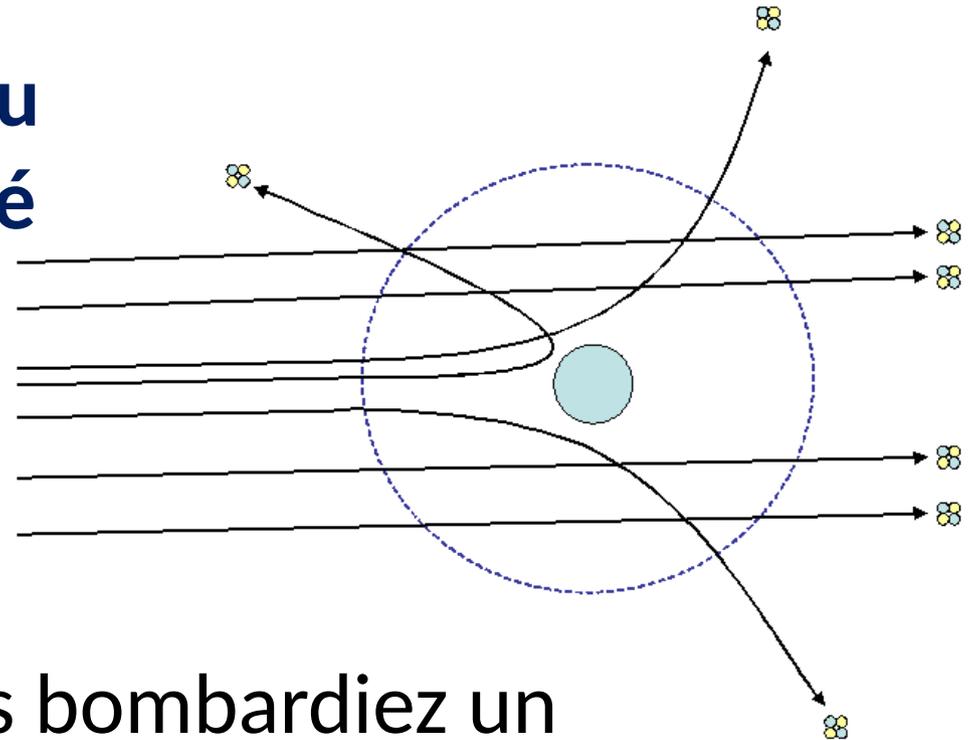
Premier modèle atomique de Thomson:

Électrons plongés dans un  
atome lourd composé de  
*charges positives de  
nature inconnue*



# La structure de l'atome

Rutherford (1911) :  
la **masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide**

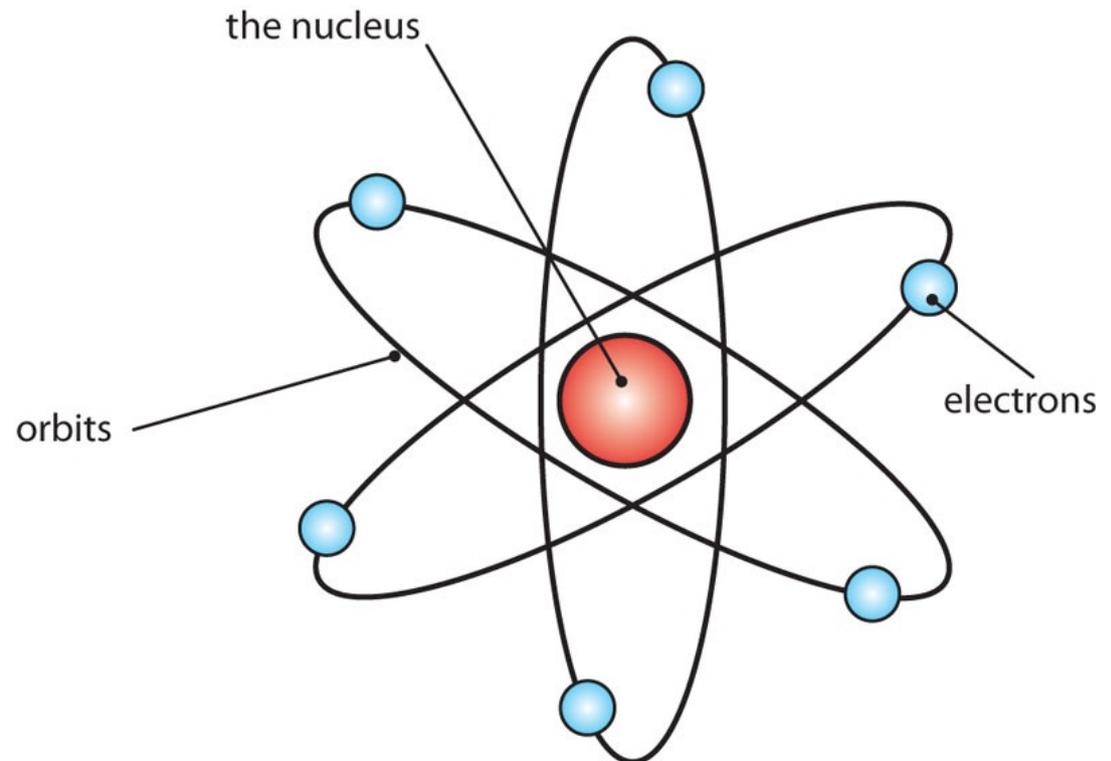


« c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

# La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

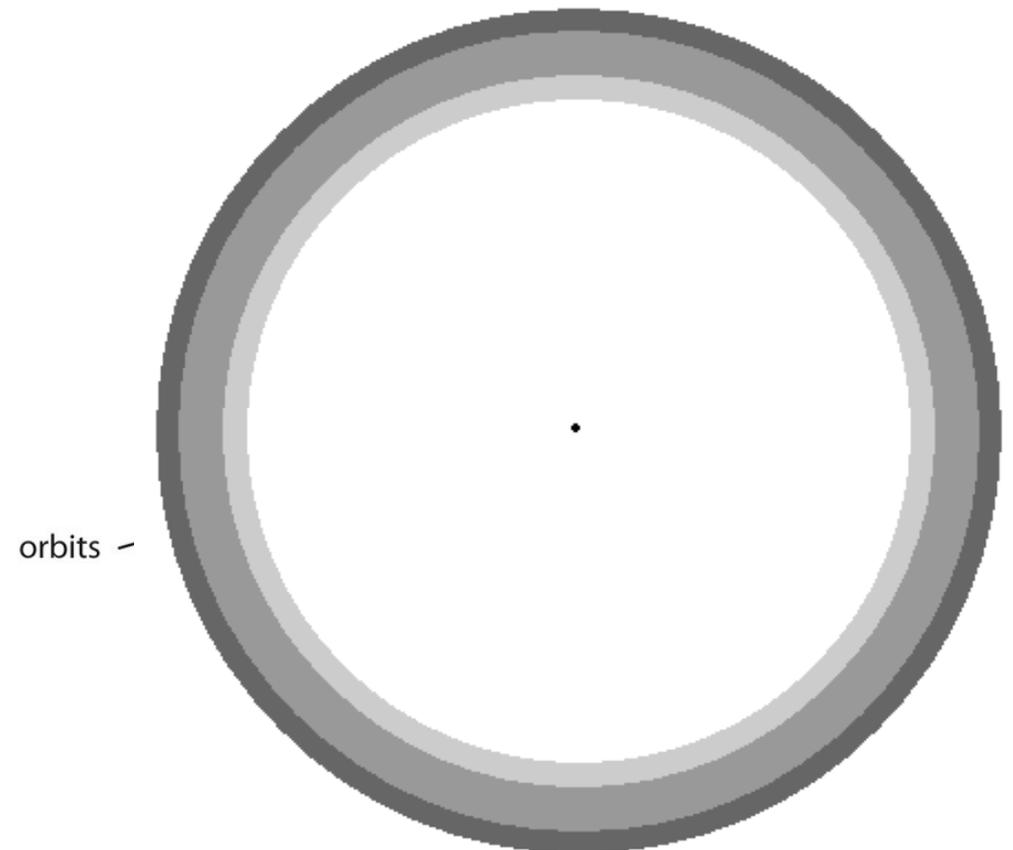
**Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.**



# La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

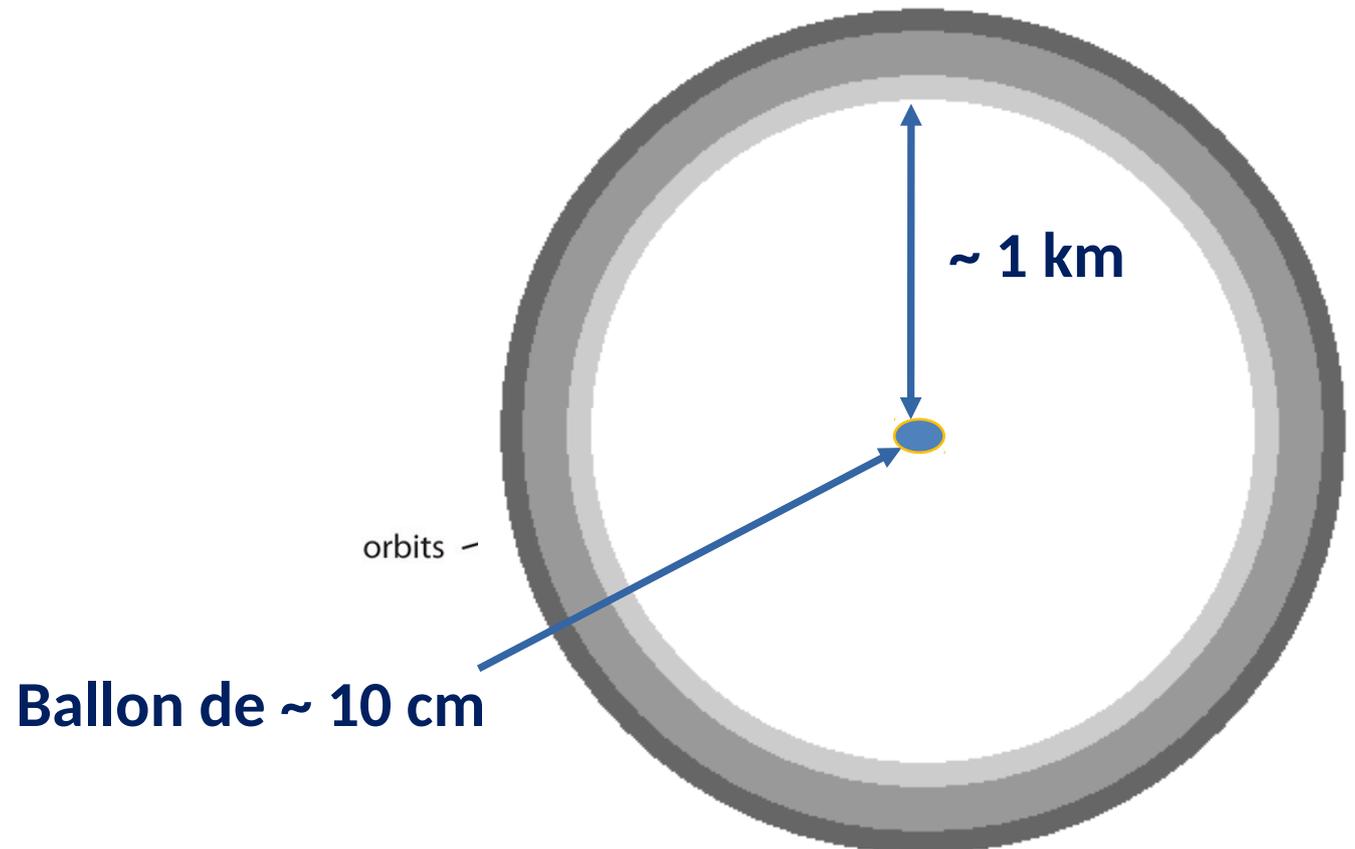
Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.



# La structure de l'atome

Rutherford (1911) : L'atome est essentiellement vide.

Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.



# L'interaction électrique

Ce qui permet aux électrons de former un système lié avec le noyau (c'est-à-dire l'atome) est l'**interaction électrique**

## Loi de Coulomb :

« L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges »

## En pratique :

Charges de même (différent) signe se repoussent (attirent)

La force augmente ou diminue en fonction de la distance

# Et le noyau ?

Est-il élémentaire comme l'électron ?

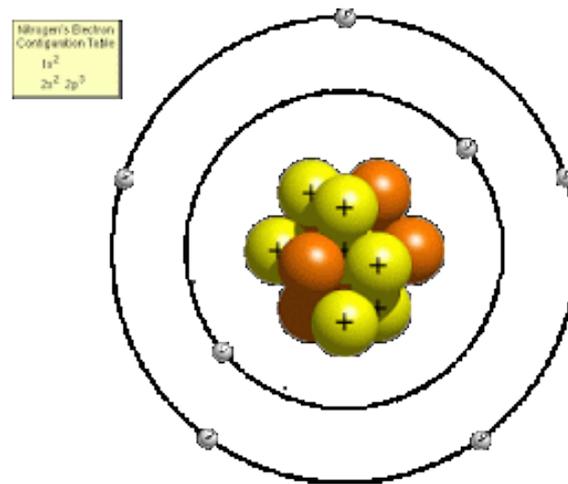
Rutherford (1919) : mise en évidence du **proton**

- charge électrique = +1
- masse de l'hydrogène

Chadwick (1932) : découverte du **neutron**

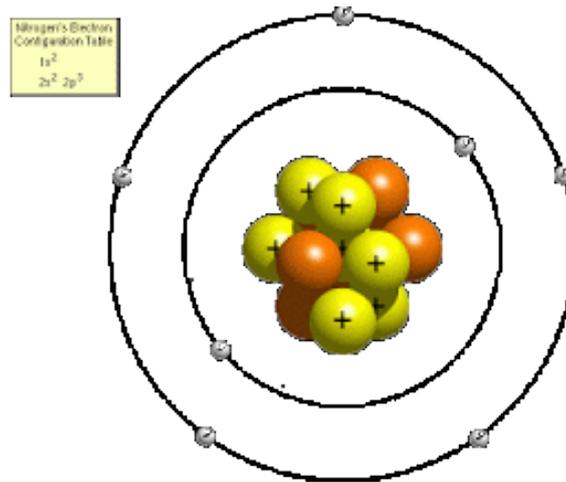
- charge électrique = 0
- (presque!) même masse que le proton (un peu plus lourd)

# Et le noyau ?



# De nouvelles interactions

Plusieurs charges électriques de même signe (protons) très proche l'une de l'autre subissant la répulsion électrique. Effet très fort!



Il doit y avoir une nouvelle interaction qui permet au noyau de rester stable : la **force forte**

# La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium (Henri Becquerel – 1896)

Pierre & Marie Curie montrent que l'uranium émet un rayonnement qui lui est propre (ce n'est pas une réaction chimique)

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

- **rayon  $\alpha$**  : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon  $\beta$**  : identifié à des électrons
- **rayon  $\gamma$**  : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux

# La radioactivité

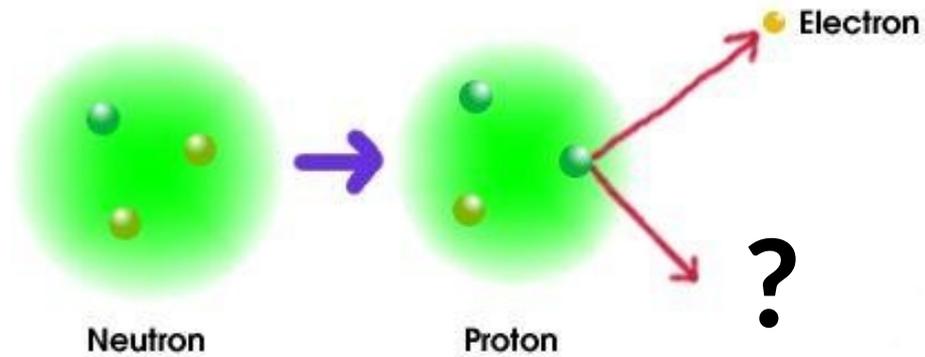
Fluorescence des sels d'uranium (Henri Becquerel – 1896)

Pierre & Marie Curie montrent que l'uranium émet un rayonnement qui lui est propre (ce n'est pas une réaction chimique)

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

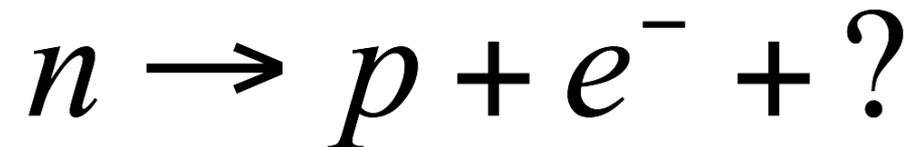
- **rayon  $\alpha$**  : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon  $\beta$**  : identifié à des électrons
- **rayon  $\gamma$**  : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux

# La radioactivité $\beta$

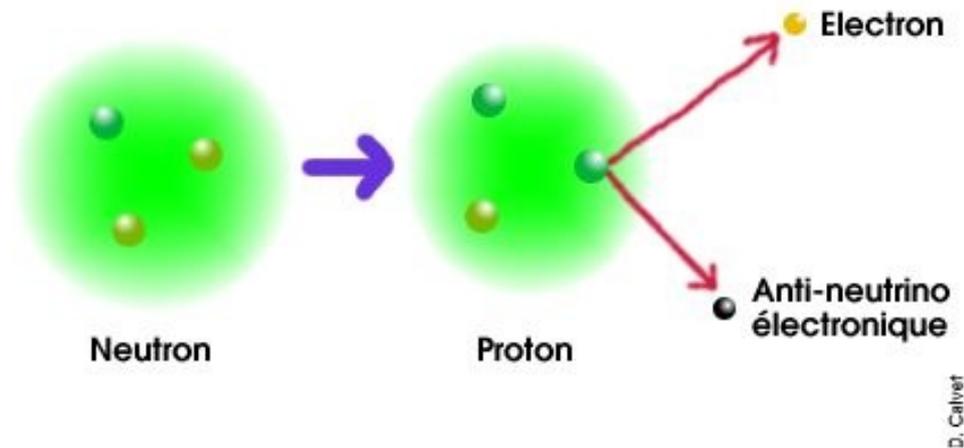


D. Calvet

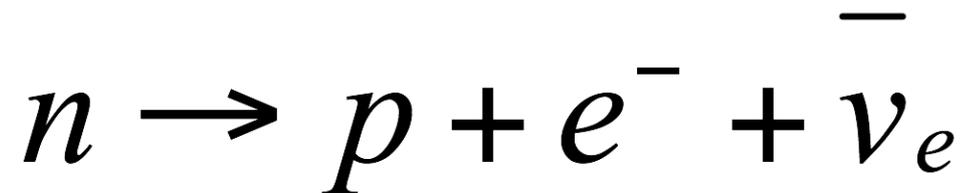
Au niveau des nucléons :



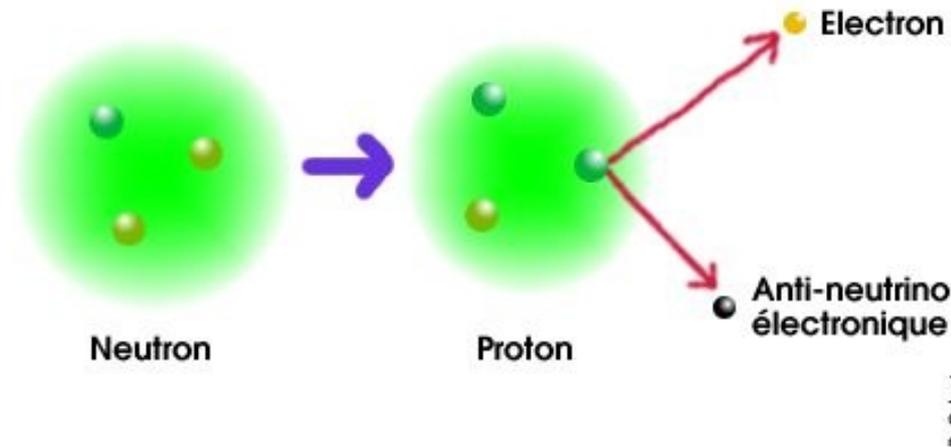
# La radioactivité $\beta$



Pauli (1930) émet l'hypothèse d'une nouvelle particule, **le neutrino**.



# La radioactivité $\beta$



Pauli (1930) émet l'hypothèse d'une nouvelle particule, **le neutrino**.

Une nouvelle force : **l'interaction faible**

# Le neutrino

Charge électrique = 0

Masse = 0

Interagissent seulement *faiblement*

- 1956 : 1<sup>ère</sup> mise en évidence d'un neutrino
  - Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
  - Cowan et Reines observent la capture d'un (anti)neutrino par un proton

# A step further

Et les nucléons ?

Deep Inelastic Scattering ('60s, '70s) : un électron en collision avec un nucléon (scattering à *la* Rutherford)

**Les nucléons ont une structure interne !**

# Le modèle des quarks

Protons et neutrons sont composés de « **quarks** »

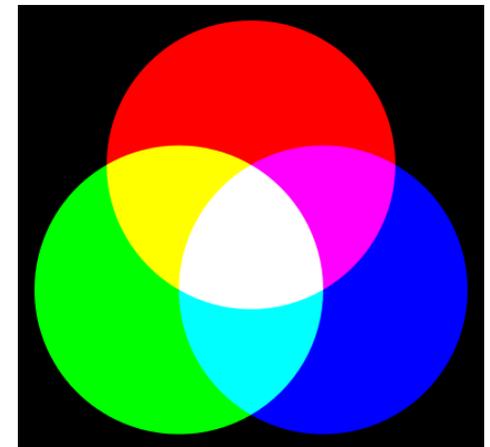
2 types de quarks avec  
**charge électrique**  
**fractionnaire**

Up (u)	Down (d)
<b><math>+2/3</math></b>	<b><math>-1/3</math></b>

Existent en trois charges « *couleurs* » :

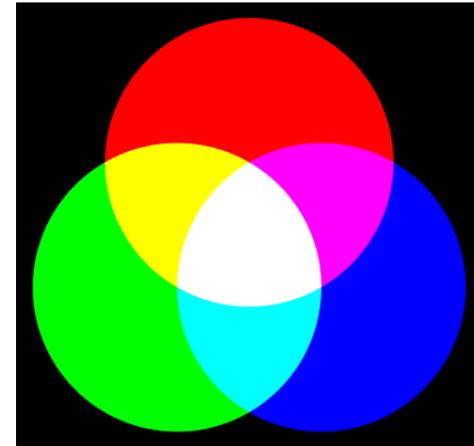
**rouge, vert, bleu**

- rouge + vert + bleu = blanc (neutre)

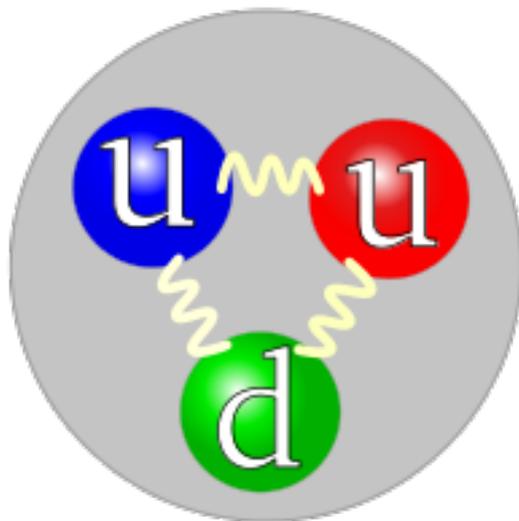


# Le modèle des quarks

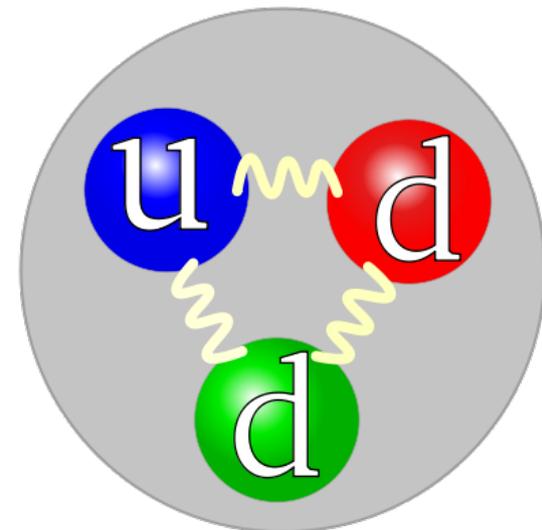
Les nucléons comportent  
un quark de chaque couleur  
et sont « blancs »



**Proton**



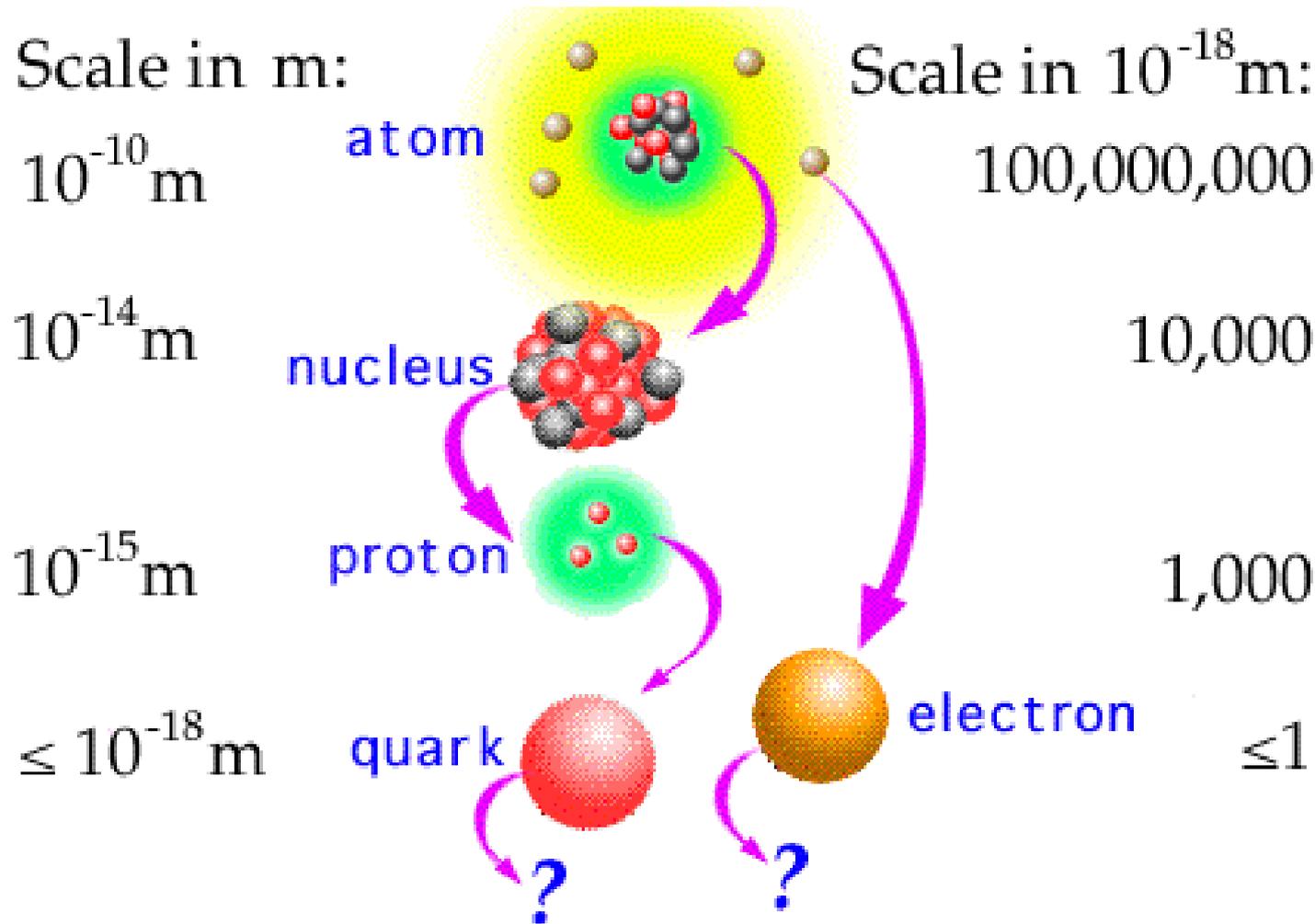
**Neutron**



# Quiz

Qui est plus lourd, le quark down ou le quark up ? Et pourquoi?

# Résumé des particules élémentaires que l'on vient de voir ensemble...



**1<sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION**

masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	
charge →	$2/3$	
spin →	$1/2$	
		up
<b>QUARKS</b>		
masse →	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	
charge →	$-1/3$	
spin →	$1/2$	
		down
<b>LEPTONS</b>		
masse →	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	
charge →	$-1$	
spin →	$1/2$	
		électron
<b>LEPTONS</b>		
masse →	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	
charge →	$0$	
spin →	$1/2$	
		neutrino électronique

...il existe d'autres particules élémentaires constituant la matière, mais plus massives et qui ne sont pas « stables »

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
<b>QUARKS</b>			
masse →	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	-1/3	-1/3	-1/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique
<b>LEPTONS</b>			
masse →	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique

# Les interactions

## Relativité restreinte :

la vitesse maximale possible est la vitesse de la lumière  
(seulement particules de masse=0 peuvent l'atteindre)

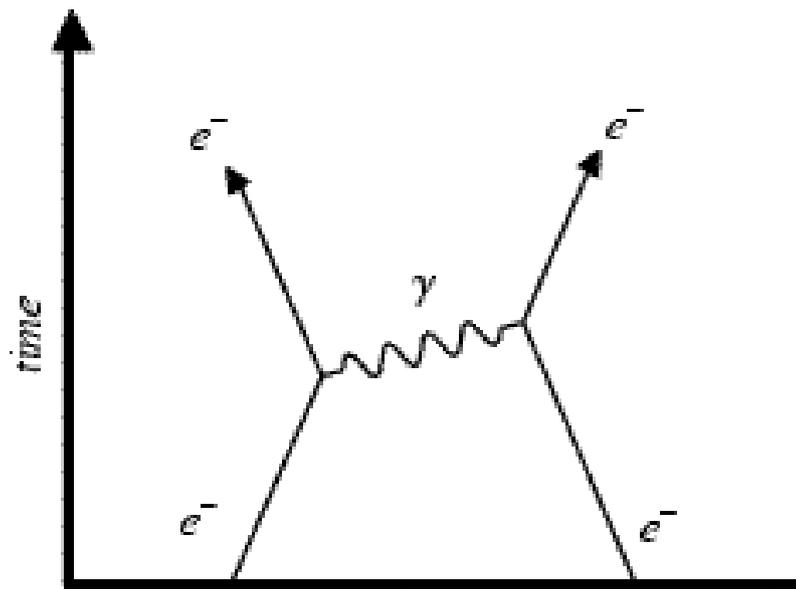
Il n'y a pas d'interactions instantanées

Deux particules peuvent interagir si elles occupent la **même position** au **même instant** (interaction local)

Comment expliquer l'interaction entre particules à distance ?

# Les interactions

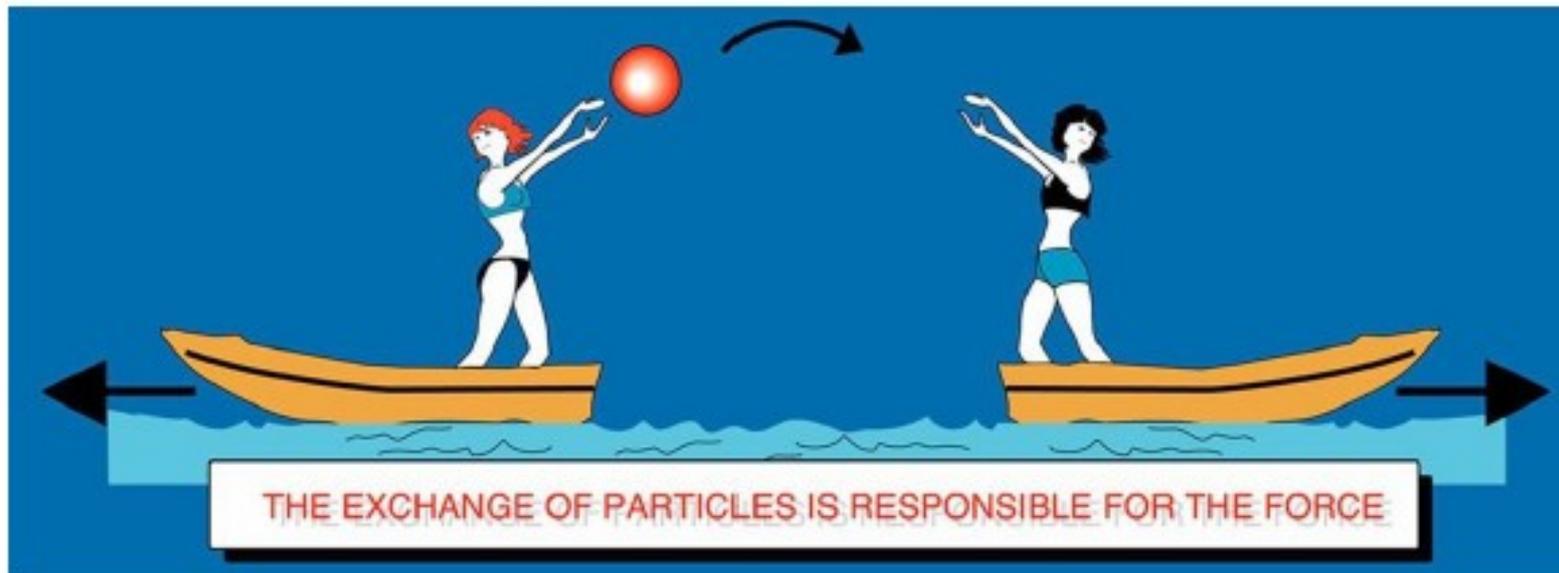
A l'aspect granulaire de la matière correspond un **aspect granulaire des forces**



Les interactions individuelles sont expliquées par **l'échange de particules de rayonnement (boson) entre particules de matière (fermion)**

# *Les interactions*

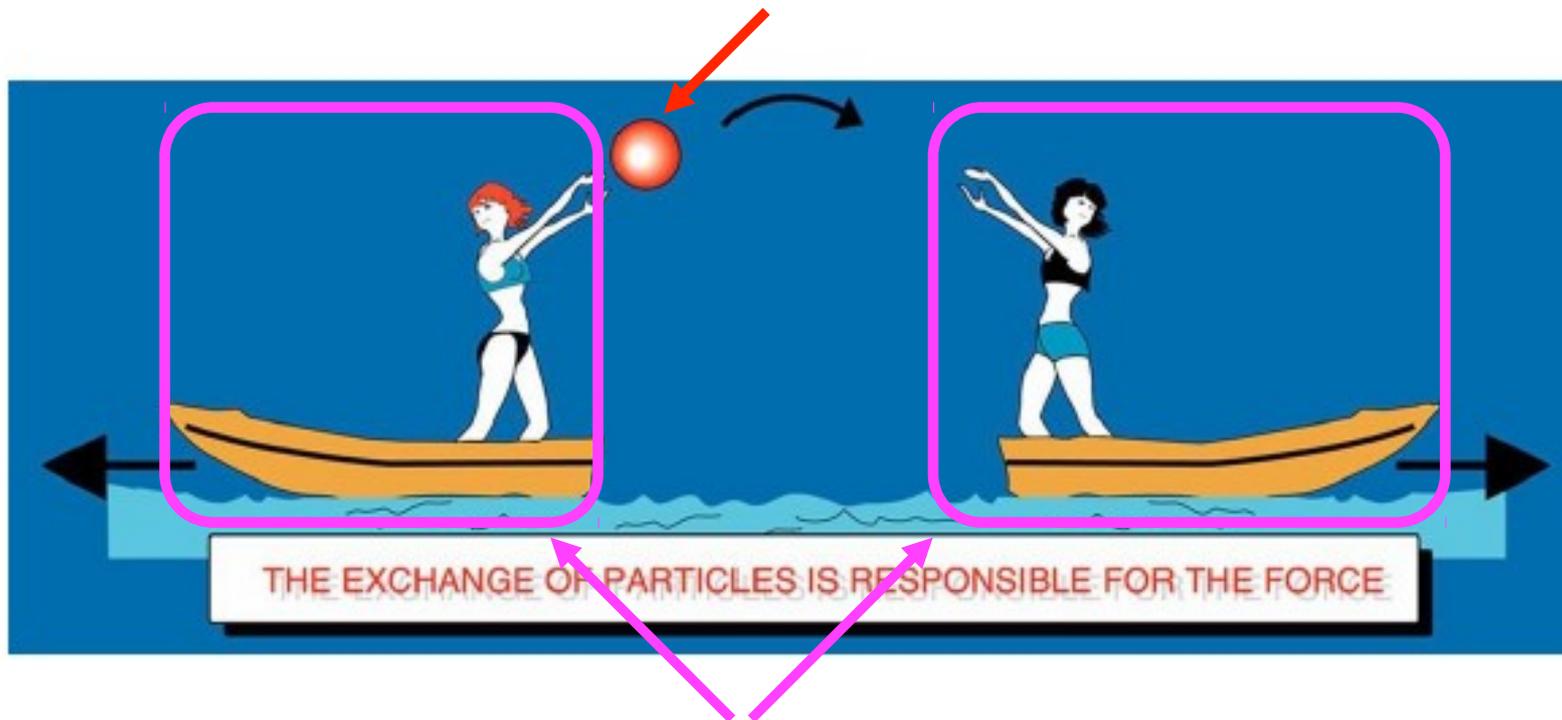
## Principe d'action et réaction



# Les interactions

## Principe d'action et réaction

**Boson** : permet l'échange d'information  
(vecteur d'une « force » fondamentale)



**Fermion** : particule de matière interagissant en fonction de la  
« force » liée au boson échangé

# Les interactions

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
QUARKS	 u up	 c charm	 t top	 g gluon
	 d down	 s strange	 b bottom	 γ photon
	 e électron	 μ muon	 τ tau	 Z boson Z
LEPTONS	 ν <sub>e</sub> neutrino électronique	 ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	 ν <sub>τ</sub> neutrino tauique	 W <sup>±</sup> bosons W <sup>±</sup>
				BOSONS DE JAUGE

# Les interactions

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
LEPTONS	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z
	ν <sub>e</sub> neutrino électronique	ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	ν <sub>τ</sub> neutrino tauique	W <sup>±</sup> bosons W <sup>±</sup>
				BOSONS DE JAUGE

Force forte

# Les interactions

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z
LEPTONS	ν <sub>e</sub> neutrino électronique	ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	ν <sub>τ</sub> neutrino tauique	W <sup>±</sup> bosons W <sup>±</sup>
				BOSONS DE JAUGE

**Force électrique**

# Les interactions

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z
LEPTONS	ν <sub>e</sub> neutrino électronique	ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	ν <sub>τ</sub> neutrino tauique	W <sup>±</sup> bosons W <sup>±</sup>
				BOSONS DE JAUGE

**Force faible**

# La masse

La masse d'un corps correspond à l'inertie de celui-ci subissant un changement de son état de mouvement

## Mécanisme de Higgs (1964)

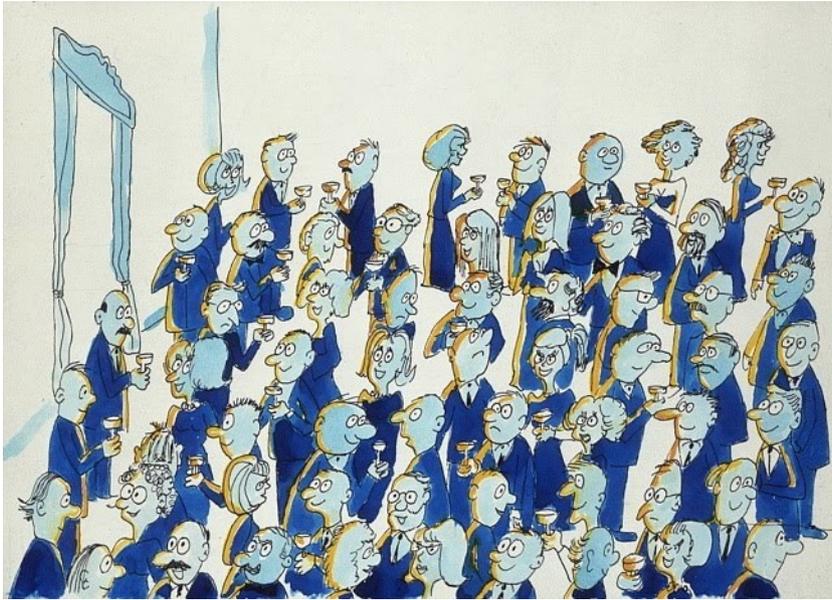
- Explique l'origine de la masse des particules élémentaires
- Prédit l'existence d'une particule : le *boson de Higgs*

Une très longue recherche : le 4 Juillet 2012 sa découverte a finalement été annoncée

# Mécanisme de Higgs



# Mécanisme de Higgs



La masse d'une particule est le résultat de son interaction avec le champ de Higgs !

# Le boson de Higgs



# Le cadre complet

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME GÉNÉRATION		
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> boson de Higgs
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>d</b> down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>s</b> strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 <b>e</b> électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 <b><math>\tau</math></b> tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 <b>Z</b> boson Z	<b>BOSONS DE JAUGE</b>
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_e</math></b> neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 <b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauique	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b><math>W^\pm</math></b> bosons $W^\pm$	

# L'anti-matière

**Est-ce que ça existe ?**

# L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

**OUI**

# L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

**OUI**

Qu'est-ce que c'est ?

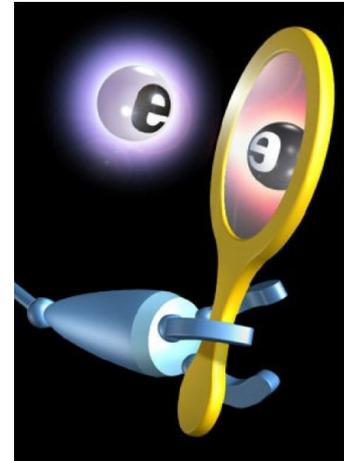
# L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

**OUI**

Qu'est-ce que c'est ?

- L'anti-matière correspond au symétrique de la matière « vue dans un miroir » (enfin presque...)



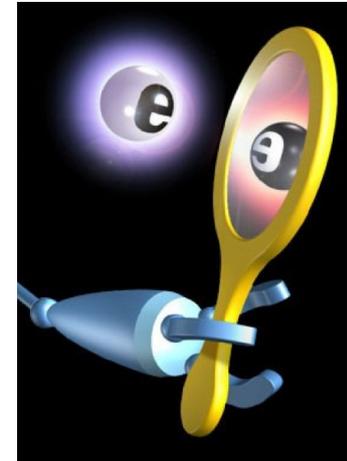
# L'anti-matière

Est-ce que ça existe ?

OUI

Qu'est-ce que c'est ?

- L'anti-matière correspond au symétrique de la matière « vue dans un miroir » (enfin presque...)
- Lorsqu'une particule de matière et une son anti-particule se rencontrent les deux s'annihilent :



À chaque particule correspond une anti-particule :

- de même masse
- de même spin
- de charge opposée

électron  $e^-$  •

proton  $p$  ⊕

neutron  $n$  ⊙

• e<sup>+</sup> positron

⊖  $\bar{p}$  antiproton

⊙  $\bar{n}$  antineutron

# Histoire de l'anti-matière

**1932** : découverte du positron dans les rayons cosmiques.

Prix Nobel en 1936

**1955** : découverte de l'antiproton au Bevatron à Berkeley, Californie.

Prix Nobel en 1959

**1956** : découverte de l'anti-neutron au Bevatron



**1965**: première observation d'anti-noyau : anti-deuteron au CERN et Brookhaven

**1995**: premier atome d'anti-hydrogène produit au CERN

# L'anti-matière autour de nous

## Deux sources naturelles :

- rayons cosmiques
- radioactivité

pas de source massive dans l'Univers !

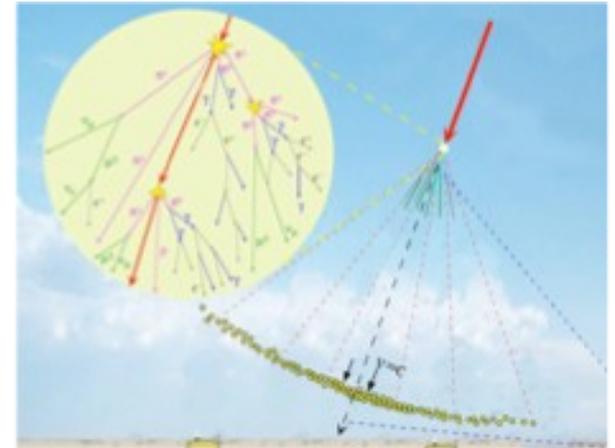
## Sources artificielles :

- accélérateurs de particules
- TEP : Tomographie par Émission de Positrons

utilisé « tous les jours » à l'hôpital !

## Difficile à :

- produire
- stocker



Pas pour tout de suite...

# L'absence d'antimatière

Au début de l'Univers :

**autant de matière que d'anti-matière...**

**Pourquoi l'antimatière a-t-elle disparu ?**

- est-elle l'exact opposée de la matière ?

# Le Modèle Standard

---

## Une théorie remarquable ...

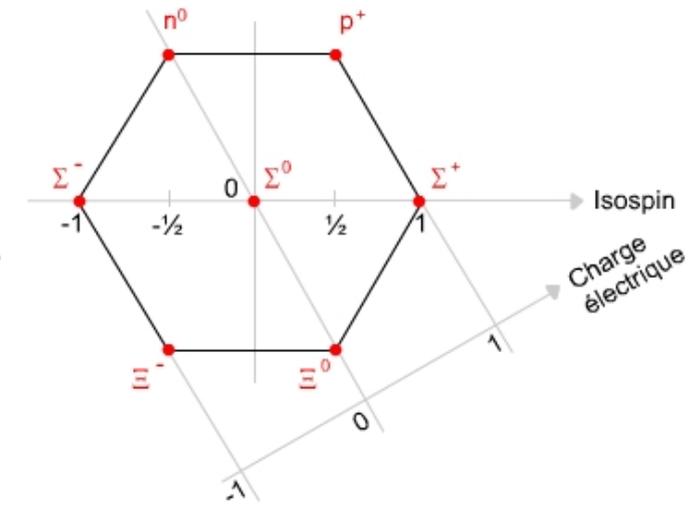
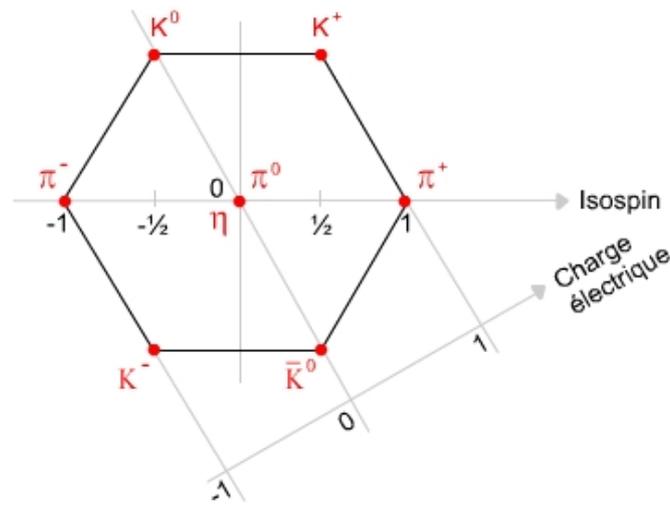
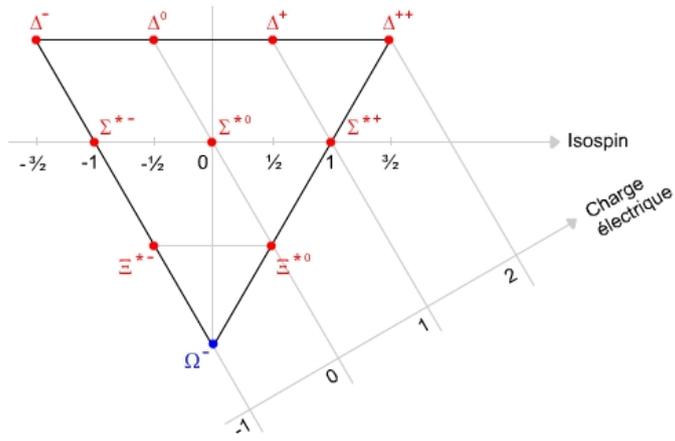
- testée avec une grande précision
- rend compte de toutes les observations effectuées en laboratoire sur une gamme d'énergie allant de l'eV au TeV ( $10^{15}$ eV)

## ... qui laissent de nombreuses questions en suspens

- pourquoi 3 familles de particules ?
- pourquoi des masses si différentes ?
- et la gravitation ?
- la disparition de l'anti-matière ?

## De plus, l'astronomie et la cosmologie montrent que

- le MS ne décrit que  $\sim 4$  % 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

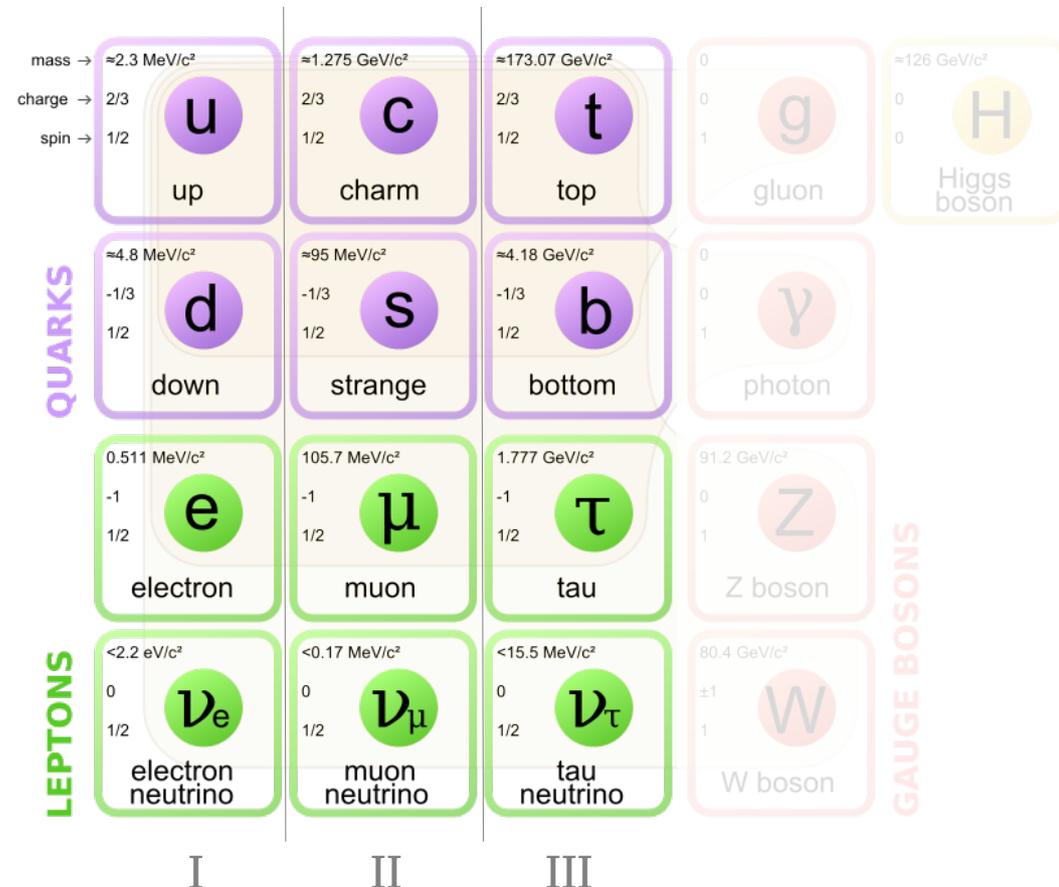
+ l'équivalent en anti-matière

=> 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

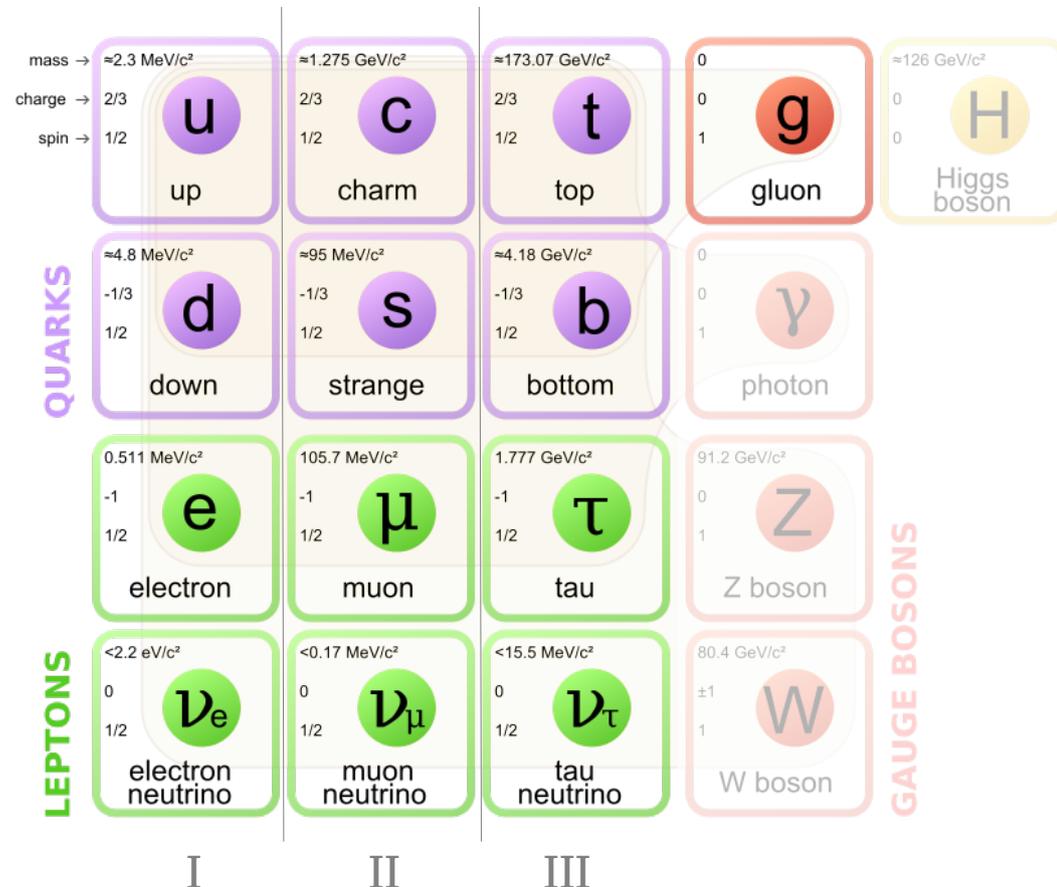
=> 12 particules de matière

+ 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)
- $\text{rvb} = \overline{\text{rvb}} = \overline{\text{rr}} = \overline{\text{vv}} = \overline{\text{bb}} = \text{BLANC}$
- insensible à la force forte
- vecteur : les gluons
- intensité :
- augmente avec la distance !!

# 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)
- $r\overline{v}\overline{b} = \overline{r}v\overline{b} = \overline{r}\overline{r} = \overline{v}\overline{v} = \overline{b}\overline{b} = \text{BLANC}$
- 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

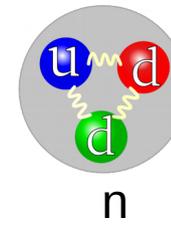
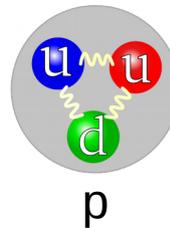
→  $\overline{r\overline{r}} = \overline{v\overline{v}} = \overline{b\overline{b}} = \text{BLANC}$

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

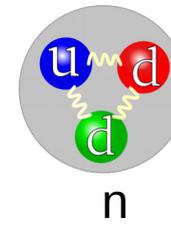
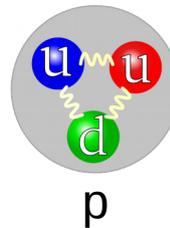
## Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

- $rgb = \overline{rgb} = \text{BLANC}$  : 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

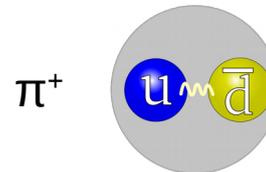
- différents types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



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

Un méson léger :  
le *pion* chargé



# Les assemblages de quarks

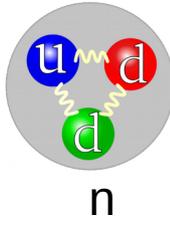
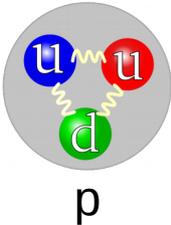
## Seuls les objets blancs peuvent circuler librement

- $rvb = \overline{r\overline{v}\overline{b}} = \text{BLANC}$  : 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

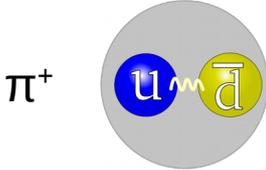
- différents types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : proton, neutron, ...

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



- les *mésos* 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 !

# Quiz

Pourquoi la force forte tient ensemble les protons dans le noyau si les protons "sont de couleur blanc" ?

# Les assemblages de quarks

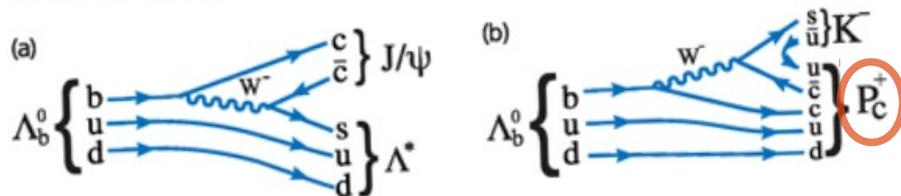
14 July 2015: Observation of particles composed of five quarks, pentaquark-charmonium states, seen in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  decays.



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

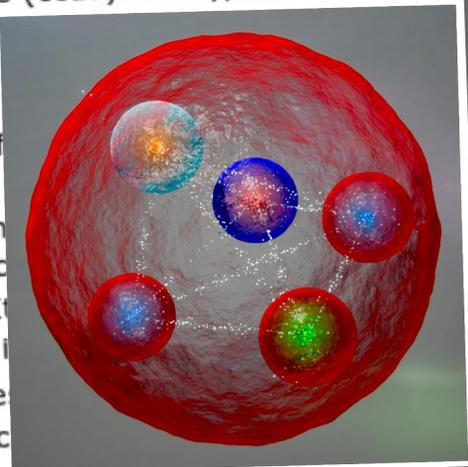
$$[ m(P_c^+(4380)) = 4380 \pm 8 \pm 29 \text{ MeV}, \Gamma = 205 \pm 18 \pm 86 \text{ MeV} ]$$

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



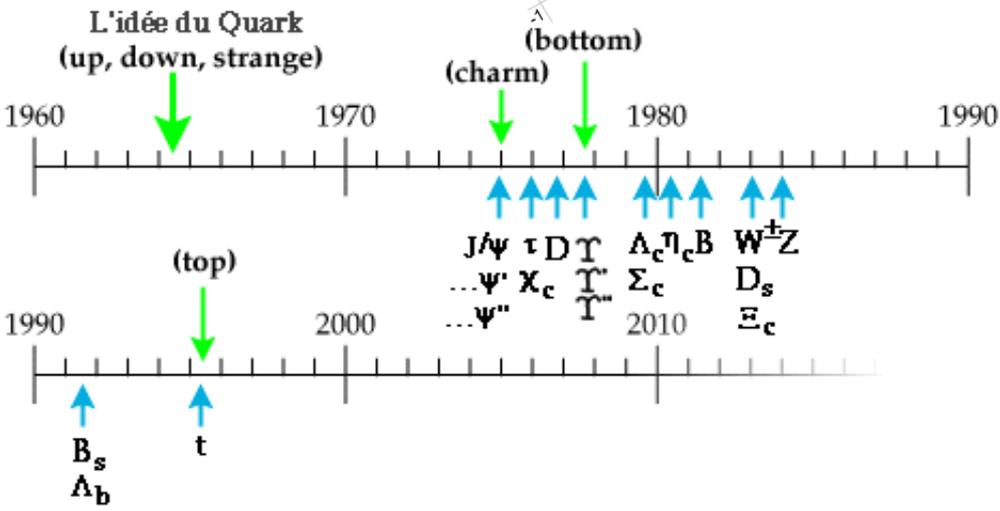
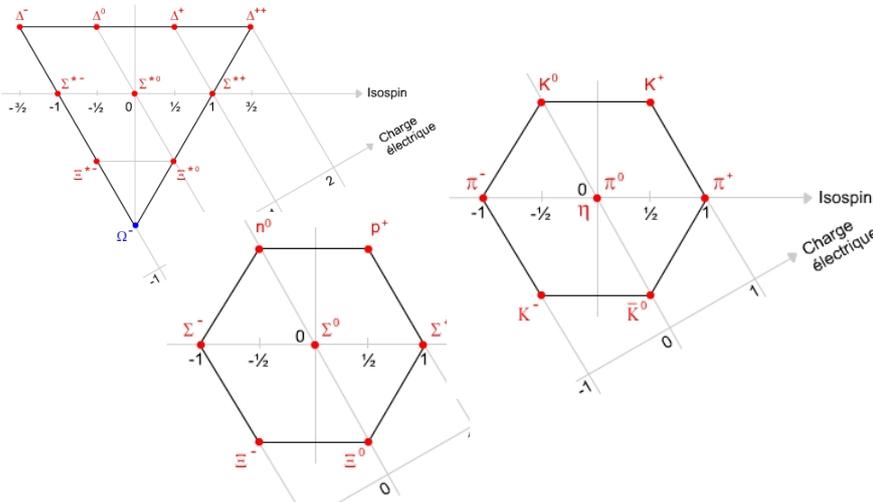
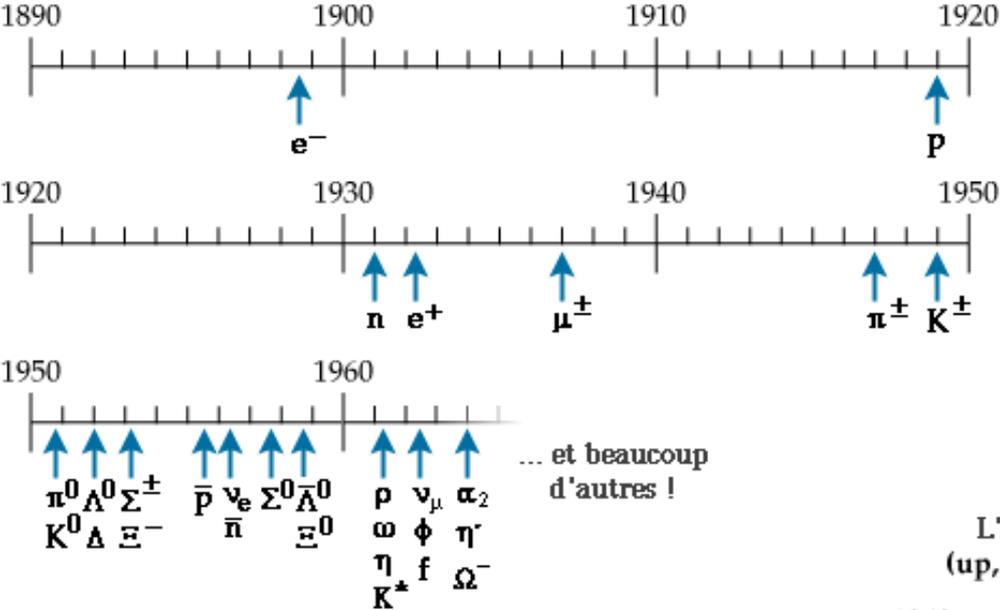
LHCb physicists have analyzed a  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$  decays with only 5% of the  $\Lambda_b^0$  baryon is like a neutron, quark in place of one of the down quarks. The decay proceeds by the diagram (a), which

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

# Quiz

Les quarks up et down qui forment le proton ont une masse de 2-5 MeV. Le proton a une masse de 1000 MeV... y a-t-il un problème?

# 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)

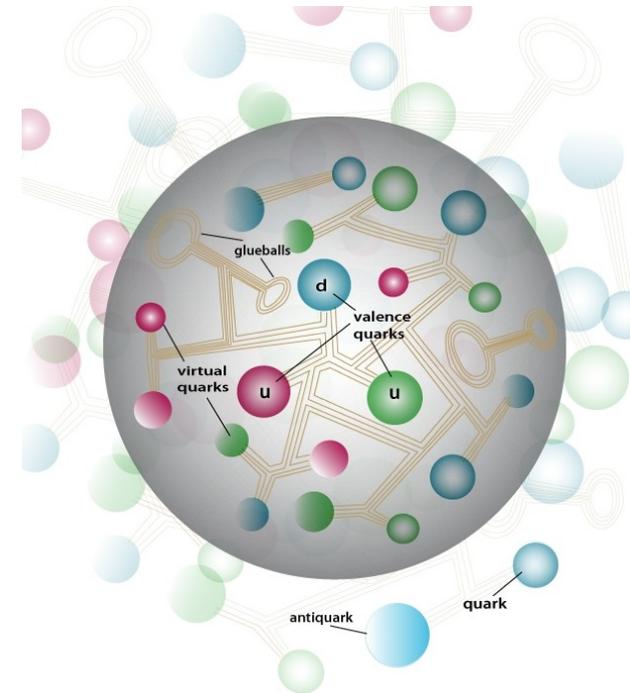
- $m(u) \approx 2 \text{ MeV}$  ;  $m(d) \approx 5 \text{ MeV}/c^2$

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

- masse du proton :

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

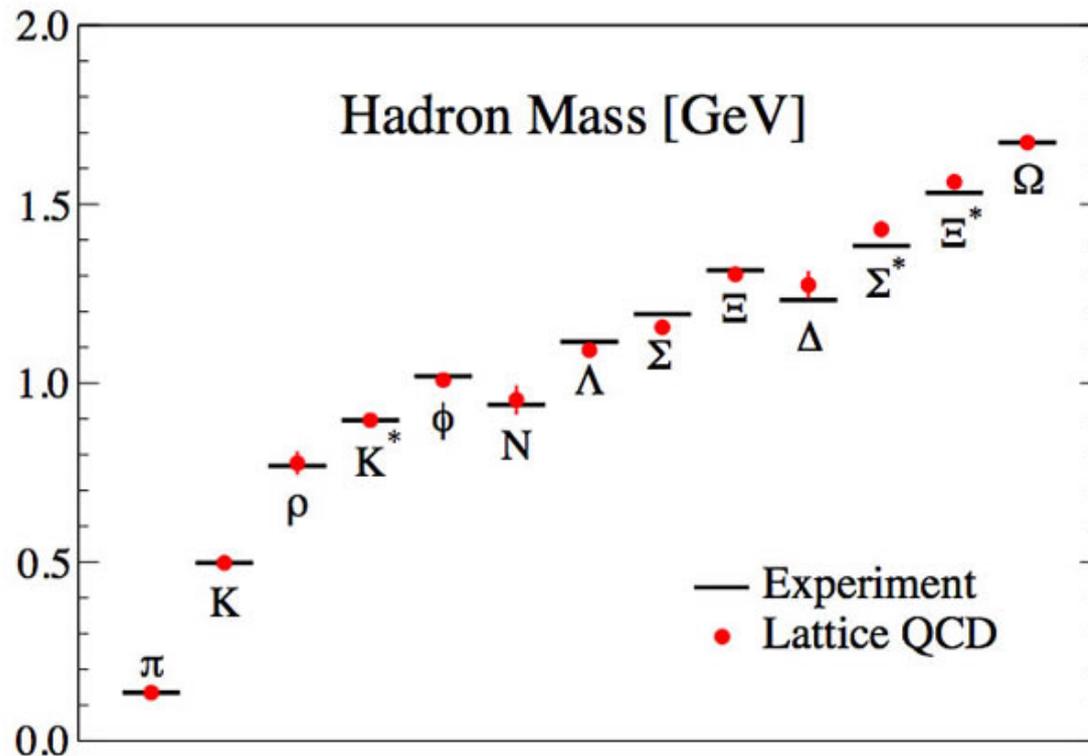
- ↘ l'essentiel de la masse est en fait donné par l'énergie de l'interaction forte entre les quarks



# La masse des hadrons (2/2)

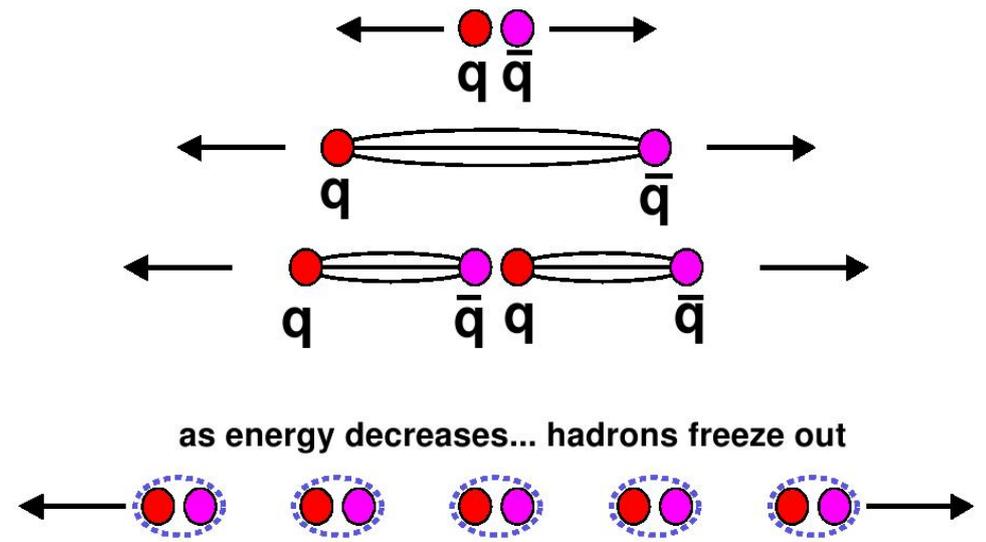
## Quel est la masse d'un hadron ?

- 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 ?

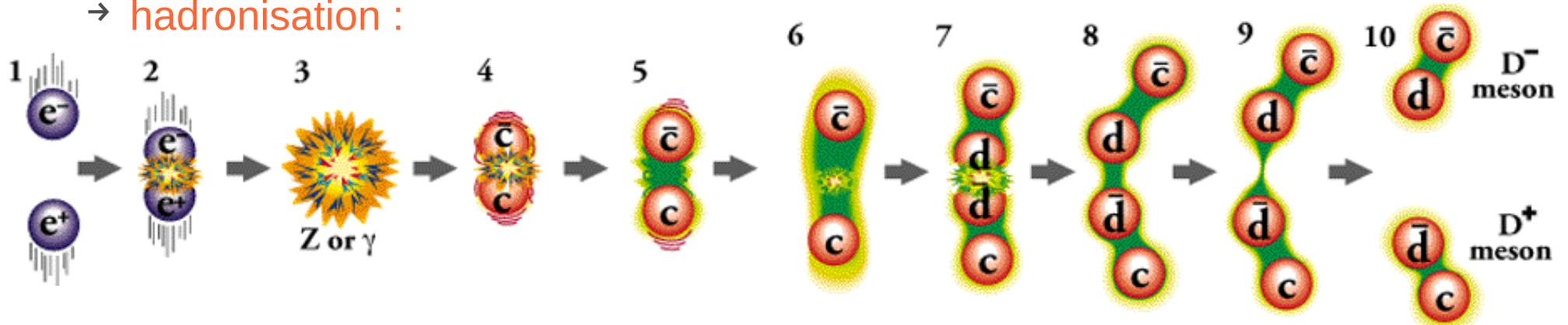
Si on tire très fort sur les quarks à l'intérieur d'un hadron, peut-on les séparer ?



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 :**



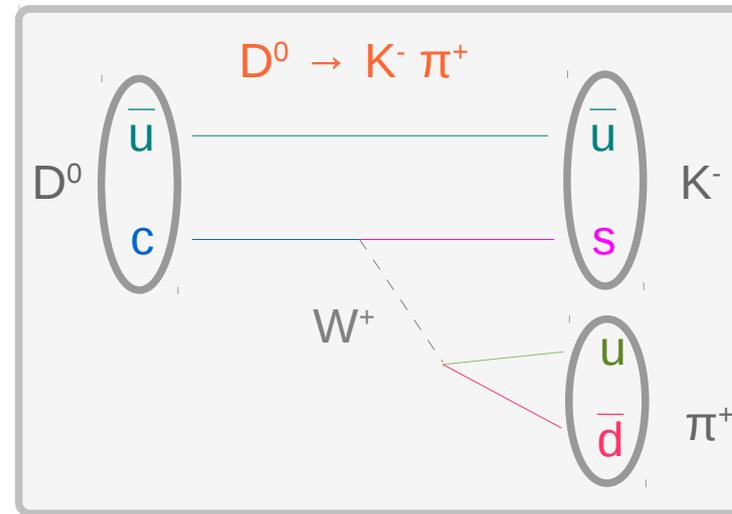
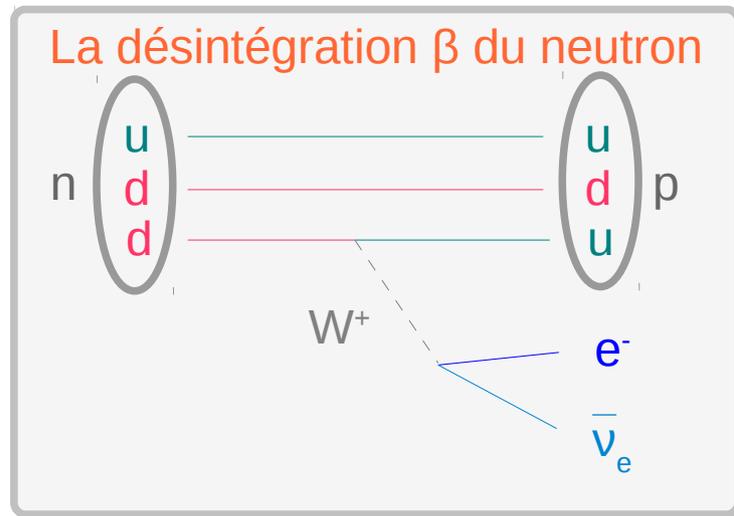
# Désintégration des hadrons (1/3)

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

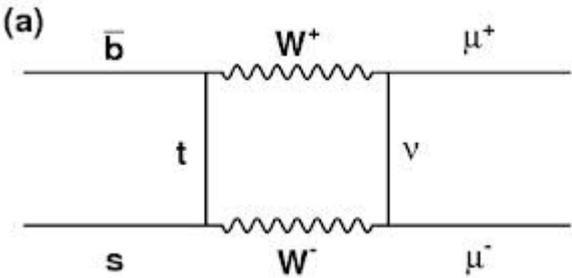


diagramme « en boîte »

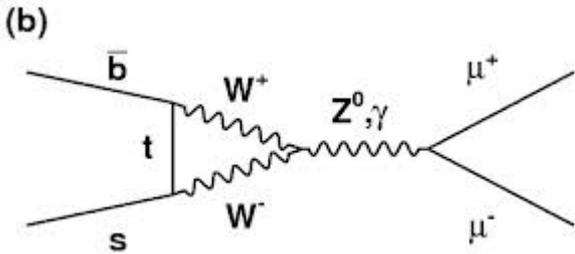
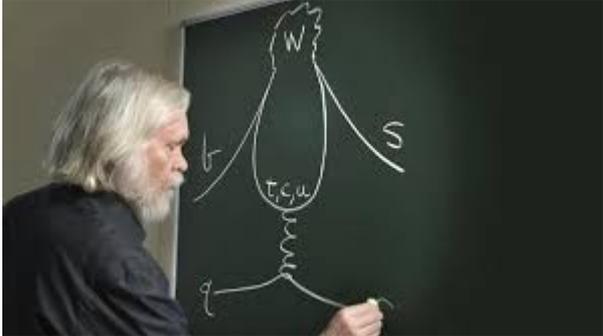


diagramme « pingouin »



# 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 ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	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
$K_S^0 \pi^-$	( 1.37 ± 0.06 ) × 10 <sup>-4</sup>	-	861
$K_S^0 \pi^0$	( 1.19 ± 0.04 )%	-	860
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$	(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. !

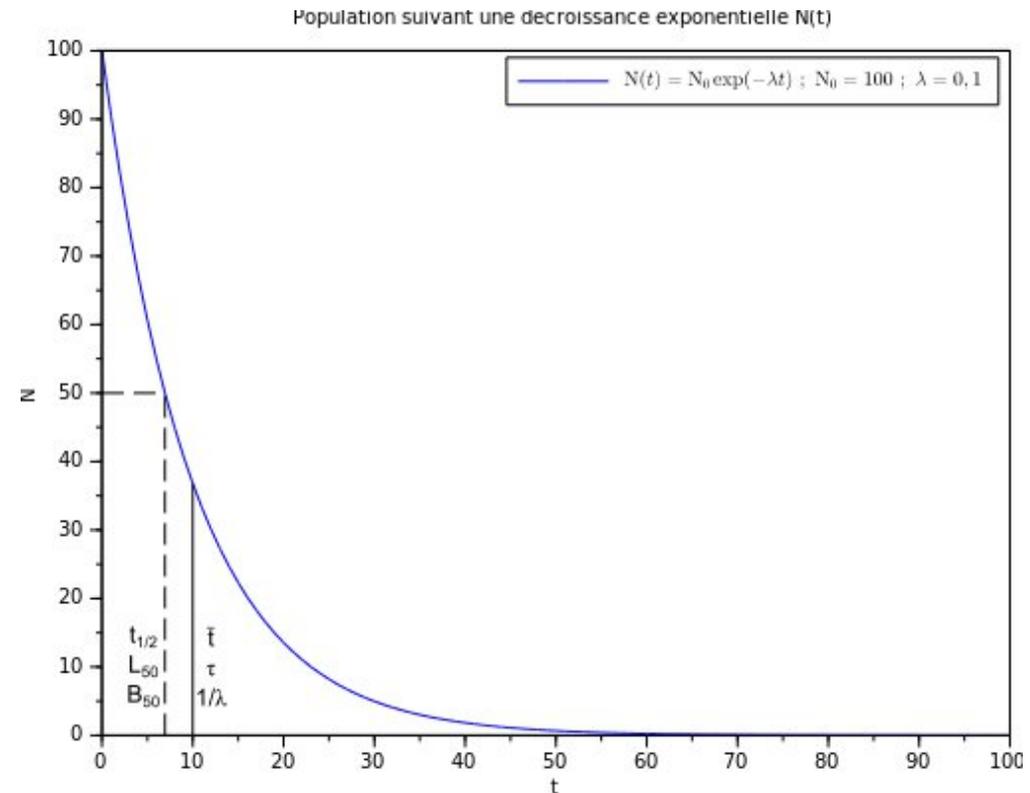
# Quiz

Le neutron libre se désintègre après 15 minutes dans un proton avec l'émission de radiation Beta. Ça vous dérange? Et si oui pourquoi?

# Espérance de vie

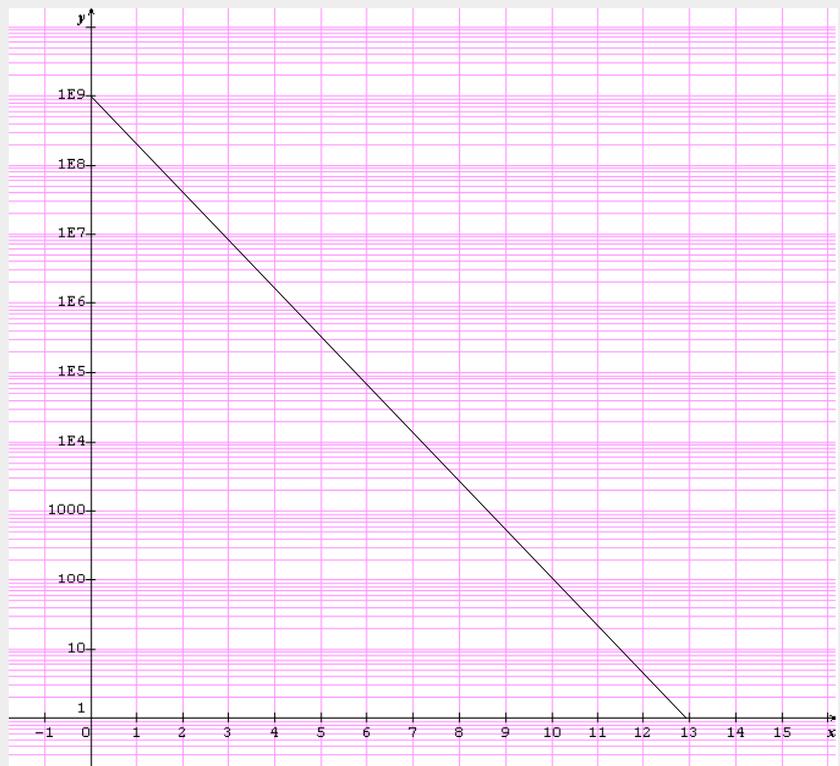
## Les hadrons sont instables (sauf le proton ?)

- 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*

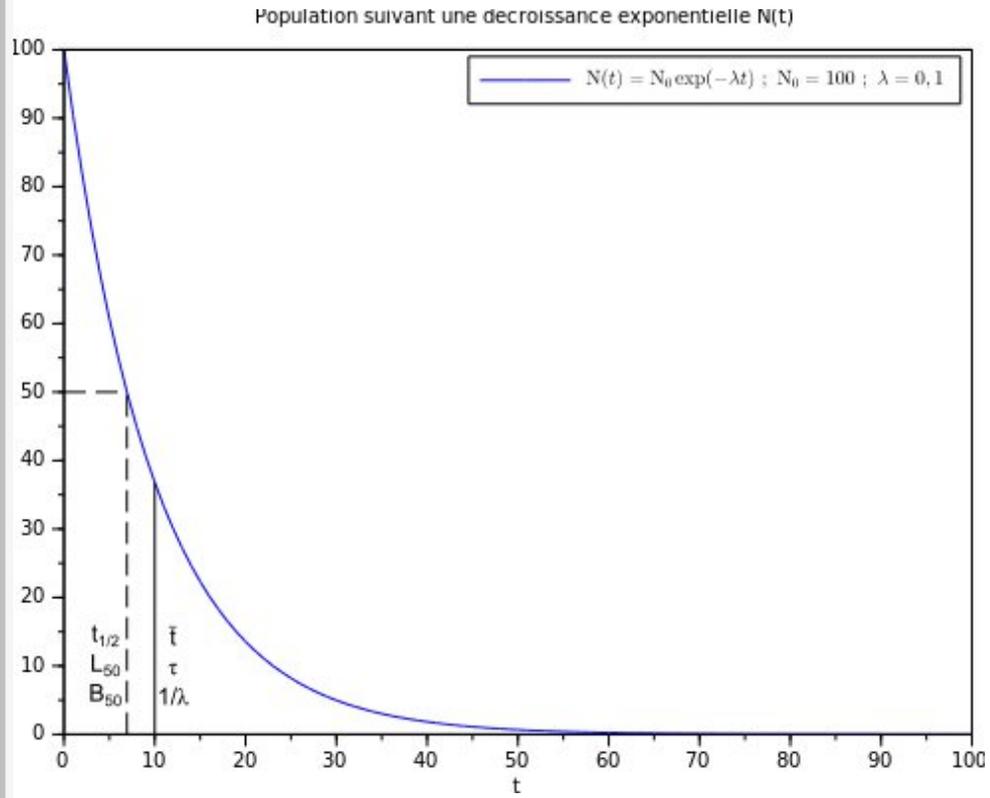


# Espérance de vie

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



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



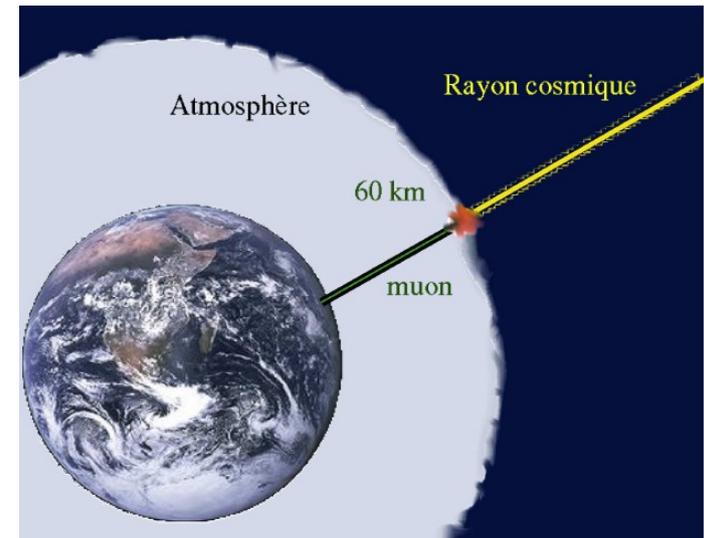
1) $v =$	300 km/s (0,1 % $c$ )	→ $L =$	300 km ( $t = 1s$ )
2) $v =$	29 979 km/s (10 % $c$ )	→ $L =$	30 130 km ( $t = 1s$ )
3) $v =$	269 813 km/s (90 % $c$ )	→ $L =$	618 994 km ( $t = 2s$ )
4) $v =$	296 794 km/s (99 % $c$ )	→ $L =$	2 103 921 km ( $t = 7s$ )
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % $c$ )	→ $L =$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

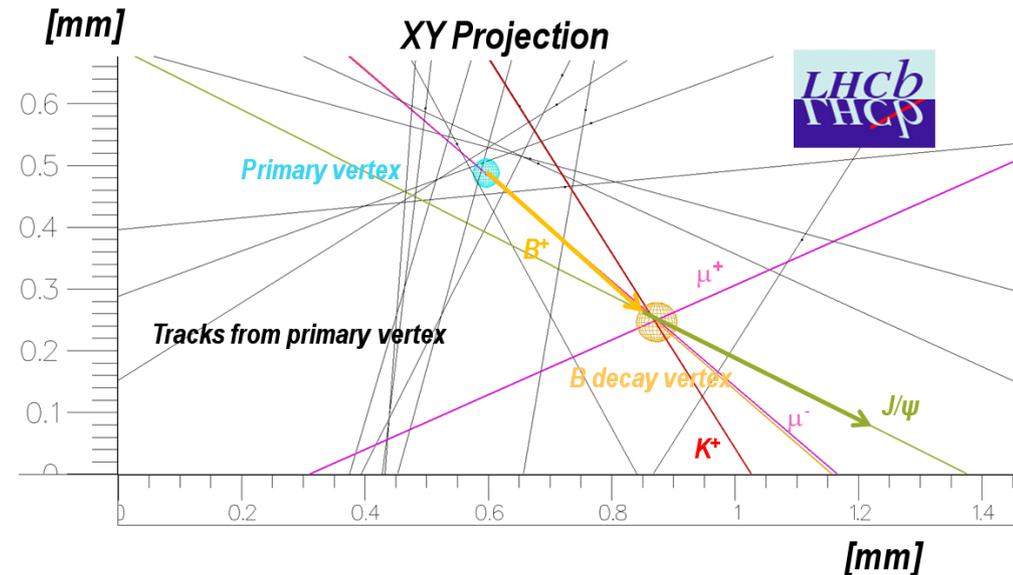
$$E = 100 \text{ GeV (typiquement)}$$

→ 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  $B_s$

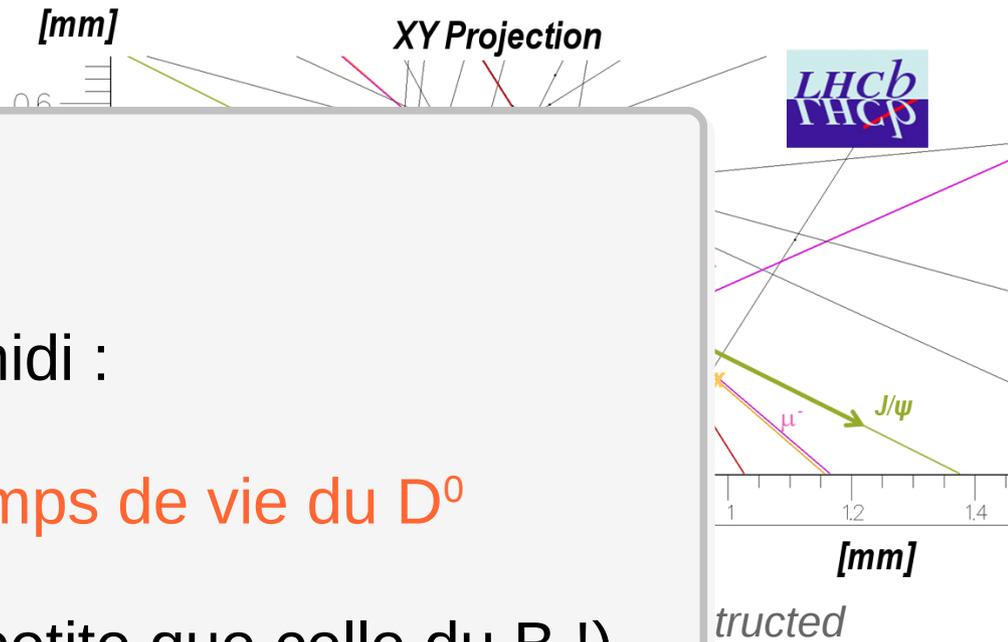
- masse  
 $m = 5 \text{ GeV}$
- temps de vie propre  
 $t_0 = 1,47 \cdot 10^{-12} \text{ s}$
- énergie des  $B_s$   
 $E = 100 \text{ GeV}$  (typique)
- facteur relativiste  
 $\gamma = E/mc^2 = 20$
- distance parcourue  
 $d = \gamma \cdot t_0 \cdot c = 9 \text{ cm}$

Teaser :

Cette après-midi :

mesure du temps de vie du  $D^0$

(encore plus petite que celle du B !)

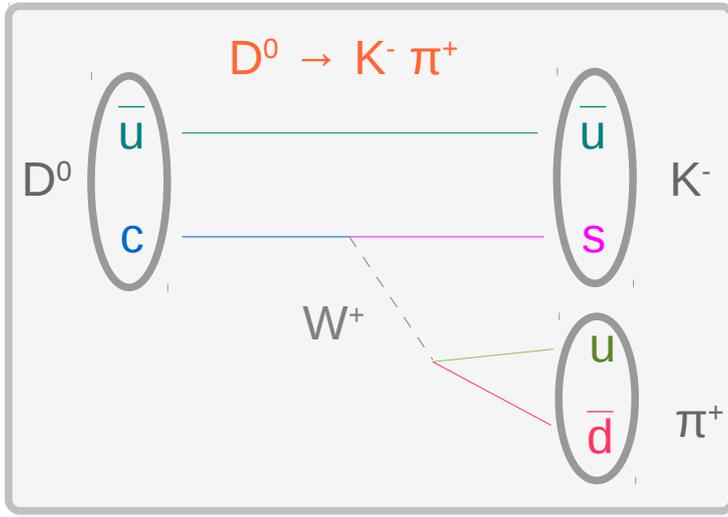


# Quiz

Supposons que j'ai un proton accéléré à la vitesse de la lumière en collision avec un électron à repos. Que se passe?

# Masse et conservation de l'énergie

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

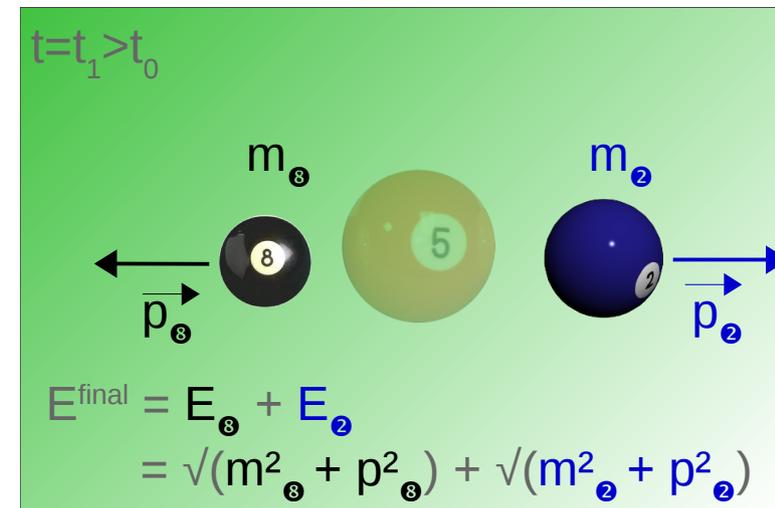


$M(D^0) = 1864.86 \pm 0.13$	MeV
$M(K^-) = 493.677 \pm 0.016$	MeV
$M(\pi^+) = 139.57018 \pm 0.00035$	MeV

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

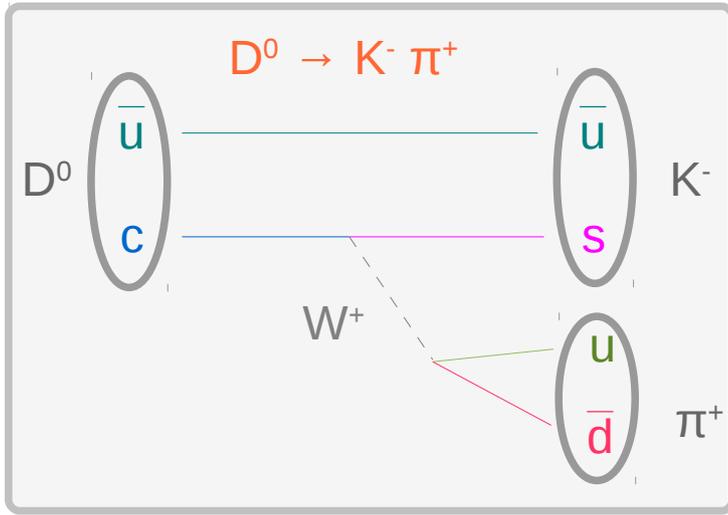
l'énergie (de masse,  $E=mc^2$ ) d'une particule avant sa désintégration se retrouve dans ses produits de désintégrations

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



# Masse et conservation de l'énergie

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



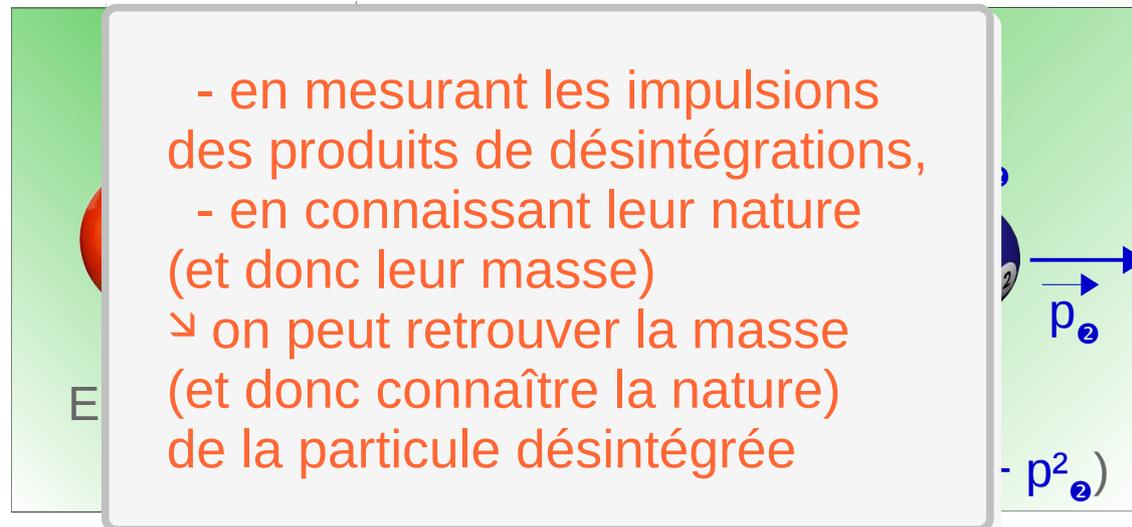
$$\begin{aligned} M(D^0) &= 1864.86 \pm 0.13 \text{ MeV} \\ M(K^-) &= 493.677 \pm 0.016 \text{ MeV} \\ M(\pi^+) &= 139.57018 \pm 0.00035 \text{ MeV} \end{aligned}$$

↳ 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 désintégrations

- 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



# 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 ?