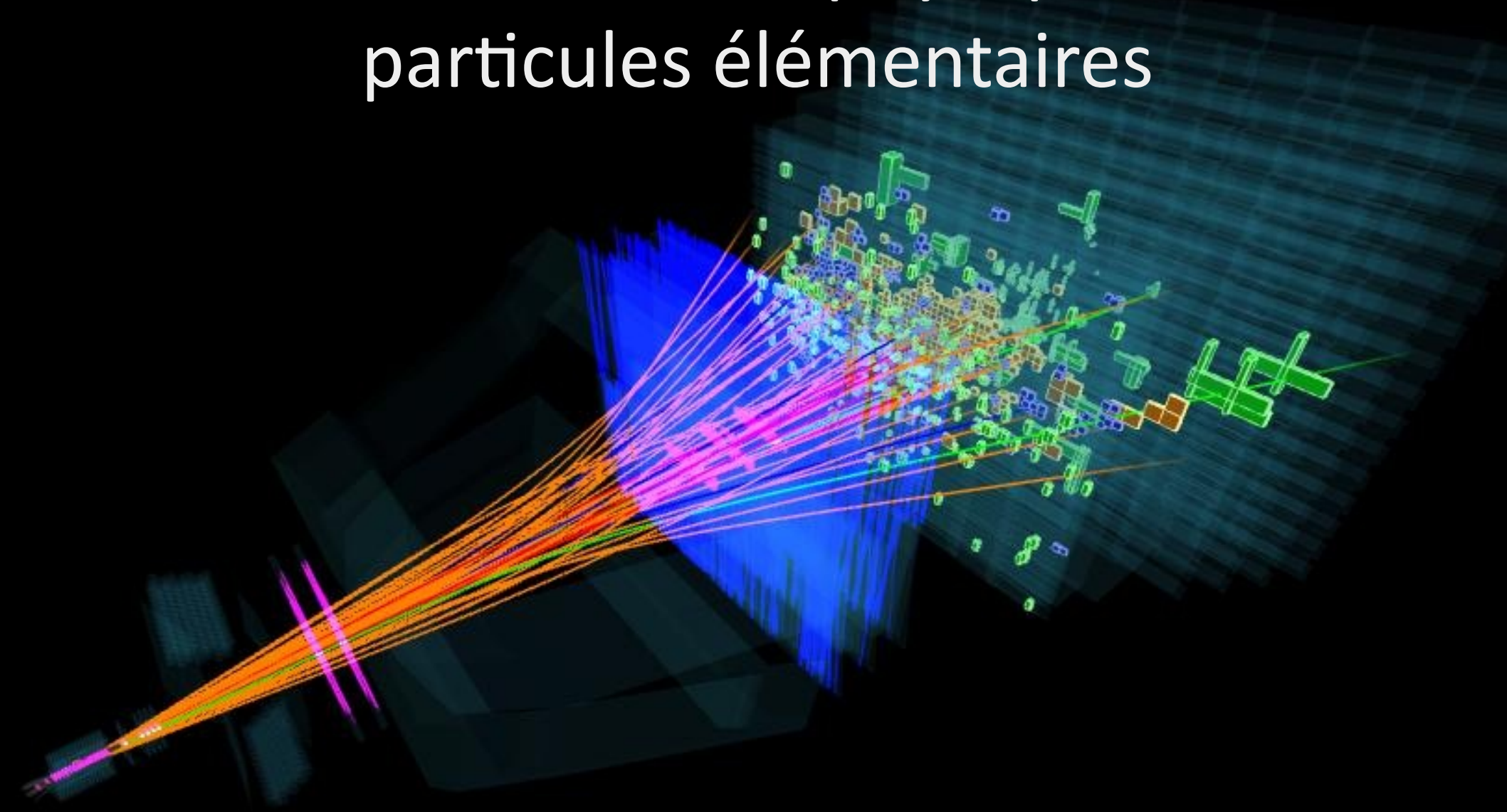


Introduction à la physique des particules élémentaires



Olivier Leroy, Aix-Marseille Univ, CNRS/IN2P3, CPPM, Marseille, France

Sommaire

Le Modèle Standard de la physique des particules élémentaires

Relativité restreinte

Physique quantique

Anti
matière

Origine des masses : mécanisme de Higgs

Conclusions et perspectives

Modèle standard, particules élémentaires

trois générations de matière (fermions)				interactions / forces (bosons)		
I		II		III		
QUARKS	masse charge spin	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  u up	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  c charm	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  t top	0 0 1  g gluon	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0  H boson de Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  d down	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  s strange	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  b bottom	0 0 1  γ photon		
	LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  e électron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  μ muon	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$  τ tau	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1  Z boson Z	
$< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  ν_e neutrino électronique		$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  ν_μ neutrino muonique	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$  ν_τ neutrino tauique	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ ±1 1  W boson W		
				BOSONS DE JAUGE BOSONS VECTEURS		BOSONS SCALAIRES

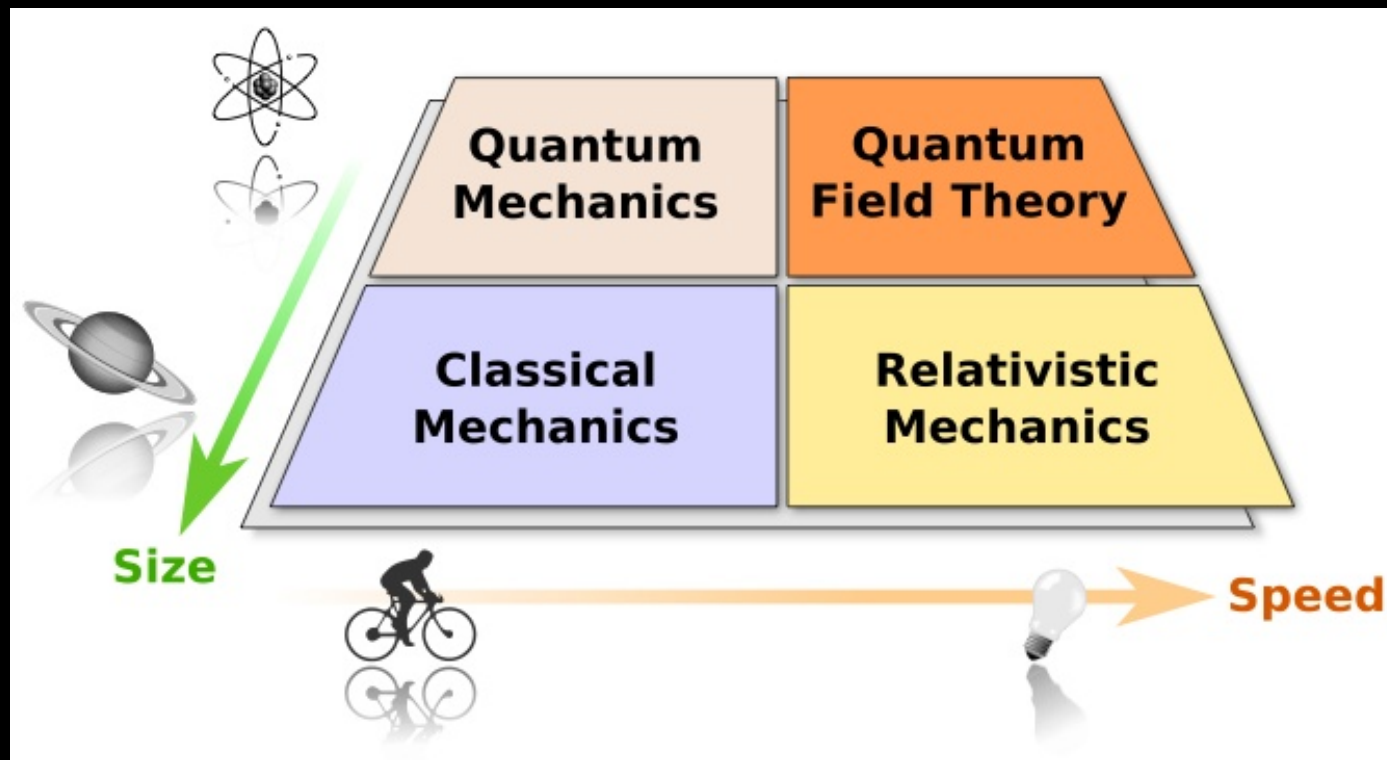
Le Modèle Standard

Le Modèle standard de la physique des particules décrit les interactions entre les constituants élémentaires de la matière

Il est fondé à la croisée de 2 théories fondamentales nées au début du XX^e S

→ **la relativité restreinte**

→ **la physique quantique**



→ Les particules élémentaires sont décrites dans le cadre de la théorie quantique des champs

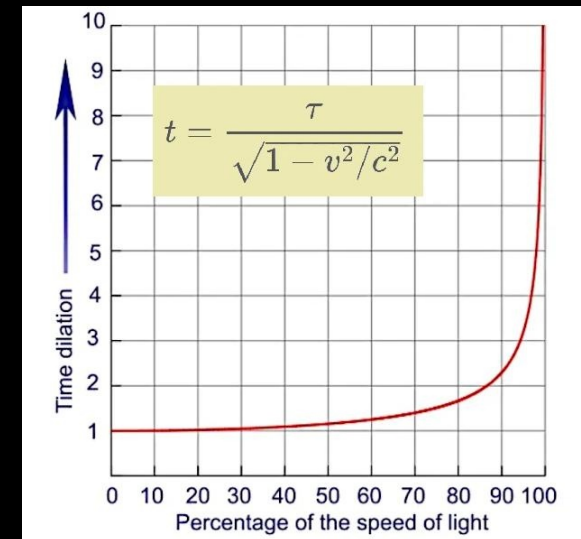
Relativité restreinte (1/2)

Espace-temps

À des vitesses proches de celle de la lumière, les lois de la physique classique ne fonctionnent plus !

Contraction des longueurs et dilatation du temps

- L'écoulement du temps dépend du référentiel
 - temps propre (τ): 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 :
 - $t = \gamma \tau$ où $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} > 1$
(d'autant plus grand que v est grand)
- Exemple : particule qui a une durée de vie de 400 fs (4×10^{-13} s)
- Si elle vole à 99 % de la vitesse de la lumière, $\gamma=7$ et la particule « vit » 7 fois plus longtemps dans le laboratoire que dans son référentiel propre. Cela nous laisse le temps de l'observer (car elle parcourt une distance 7 fois plus longue) !



Relativité restreinte (2/2)

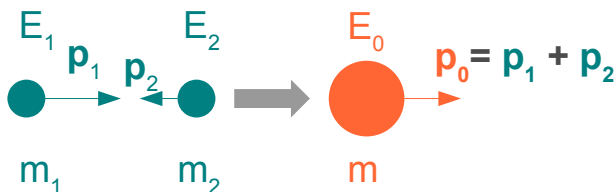
Masse et énergie

La masse est une forme d'énergie

- Relation entre l'énergie, E_0 , et la masse au repos, m , d'un corps :
- $E_0 = m c^2$ (dans le référentiel où le corps est immobile)
- $c = 3 \times 10^8$ m/s, vitesse de la lumière dans le vide
- 1 euro = 1.2\$. Facteur de conversion : $c^2 = 9 \times 10^{16}$!

Énergie totale d'un système : $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (p : quantité de mouvement)

Transformation de l'énergie cinétique en masse

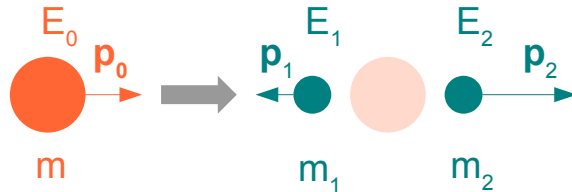


$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}$

exemple : collision de protons avec $E = 7$ TeV
→ énergie disponible : $E_0 = 14$ TeV

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents (14000 fois au LHC) !

Transformation de la masse en énergie cinétique



$m^2 = E_0^2 - p_0^2 = [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 + [p_1 + p_2]^2$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.
En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

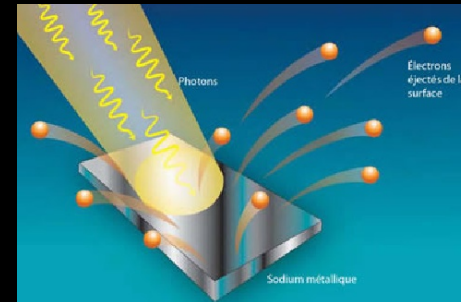
Physique quantique (2/3)

Aux échelles subatomiques, les objets ont une nature à la fois **corpusculaire** et **ondulatoire** !

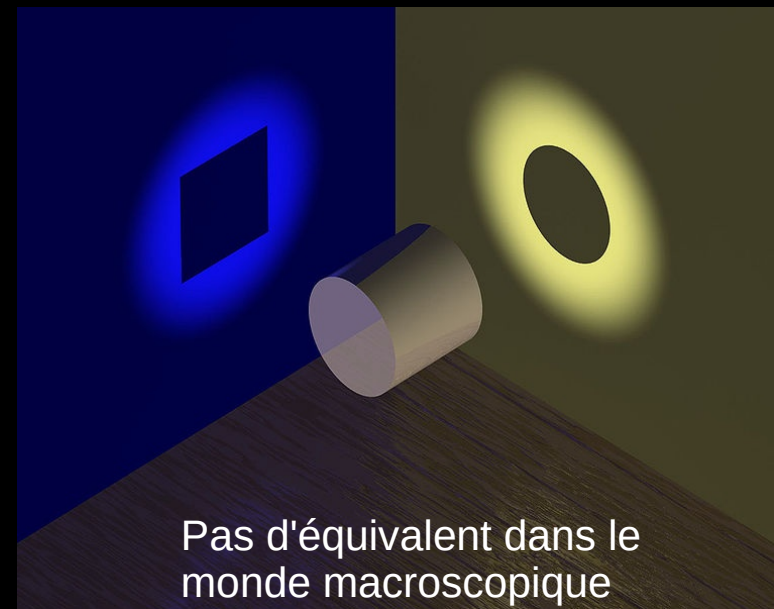
C'est la « dualité onde-corpuscule »

→ 2 descriptions antagonistes !

- *corpuscule* : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- *onde* : objet étendu pouvant interférer



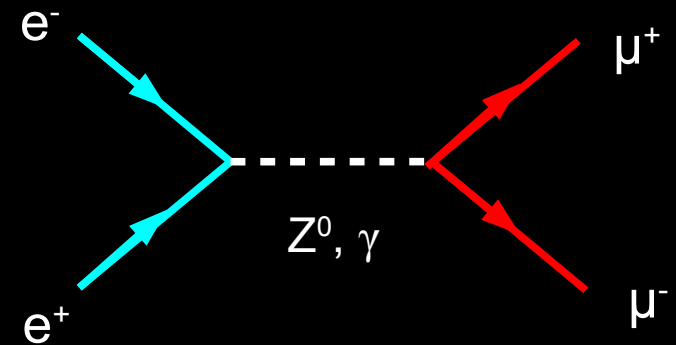
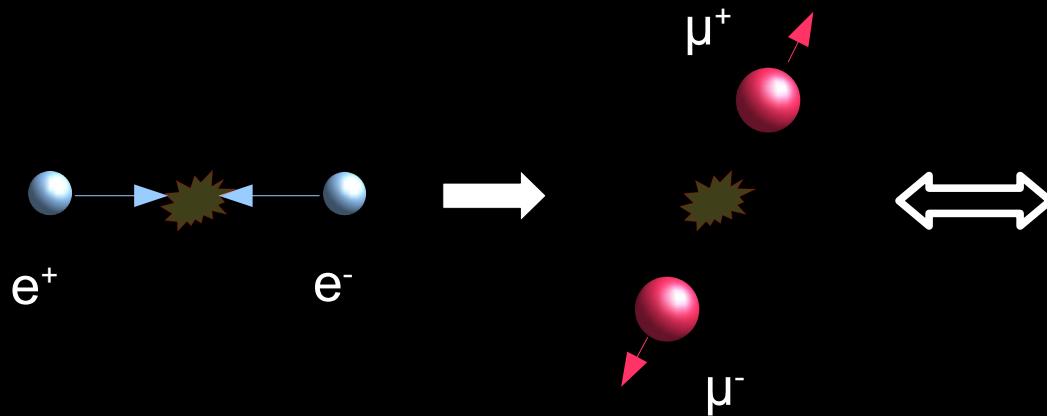
L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon [effet photo-électrique, Einstein, 1905]



Physique quantique (3/3)

Nature probabiliste

Exemple : annihilation e^+e^- (interaction faible)



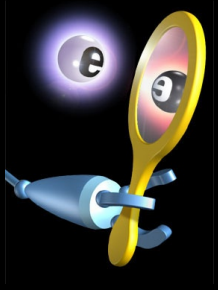
Proba ($e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$) = 3.3 %

Proba ($e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow b\bar{b}$) = 15 %

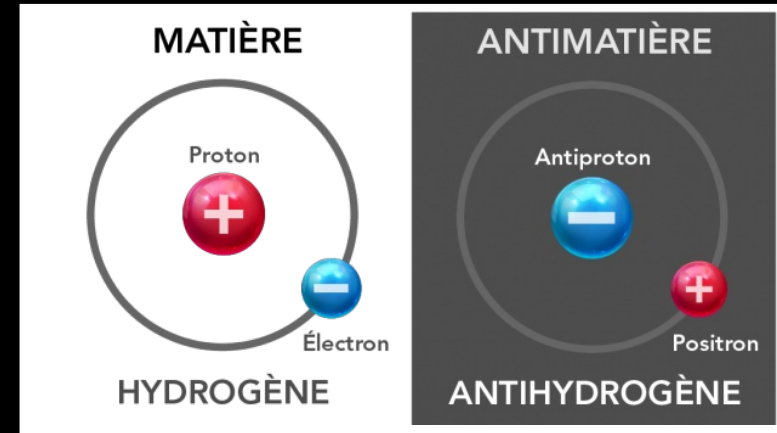
Prédictions « statistiques »
(pas individuelles)



Les mêmes causes ne produisent pas toujours les mêmes effets !



L'antimatière



- À toute particule, il faut adjoindre une **antiparticule**, c.à.d. une particule :
 - de même masse
 - autres nombres quantiques renversés (exemple la charge électrique)
 - notation courante : $\bar{b}$ antiparticule associée au quark b
- Certaines particules sont leurs propres antiparticules (exemple : le photon)
- Les antiparticules se comportent comme les particules (vu dans un miroir)
 - en première approximation
 - en réalité, la symétrie n'est pas parfaite
- Des millions d'anti-particules vous traversent chaque seconde en ce moment :
 - anti-neutrinos provenant de la désintégration beta des isotopes radioactifs naturels (^{238}U)
- Votre corps émet quelques milliers d'anti-neutrinos par seconde (^{40}K)



L'antimatière

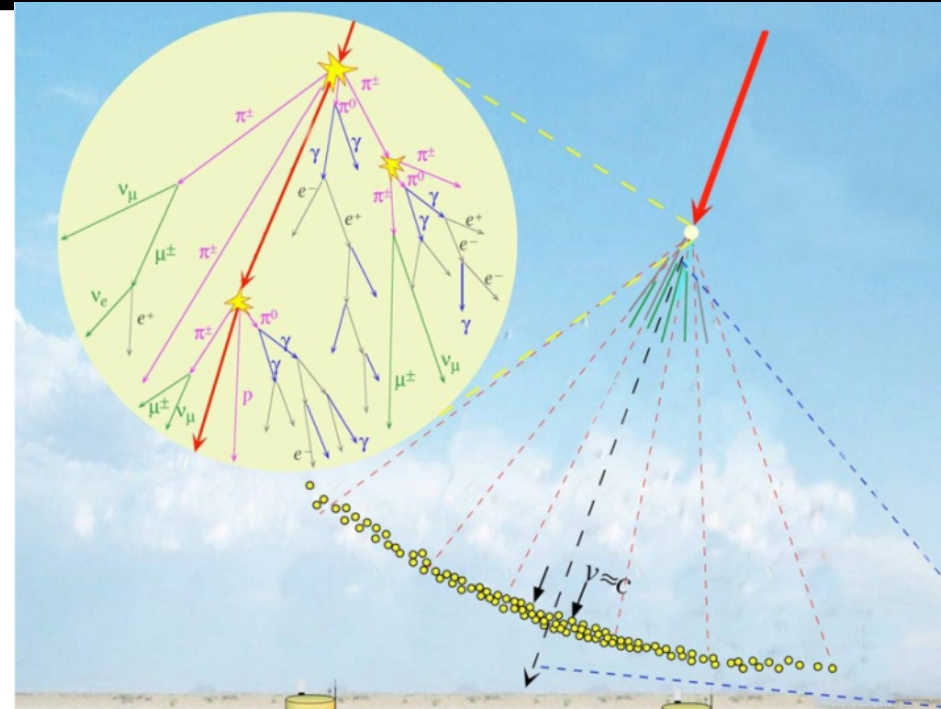
- 2 source naturelles:

- Collisions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère: l'énergie du choc est transformée en particules et anti-particules

- Radioactivité β^+ :

proton $\rightarrow$ neutron + positron e^+ + anti-neutrino

Mais aucune source abondante détectée dans l'univers!



- Dans les accélérateurs de particules: $E=mc^2$
- Énergie convertie en matière + antimatière (et réciproquement!)
- $c = 300\,000\text{ km/s}$ = vitesse de la lumière dans le vide
- $1\text{ €} = 1,2\text{ \$}$
- $1\text{ g} = 9 \times 10^{13}\text{ joules} \sim \text{Hiroshima...}$
- La matière (et l'antimatière) contiennent une quantité ÉNORME d'énergie!





L'antimatière

- Big bang : énergie → matière + antimatière
- Puis : matière + antimatière → énergie → photon
- Mais aujourd'hui notre univers est fait de matière!

→ La matière l'a emporté sur l'antimatière

→ Une asymétrie matière – antimatière est apparue au cours de l'évolution de l'Univers... mais comment ??

Différence minuscule: pour 1 000 000 000 antiprotons créés, 1 000 000 001 protons l'ont été! La quasi-totalité de la matière et de l'antimatière s'est annihilée. Le minuscule excédent ($1/10^9$), c'est nous!

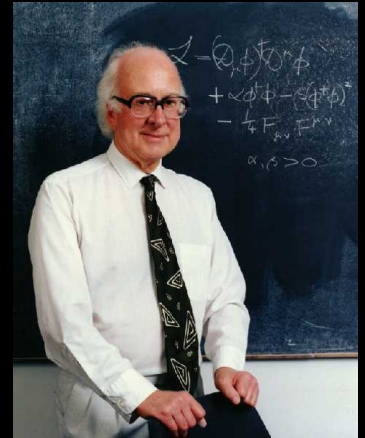
L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse

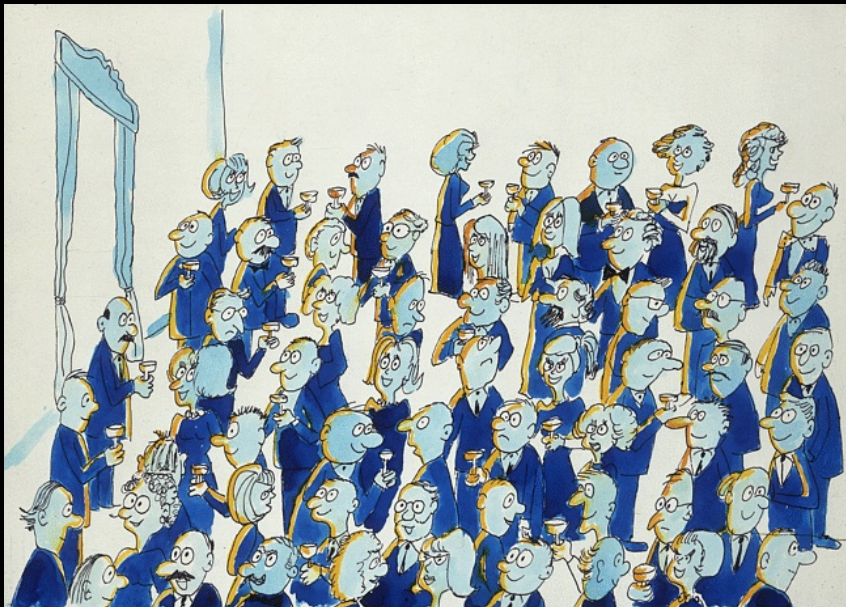
Pour les faire apparaître : **mécanisme de Higgs**

Analogie :

Particule (= célébrité) traverse le champs de Higgs (foule du cocktail) → ralentie/inertie → acquière une masse



Le physicien britannique
Peter Higgs

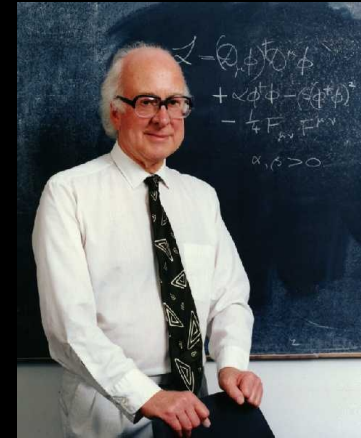


L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse.

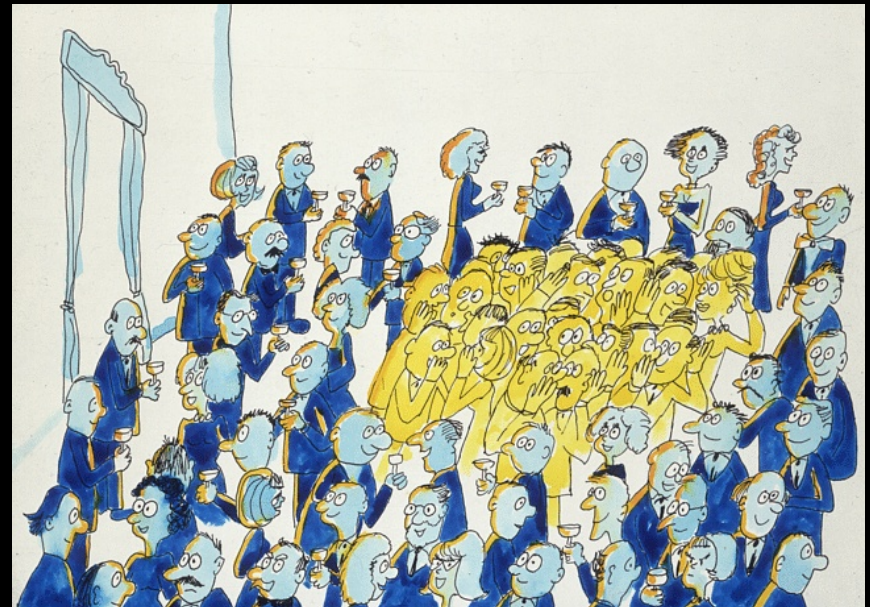
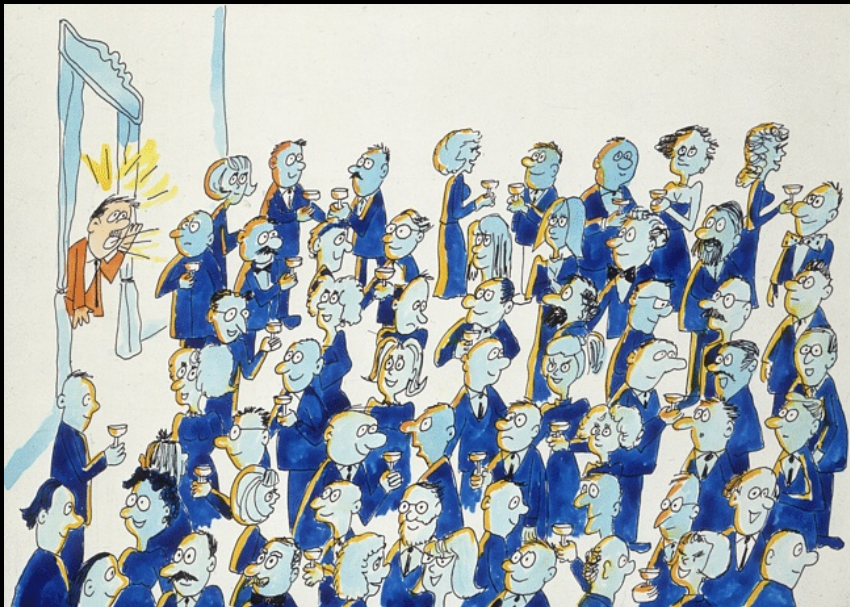
Boson de Higgs = excitation du champs de Higgs ~
« Attroupement autour de la rumeur circulant dans la foule »

(comme le photon est une excitation du champ électromagnétique)



Le physicien britannique
Peter Higgs

Prédit en 1964, découvert au Cern en 2012



Conclusions et perspectives

Les questions en suspens

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes observés en laboratoire

Pour autant, il reste insatisfaisant :

- pourquoi **3 familles** de particules ?
- pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g. $m(\text{top}) \sim 10^{11} m(\text{neutrino})$!
- comment inclure la gravité ?
- il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre que :

- le modèle standard ne peut expliquer que 4% du contenu de l'univers
 - > 80 % de la matière est de nature inconnue (matière noire)
 - ~75 % de la densité d'énergie est de nature inconnue (énergie noire)
 - **96 %** du contenu de l'univers reste mystérieux !

→ Qu'y a-t-il au delà du Modèle Standard ?

Backup

Au delà du Modèle Standard ?

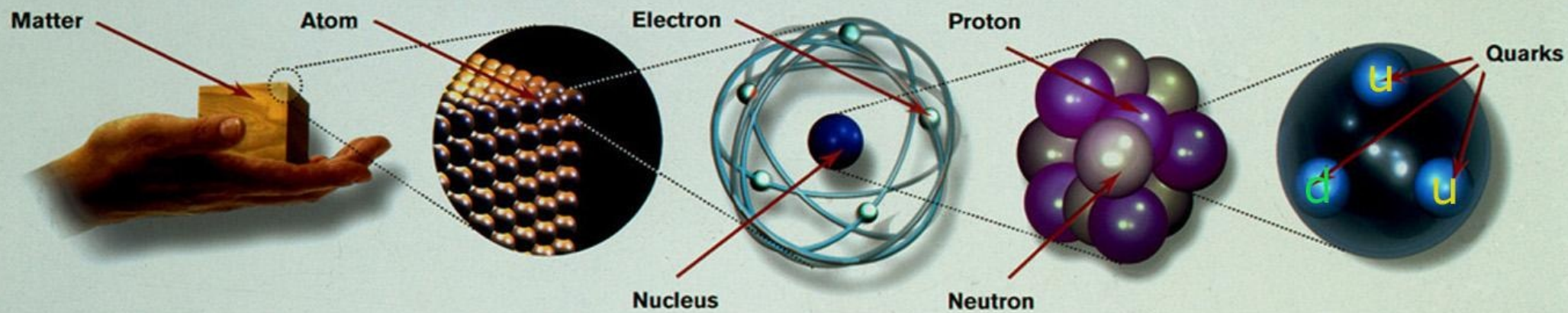
Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$!! Pour produire des particules très massives (bosons de Higgs, particules supersymétriques), il faut mettre en jeu suffisamment d'énergie dans les collisions
- Pour voir des effets fins et rares, il faut produire un très grand nombre de collisions

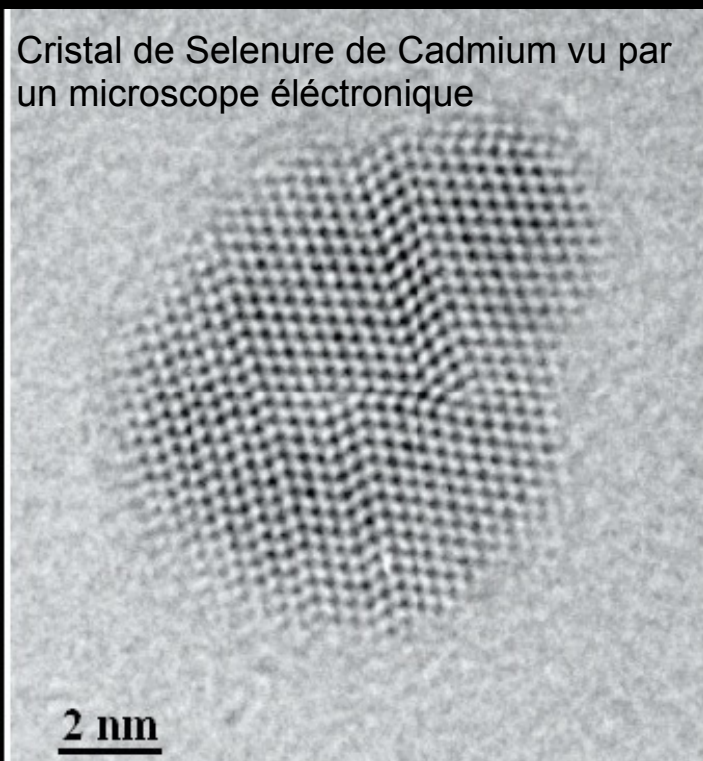
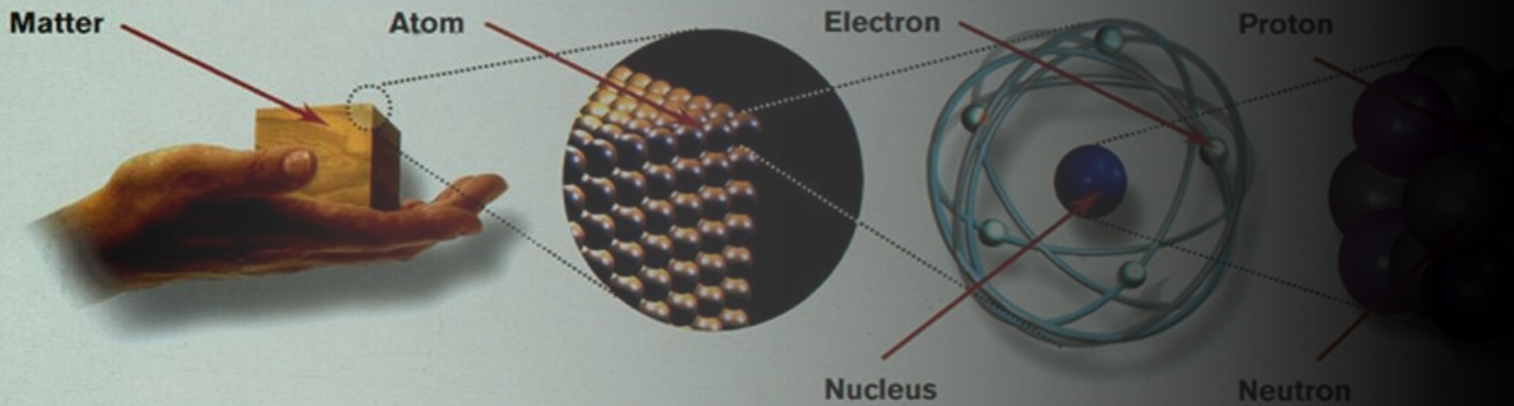
Réponse ?

Le Large Hadron Collider (**LHC**) construit au CERN près de Genève sur la frontière franco-suisse et ses détecteurs ...



Descente vers l'infiniment petit

Structure de la matière ordinaire :
ses constituants élémentaires et leurs interactions



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

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

Comment ces molécules se forment ? Comment interagissent-elles ? D'où tirent-elles leurs propriétés ?

→ structure de l'atome

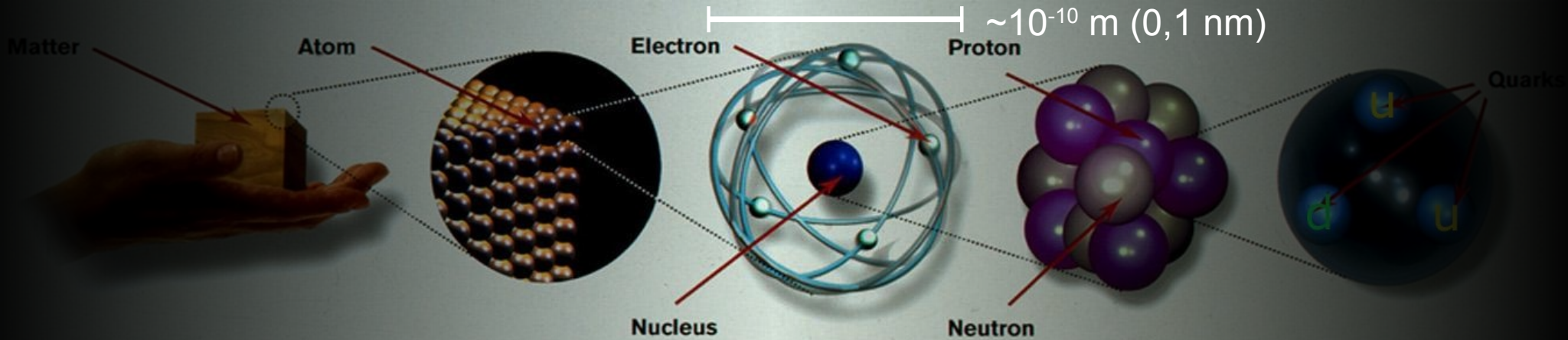
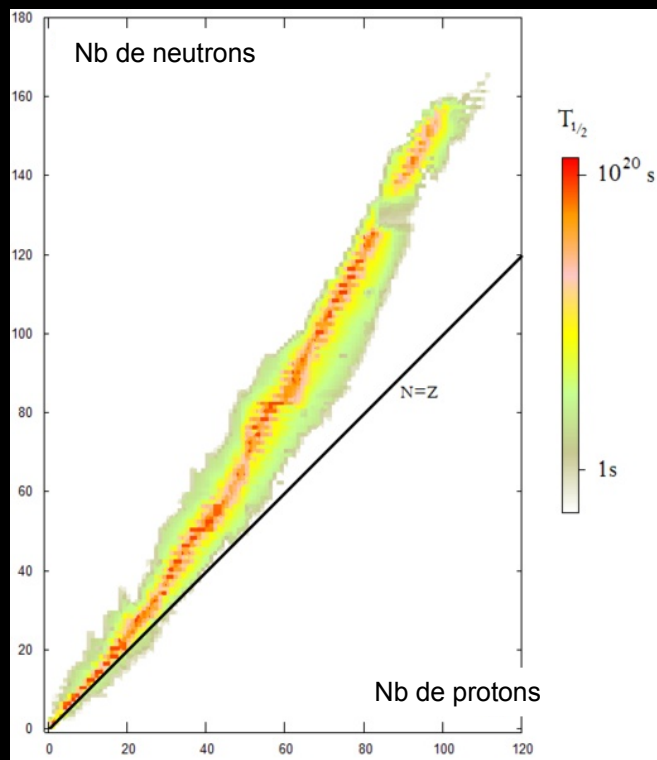
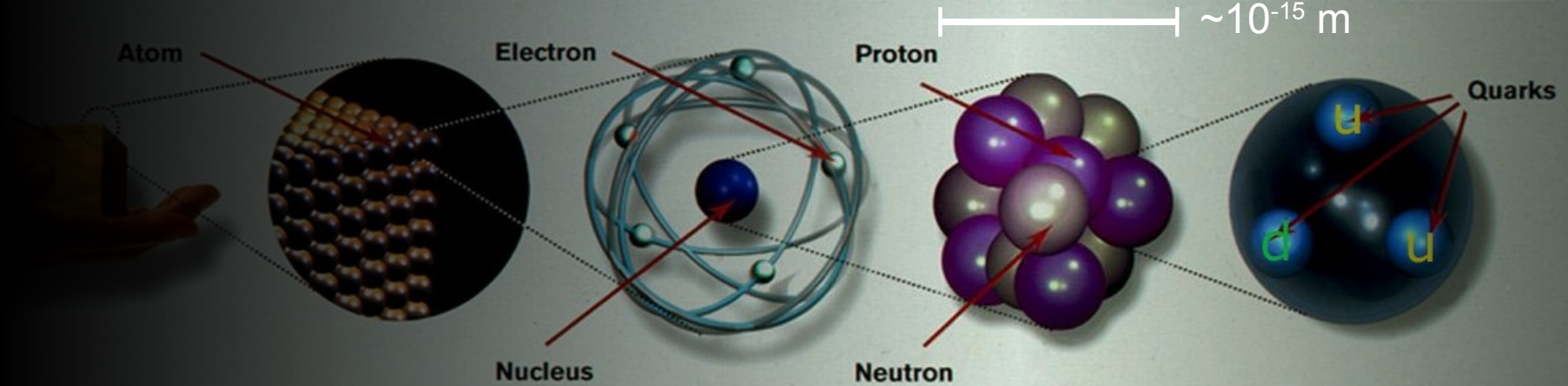


Table des éléments atomiques :

Etat physique du corps simple(25°C,1 atm)																		SOLIDE		LIQUIDE		GAZEUX		SYNTHÈSE	



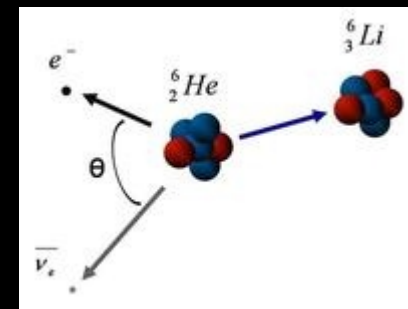
Noyau atomique formé de nucléons : protons & neutrons.
Le nombre de protons (=nombre d'électrons) détermine la nature de l'élément chimique.

La cohésion du noyau est assurée par l'**interaction forte**
La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

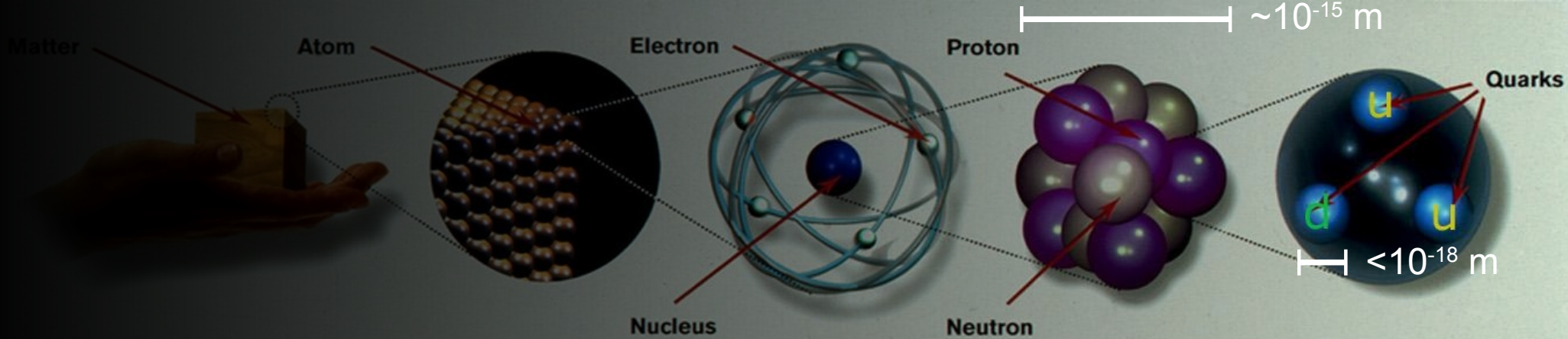
Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un **neutrino**, e.g. :

→ **interaction faible**

Désintégration β
(Pauli - 1930)



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



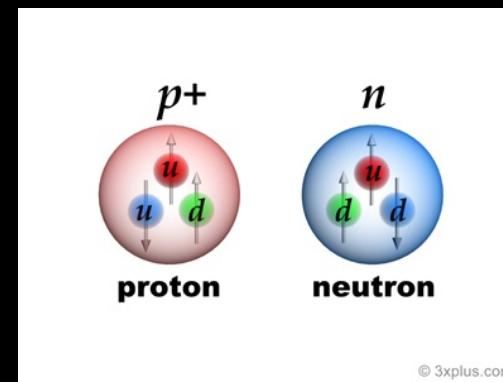
Nucléons (protons & neutrons) sont constitués de quarks

2 types de quarks (à ce stade) :

- ↘ Up ($q=+2/3$) : u
- ↘ Down ($q=-1/3$) : d

Teneur en quarks des nucléons :

- ↘ proton ($q=1$) : uud
- ↘ neutron ($q=0$) : udd



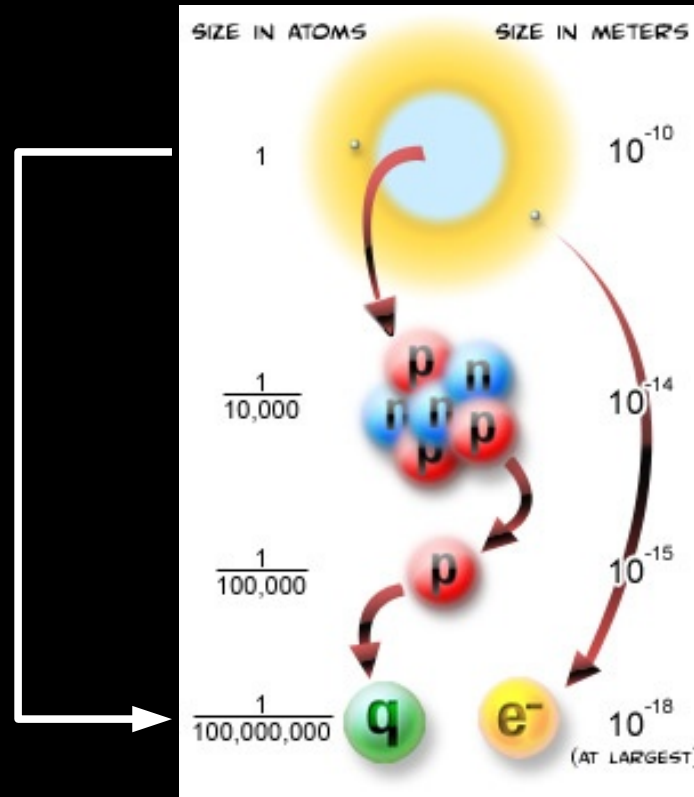
Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

- ↘ on n'observe pas les quarks librement dans l'espace

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

8 ordres de grandeur



Quarks, électrons, neutrinos sont des **particules élémentaires**

→ pas de structure interne (connue à ce jour !)

Digression : les unités

Unité d'énergie : l'électron-Volt (eV)

- 1 eV = énergie acquise par un électron accéléré par un champ électrique de 1V
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$
- Multiples usuels :
 - $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
 - $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
 - $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
 - $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

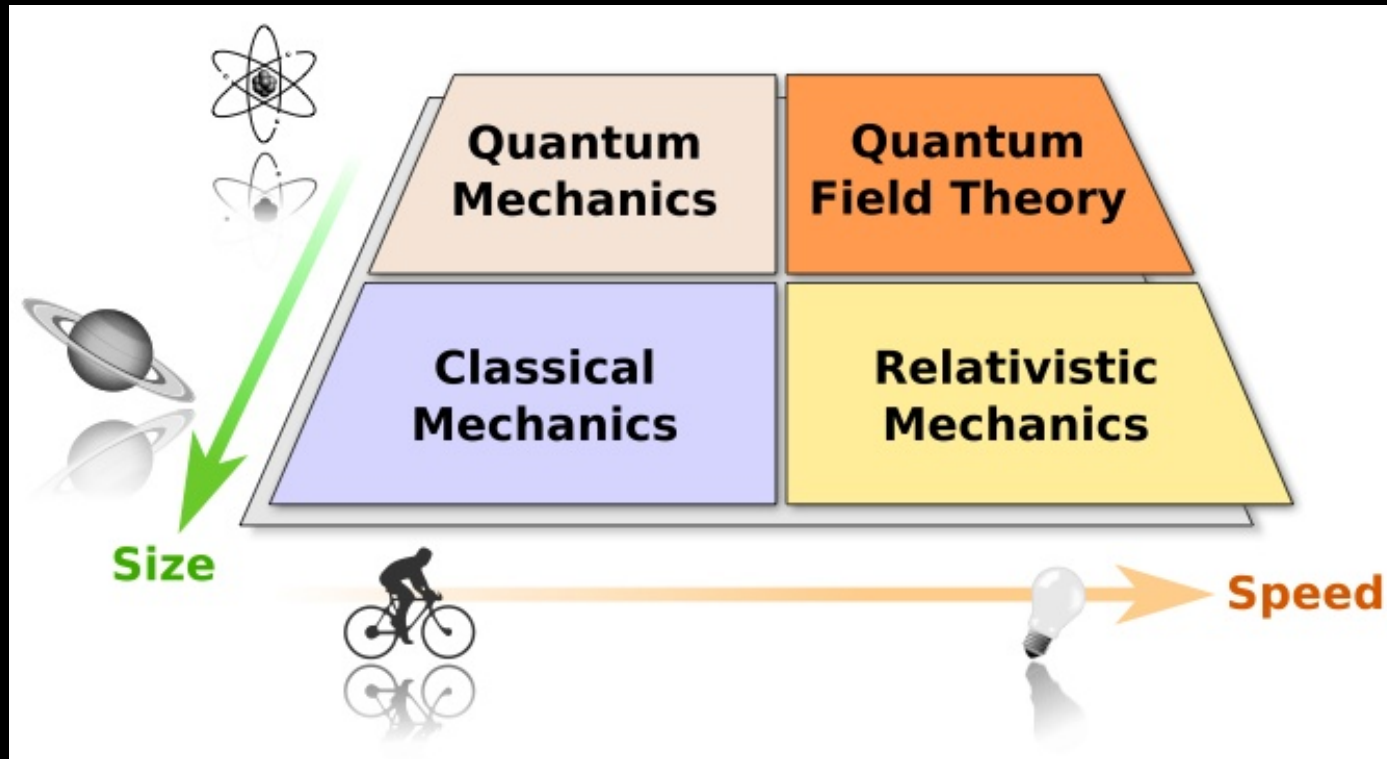
Unité de masse : ($E=mc^2$, équivalence masse-énergie)

- $1 \text{ eV}/c^2 = 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$
- exemples :
 - proton : $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938 \text{ MeV}/c^2$
 - électron : $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$

→ Dans ce cadre : description des particules élémentaires et de leur **interactions**

Le Modèle Standard

2



→ Les particules élémentaires sont décrites dans le cadre de la théorie quantique des champs

Le Modèle Standard

Les charges

Les charges des interactions :

- forces interagissent avec les porteurs des charges associées, e.g. :
 - force électromagnétique : charge électrique
 - force forte : charge de couleur (b,r,v)
- la charge totale d'un système est conservée lors d'une réaction

Le Modèle Standard

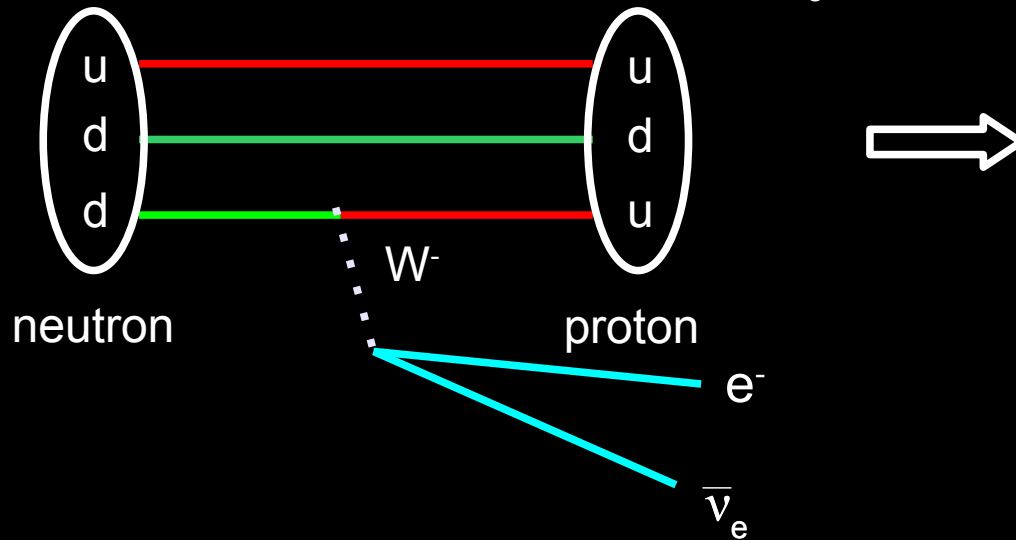
- la **matière** : les fermions fondamentaux
 - ↘ 6 quarks + 6 antiquarks
 - ↘ 6 leptons + 6 antileptons
- les vecteurs des **interactions**
 - ↘ 8 gluons pour l'interaction forte
 - ↘ W^+ , W^- , Z^0 , γ pour l'interaction électrofaible
- le **boson de Higgs**
 - ↘ par lequel les particules acquièrent leur masse

Illustrations

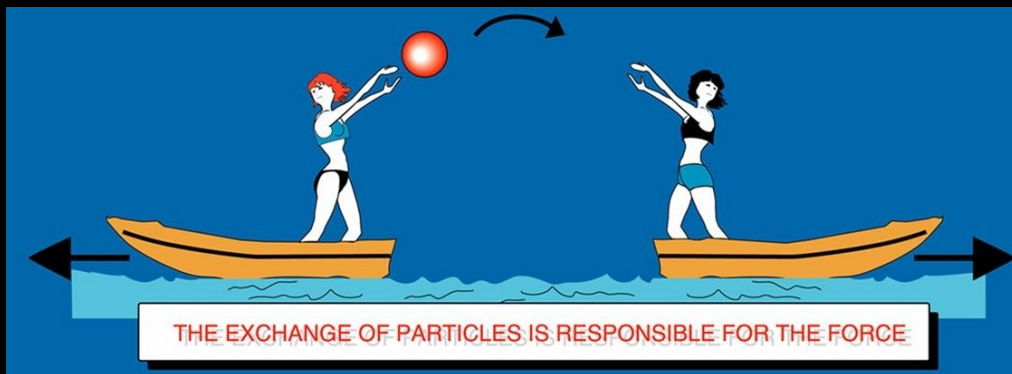
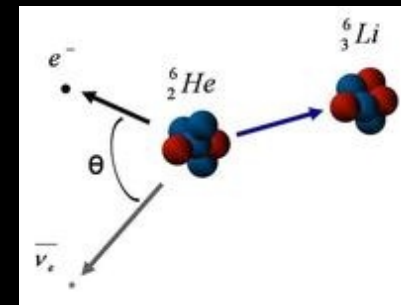
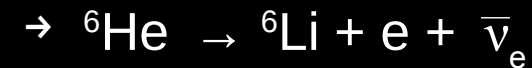
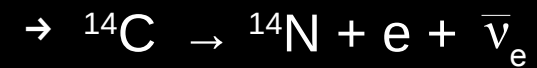
Interaction faible

Exemples

Désintégration du neutron : $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$



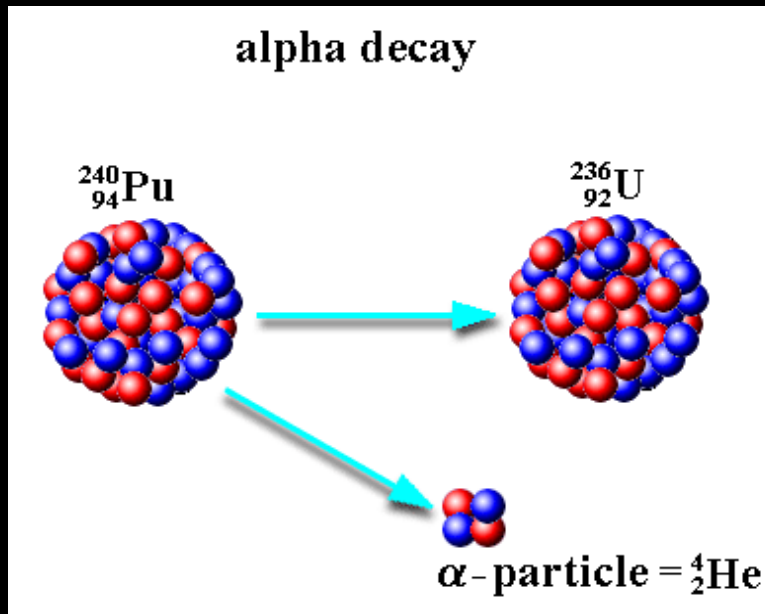
C'est ce qui se passe dans le noyau dans les désintégrations « β »



Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

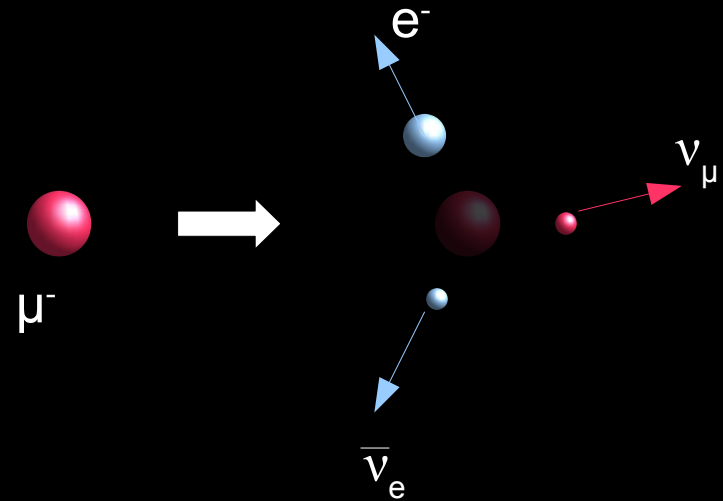
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

- le noyau initial (Pu) se scinde en 2 :
- pas de modification des constituants

Désintégration d'une particule élémentaire



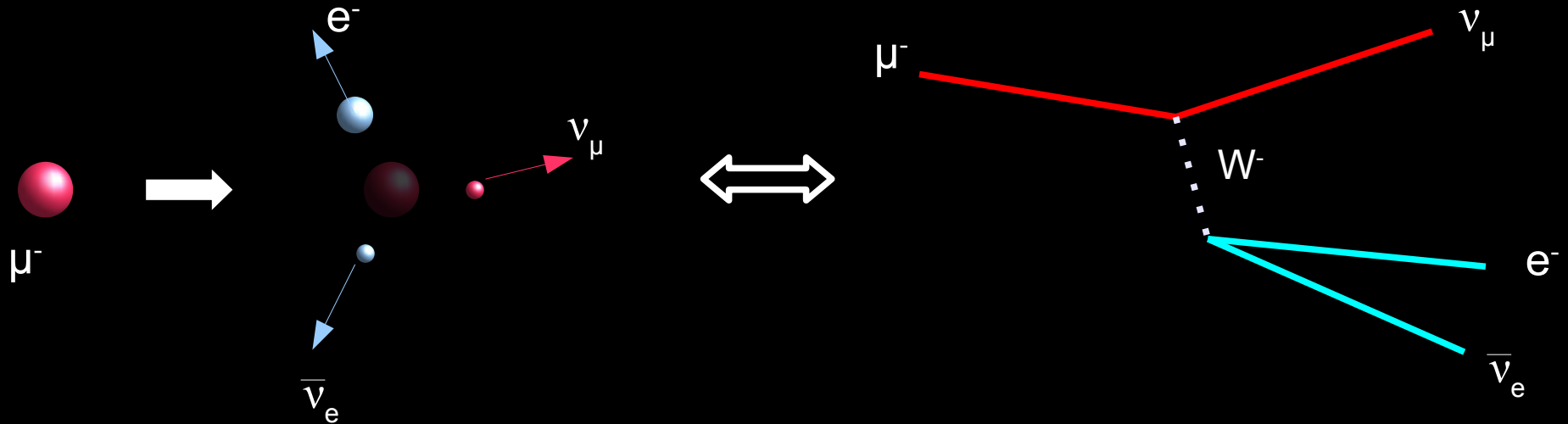
Transformation de la particule initiale :

- disparition de la particule initiale
- apparition de particules de natures différentes

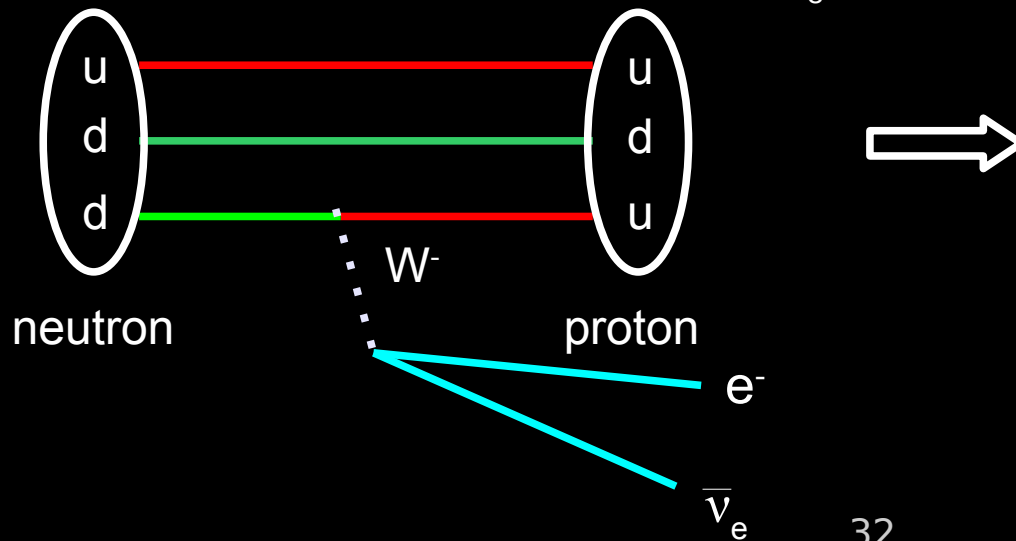
Désintégrations

Exemples

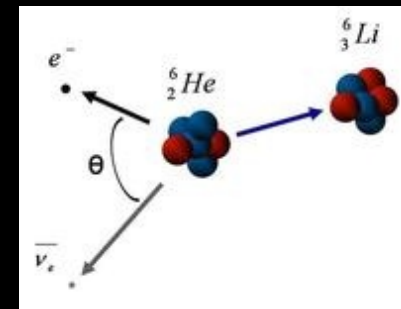
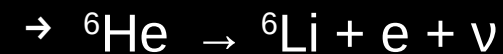
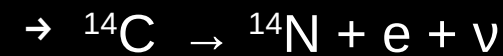
Désintégration du muon : $\mu \rightarrow \nu_\mu e \bar{\nu}_e$



Désintégration du neutron : $n \rightarrow p e \bar{\nu}_e$



C'est ce qui se passe dans le noyau dans les désintégrations « β »



Désintégrations

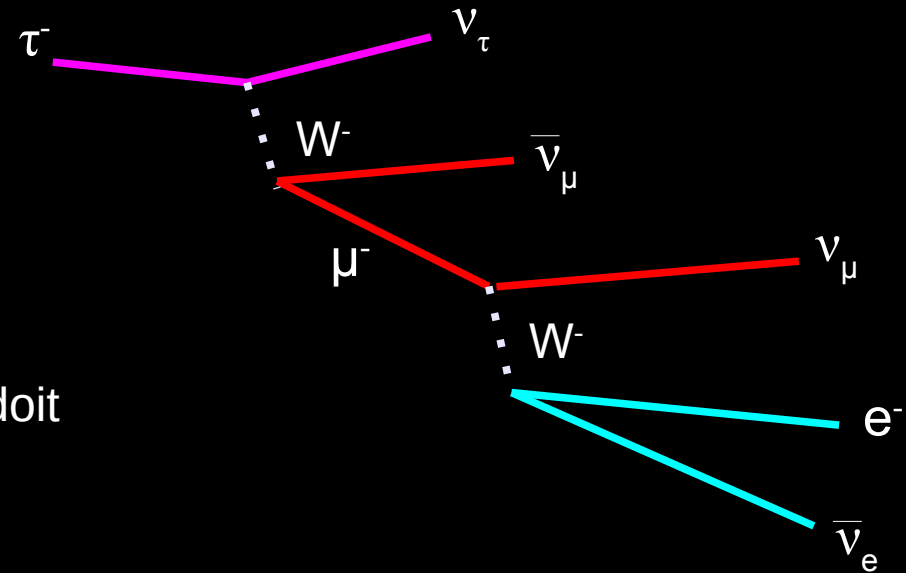
La force (électro-)faible en action

Loi de conservation :

- l'**énergie totale**
 - désintégration de particules lourdes vers des particules plus légères, le surcroît étant transformé en énergie cinétique
- le **nombre leptonique**
 - e.g. si il y a 1 lepton muonique en entrée, on doit en retrouver un à la sortie
- la **charge électrique**
- ...

Force faible :

- autorise le changement de nature (saveur) des quarks
- responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires
 - seules les plus légères sont stables



D'une façon générale :

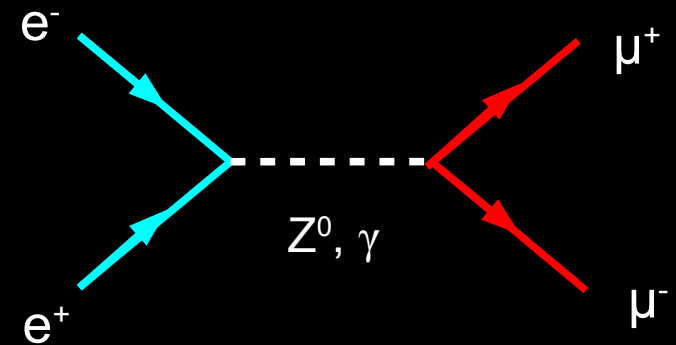
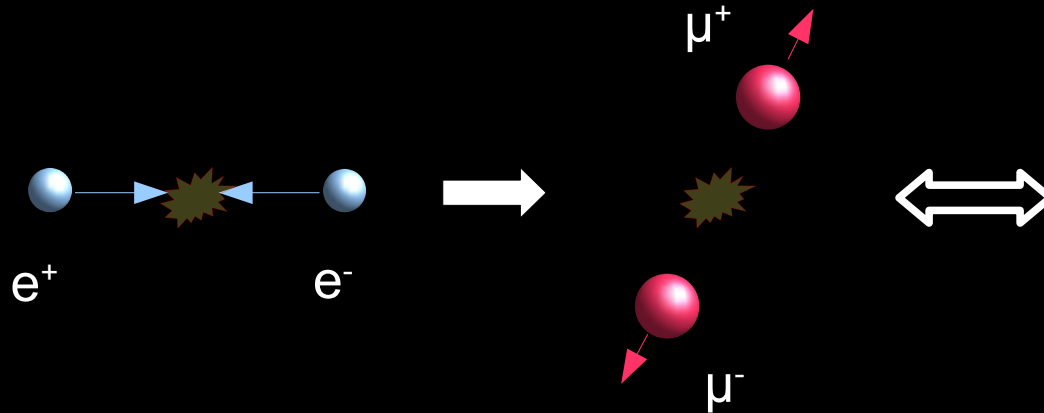
Toute particule pouvant se désintégrer le fait :

- multiples états finaux possibles
- temps de vie dépend du nombre d'états finaux et des interactions en jeu

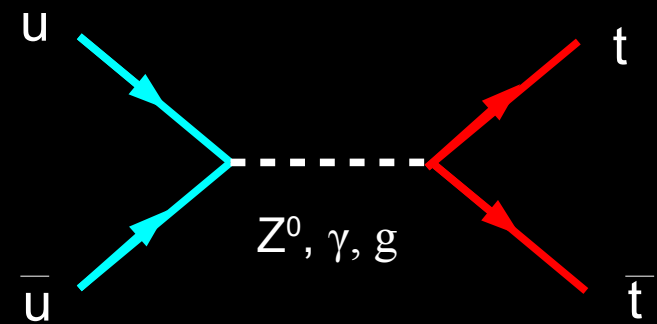
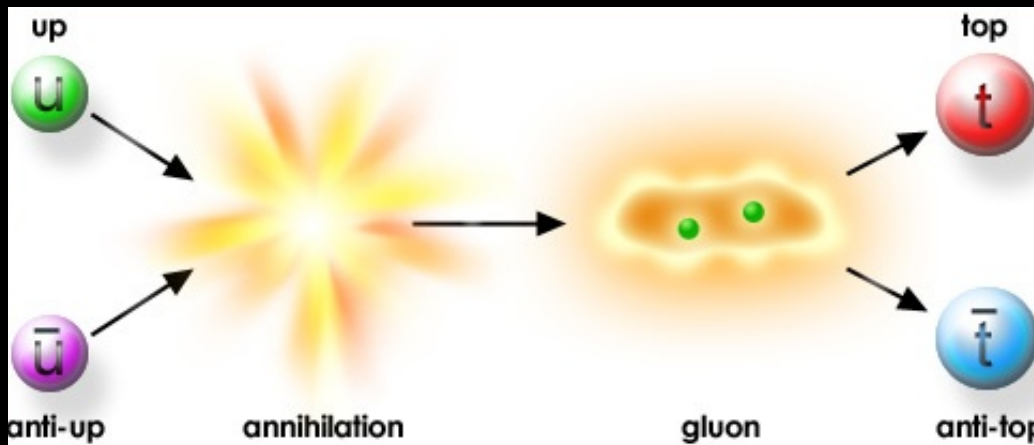
Annihilations

Exemples

Annihilation e^+e^- (interaction faible)



Annihilation $q\bar{q}$



→ réactions possibles si assez d'énergie cinétique à transformer en masse

Les interactions

Principe

Interaction :

- résultat d'une force exercée entre 2 corps

Caractéristiques :

- **nature des corps** sur lesquels elles s'exercent
- **intensité**
- **porté**

Exemples :

- interaction électrostatique

$$\mathbf{F}_{12} = 1/(4\pi\epsilon_0) \times q_1 q_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

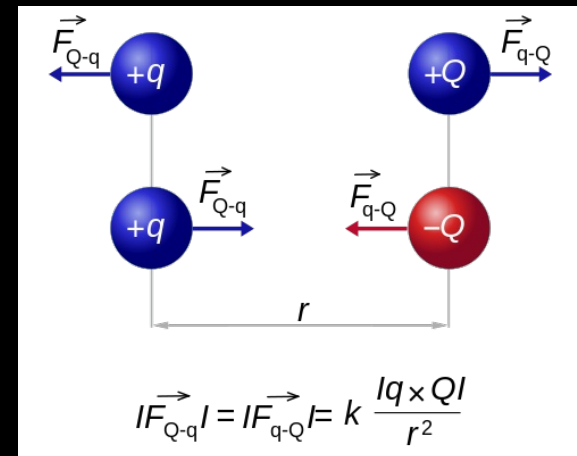
$$1/(4\pi\epsilon_0) = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

- interaction gravitationnelle

$$\mathbf{F}_{12} = -G \times m_1 m_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

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

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules

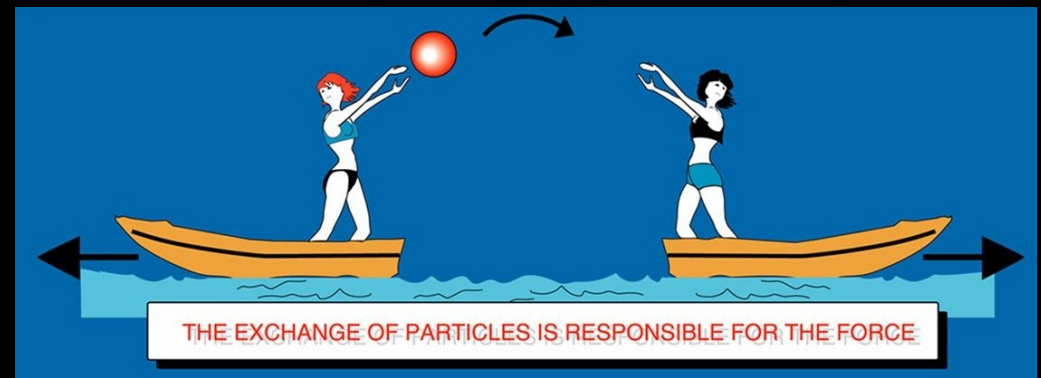


Les interactions

Les messagers

Force électrostatique entre 2 électrons e_1 et e_2 :

- comment e_1 sait-il que e_2 existe et qu'il est donc soumis à une force ?
- échange d'information à la vitesse de propagation du champ électromagnétique
 - ⇔ échange d'un photon *virtuel*
- Interaction fondamentale:
 - échange de particules
 - particule échangée = vecteur de l'interaction
 - portée de l'interaction $\propto 1/m_{\text{vecteur}}$



Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

Constituants élémentaires :

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

Interactions fondamentales entre ces constituants :

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

Descente vers l'infiniment petit

La matière ordinaire

Constituants élémentaires :

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

Interactions fondamentales entre ces constituants :

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

→ **What else ?**

Descente vers l'infiniment petit

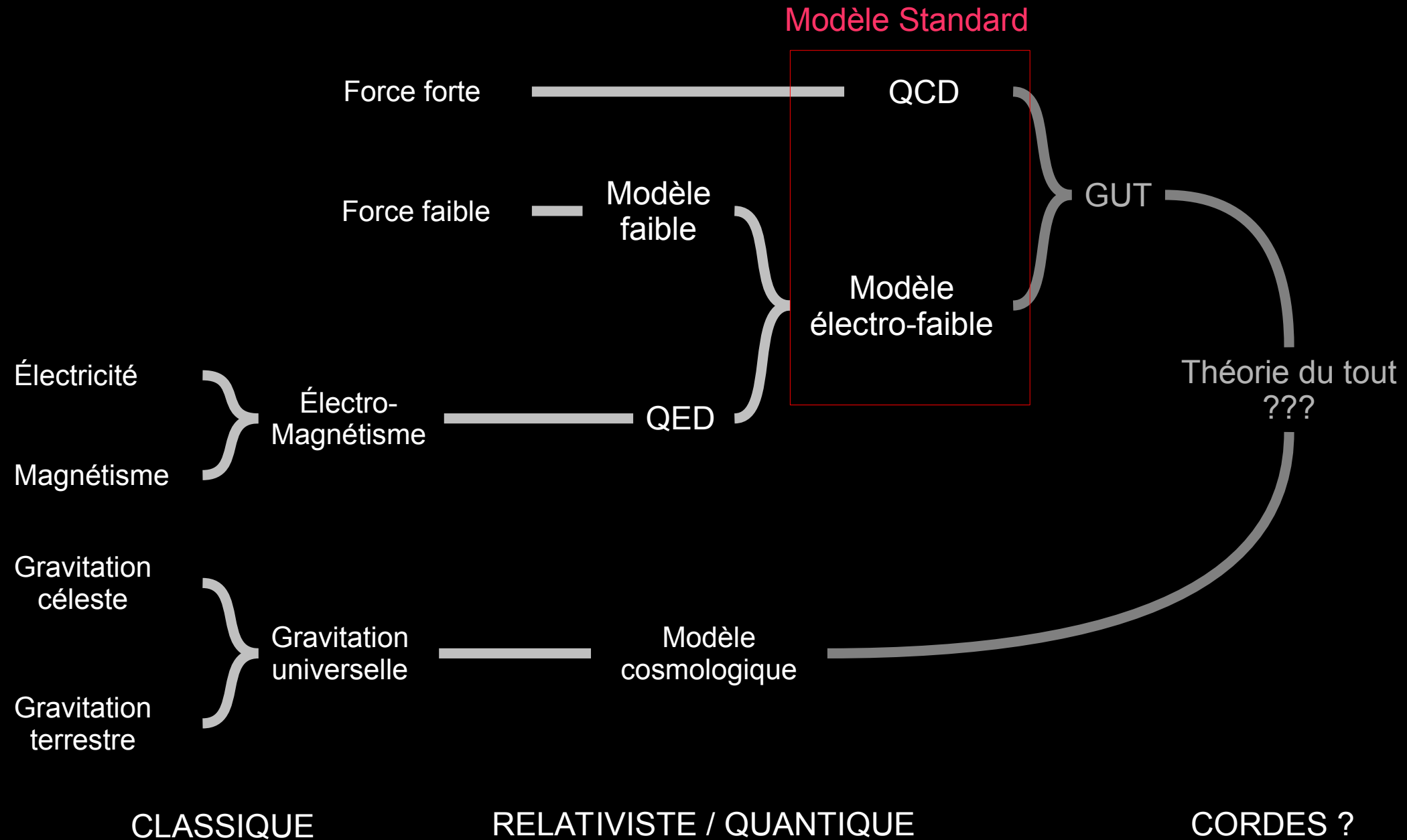
Autres formes de matière

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

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

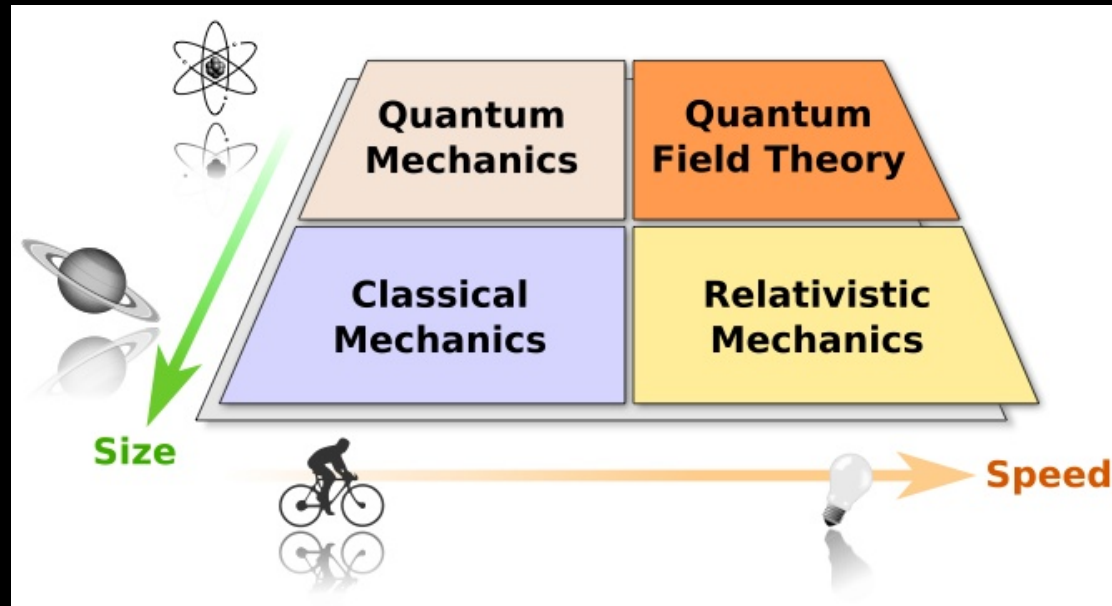
- même structure (même contenue en quarks et leptons)
 - ↘ une organisation remarquable !
- dont les particules sont :
 - ↘ plus lourdes
 - ↘ instables : vont se désintégrer spontanément en donnant des particules plus légères

Théories fondamentales



Le Modèle Standard

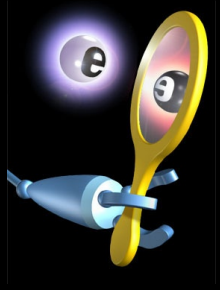
Les interactions



Le Modèle Standard décrit les interactions entre les constituants élémentaires de la matière :

Interactions fondamentales :

- électromagnétique & faible
- forte

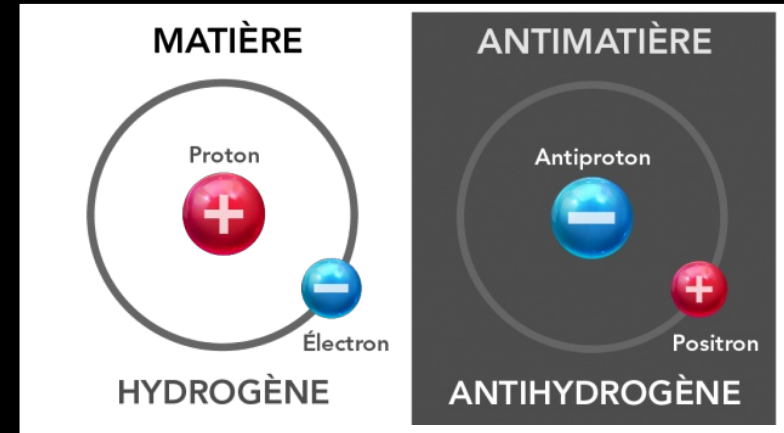


L'antimatière

Le positron = l'anti-électron

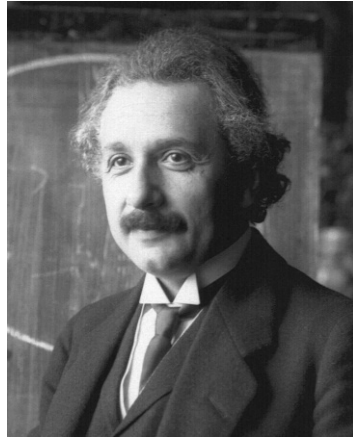
Généralisation :

- A toute ces particules, il faut adjoindre une **antiparticule**, c.à.d. une particule :
 - de même masse et de même spin
 - autres nombres quantiques renversés
 - e.g. : charge électrique
 - notation courante : $\bar{b}$ antiparticule associée au quark **b**
- Certaines particules sont leurs propres antiparticules (exemple : le photon)
- Les antiparticules se comportent comme les particules (vu dans un miroir)
 - en première approximation
 - en réalité, la symétrie n'est pas parfaite
- Des millions d'anti-particules vous traversent chaque seconde en ce moment : anti-neutrinos provenant de la désintégration beta des isotopes radioactifs naturels (^{238}U)
- Votre corps émet quelques milliers d'anti-neutrinos par seconde (^{40}K)



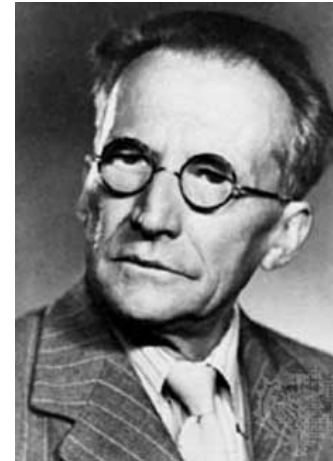
Un peu d'histoire

1905 : Einstein



Relativité restreinte

1926 : Schrödinger



Mécanique quantique

1928 : Equation de Dirac,
décrit le comportement de
l'électron



Schrödinger et Dirac partagent
le prix Nobel en 1933

Problème...

L'équation de Dirac a 2 solutions !

{ l'électron
????

- La 2ème solution correspond à une particule de charge et autres nombres quantiques opposés à ceux de l'électron
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande!



Dirac invente
l'antiélectron
en 1930



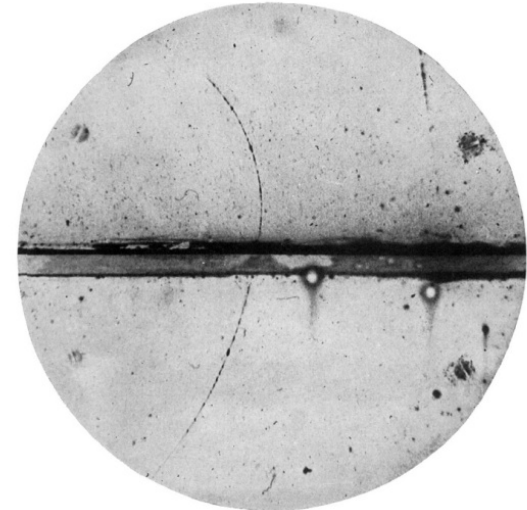
e^-
électron



e^+
positron



1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



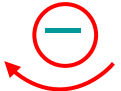
Plomb

FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_P = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_P = 7.5 \times 10^5$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Les antiparticules

- Sont similaires aux particules:
 - Même masse
 - Même durée de vie
- MAIS ont une charge électrique opposée, ...

électron e^- 
proton p 
neutron n 

 e^+ positron
 $\bar{p}$ antiproton
 $\bar{n}$ antineutron

Histoire de l'antimatière

- **1932** : découverte du **positron** dans les rayons cosmiques. Prix Nobel en 1936 (Anderson)
- **1955** : découverte de l'**antiproton** au Bevatron à Berkeley, Californie. Prix Nobel en 1959 (Segrè et Chamberlain)
- **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

Où trouve-t-on de l'antimatière ?

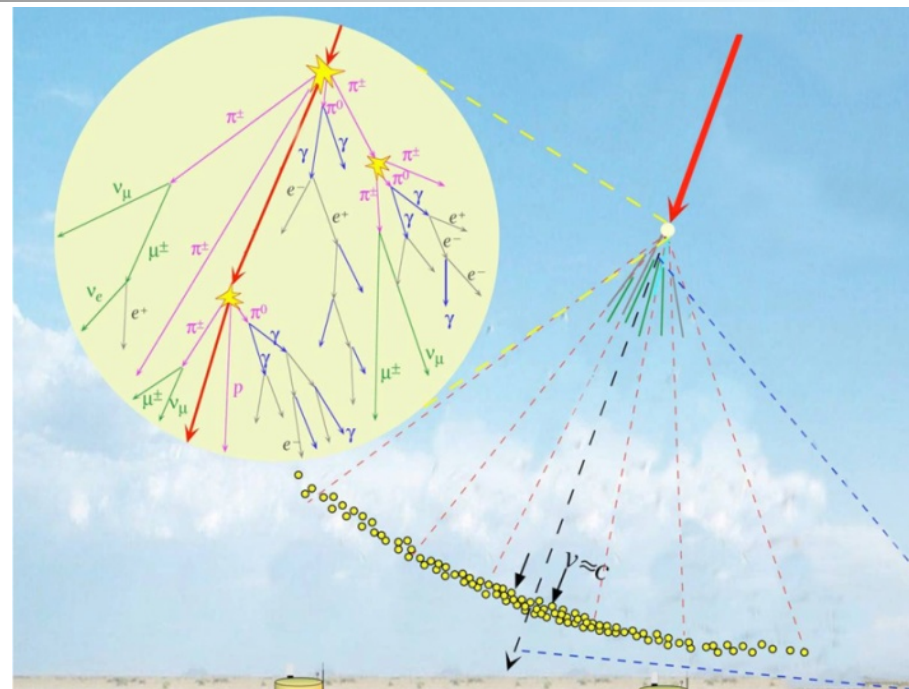
- 2 sources naturelles:

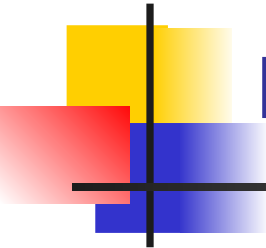
- Collisions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère: l'énergie du choc est transformée en particules et anti-particules
- Radioactivité β :

proton $\rightarrow$ neutron + positron e^+ + neutrino

Mais aucune source abondante détectée dans l'univers!

- Dans les accélérateurs de particules: $E=mc^2$
- Énergie convertie en matière + antimatière (et réciproquement!)
- $c = 300\,000\text{ km/s}$ = vitesse de la lumière dans le vide
- $1\text{ €} = 1,2\text{ \$}$
- $1\text{ kg} = 9 \times 10^{16}\text{ J}$ (l'énergie consommée en France en 1 semaine)
- $1\text{ g} = \text{Hiroshima...}$
- **La matière (et l'antimatière) contiennent une quantité ENORME d'énergie!**





Pourquoi étudier l'antimatière ?

- Big bang : énergie → matière + antimatière
- Puis : matière + antimatière → énergie → photon
- Mais aujourd'hui notre univers est fait de matière!

→ La matière l'a emporté sur l'antimatière

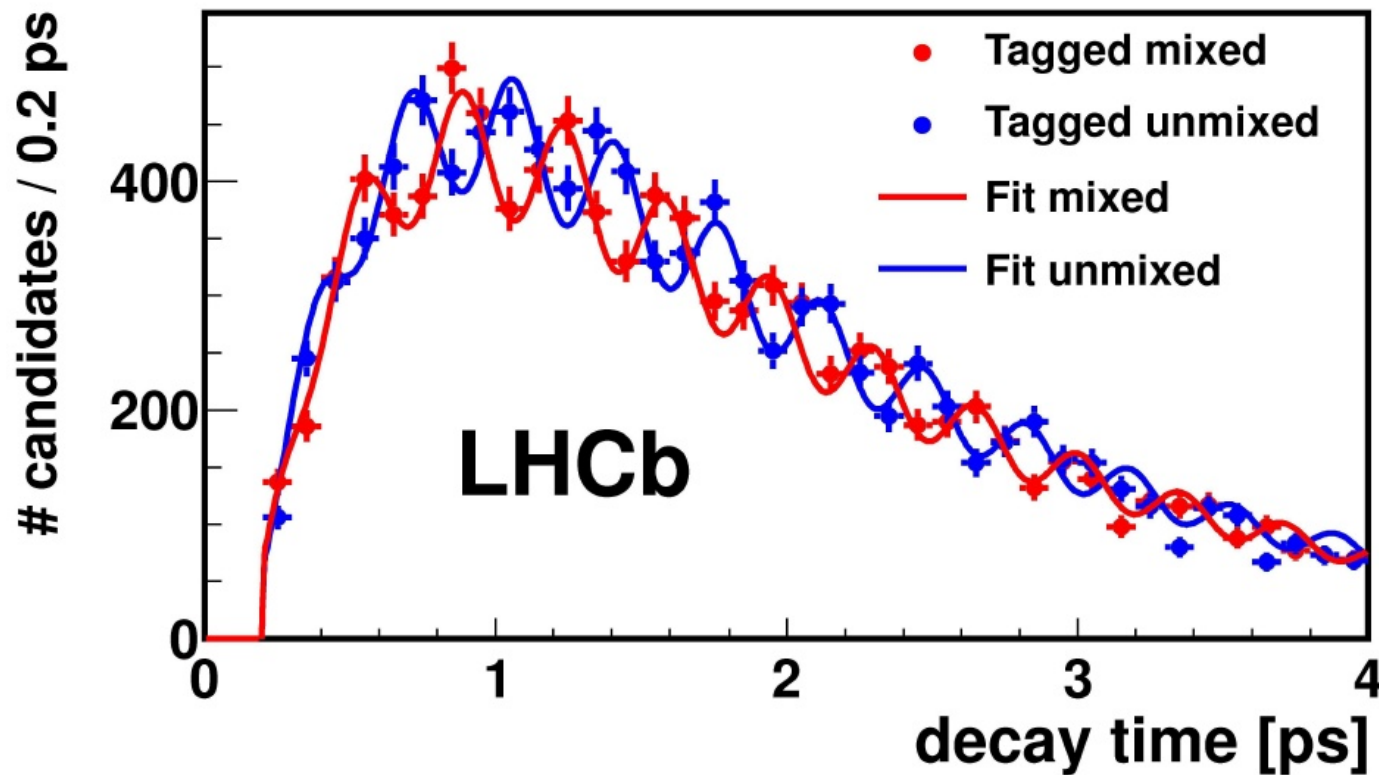
→ Une asymétrie matière – antimatière est apparue au cours de l'évolution de l'Univers... **mais comment ??**

Différence minuscule: pour 1 000 000 000 antiprotons créés, 1 000 000 001 protons l'ont été! La quasi-totalité de la matière et de l'antimatière s'est annihilée. Le minuscule excédent ($1/10^9$), c'est nous!

Oscillation matière - antimatière

- Les mésons B_s oscillent 2800 milliards de fois par seconde entre particule et antiparticule! ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$)

$$1\text{ fb}^{-1} B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$$



$$\Delta m_s = 17.68 \pm 0.023 \text{ (stat)} \pm 0.006 \text{ (syst)} \text{ ps}^{-1}$$

Relativité restreinte (2/2)

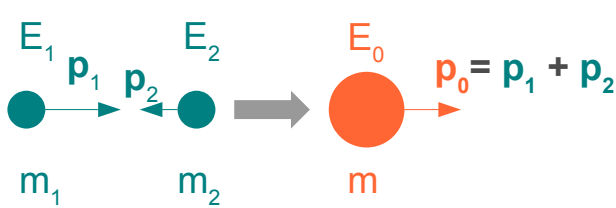
Masse et énergie

La masse est une forme d'énergie

- si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de E/c^2 : $E = \Delta mc^2$
- $E_0 = m c^2$: énergie au repos (dans le ref. où le corps est immobile)
- 1 euro = 1.2\$. Facteur de conversion : $c^2 = 9 \times 10^{16}$!

Énergie totale d'un système : $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (p : quantité de mouvement)

Transformation de l'énergie cinétique en masse

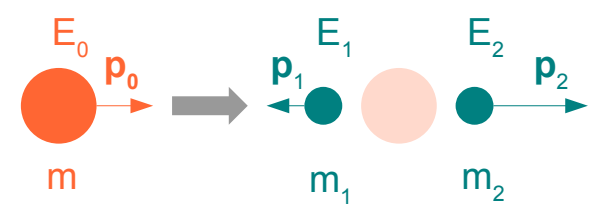


$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}$

exemple : collision de protons avec $E = 7$ TeV
→ énergie disponible : $E_0 = 14$ TeV

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents (14000 fois au LHC) !

Transformation de la masse en énergie cinétique



$m^2 = E_0^2 - p_0^2 = [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 + [p_1 + p_2]^2$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.
En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

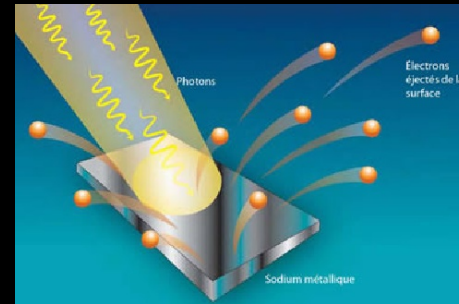
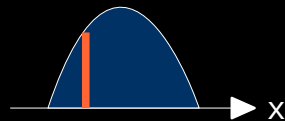
Dualité onde-corpuscule (1/4)

Principe

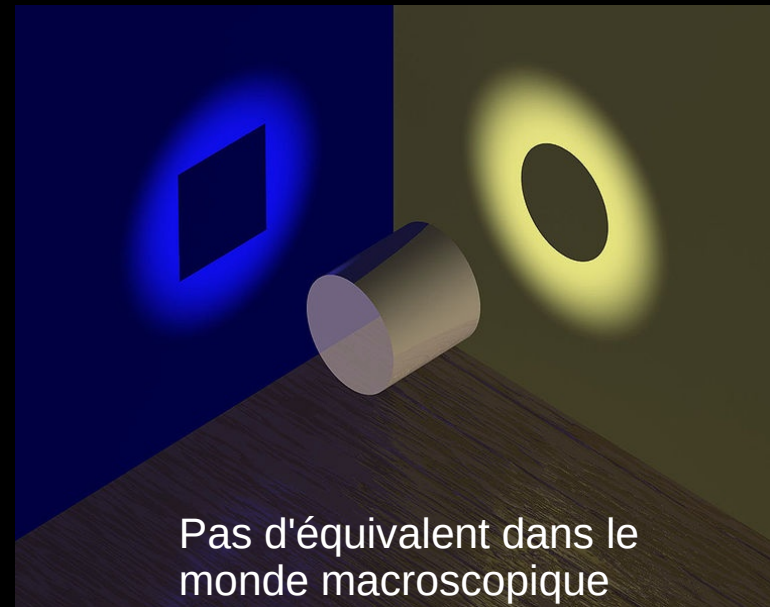
Aux échelles subatomiques, les objets ont une nature à la fois **corpusculaire** et **ondulatoire** !

- $E = \hbar \omega$ (ω : pulsation = $2\pi\nu$)
 $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ (k : vecteur d'onde $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$)
 $\hbar = 1.05 \cdot 10^{-34}$ J.s (constante de Planck)
- 2 descriptions antagonistes !
 - *corpuscule* : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
 - *onde* : objet étendu pouvant interférer
 - *objet quantique* : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée

ex : la position



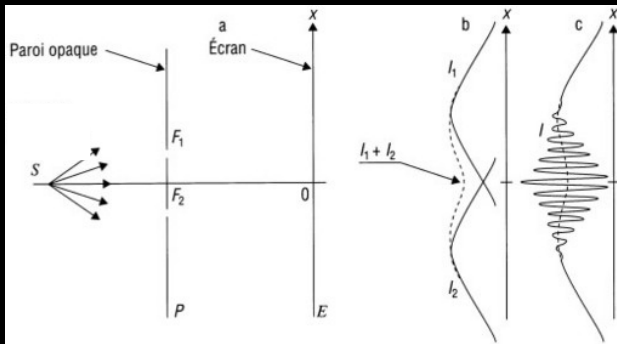
L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon [effet photo-électrique, Einstein, 1905]



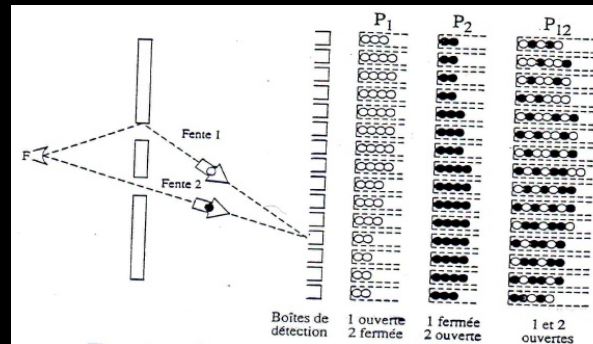
Dualité onde-corpuscule (3/4)

Illustration : l'expérience des fentes d'Young

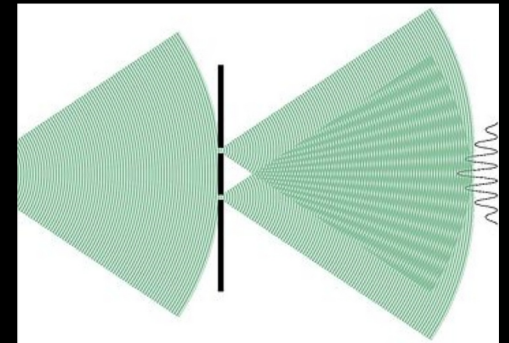
L'expérience :



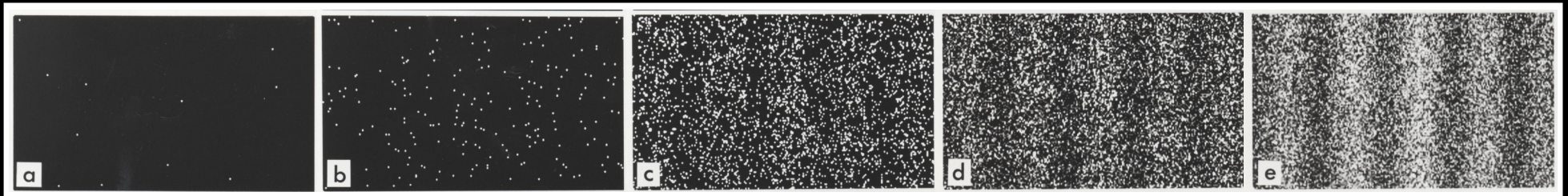
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



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



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

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

Dualité onde-corpuscule (4/4)

Les relations d'incertitude

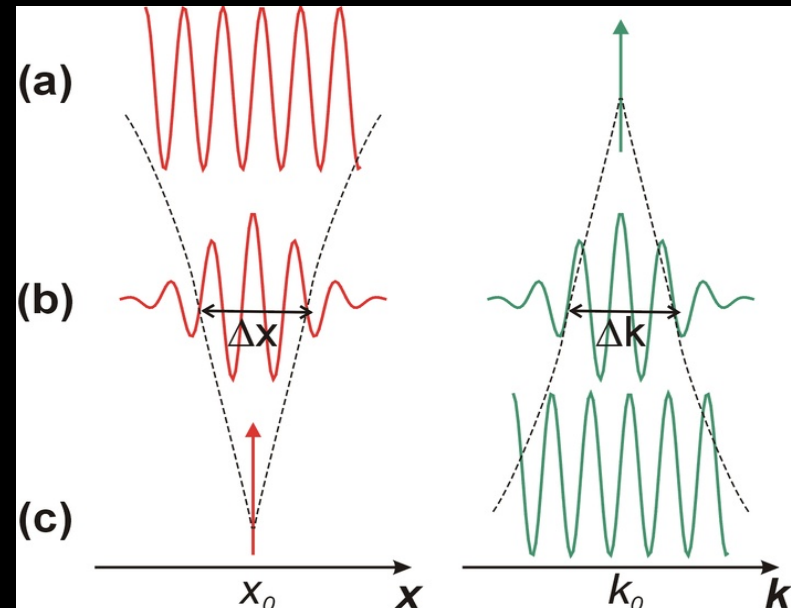
Relations d'Heisenberg (1927) :

- si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que : $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que : $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

« Avantages » de ce flou quantique :

- une énergie (ΔE) peut être « emprunter » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
- ... et comme $E=mc^2$, des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

- (a) onde : $A = \cos(k \cdot x)$
 - extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) paquet d'onde : $A = \sum_k \cos(k \cdot x)$
 - extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) corpuscule : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
 - localisée spatialement
 - pas de fréquence déterminée

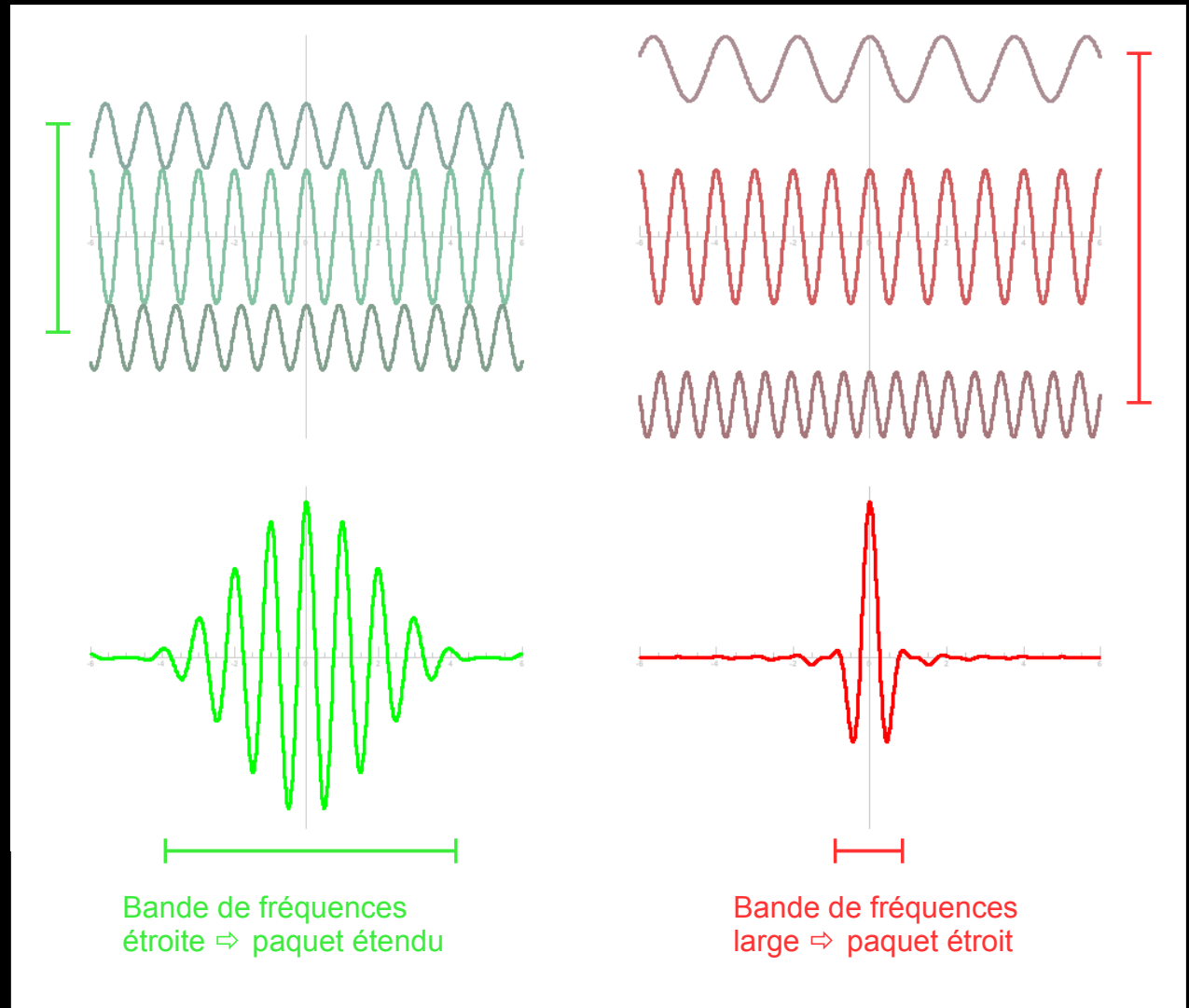


Dualité onde-corpuscule (3/4)

Le paquet d'onde

superposition de plusieurs
ondes (planes) de fréquences
différentes

l'interférence (destructive)
entre ces ondes donne
naissance à un *paquet
d'onde*



Le Modèle Standard

Le positron

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

→ mécanique quantique

→ cas relativiste

□ Equation de Dirac

$$i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t)|\psi(t)\rangle$$

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

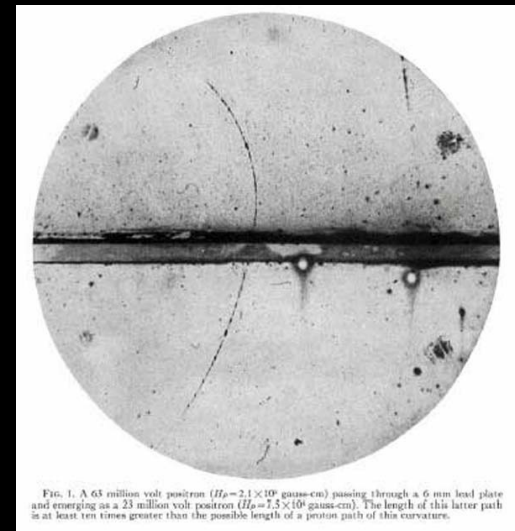
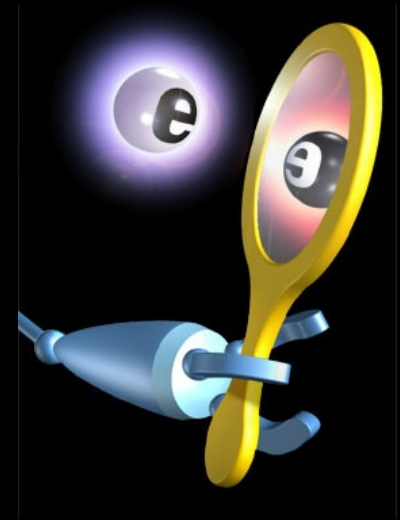
□ 2 solutions :

énergie positive $\Rightarrow$ électron

énergie négative $\Rightarrow$ **positron**

Observation [1932, Anderson]

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

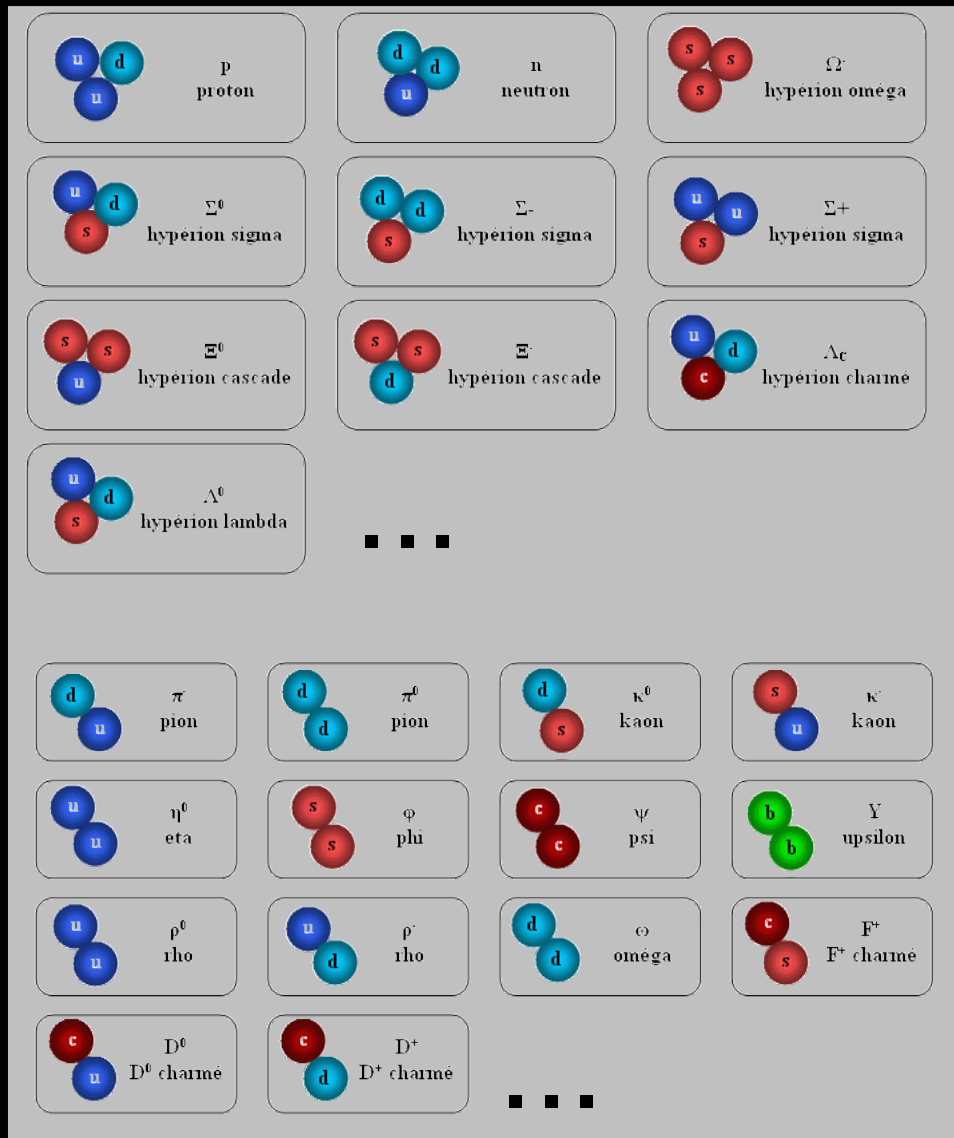


Les interactions

Les particules composites

Le zoo des baryons et mésons

... et leurs modes de désintégration



$J/\psi(1S)$ $J^G(J^{PC}) = 0^-(1^{--})$

Mass $m = 3096.916 \pm 0.011$ MeV
 Full width $\Gamma = 92.9 \pm 2.8$ keV ($S = 1.1$)
 $\Gamma_{ee} = 5.55 \pm 0.14 \pm 0.02$ keV

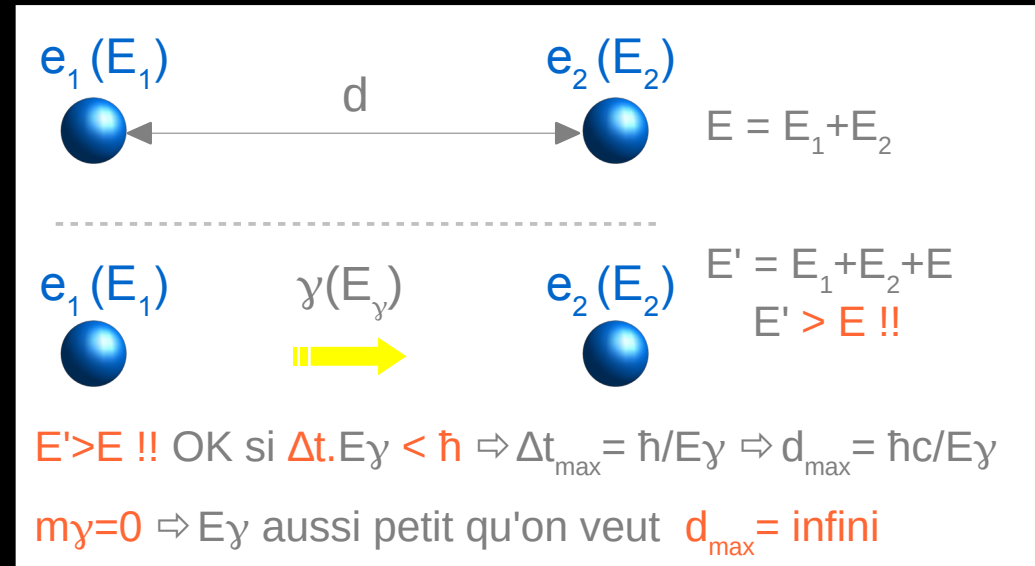
$J/\psi(1S)$ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	p (MeV/c)
hadrons	(87.7 $\pm$ 0.5) %		—
virtual $\gamma \rightarrow$ hadrons	(13.50 $\pm$ 0.30) %		—
ggg	(64.1 $\pm$ 1.0) %		—
γgg	(8.8 $\pm$ 0.5) %		—
$e^+ e^-$	(5.94 $\pm$ 0.06) %		1548
$e^+ e^- \gamma$	[a] (8.8 $\pm$ 1.4) $\times 10^{-3}$		1548
$\mu^+ \mu^-$	(5.93 $\pm$ 0.06) %		1545
Decays involving hadronic resonances			
$\rho \pi$	(1.69 $\pm$ 0.15) %	$S=2.4$	1448
$\rho^0 \pi^0$	(5.6 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$		1448
$a_2(1320) \rho$	(1.09 $\pm$ 0.22) %		1123
$\omega \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	(8.5 $\pm$ 3.4) $\times 10^{-3}$		1392
$\omega \pi^+ \pi^- \pi^0$	(4.0 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$		1418
$\omega \pi^+ \pi^-$	(8.6 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-3}$	$S=1.1$	1435
$\omega f_2(1270)$	(4.3 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-3}$		1142
$K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	(2.3 $\pm$ 0.7) $\times 10^{-4}$		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(892)^\mp$	(1.00 $\pm$ 0.22 $\pm$ 0.40) $\times 10^{-3}$		1266
$K^*(892)^\pm \bar{K}^*(800)^\mp$	(1.1 $\pm$ 1.0 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-3}$		—
$\eta K^*(892)^0 \bar{K}^*(892)^0$	(1.15 $\pm$ 0.26) $\times 10^{-3}$		1003
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1430)^0 + c.c.$	(6.0 $\pm$ 0.6) $\times 10^{-3}$		1012
$K^*(892)^0 \bar{K}_2^*(1770)^0 + c.c. \rightarrow K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	(6.9 $\pm$ 0.9) $\times 10^{-4}$		—
$\omega K^*(892) \bar{K} + c.c.$	(6.1 $\pm$ 0.9) $\times 10^{-3}$		1097
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c.$	(5.12 $\pm$ 0.30) $\times 10^{-3}$		1373
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	(1.97 $\pm$ 0.20) $\times 10^{-3}$		—
$K^+ \bar{K}^*(892)^- + c.c. \rightarrow K^0 K^\pm \pi^\mp$	(3.0 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$		—

Les interactions

Les messagers

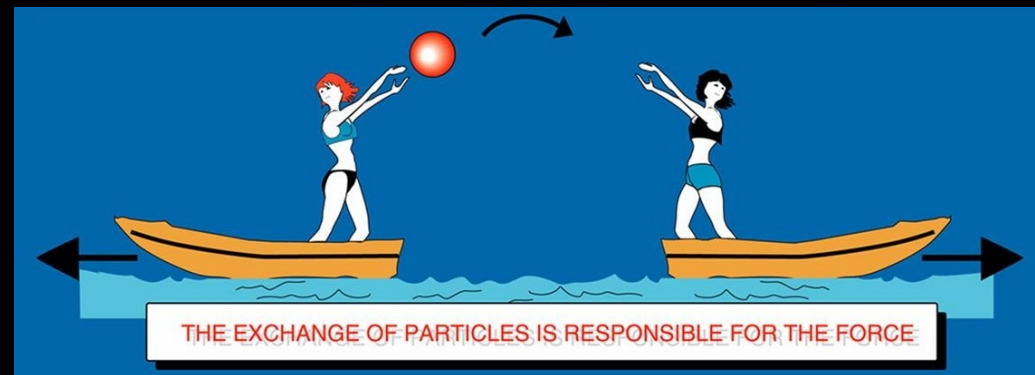
Force électrostatique entre 2 électrons e_1 et e_2 :

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



→ Interaction fondamentale:

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



Le Modèle Standard

Les particules de matière :
les fermions (spin demi-entier)

Les particules vecteurs de forces :
les bosons (spin entier)

Particles

Leptons

Tau		Electric Charge -1	Tau Neutrino		Electric Charge 0
Muon		-1	Muon Neutrino		0
Electron		-1	Electron Neutrino		0

Quarks

Bottom		Electric Charge -1/3	Top		Electric Charge 2/3
Strange		-1/3	Charm		2/3
Down		-1/3	Up		2/3

each quark: ●R, ●B, ●G 3 colors

The particle drawings are simple artistic representations

Forces

Strong

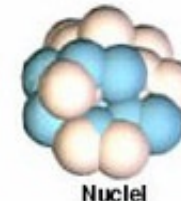
Gluons (8)



Quarks



Mesons
Baryons



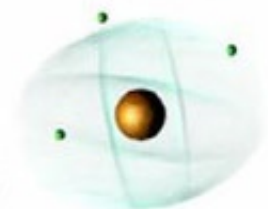
Nuclei

Electromagnetic

Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Gravitational

Graviton ?



Solar system
Galaxies
Black holes

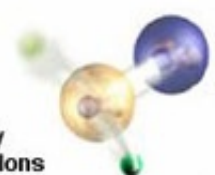


Weak

Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun



The particle drawings are simple artistic representations

Le Modèle Standard

La masse des particules

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

~ 0

1

~ 0

200

~ 0

3500

4

10

3000

200

340000

8000

Le Modèle Standard

La masse des particules

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 photon	0	0
 W ⁻	80.39	-1
 W ⁺ W bosons	80.39	+1
 Z ⁰ Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
 gluon	0	0

Le Modèle Standard

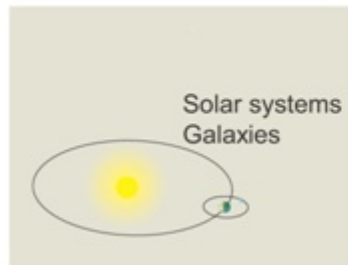
gravitation

pesanteur
mouvements astres
agit sur les objets massifs

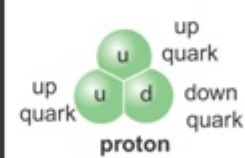
Les interactions

Interaction forte

cohésion du noyau,
cohésion des hadrons, ...
agit sur les quarks

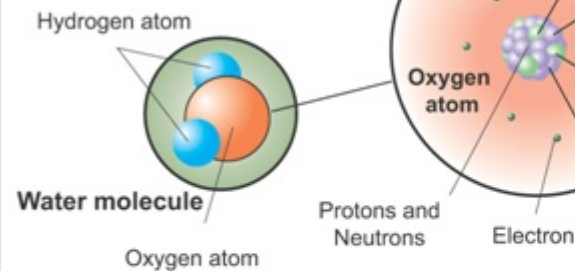


Gravity Force



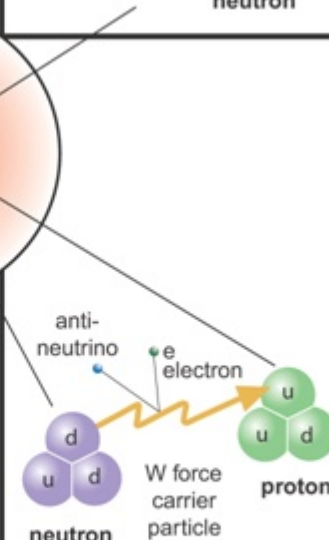
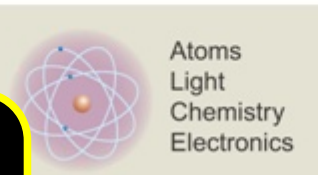
Strong force

Electromagnetic force



Interaction électromagnétique

cohésion atomique,
liaisons chimiques,
lumière, ...
agit sur les particules chargées



Weak force

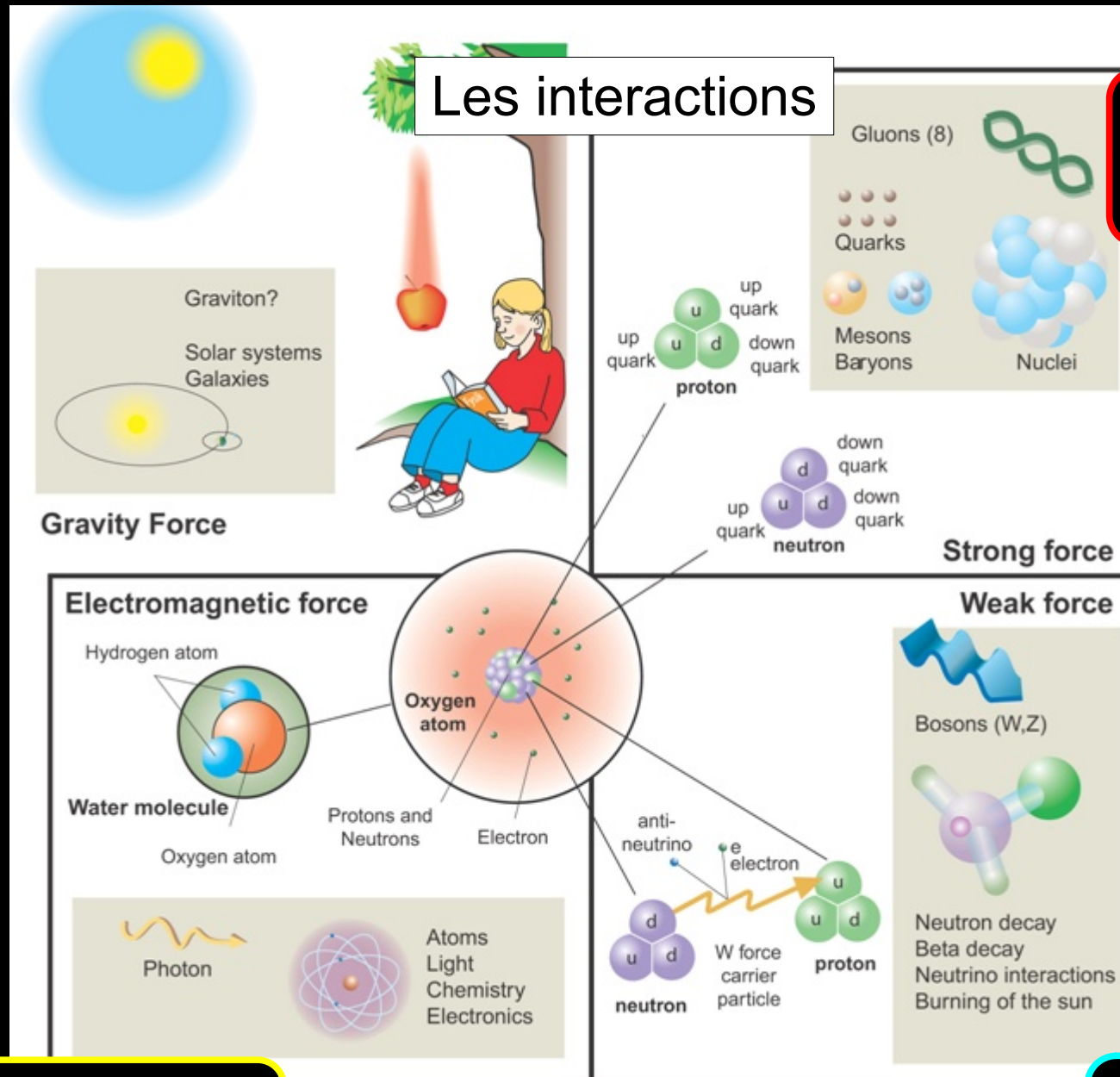


Neutron decay
Beta decay
Neutrino interactions
Burning of the sun

Interaction faible

désintégration du neutron,
radioactivité β , ...
agit sur toutes les particules

Le Modèle Standard



Interaction **forte**

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

Interaction **électromagnétique**

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

Interaction **faible**

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

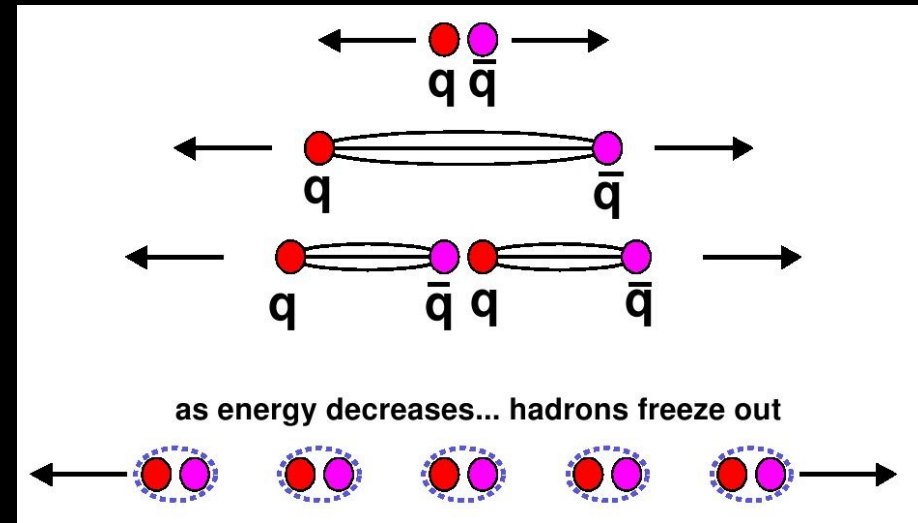
L'interaction forte

Interaction forte

Hadronisation

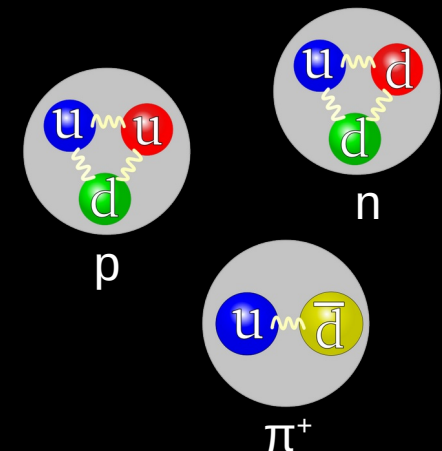
L'interaction forte agit comme un élastique :

- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)



Conséquence : Les quarks sont confinés dans des « hadrons »

- **baryon** : composé de 3 quarks de couleurs différentes
- **méson** : composé de 2 quarks de couleurs opposées



Interaction forte

Chromodynamique

Charge : couleur

→ **B V R** & **$\bar{B}$ $\bar{V}$ $\bar{R}$** (« anticouleur »)

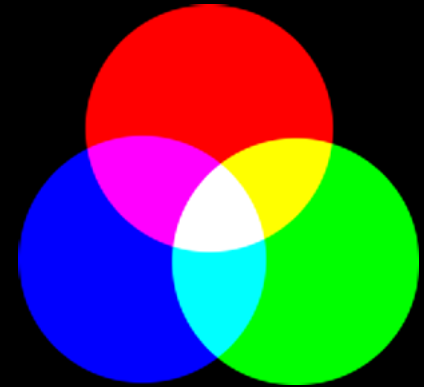
→ les couleurs s'ajoutent vectoriellement

→ **B+V+R= Blanc**

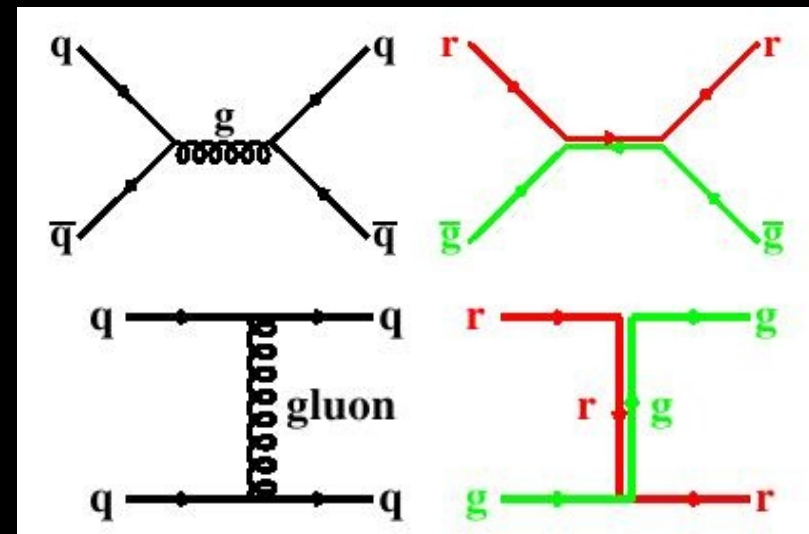
→ **B+ $\bar{B}$ = Blanc**

Vecteur : **gluons** (8)

→ porte une couleur et une « anticouleur »



Les couleurs sont conservées par interaction forte

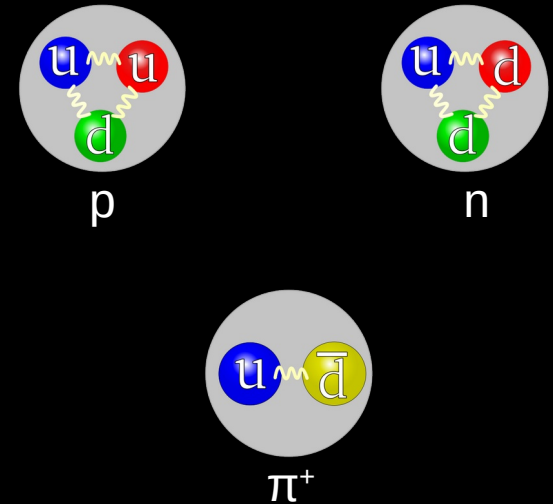


Interaction forte

Hadronisation

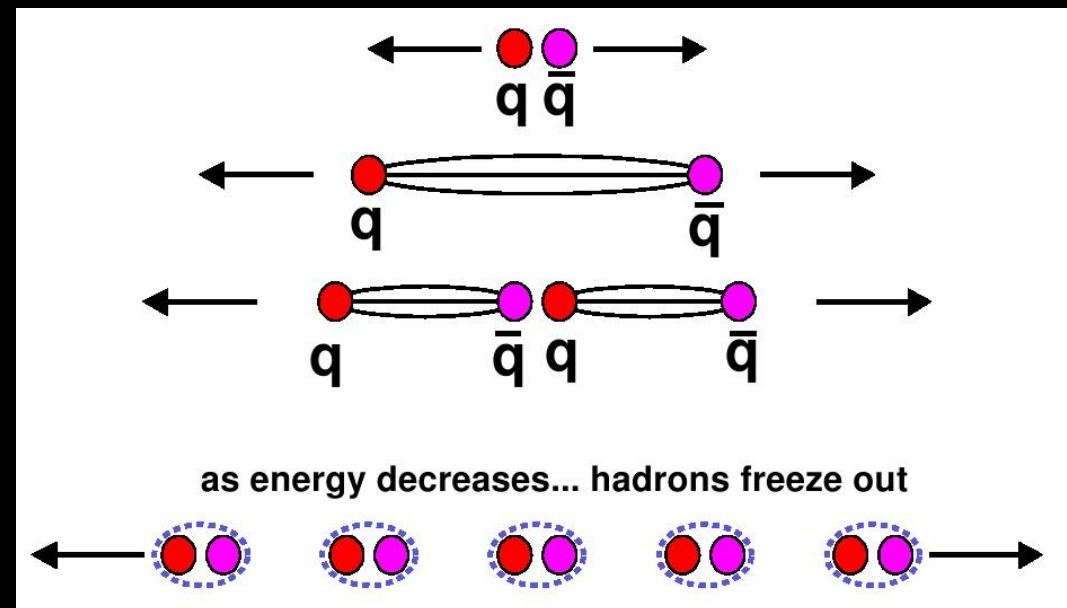
Le vide est opaque à la couleur :

- seuls les objets blancs circulent librement
- les quarks sont confinés dans des hadrons
 - **baryon** : composé de 3 quarks de couleurs différentes
 - **méson** : composé de 2 quarks de couleurs opposées



L'interaction forte agit comme un élastique :

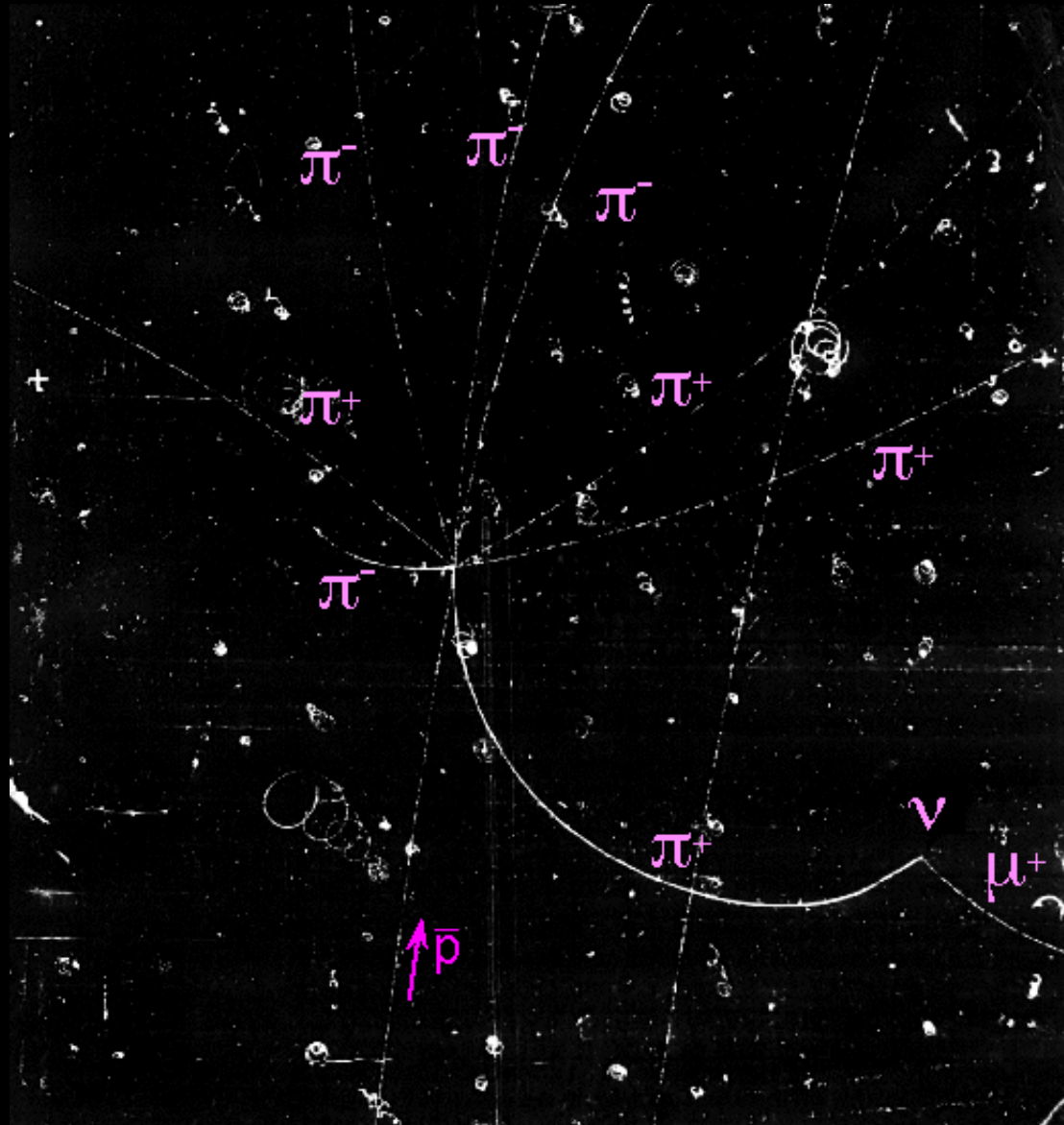
- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)



L'interaction forte en action

En action

Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



(cliché de chambre
à bulles)

La violation de CP

Le Modèle Standard

Les symétries

La construction du modèle standard s'appuie sur des symétries :

- symétries d'espace-temps :
 - conservation de l'énergie
 - conservation du moment angulaire
 - conservation de l'impulsion
- symétrie de « jauge » propres aux interactions
- **symétries discrètes** :
 - renversement droite/gauche : Parité (**P**)
 - renversement des charges : Conjugaison de charge (**C**)
 - renversement du temps (**T**)

Le Modèle Standard

La symétrie CP

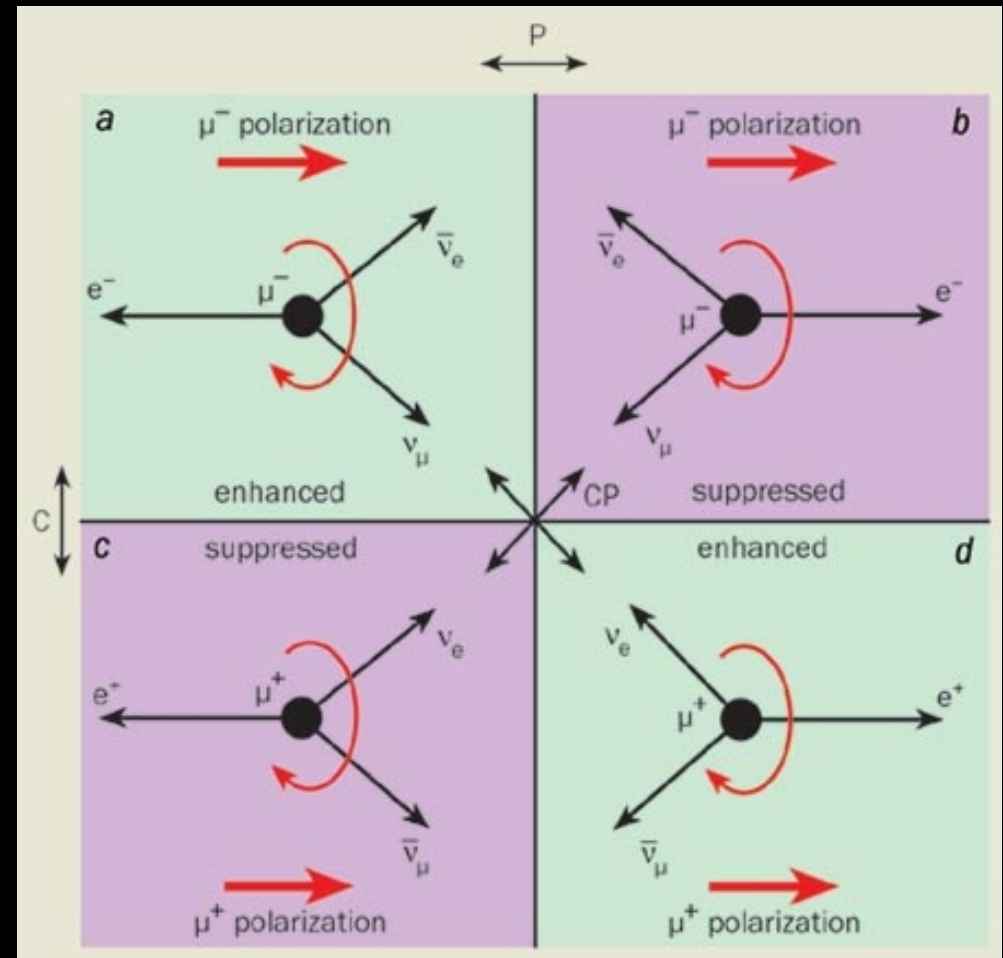
Effet de transformations discrètes :

- Opération P :
 - symétrie miroir
- Opération C
 - particule → anti-particule

La désintégration du muon (met en jeu l'interaction faible) n'est symétrique ni par C ni par P

→ Madame WU (1957)

→ **CP** : la composé des 2 transformations semble rester valide ! c.à.d : l'anti-matière se comporte comme le reflet de la matière dans un miroir.

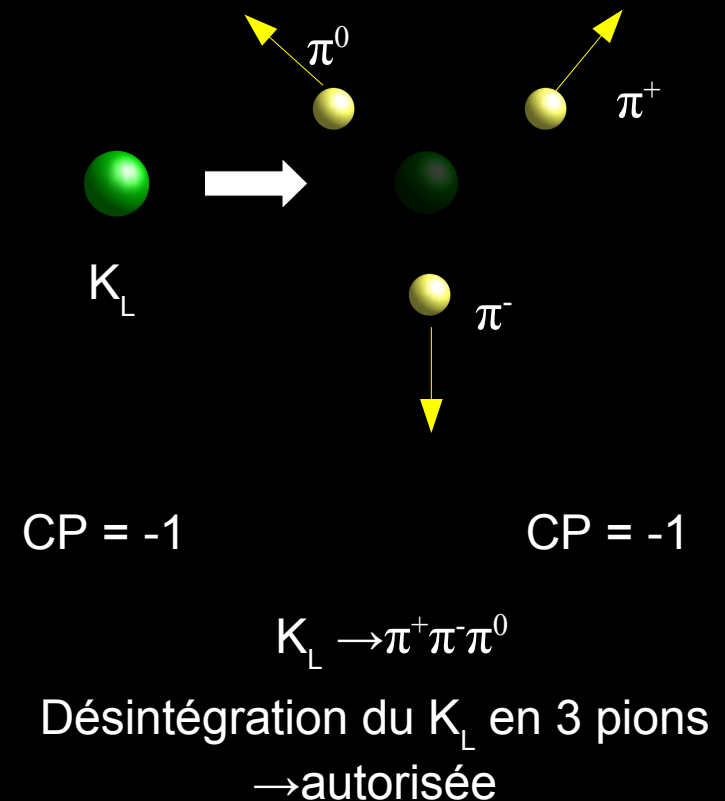
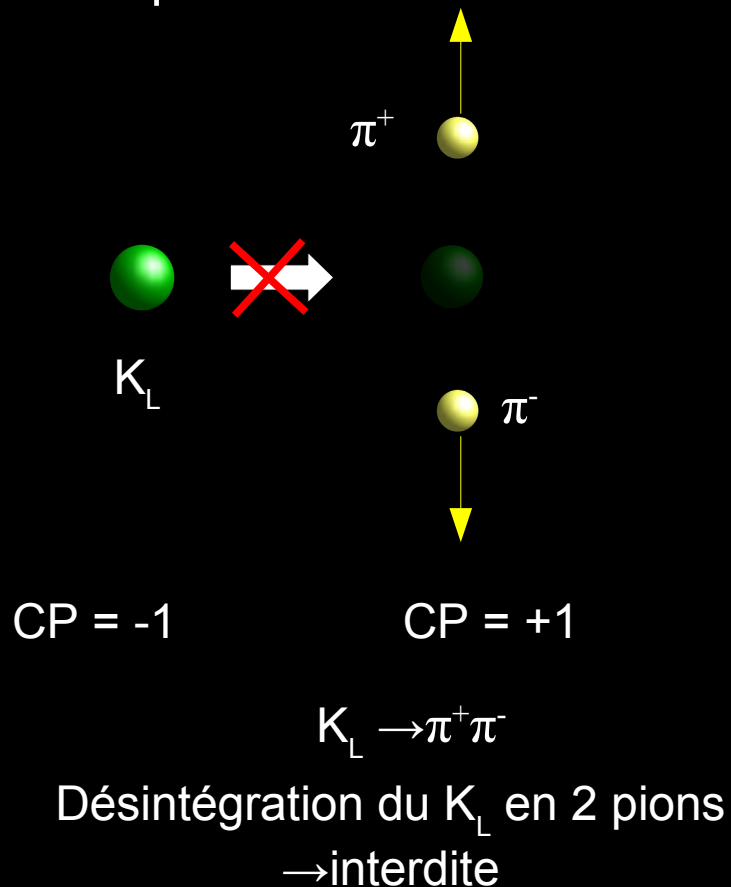


Le Modèle Standard

La violation de CP

Les particules possèdent des parités intrinsèques (propriété quantique !).

Si la conservation de CP est une propriété de la nature, certaines réactions sont impossibles :



Le Modèle Standard

La violation de CP

En 1964, Christenson, Cronin, Fitch & Turlay observent la désintégration : $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$

→ **découverte de la violation de CP**

□ faible : ~2 cas pour mille seulement

A l'époque, seul les 3 quarks les plus légers étaient connues (u,d & s)

Les théoriciens se rendent compte que la théorie en vigueur s'accommoderait naturellement de la violation de CP si il y avait 3 familles de quarks

→ 1974 : découverte du quark c

→ 1977 : découverte du quark b

→ 1995 : découverte du quark t

→ **la matière et l'anti-matière ne sont pas rigoureusement symétrique.**

Depuis l'étude de la violation de CP a continué de susciter un très fort intérêt. Elle reste un moyen de tester le Modèle Standard très finement.

Observation

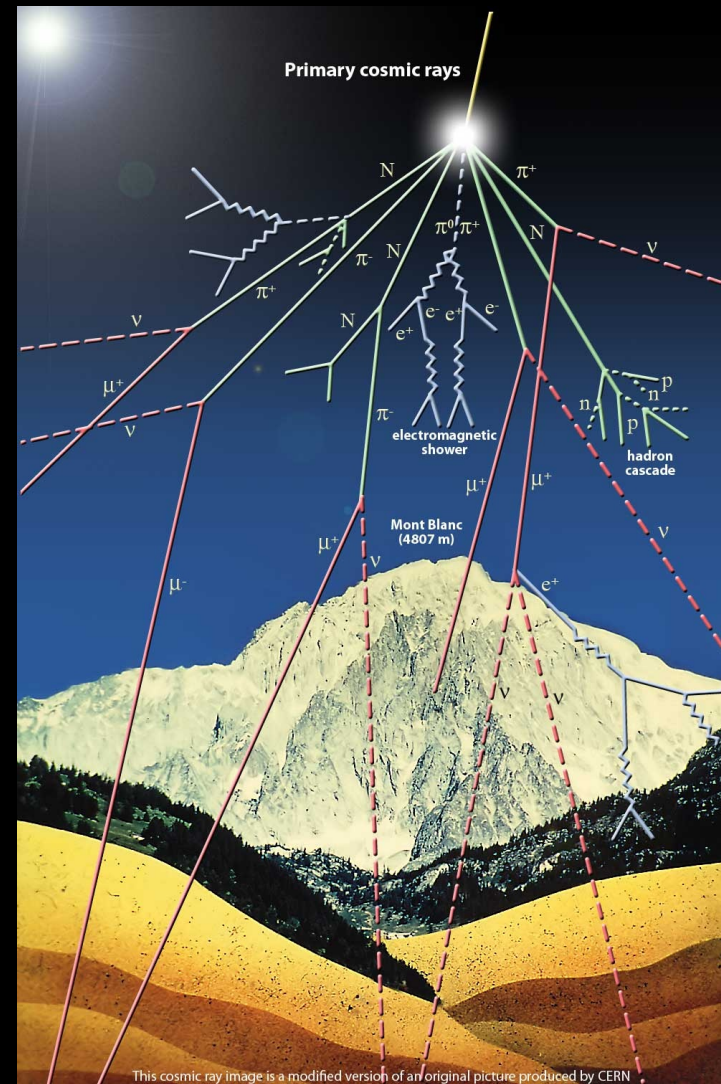
Sources

Comment créer les particules que l'on veut découvrir ou étudier ?

- sources naturelles :
 ↳ e.g. rayons cosmiques

2012 : célébration des 100 ans de la
découverte des rayons cosmiques

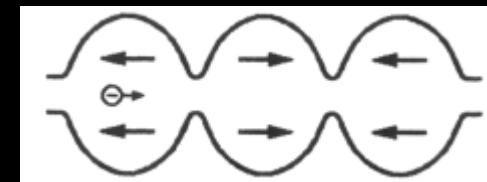
Ont permis la découverte :
 - du positron
 - du muon
 - de particules étranges
 - ...



Sources

Comment créer les particules que l'on veut découvrir ou étudier ?

- sources naturelles :
 - e.g. rayons cosmiques
- mettre suffisamment d'énergie en jeu pour les créer ($E > mc^2$)
 - accélérateurs de particules
 - accélération de particules chargées dans des champs électriques
 - cible ou collisions
- ensuite on observe
 - les particules suffisamment stables, i.e. qui vivent assez longtemps pour être vus
 - ou bien, leurs produits de désintégration



cavité accélératrice

