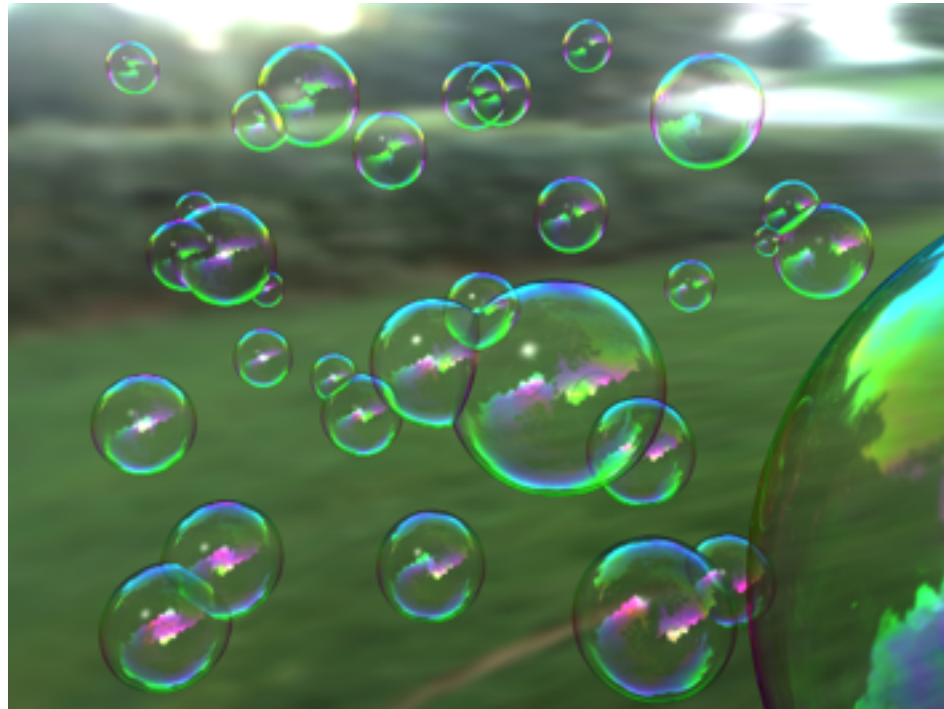


# *Les objets de la physique des particules*



# Les particules

Toute la matière qui nous entoure est constituée de particules

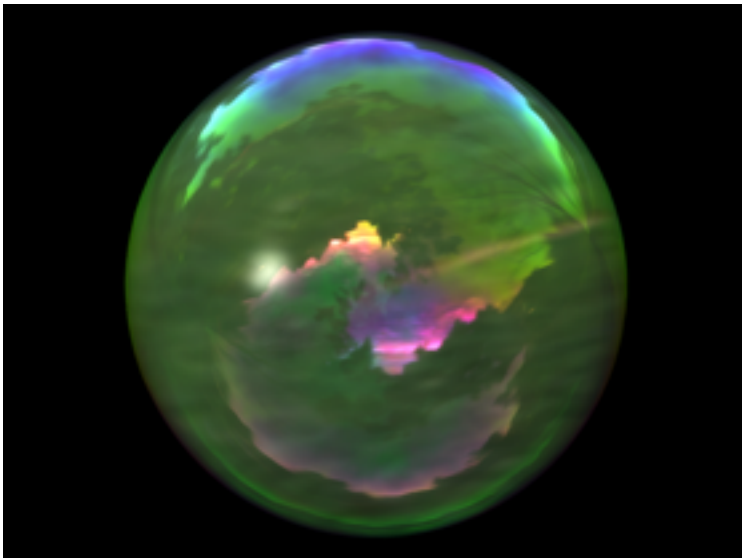


# Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

**Élémentaires**

Elles n'ont pas de structure interne



**Composites**

Existence d'une structure interne

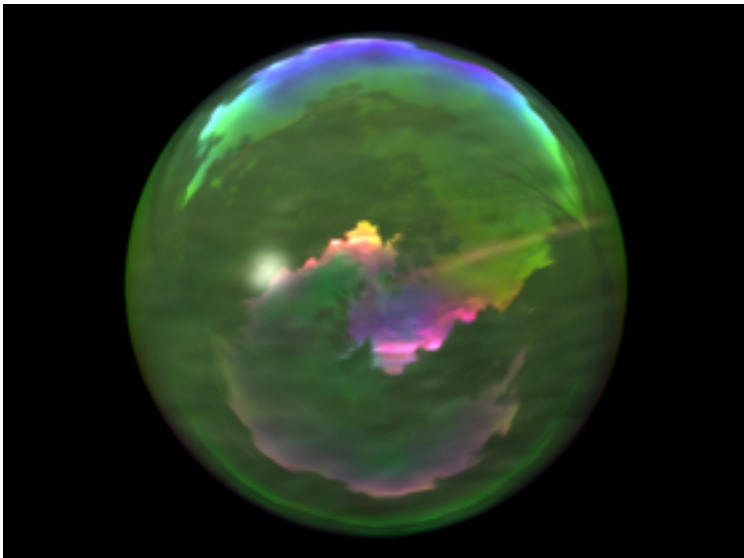


# Les particules

Elles ne sont pas toutes identiques

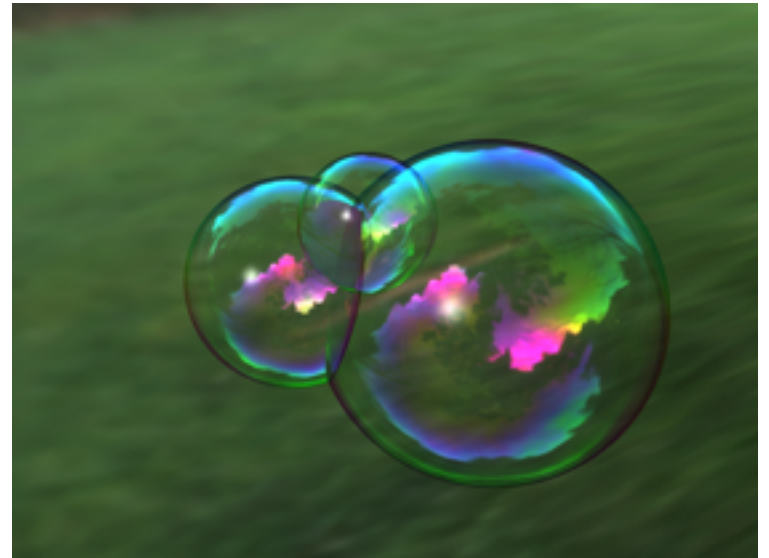
## Élémentaires

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** ?

# On va apprendre à les connaître

	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	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
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>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> down	≈95 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> strange	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> électron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z</b> boson Z	<b>BOSONS DE JAUGE</b>
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W<sup>±</sup></b> bosons W <sup>±</sup>	

# Au début on ne connaissait que l'atome

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

**Tableau périodique des éléments**

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

1	2											11	12	13	14	15	16	17	18									
IA	IIA											IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII									
1 hydrogène 1 H 1,00794	2 hélium 2 He 4,002602											3 lithium 3 Li 6,941	4 beryllium 4 Be 9,012182	5 bor 5 B 10,811	6 carbone 6 C 12,0107	7 azote 7 N 14,00644	8 oxygène 8 O 15,9994	9 fluor 9 F 18,9984032	10 néon 10 Ne 20,1797	11 sodium 11 Na 22,98976928	12 magnésium 12 Mg 24,304	13 aluminium 13 Al 26,9815386	14 silicium 14 Si 28,0855	15 phosphore 15 P 30,973762	16 soufre 16 S 32,06	17 chlore 17 Cl 35,4527	18 argon 18 Ar 39,948	
19 potassium 19 K 39,0983	20 calcium 20 Ca 40,078	21 scandium 21 Sc 44,955912	22 titane 22 Ti 47,867	23 vanadium 23 V 50,9415	24 chrome 24 Cr 51,9961	25 manganèse 25 Mn 54,938045	26 fer 26 Fe 55,845	27 cobalt 27 Co 58,933195	28 nickel 28 Ni 58,6934	29 cuivre 29 Cu 63,546	30 zinc 30 Zn 65,38	31 gallium 31 Ga 69,723	32 germanium 32 Ge 72,61	33 arsenic 33 As 74,92160	34 sélénium 34 Se 78,96	35 brome 35 Br 79,904	36 krypton 36 Kr 83,80											
37 rubidium 37 Rb 85,4678	38 strontium 38 Sr 87,62	39 yttrium 39 Y 88,90585	40 zirconium 40 Zr 91,224	41 niobium 41 Nb 92,90638	42 molybdène 42 Mo 95,94	43 technétium 43 Tc 97,9072	44 ruthénium 44 Ru 101,07	45 rhodium 45 Rh 102,90550	46 palladium 46 Pd 106,42	47 argent 47 Ag 107,8682	48 cadmium 48 Cd 112,411	49 indium 49 In 114,818	50 étain 50 Sn 118,710	51 antimoine 51 Sb 121,760	52 tellure 52 Te 127,60	53 iode 53 I 126,90447	54 xénon 54 Xe 131,29											
55 césium 55 Cs 132,90545196	56 barium 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71		72 hafnium 72 Hf 178,49	73 tantalum 73 Ta 180,94788	74 tungstène 74 W 183,84	75 rénium 75 Re 186,207	76 osmium 76 Os 190,23	77 iridium 77 Ir 192,222	78 platine 78 Pt 195,084	79 or 79 Au 196,966569	80 mercure 80 Hg 200,59	81 thallium 81 Tl 204,3871	82 plomb 82 Pb 207,2	83 bismuth 83 Bi 208,98040	84 polonium 84 Po [209,9841]	85 astate 85 At [208,9801]	86 radon 86 Rn [222,0175]										
87 francium 87 Fr [223,0187]	88 radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103		104 rutherfordium 104 Rf [261,1032]	105 dubnium 105 Db [262,1034]	106 seaborgium 106 Sg [263,1039]	107 bohrium 107 Bh [264,1042]	108 hassium 108 Hs [265,1045]	109 meitnerium 109 Mt [266,1048]	110 darmstadtium 110 Ds [271,1044]	111 roentgenium 111 Rg [272,1045]	112 copernicium 112 Cn [285,1072]	113 nihonium 113 Nh [286]	114 flérovium 114 Fl [289]	115 moscovium 115 Mc [290]	116 livermorium 116 Lv [293]	117 tennessine 117 Ts [294]	118 oganesson 118 Og [294]										
57 lanthane 57 La 138,90547	58 cérium 58 Ce 140,12	59 praseodyme 59 Pr 140,90766	60 néodyme 60 Nd 144,242	61 prométhée 61 Pm [144,9127]	62 europium 62 Eu 151,964	63 gadolinium 63 Gd 157,25	64 terbium 64 Tb 158,92535	65 dysprosium 65 Dy 162,5003	66 holmium 66 Ho 164,93032	67 érbium 67 Er 167,259	68 thulium 68 Tm 168,93423	69 ytterbium 69 Yb 173,054	70 lutétium 70 Lu 174,967	89 actinium 89 Ac [227,0277]	90 thorium 90 Th 232,03806	91 protactinium 91 Pa 231,03689	92 uranium 92 U 238,02891	93 néptunium 93 Np [237,0482]	94 plutonium 94 Pu [244,0642]	95 américium 95 Am [243,0614]	96 curium 96 Cm [247,0700]	97 berkélium 97 Bk [247,0712]	98 californium 98 Cf [251,0794]	99 éinsteinium 99 Es [252,0830]	100 fermium 100 Fm [257,0952]	101 mendelevium 101 Md [258,1062]	102 nobélium 102 No [259,1082]	103 lawrencium 103 Lr [262,1148]

métaux alcalins    métaux alcalino-terreux    lanthanides    actinides    métaux de transition    métaux pauvres    métalloïdes    non-métaux    halogènes    gaz nobles    primordial    découverte récente 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 :

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

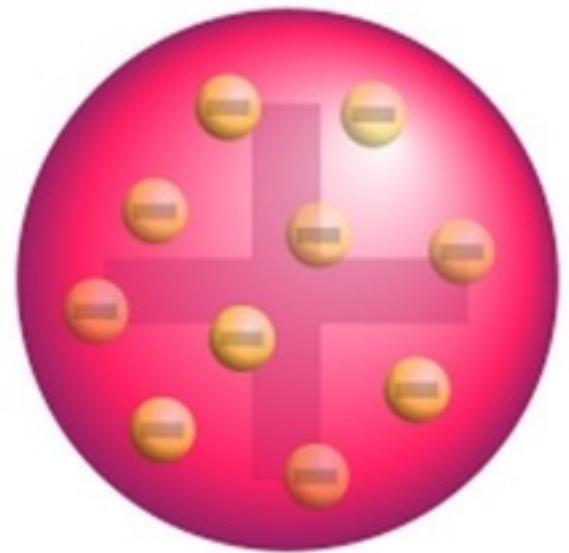
(charge électrique élémentaire = -1)

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

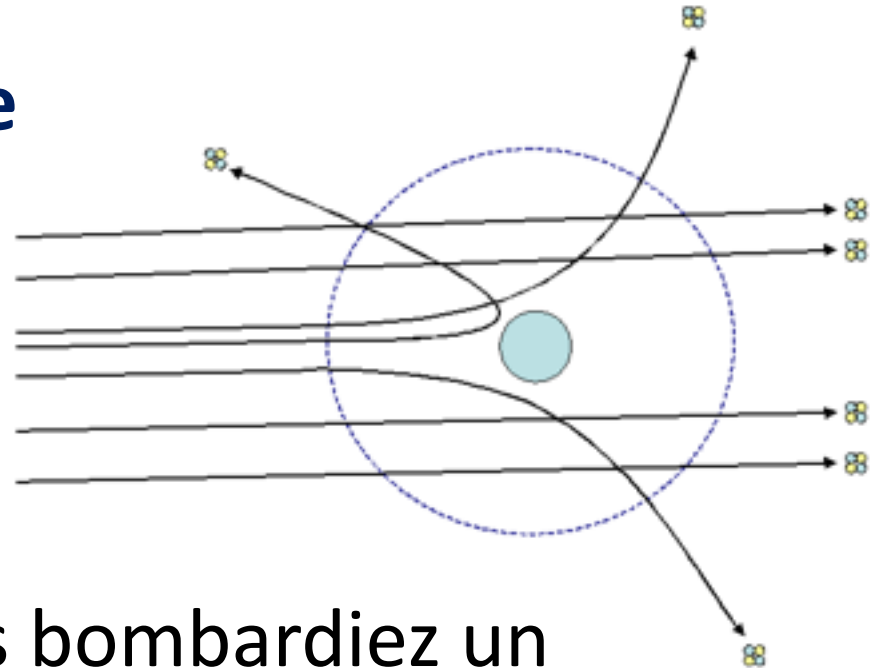
Premier modèle atomique de Thomson:

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**

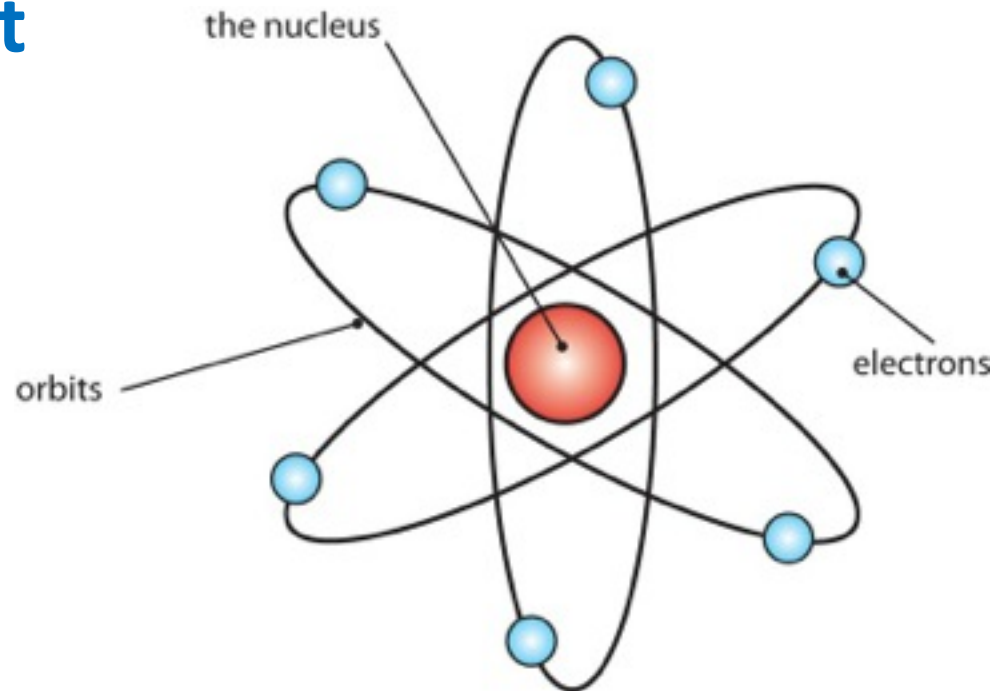


« c'est comme si vous bombardiez un  
buvard avec un obus de 75 et que vous  
le voyez rebondir »

# La structure de l'atome

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

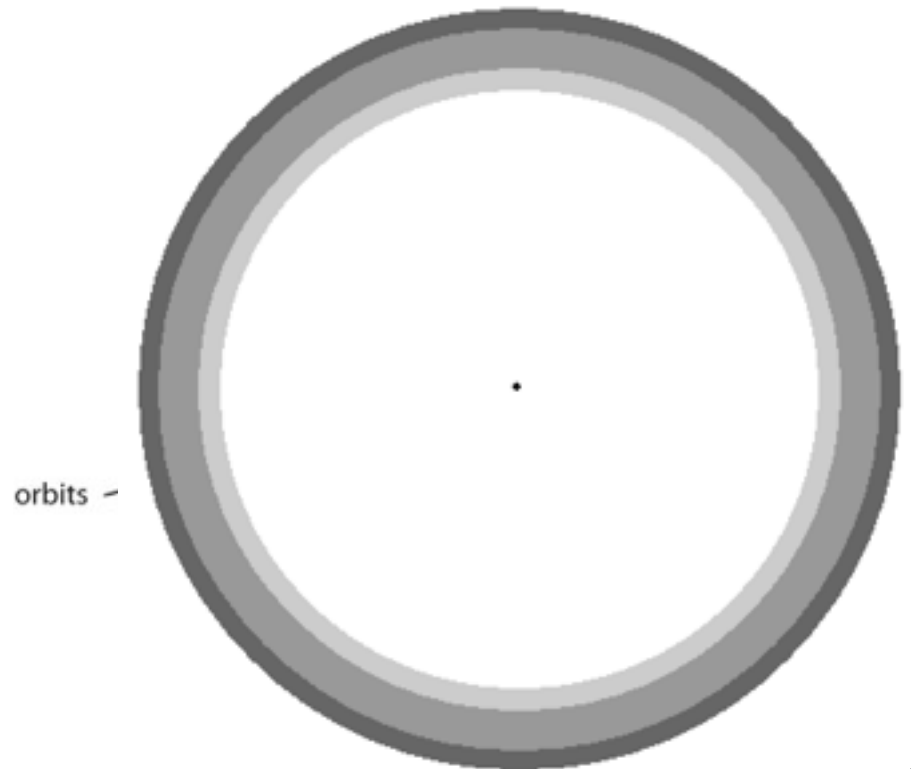
**Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.**



# La structure de l'atome

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

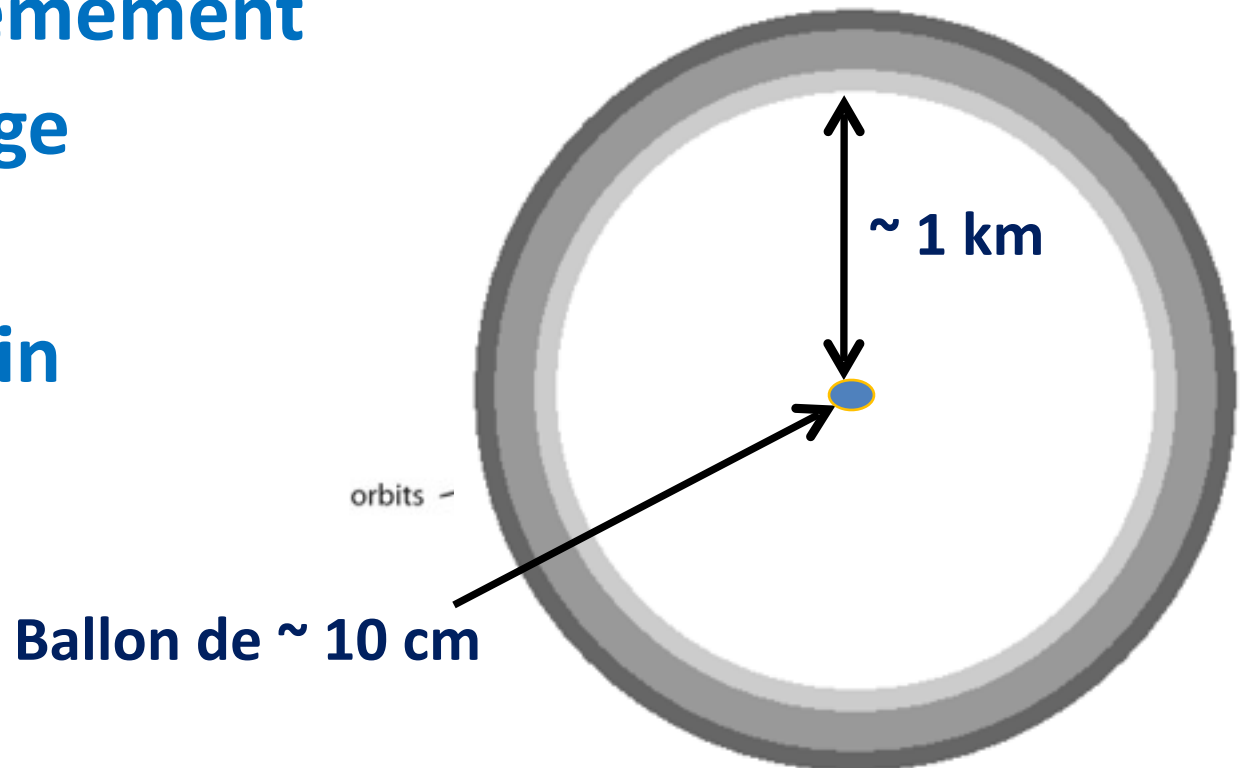
**Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.**



# 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 (*cad* 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 au diminue en fonction de la distance

# Et le noyau ?

## Est-il élémentaire comme l'électron ?

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

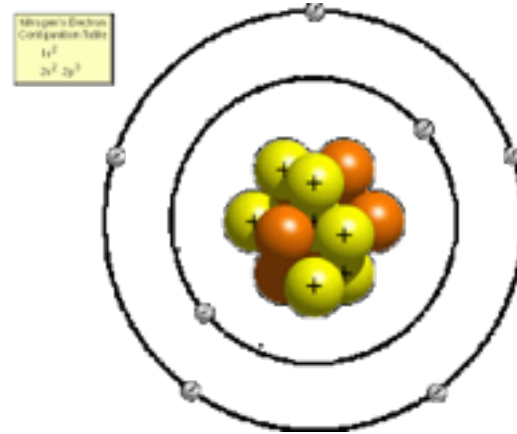
- charge électrique = +1
- masse de l'hydrogène

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

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

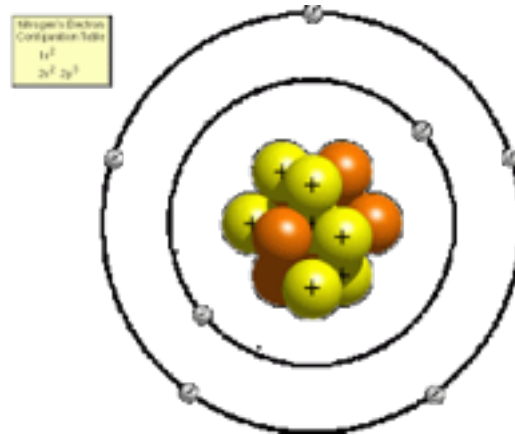


# Et le noyau ?



# 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

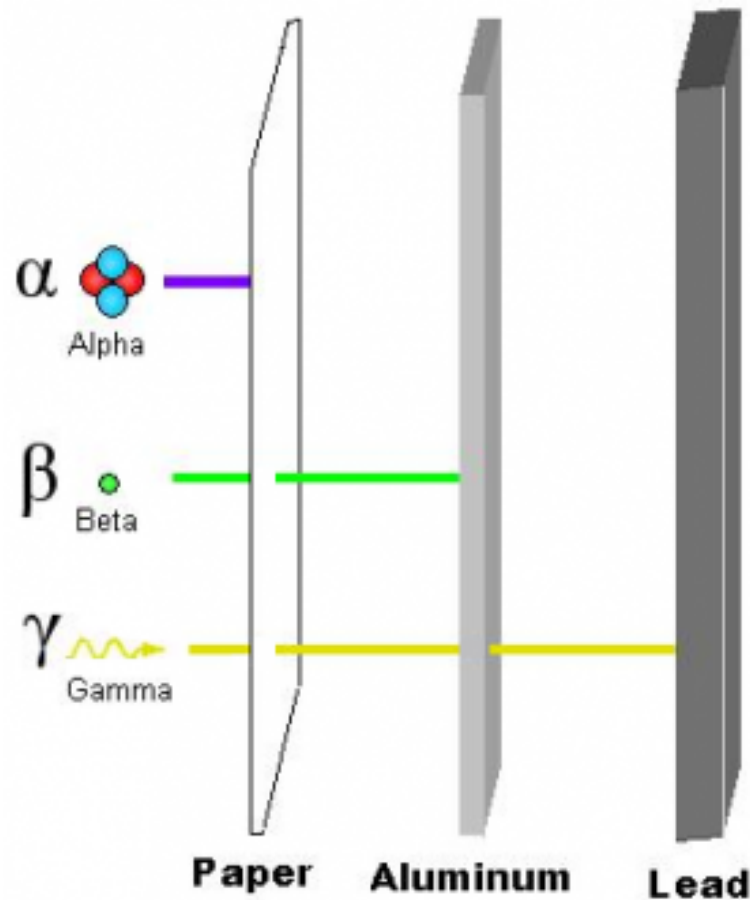
Fluorescence des sels d'uranium (Henri Becquerel – 1896)

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



# 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)

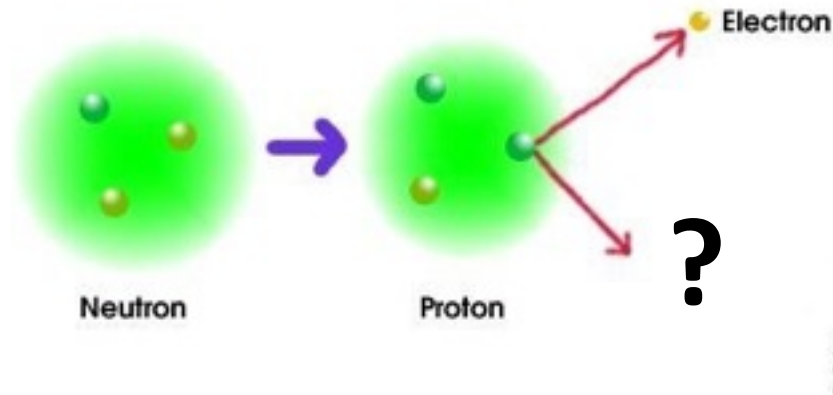
3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

– **rayon  $\alpha$**  : identifié à des noyaux d'hélium

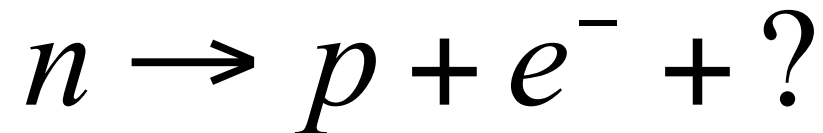
– **rayon  $\beta$**  : identifié à des électrons

– **rayon  $\gamma$**  : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux

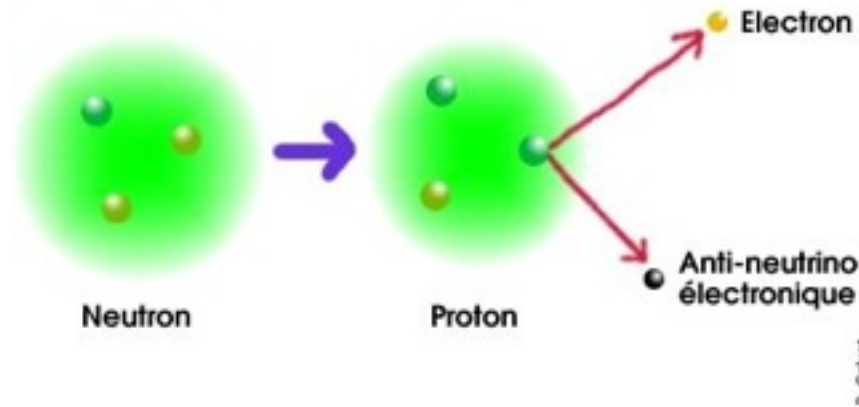
# La radioactivité $\beta$



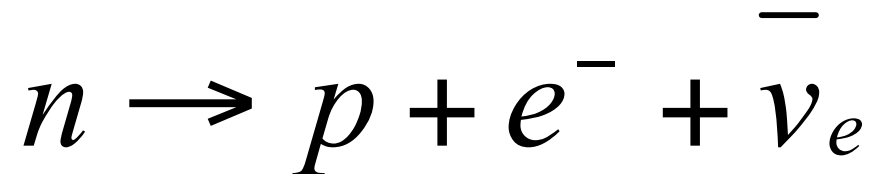
Au niveau des nucléons :



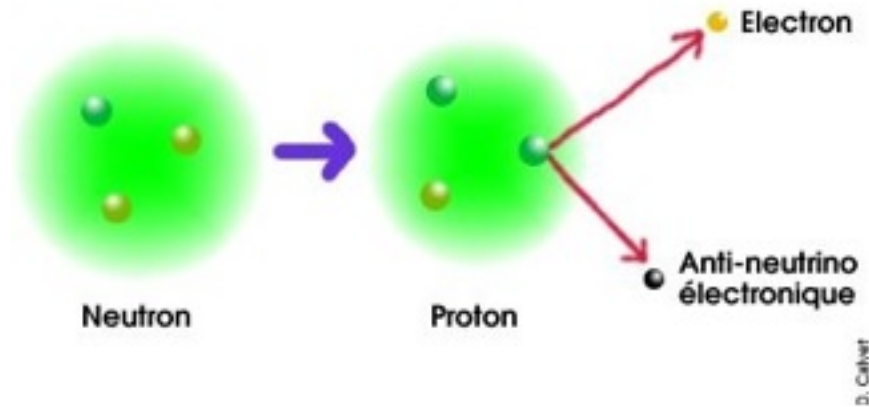
# La radioactivité $\beta$



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)
$+2/3$	$-1/3$

Existent en trois charges « *couleurs* » :

**rouge**, **vert**, **bleu**

– rouge + vert + bleu = blanc (neutre)

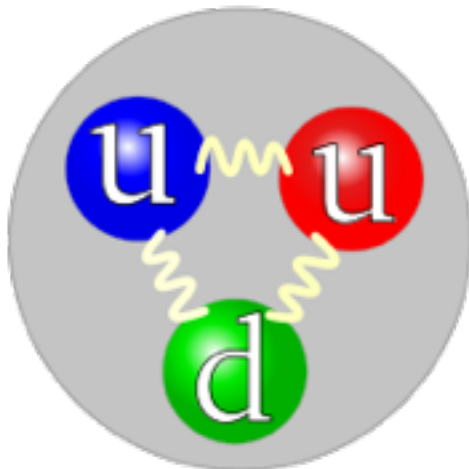


# Le modèle des quarks

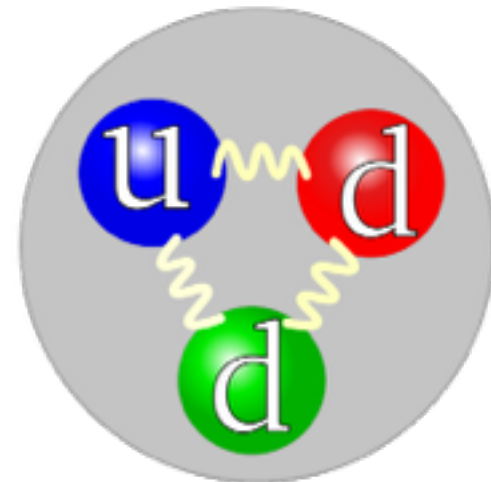
Les nucléons comportent  
un quark de chaque couleur  
et sont « blancs »



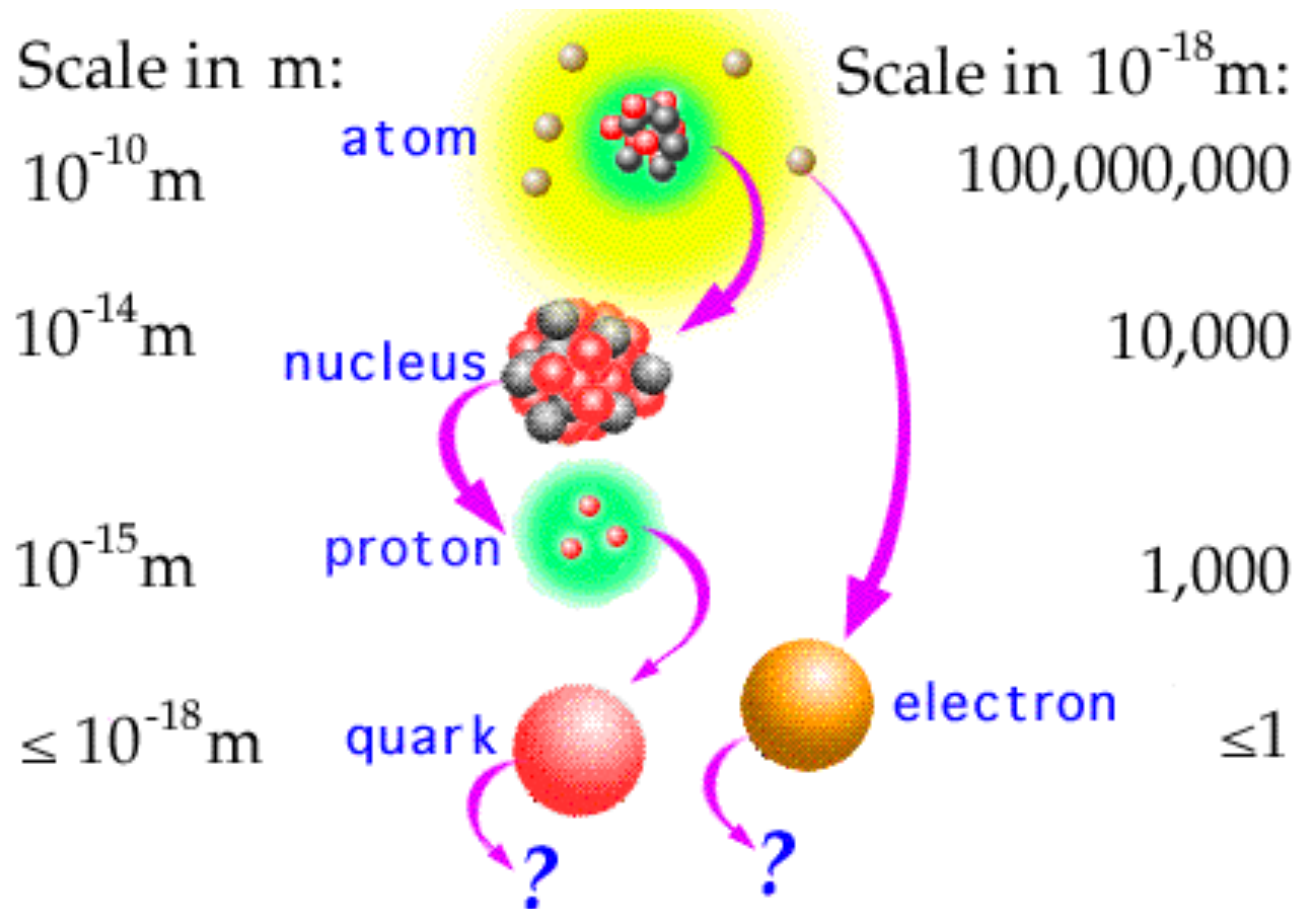
## Proton



## Neutron



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



1<sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION

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

...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
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>
charge →	0	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2

# *Les interactions*

Relativité restreinte :

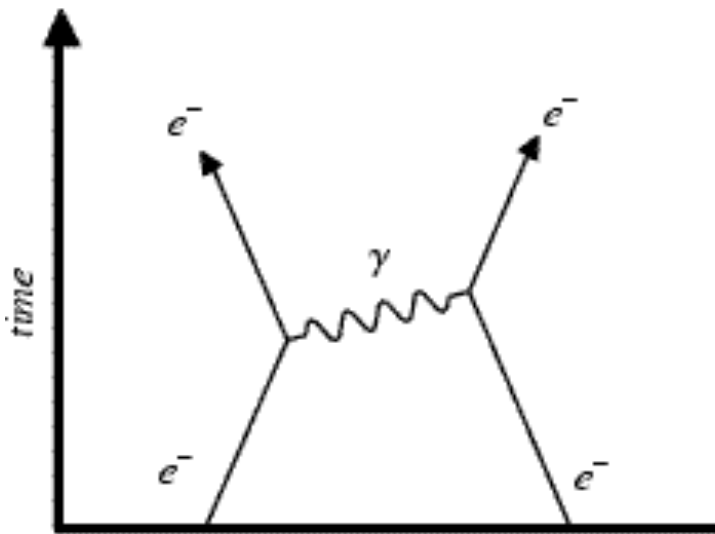
Il n'y a pas d'interactions instantanées

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**

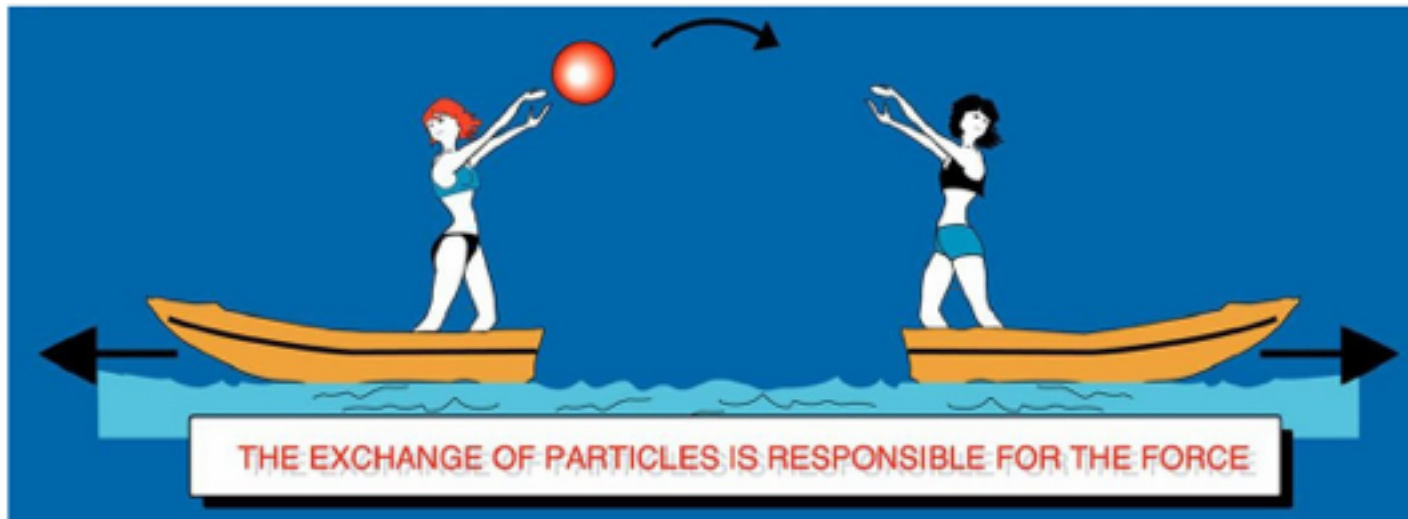


Les interactions individuelles sont expliquées par **l'échange de particules de rayonnement (boson) entre particules de matière (fermion)**



# *Les interactions*

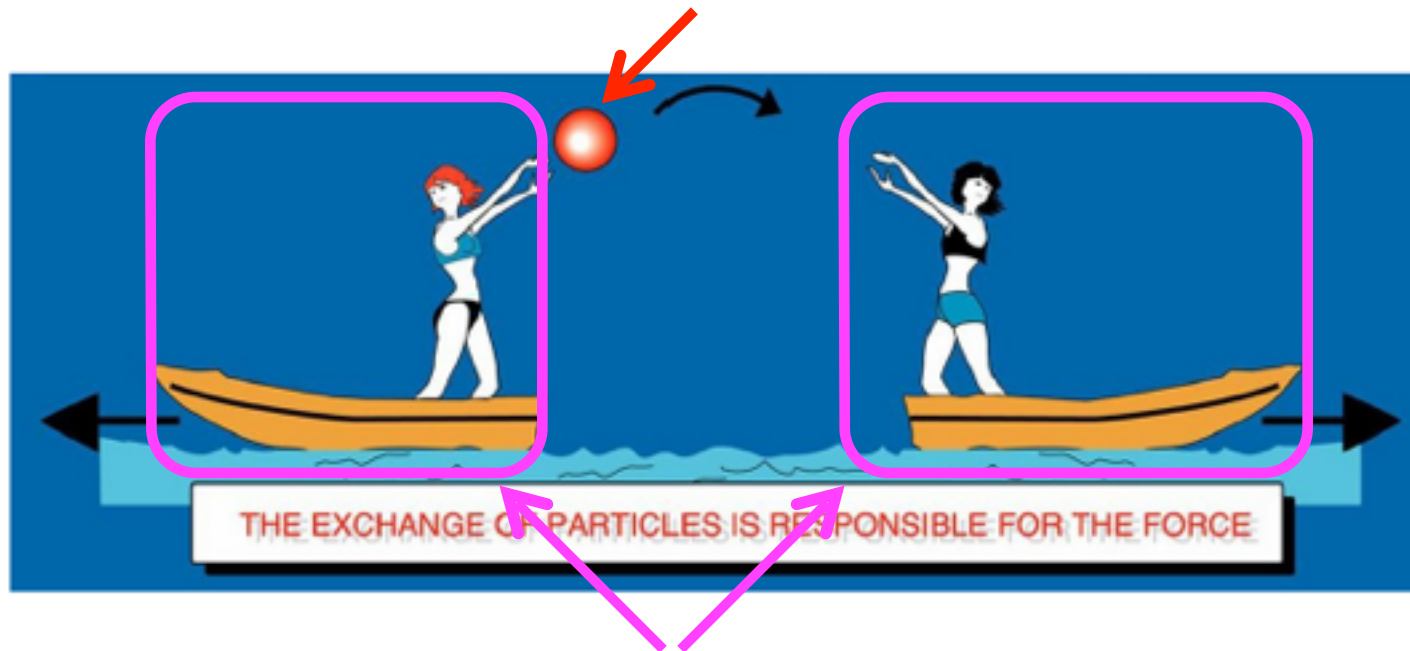
## Principe d'action et réaction



# 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>
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	±1
	1/2	1/2	1/2	1
				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	0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 e électron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 τ tau	91.2 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 Z boson Z
	<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>e</sub> neutrino électronique	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 ν <sub>τ</sub> neutrino tauique	80.4 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 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

	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	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
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>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
<b>QUARKS</b>					
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> boson Z	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
<b>LEPTONS</b>	<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>W<sup>±</sup></b> bosons W <sup>±</sup>	<b>BOSONS DE JAUGE</b>

# 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 :  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$



À chaque particule correspond une anti-particule :

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

électron  $e^-$  •  
proton  $p$  ⊕  
neutron  $n$  ⊙

•  $e^+$  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



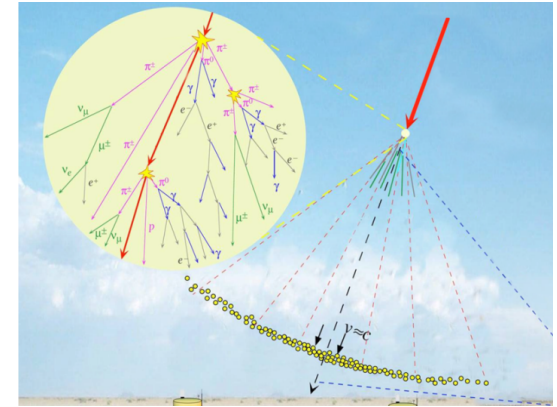
**1965**: première observation d'anti-noyau : anti-deuteron au CERN et Brookhaven

**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... 50

# 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 ?

# Les nouvelles questions

1. **Pourquoi uniquement 3 familles ?**
2. **Pourquoi des masses si différentes** (*i.e.* pourquoi des interactions si différentes avec le champ de Higgs) ?
3. **L'origine de l'asymétrie matière-antimatière**  
(éléments de discussion plus tard dans la matinée)
4. Et **la gravité** ?
5. ...

**Merci pour votre  
attention!**