

# *Les objets de la physique des particules*



# Les particules

Toute la matière qui nous entoure est constituée de particules

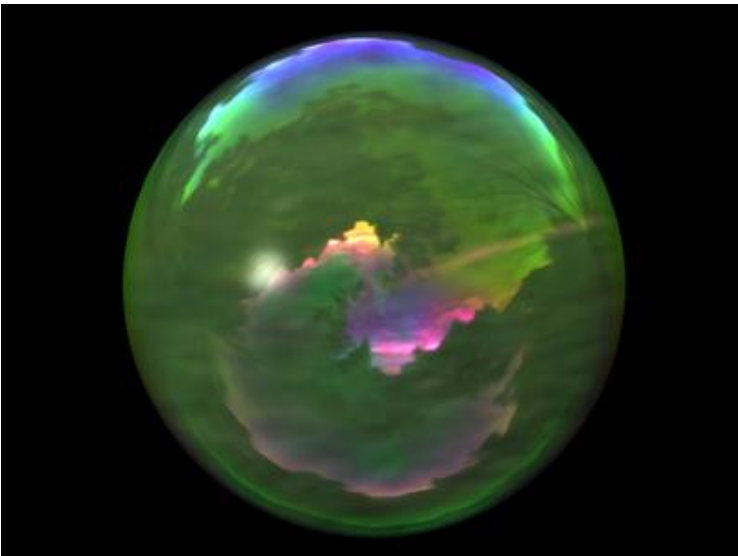


# Les particules

Sont pas toutes les memes

## Elementaires

Il n'ont pas une structure interne



## Composites

Il y a une structure interne

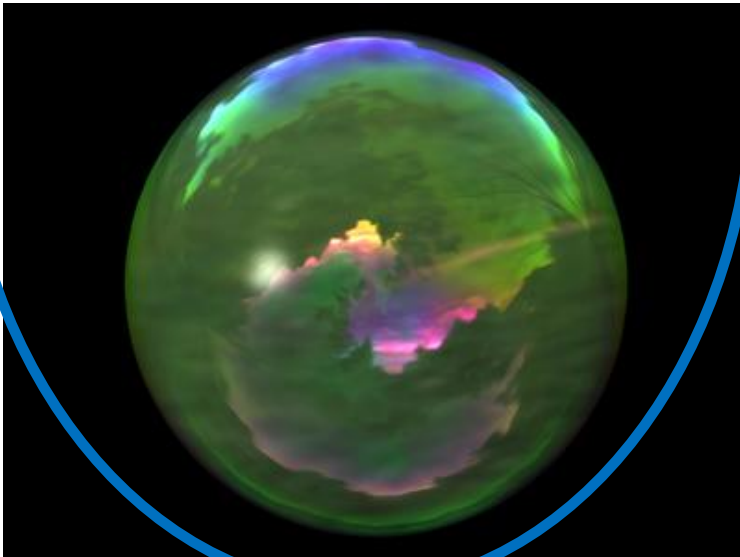


# Les particules elementaires

Sont pas toutes les memes

**Elementaires**

Il n'ont pas une structure interne



**Composites**

Il y a une structure interne



# *Les questions*

1. La **physique** des particules elementaires
2. **Combien et quelles** sont-elles?
3. **Comment interagissent** entre elles?
4. D'où viens leur **masse**?

# La dimension d'une particule elementaire

~ 0,000000000000000000000001 m

Une particule de cette dimension on peut plus la considerer simplement comme une petite balle.

On a besoin d'un nouveau approche:

***la mecanique quantique***

# La *mecanique quantique*

Le meme object on peut le decrirer à la fois  
comme une onde ou une particule:

*dualisme onde-particule*

Une particule est une **onde de probabilité**:  
elle est distribuèe dans *tout l'espace*  
on peut connaitre seulement la probabilité  
qu'elle se trouve à un certain point de l'espace  
à un certain instant

**Comment est-il possible?**

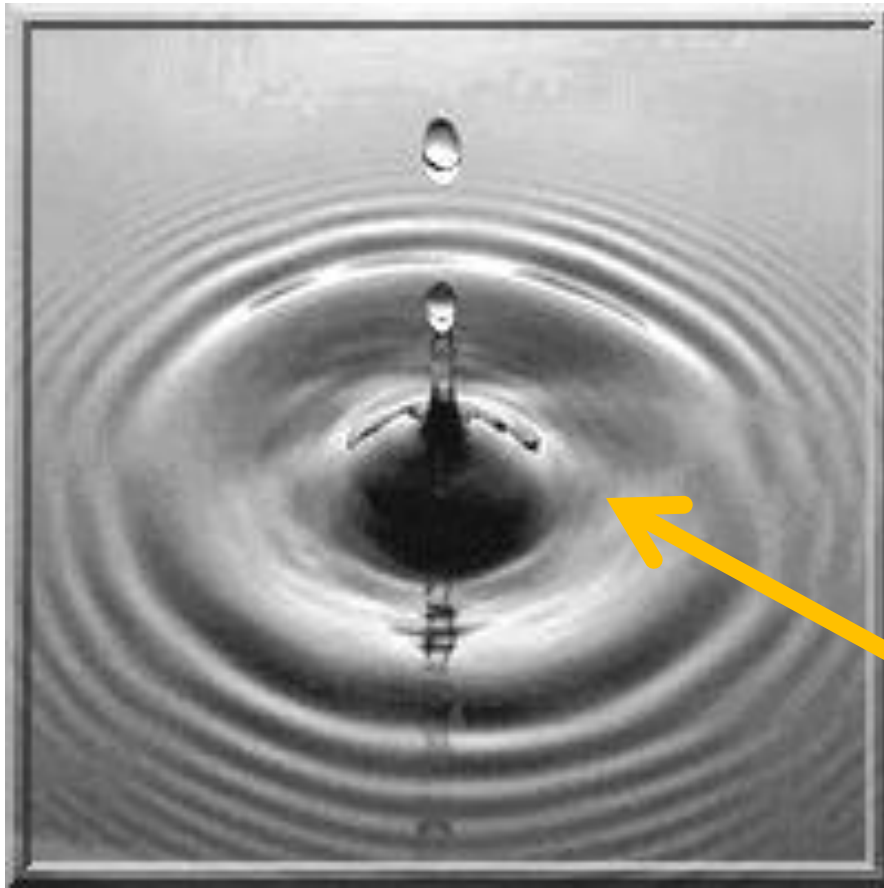
# Dualisme onde-particule



On peut penser une  
particule comme  
un *rond dans l'eau*



# Dualisme onde-particule



On peut penser une  
particule comme  
un *rond dans l'eau*

Plus l'onde est haute,  
plus grande est la  
*probabilité*  
de trouver la particule

# Dualisme onde-particule



Le caractere ondulatoire ou corpusculaire depend par:

>la **distance** à laquelle on observe un certain processus

# Dualisme onde-particule



Le caractere ondulatoire ou corpusculaire depend par:

>la **distance** à laquelle on observe un certain processus

# Dualisme onde-particule



Le caractere ondulatoire ou corpusculaire depend par:

> la **distance** à laquelle on observe un certain processus

Et une ***particule en mouvement***?

Avec une petite balle on peut definir une ***trajectoire***

Que est-ce que de la trajectoire classique en QM?

# Dualisme onde-particule

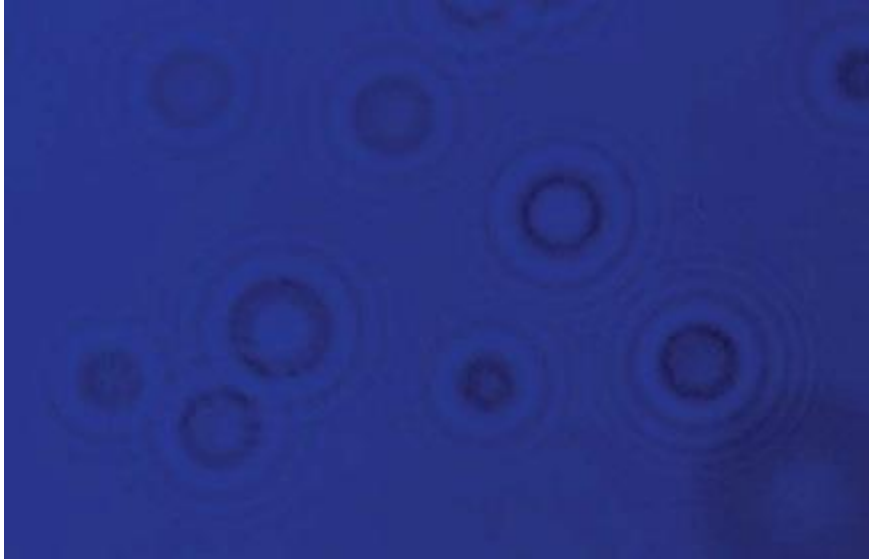


Le caractere ondulatoire ou corpusculaire depend par:

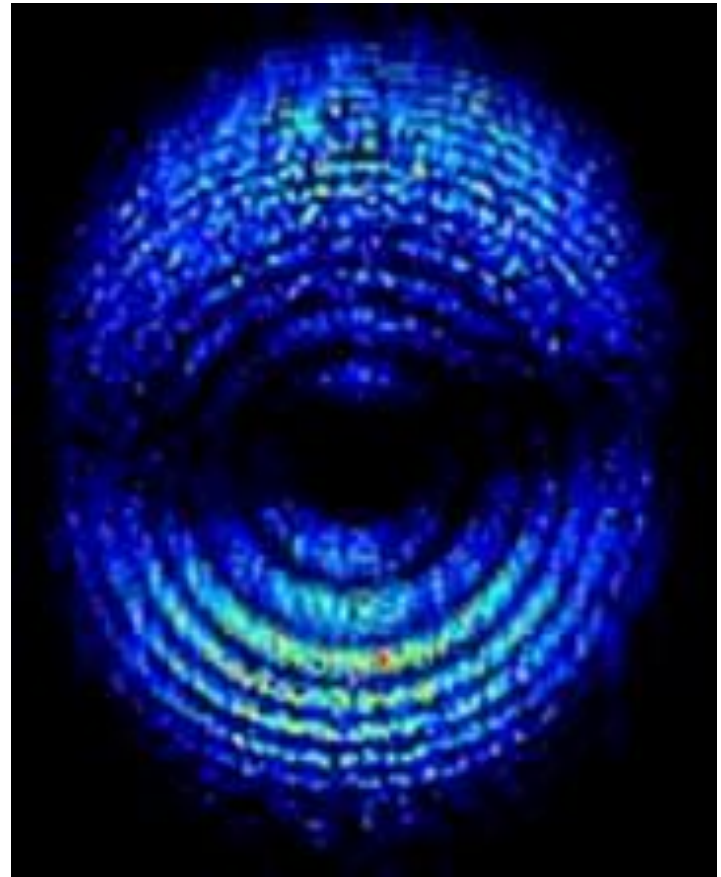
- >la **distance** à laquelle on observe un certain processus
- >la **vitesse** de l'object qu'on observe

# Mais...est-ils vrai?

Vrai electrons



Un electron en mouvement



# ***La Relativité restreinte***

1. Il existe une vitesse maximale de propagation

$$**c=300.000 Km/s**$$

Il n'y a pas des interactions instantanées! (qui demandent une vitesse de propagation infinie)

Deux objets à distance peuvent pas savoir l'un que est-ce qu'en train de faire l'autre au même instant

# *La Relativité restreinte*

2. equivalence entre masse et energie

$$E=mc^2$$

Seulement masse + energie est conserve dans les processus physiques et non le deux quantité separement



# ***La Relativité restreinte***

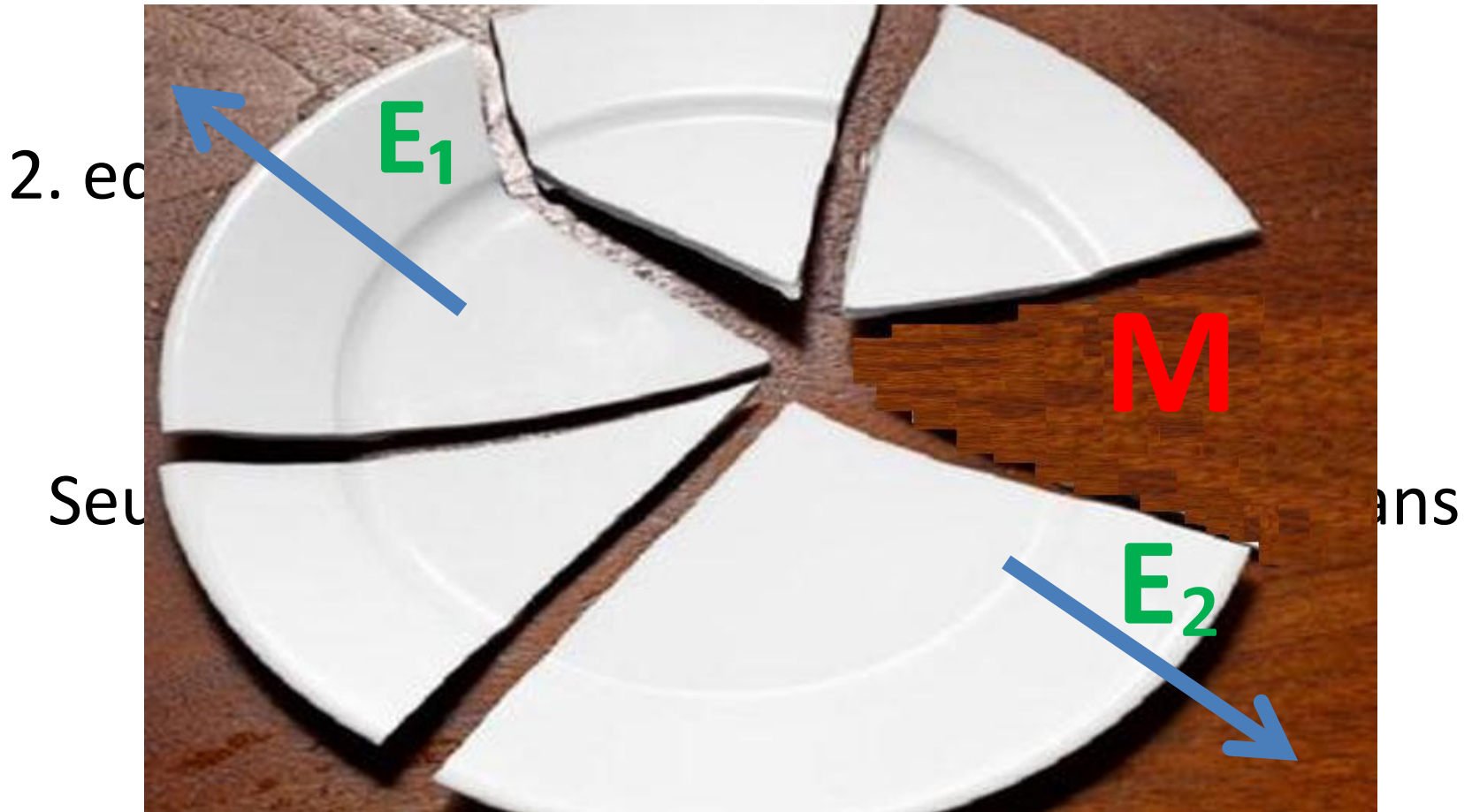
2. ec

Seu



ans

# *La Relativité restreinte*



$$E_1 + E_2 = Mc^2$$

# On va les connaître

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME 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>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	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	
<b>LEPTONS</b>					
	<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>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>

# Au debout c'était l'atome

**Atome:** ἄτομος [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	biérum 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]	tennessium 110 Ts [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	flérovium 114 Fl [289]	unpentium 115 Uup [288]	livermorium 116 Lv [292]	unseptium 117 Uus [292]	unuoctium 118 Uuo [294]
			lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praseodyme 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]	mendélévium 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 debout c'était l'atome

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

Charge électrique nulle

Ils s'organisent en molécules

Object d'étude de la ***chimie***

# L'électron

Il doit y avoir quelque chose plus fondamental:

En 1897 J-J. Thomson découvre l'*electron*:

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

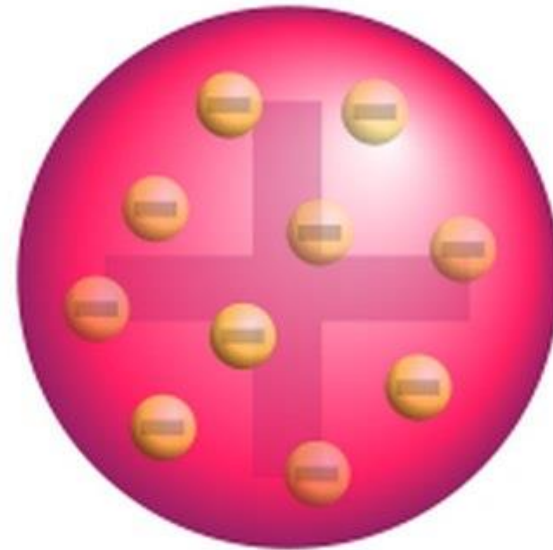
(charge électrique élémentaire = -1)

La charge électrique est «*quantisé*» : on peut avoir que des multiples entières des électrons (on peut pas les diviser!)

# L'électron

Prémier modèle atomique de Thomson:

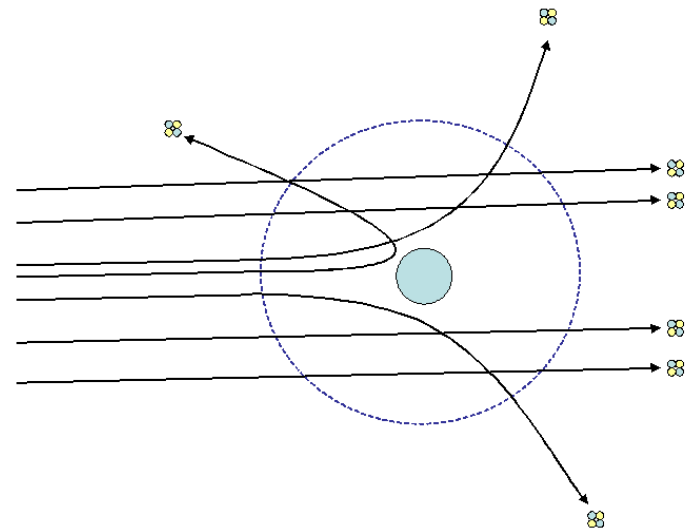
électrons plongés dans un  
atome lourd  
composé de charges  
positives de  
nature inconnue



# La structure de l'atome

Rutherford (1911):

la **masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide**



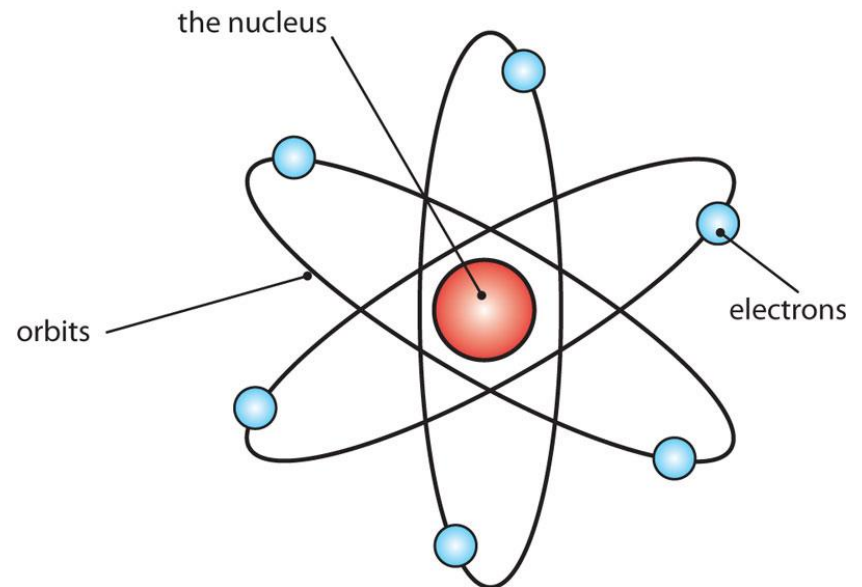
« c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »



# La structure de l'atome

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

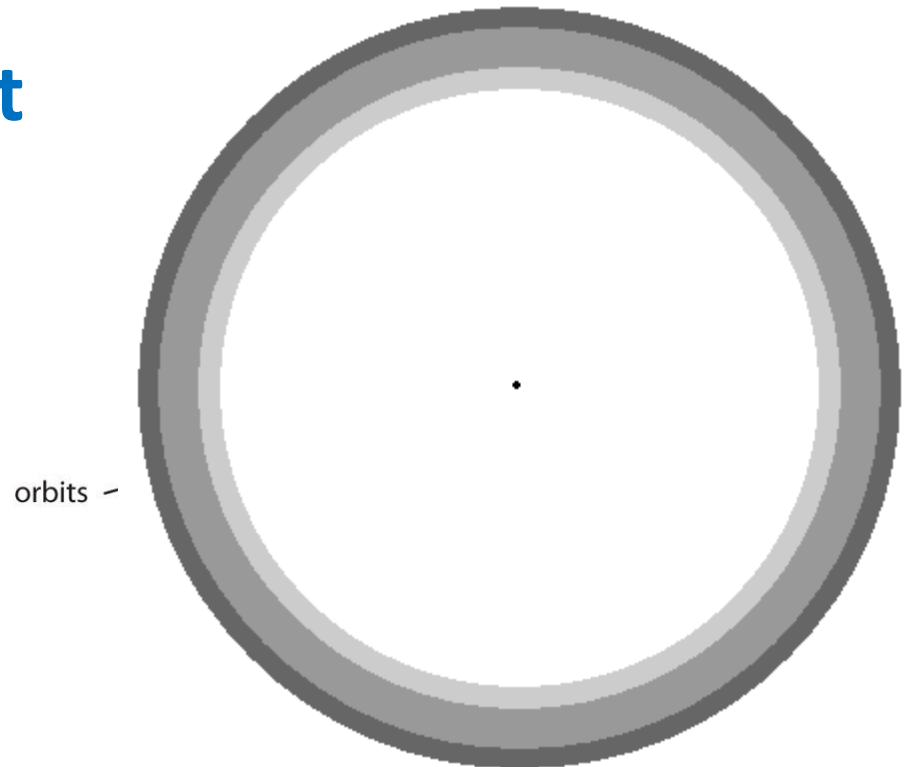
**Un noyau extrêmement petit et un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.**



# 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.**

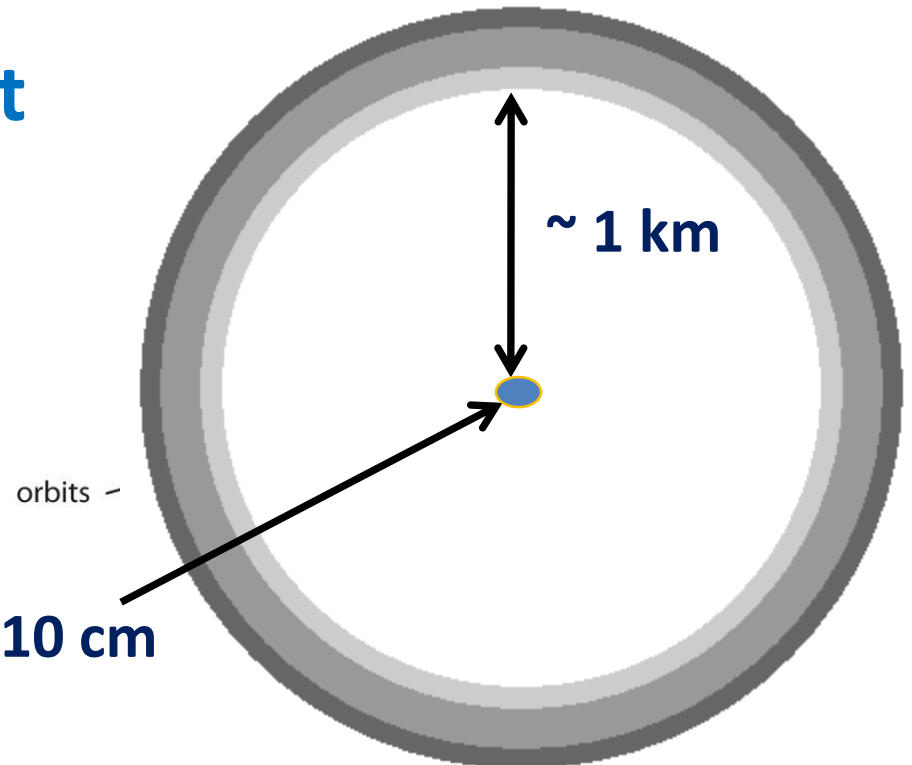


# La structure de l'atome

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

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

**Ballon de ~ 10 cm**



# L'interaction électrique

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

Lois 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 du même (différent) signe se repoussent (attire)
- La force augmente au diminuer de la distance (et viceversa)

# Et le noyau?

Est-il élémentaire comme l'électron?

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

- charge électrique : +1

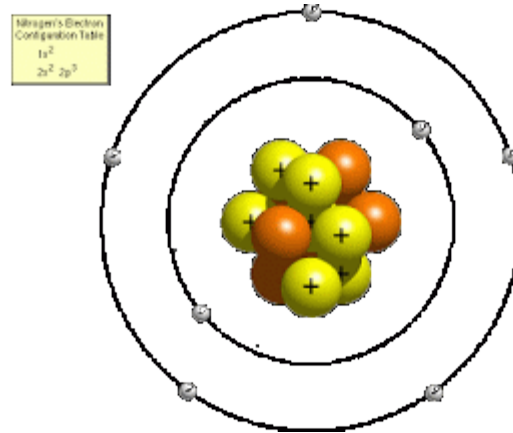
- masse de l'hydrogène

Chadwick (1932): découvre le **neutron**

- charge électrique = 0

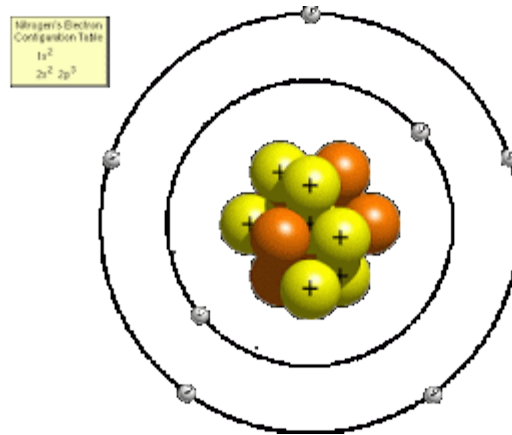
- (presque!) même masse du proton (un peu plus lourd)

# Et le noyau?



# Des nouvelles interactions

Plusieurs charges électrique du même signe (protons) très proche l'une l'autre subissent la répulsion électrique, très forte!



Il doit y avoir une nouvelle interaction qui permet au noyau de se maintenir 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 :

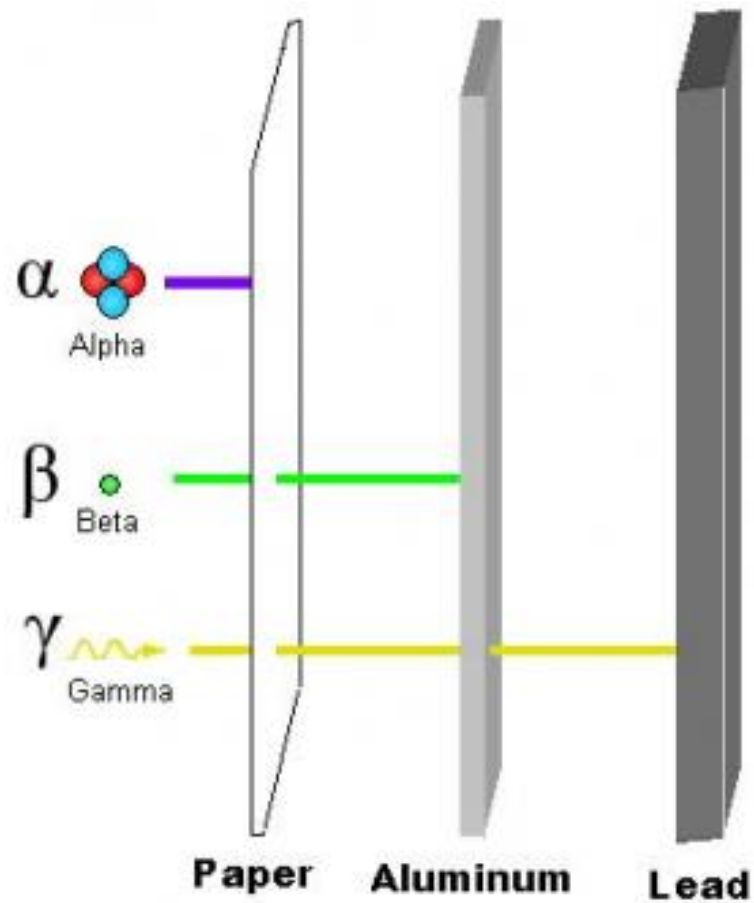
– **rayon  $\alpha$**  : identifié à des noyaux d'hélium

– **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)

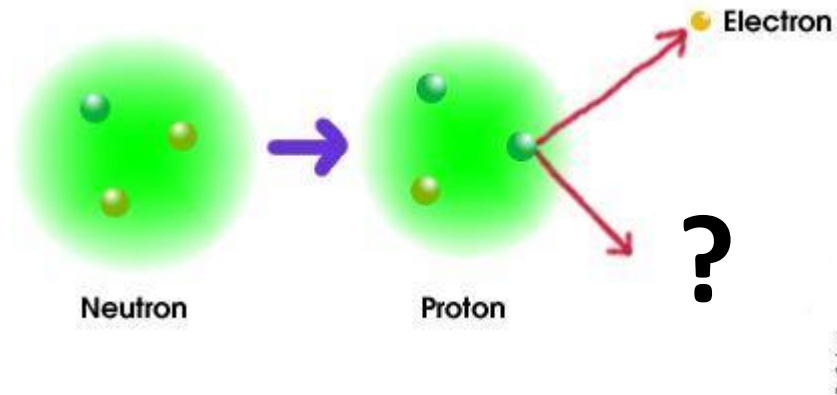
3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

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

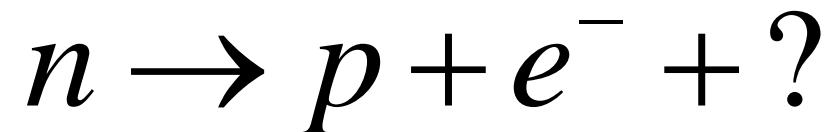
– **rayon  $\beta$**  : identifié à des électrons

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

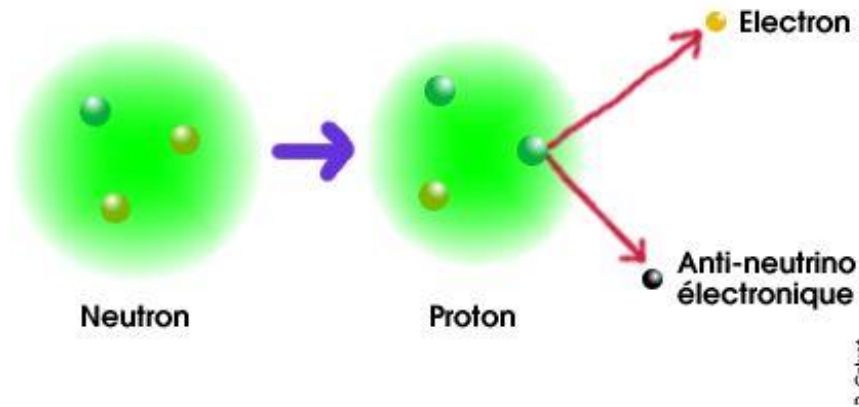
# La radioactivité $\beta$



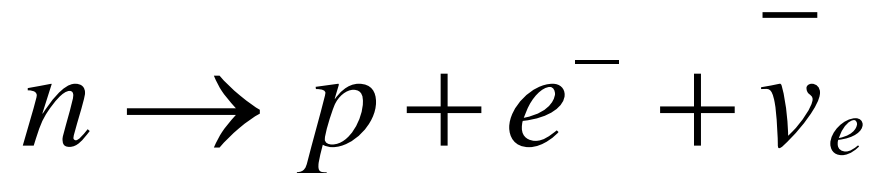
**Au niveau de nucléons:**



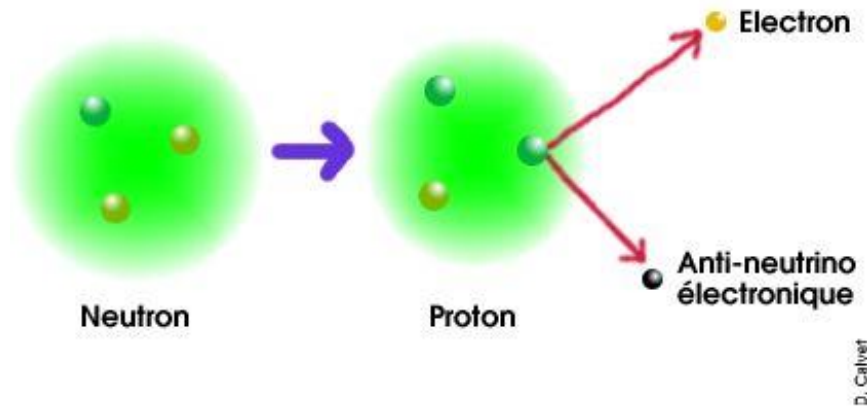
# La radioactivité $\beta$



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 : 1ere 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 nucleons?

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

> Les nucleons ont une structure interne

# Le modèle à quark

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

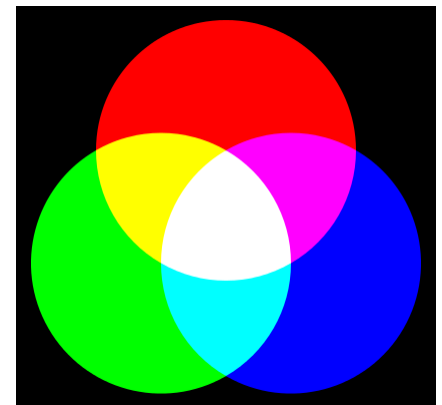
2 types de quarks avec  
**charge électrique**  
**fractionnaire**

Up (u)	Down (d)
$+2/3$	$-1/3$

Existent en trois charges « couleurs »:

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

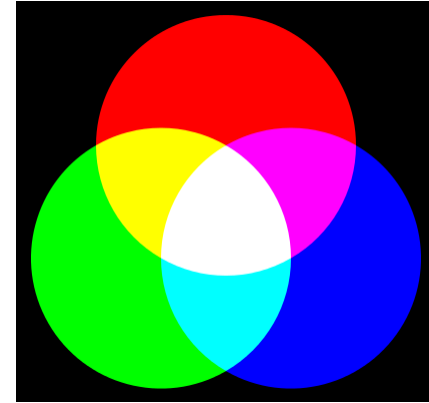
– rouge + vert + bleu = blanc (neutre)



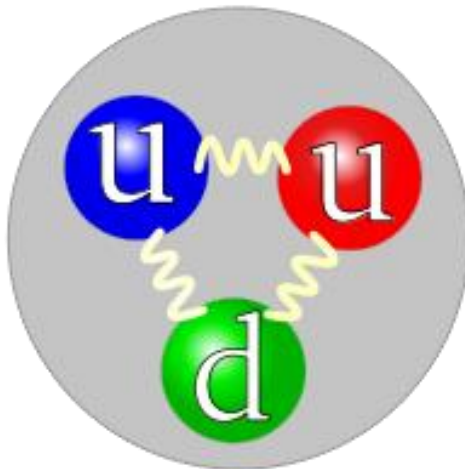


# Le modele à quark

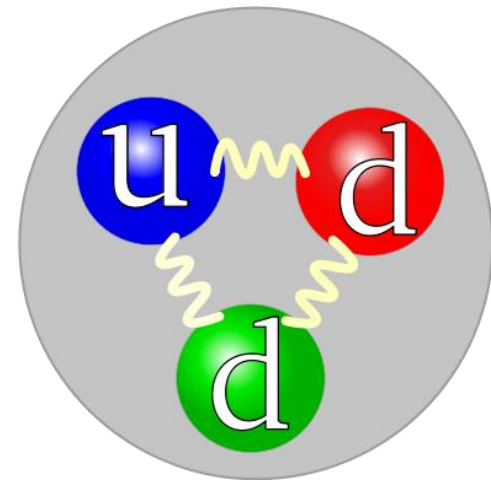
Les nucléons comportent  
un quark de chaque couleur  
et sont blancs



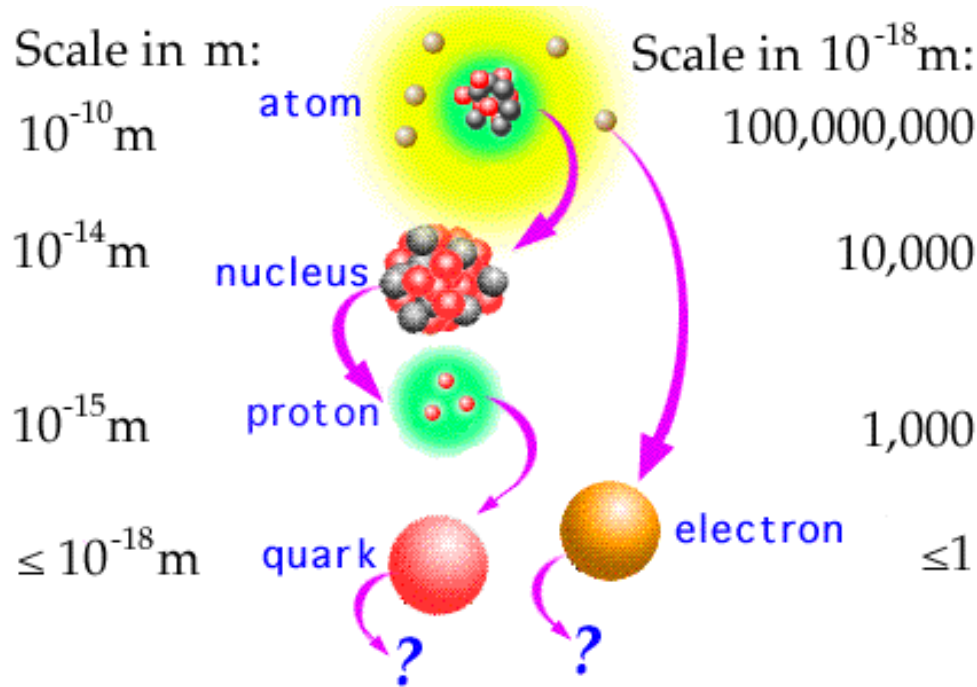
**Proton**



**Neutron**



# Summary



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

# La tribù des particules

	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
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>			
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$
	$-1$	$-1$	$-1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$
	$0$	$0$	$0$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
<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

# *Les interactions*

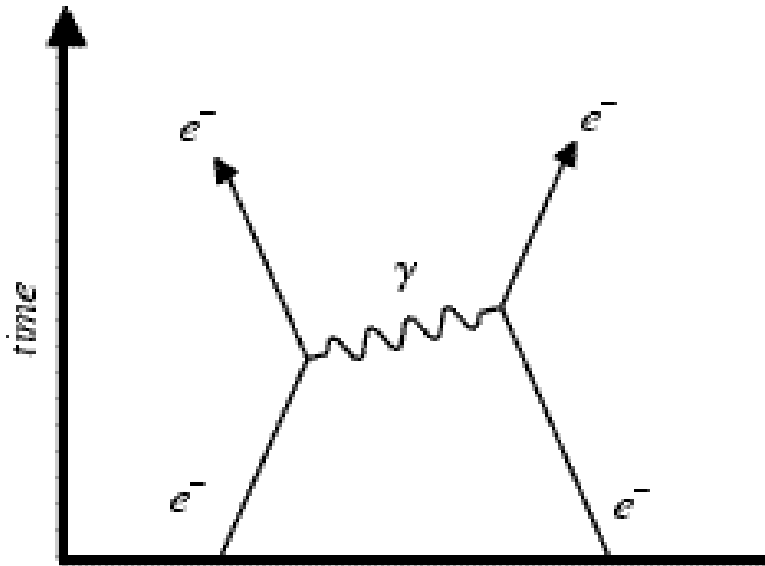
Relativité restreinte: il n'y a pas des interactions à distance instantané

Deux particules peuvent interagir s'elles occupent la ***meme position*** au ***meme instant*** (***interaction local***)

Comment expliquer l'interaction entre particules à distance?

# Les interactions

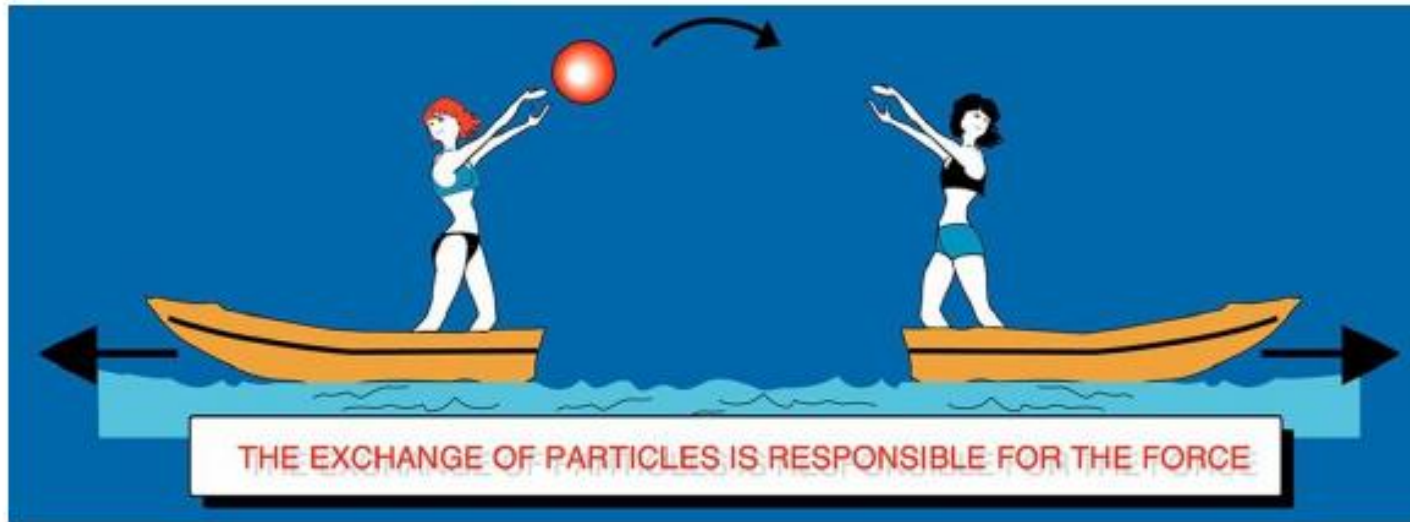
A l'aspect granulaire de la matière correspond un **aspect granulaire des forces**



Les interactions individuelles sont expliquées par **l'échange de particules de rayonnement entre particules de matière**

# *Les interactions*

















## Principe d'action et reaction



# 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	 up	 charm	 top	 gluon
	 down	 strange	 bottom	 photon
	 électron	 muon	 tau	 boson Z
LEPTONS	 neutrino électronique	 neutrino muonique	 neutrino tauique	 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
	 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>
	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
	<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

Force forte



















# Les interactions

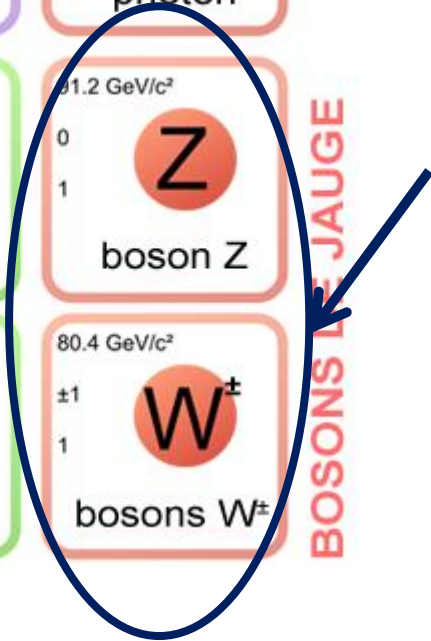
	1 <sup>ÈRE</sup> GÉNÉRATION	2 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	3 <sup>ÈME</sup> GÉNÉRATION	
masse →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
QUARKS	 u up	 c charm	 t top	 g gluon
	 d down	 s strange	 b bottom	 γ photon
	 e électron	 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 est l'inertie d'un corps à 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 sa interaction avec le champ de Higgs!

# Le boson de Higgs



# Le quadre complét

	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>	

# Les nouvelles questions

1. **Pourquoi 3 familles?**
2. **Pourquoi des masses si différents** (*cad* pourquoi des interaction si différents avec le champ de Higgs)?
3. **L'asymmetrie matière-antimatière**
4. Et **la gravité?**
5. ...



**Merci pour votre  
attention!**