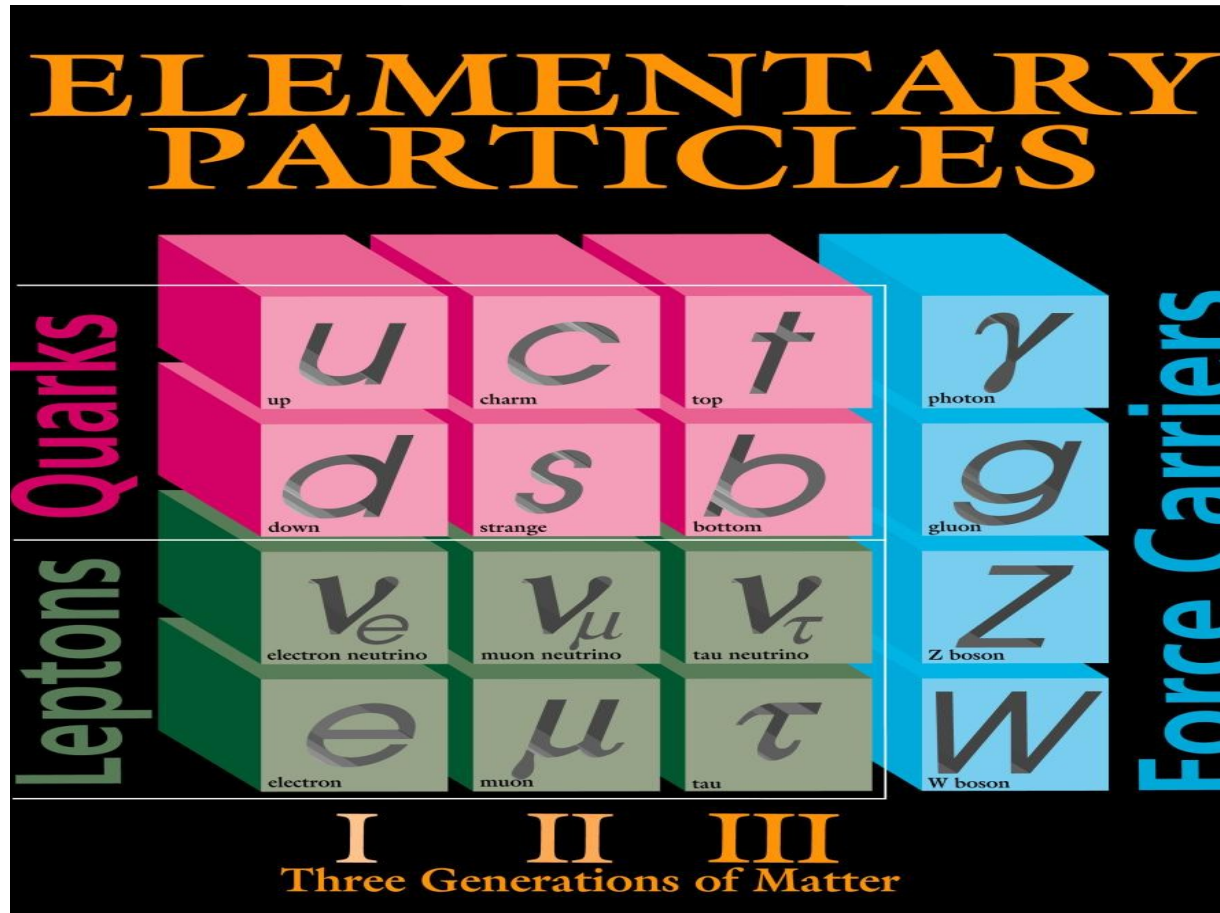


# Les objets de la physique des particules



Julien Cogan

# Plan

- ❖ Les particules « ordinaires »
- ❖ What else ?
- ❖ Les interactions fondamentales

Les particules « ordinaires »

*La Génèse*

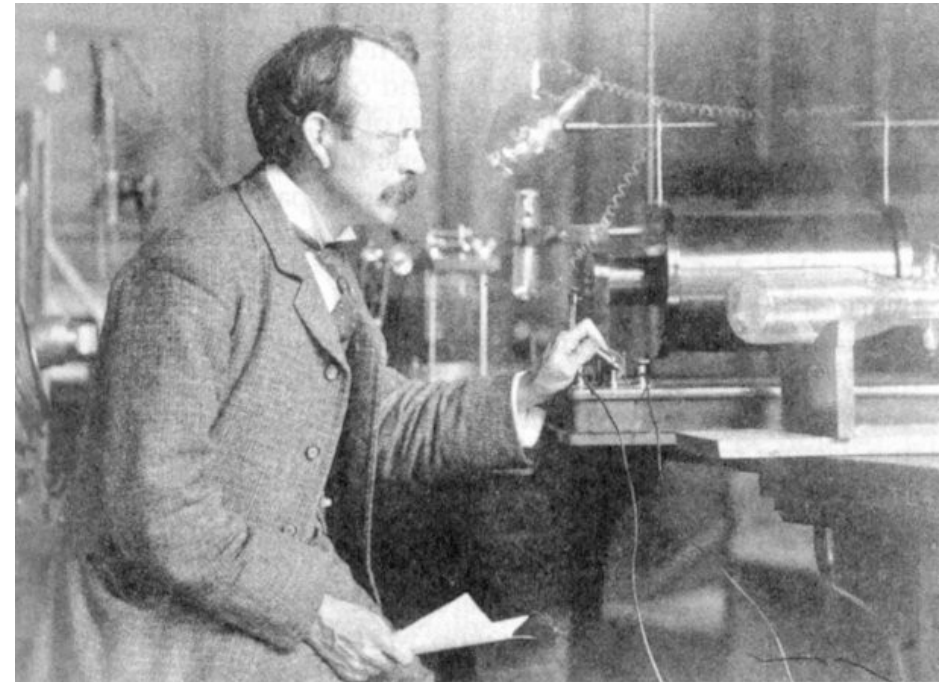
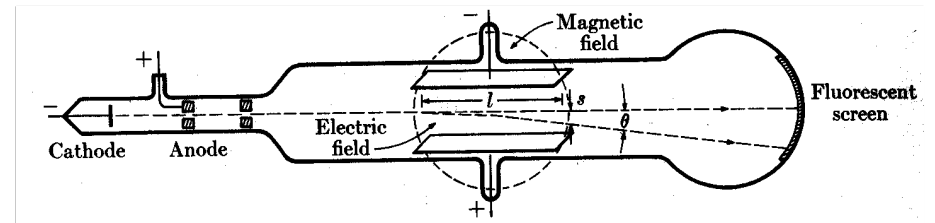
# L'électron

## Découvert par J-J Thomson en 1897

- charge électrique =  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
(charge électrique élémentaire = -1)
- mesure sa masse  $m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$

## L'atome selon Thomson

- « plum-pudding »
- électrons plongés dans un atome lourd composé de charges positives de nature inconnue



L'électron est aujourd'hui encore considéré comme élémentaire

# Le noyau atomique

## Expérience de Rutherford (1911)

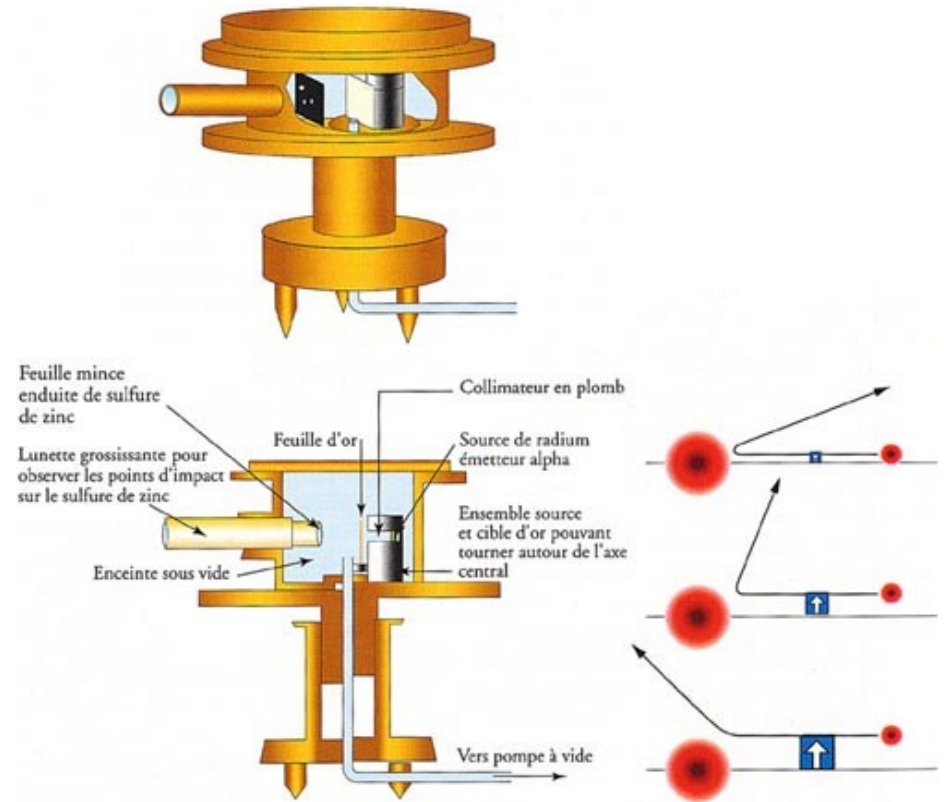
- la masse est concentrée au coeur d'un atome composé de vide  
« c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

## Nouveau modèle atomique



L'atome est essentiellement vide.

Il est composé d'un noyau extrêmement petit et d'un nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau.

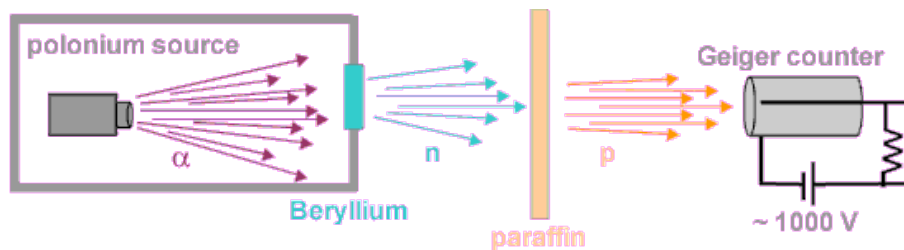


# Les nucléons, les constituants du noyau

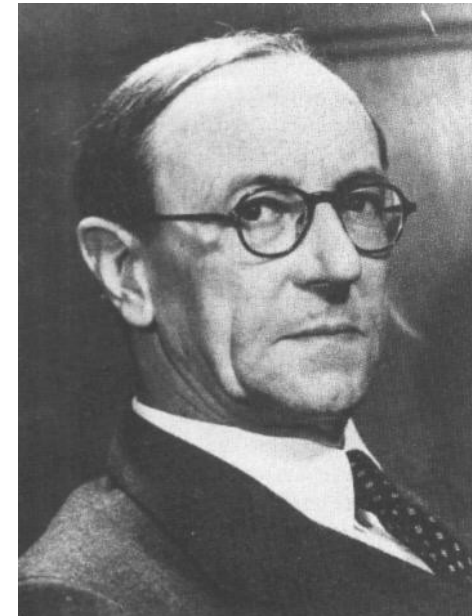
## Mise en évidence du **proton** (1919, Rutherford)

- charge +1

## Découverte du **neutron** (1932, Chadwick)



- neutre : charge = 0
- ~ même masse que le proton



Interlude

*L'Année Miraculous*

# L'énergie

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

## Formes:

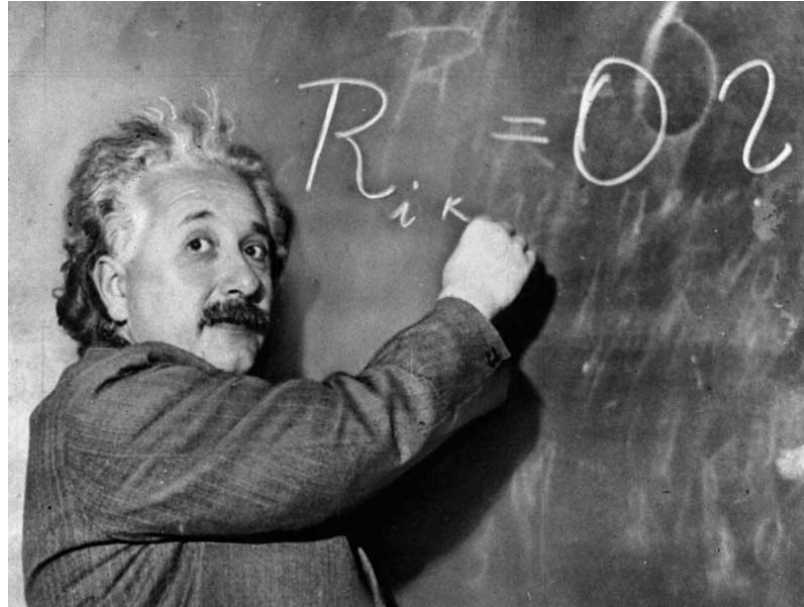
- énergie cinétique d'une masse en mouvement :
  - mécanique classique :  $E_c = 1/2 mv^2$
- énergie potentielle des divers types de forces s'exerçant entre systèmes
- **énergie de masse** :  $E_0 = mc^2$  (c vitesse de la lumière)

## Unités :

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



# 1905 : « l'année miraculeuse »



Le mouvement brownien : déplacement aléatoire des grains

La relativité restreinte

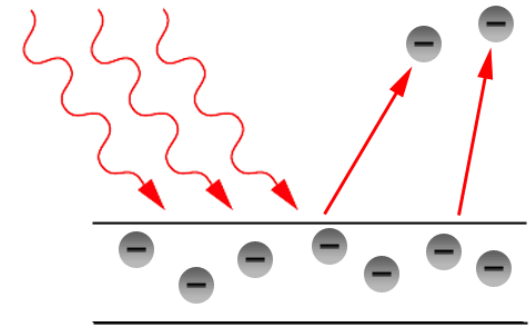
- vitesse de la lumière : vitesse limite (maximale) et absolue
- l'espace temps est relatif : il est différent pour 2 observateurs en mouvement
- équivalence entre énergie et matière :
  - $E_0 = mc^2$
  - l'énergie d'un système au repos est reliée à sa masse

Effet photo-electrique : les photons sont des *quanta* de lumière

# L'atome de Bohr

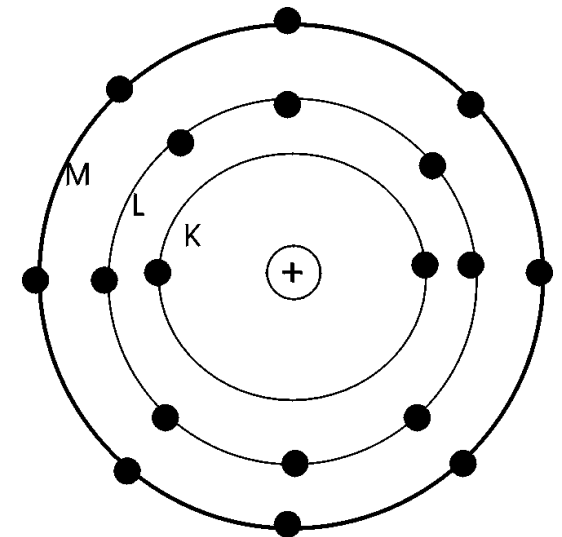
## La théorie des quanta :

- le rayonnement du corps noir (Planck – 1900)
- constante de Planck :  $h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- l'effet photo-électrique
  - découvert par Herz (1887)
  - expliqué par Einstein : l'arrachement des électrons à la surface d'un métal dépend de la longueur d'onde du rayonnement auquel il est soumis



## Premier modèle de l'atome en couche (Bohr – 1913)

- les électrons ne s'effondrent pas sur le noyau car ils sont assujettis à des orbites quantifiées



# La quantité de mouvement

Définition (wikipedia) : « la grandeur physique associée à la vitesse et à la masse d'un objet. Elle fait partie, avec l'énergie, des valeurs qui se conservent lors des interactions entre éléments du système. »

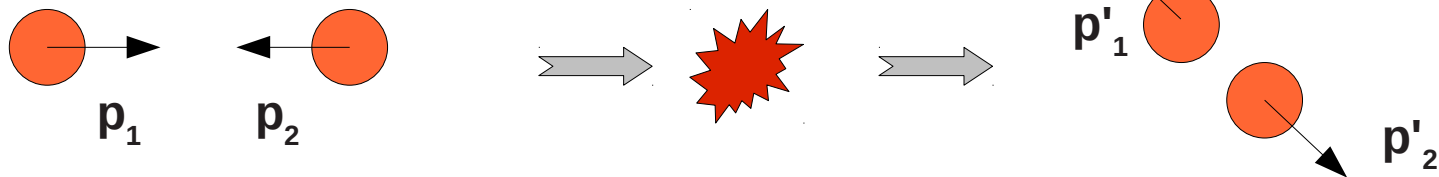
Mécanique classique :  $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

Mécanique relativiste :  $\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$  où  $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$

Mécanique quantique :  $P = h/\lambda$



Conservation :  $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2$



# Les points clefs

2 théories fondamentales voient le jour au début du XX siècle :

– la relativité

→ important dès que les vitesses considérées sont proches de celle de la lumière

→  $\mathbf{p} = m \mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$  où  $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$

→  $E_0 = mc^2$  : la masse au repos = la **masse invariante**

□ caractéristique de la particule

□ énergie disponible lors d'une désintégration

□  $E = \sqrt{M^2c^4 + P^2c^2}$ , c.à.d.  **$E^2 = M^2 + P^2$**

– la mécanique quantique

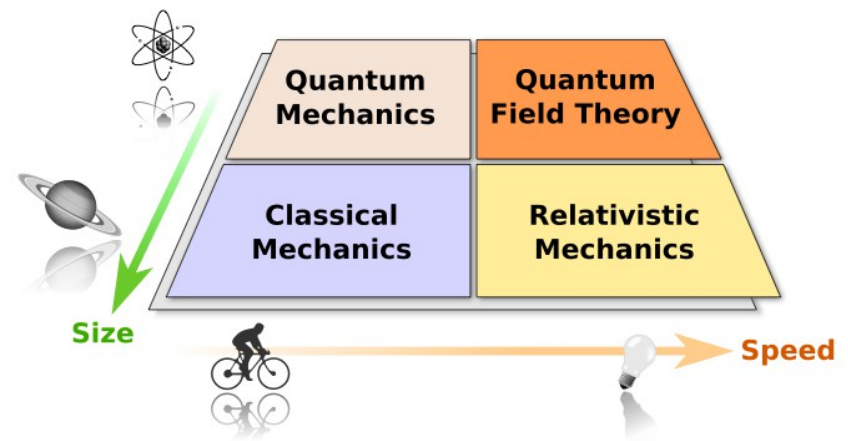
→ indispensable dès l'échelle atomique

→  $p = h/\lambda$

→ dualité onde-corpuscule

Marque la naissance de la physique des particules modernes

– théorie quantique & relativiste



Les particules « ordinaires »

*One step further*

# La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium (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



Pierre & Marie Curie

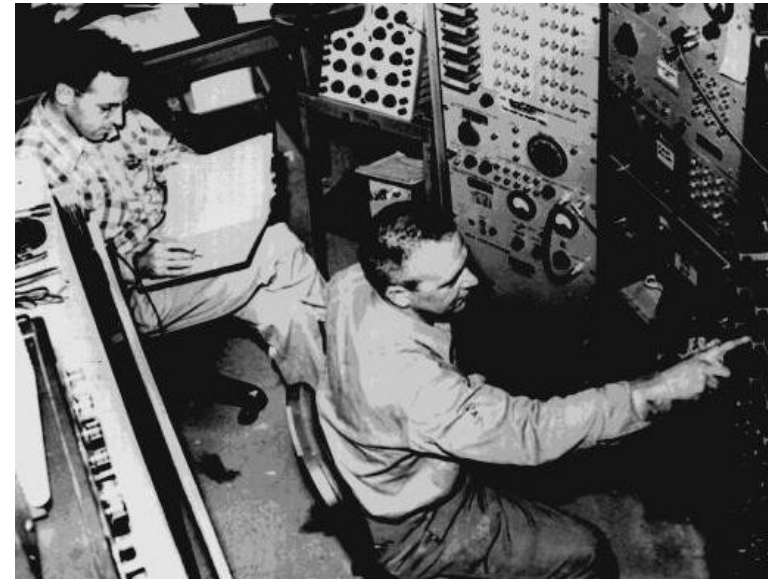
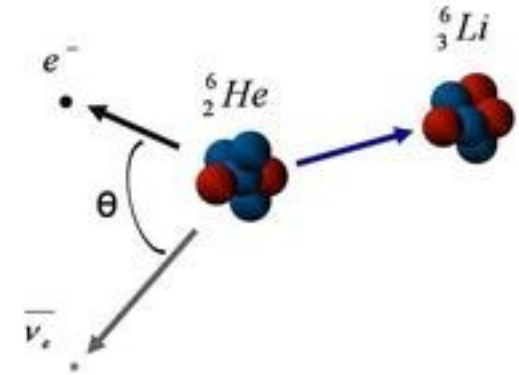
# Les désintégrations $\beta$

Les désintégrations  $\beta$  posent problème : de l'énergie semble manquer

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

1956 : 1ère 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



# La matière ordinaire : résumé ...

Toute la matière qui nous entoure est constituée de :

- électrons,  $e^-$
- neutrinos,  $\nu_e$
- protons & neutrons



# La matière ordinaire : résumé ?

Toute la matière qui nous entoure est constituée de :

- électrons,  $e^-$
- neutrinos,  $\nu_e$
- protons & neutrons

Les protons et le neutrons sont ils élémentaires ?

# Les nucléons sont-ils élémentaires ?

Protons et neutrons sont composés de « quarks »

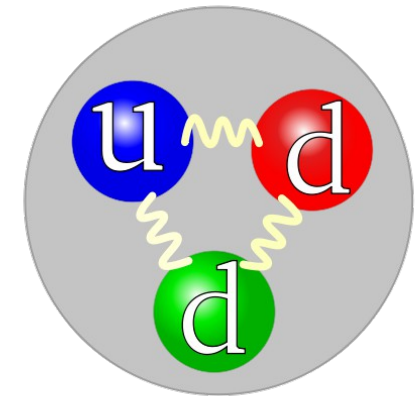
2 types de quarks : up (u) et down (d)

Charge électrique fractionnaire :

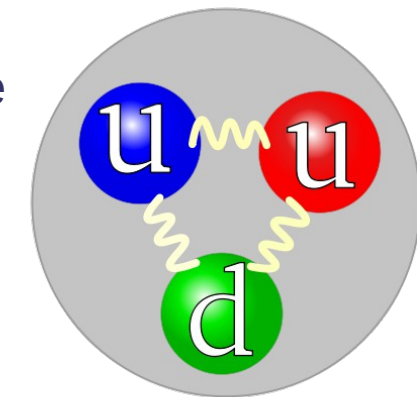
u	+2/3
d	-1/3

Existent en trois « couleurs » : rouge, vert, bleu

- couleur : convention pour désigner un nouveau type de charge
- rouge + vert + bleu = blanc
- les nucléons comportent un quark de chaque couleur et sont blancs



neutron



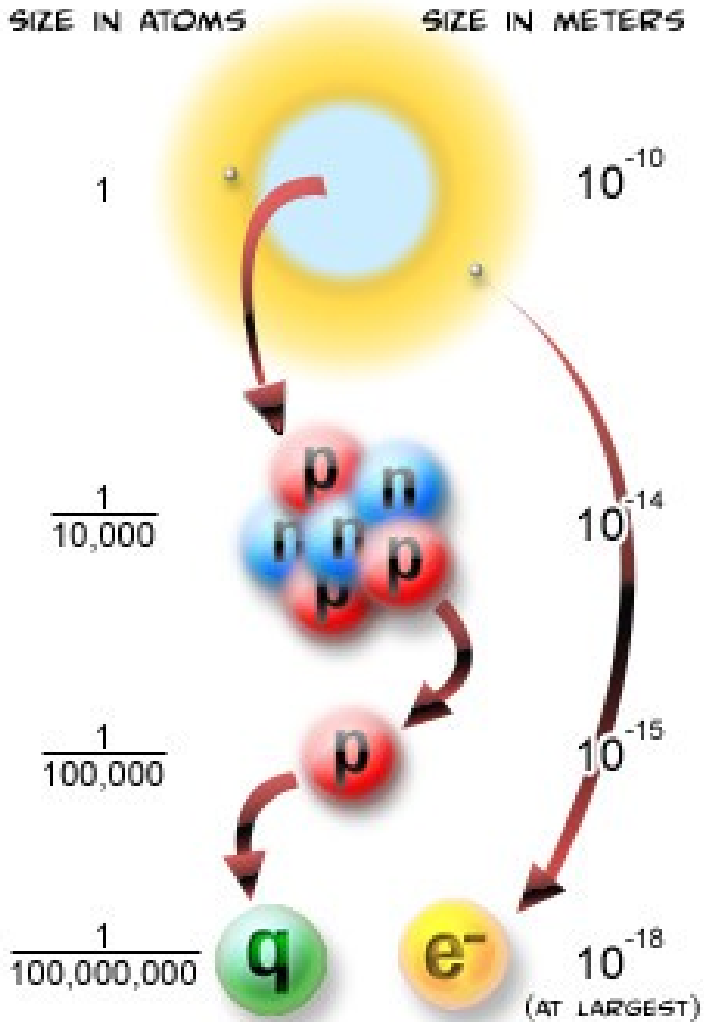
proton

# La matière ordinaire : résumé

Toute la matière qui nous entoure est constituée de :

- électrons,  $e^-$
- neutrinos,  $\nu_e$
- des quarks  $u$  et  $d$

# De l'atome aux quarks



Unité de longueur usuelle

le fermi (ou femtomètre):  $1\text{fm} = 10^{-15}\text{ m}$

Constituants élémentaires :

- électrons
- quarks :  $u u u d d d$



What else ?

# Le positron et l'antimatière

Dirac (1928) développe une théorie relativiste pour décrire l'électron

- prédit l'existence de l' « anti-électron » (positron)
- c'est la naissance de l'antimatière

Découverte du positron dans les rayons cosmiques

- Anderson (1932) observe dans une chambre de Wilson une particule qui a toutes les caractéristiques de l'électron et possède une charge électrique positive

1955 : découverte de l'anti-proton

- « proton » chargé négativement

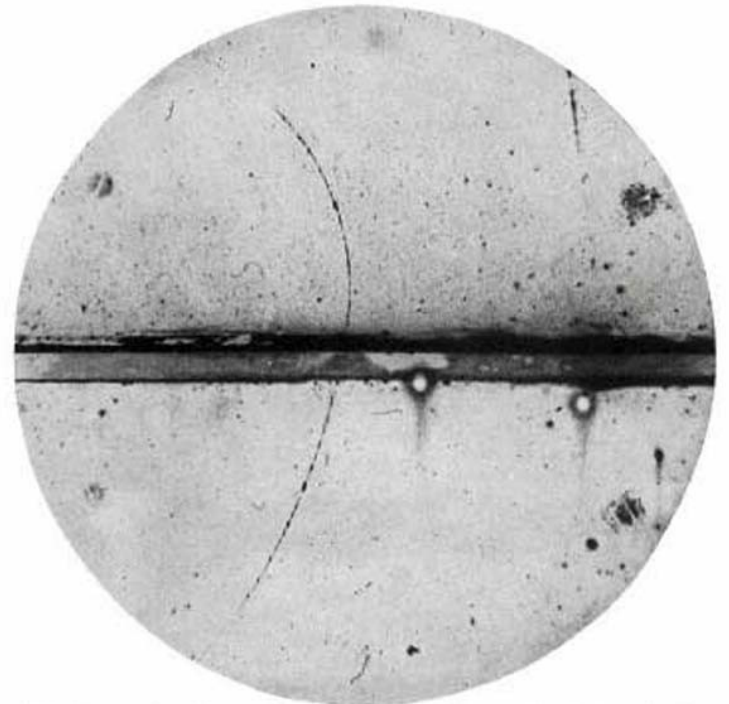


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 7.5 \times 10^5$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

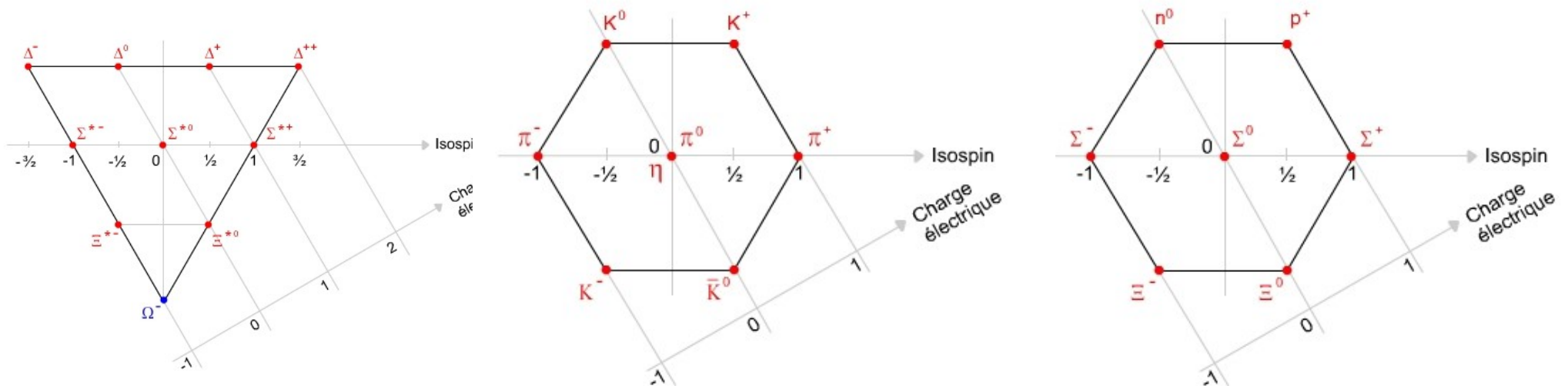
# De nouvelles particules

## Anderson (1936) : découverte du muon ( $\mu$ )

- charge électrique -1, beaucoup plus lourd que l'électron
- « Who ordered the muon ? » (I. Rabi – Nobel 1944)

## 1957-1965 : Age d'or des chambres à bulles

- pluie de nouvelles particules
- $K^0$ ,  $\Lambda^0$  semblent produits par paire ... étrange
- quand on ne comprend pas, on classe



Interlude

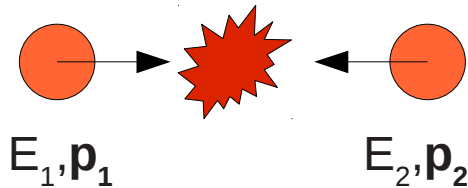
*Mais d'où ça sort ?*



# Comment ces nouvelles particules sont produites ?

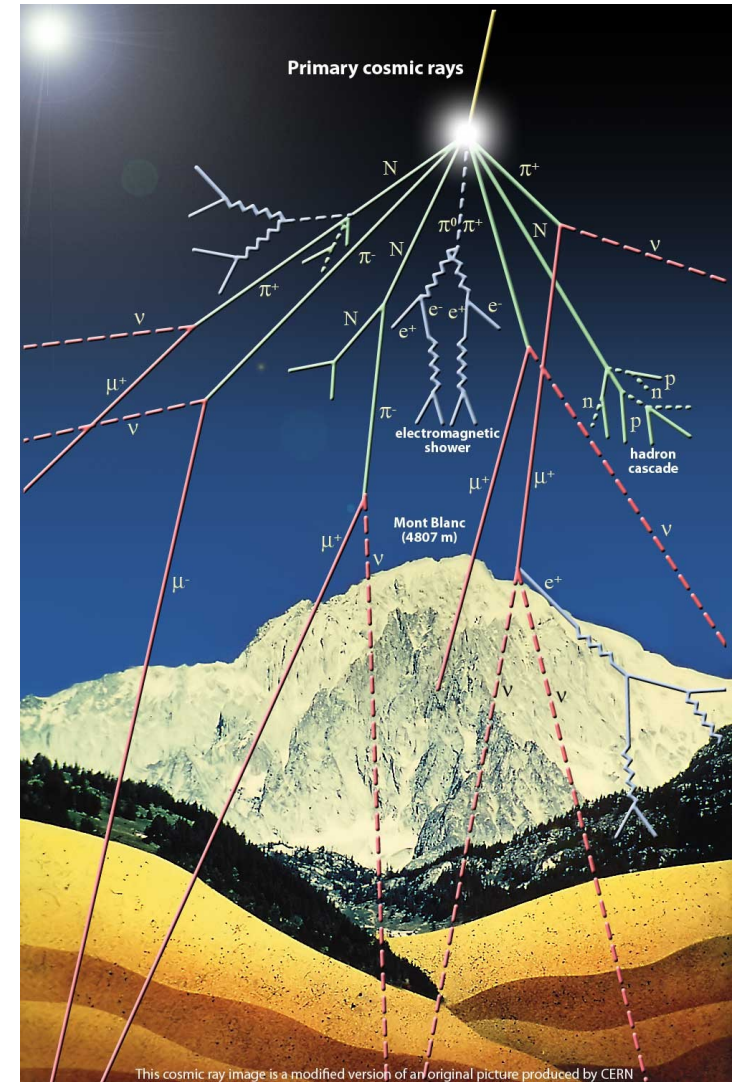
## Avec de l'énergie (cinétique)

- $E = mc^2$  : équivalence matière – énergie
- on peut produire de l'« énergie de masse »
- pour produire une particule de masse  $m$ , il faut  $E_1 + E_2 > mc^2$



## Source d'énergie

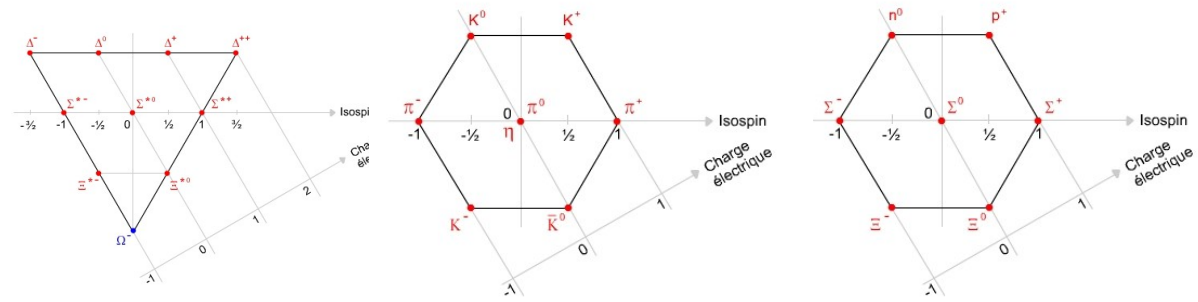
- les rayons cosmiques
  - découverts par Hess (1912)
  - « source naturelle »
- accélérateurs de particules
  - + en + puissants
  - permettent de produire des particules de + en + lourdes



This cosmic ray image is a modified version of an original picture produced by CERN

What else ?

# Les quarks (1/2)



1964 : Gell-Mann et Nee'man proposent la théorie des quarks © 3xplus.com

- « Three quarks for Munster Mark » (Finnegans Wake, James Joyce)
- tous les hadrons alors connus peuvent être formés à partir de 3 quarks  
**u**, **d** et **s** (pour *strange* !)
- n'est-ce qu'un simple artifice mathématique ?

1968 au Slac (Standford), le grand accélérateur d'électrons répète l'expérience de Rutherford : mise en évidence de « points durs » à l'intérieur des hadrons

1970 : prédiction d'une nouvelle espèce de quark : le quark **c** (*charm*) – découvert en 1974

2 autres paires de quarks prédits : le **b** (*beauty* ou *bottom*) et le **t** (*top*)

- **b** : découvert en 1976
- **t** : découvert en 1995

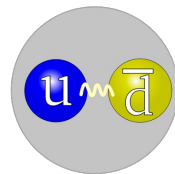
# Les quarks (2/2)

Au total :

- 6 espèces de quarks : u, d, s , c, b, t
- chacun existant en 3 couleurs (b,v,r)
- un anti-quark associé à chaque espèce : u, d, s , c, b, t
- les anti-quarks portent des anti-couleurs ( $\bar{b}, \bar{v}, \bar{r}$ )

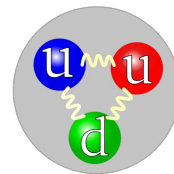
Les quarks ne se déplacent pas librement.  
Ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons**.

- le vide est opaque à la couleur, seuls les objets « blancs » circulent
- 2 types de hadrons :
  - les **baryons** contiennent 3 quarks; ex : protons, neutrons, ...
  - les **mésons** contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : **pion** ( $\pi$ ), Kaon (K), ...



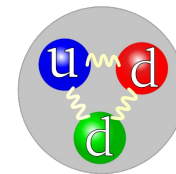
$\pi^+$

Un méson léger :  
le **pion** chargé



p

Des baryons « ordinaires » :  
le proton et le neutron



n

# Les leptons

Déjà rencontrés :

- $e, \mu$  : charge électrique -1
- $\nu_e$

1962 : découverte d'une nouvelle espèce de neutrino, le  $\nu_\mu$

1977 : découverte d'un cousin super-lourd de l'électron et du muon : le  $\tau$  (tau)

2000 : la dernière pièce du puzzle: le neutrino « tauique »,  $\nu_\tau$

# Les particules de matière

Type	Charge électrique	1 <sup>ère</sup> famille		2 <sup>ème</sup> famille		3 <sup>ème</sup> famille	
Quarks	+2/3	up	u	charm	c	top	t
	-1/3	down	d	strange	s	bottom	b
Leptons	-1	electron	e	muon	$\mu$	tau	$\tau$
	0	neutrino electron	$\nu_e$	neutrino muon	$\nu_\mu$	neutrino tau	$\nu_\tau$

Une remarquable organisation !

3 familles de particules, avec la même structure :

- 2 quarks ( $q=2/3$ ,  $q=-1/3$ )
- 2 leptons ( $q=-1$ ,  $q=0$ )

La première famille comporte les particules formant la matière ordinaire

Les membres de la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> famille sont plus lourds et **instables**; ils se **désintègrent** spontanément en donnant des particules plus légères

Instabilité, désintégration ?

# Qu'est-ce qu'une désintégration ?

## Qu'est-ce qu'une désintégration ?

- disparition de la particule initiale et création de nouvelles particules (les *produits de la désintégration*). NB : les particules créées n'étaient pas présentes initialement.

## Qu'est qu'une particule instable ?

- une particule qui se désintègre spontanément.

## Comment est-ce possible ?

- parce que les lois de la physique l'autorise !
  - Symétrie d'espace-temps, par ex. la conservation de l'énergie :  $E = E_1 + E_2$



# Qu'est-ce qu'une désintégration ?

## Qu'est-ce qu'une désintégration ?

- disparition de la particule initiale et création de nouvelles particules (les *produits de la désintégration*). NB : les particules créées n'étaient pas présentes initialement.

## Qu'est qu'une particule instable ?

- une particule qui se désintègre spontanément.

## Comment est-ce possible ?

- parce que les lois de la physique l'autorise !
  - Symétrie d'espace-temps, par ex. la conservation de l'énergie



$$\text{masse} = m \rightarrow E = mc^2$$

# Qu'est-ce qu'une désintégration ?

## Qu'est-ce qu'une désintégration ?

- disparition de la particule initiale et création de nouvelles particules (les *produits de la désintégration*). NB : les particules créées n'étaient pas présentes initialement.

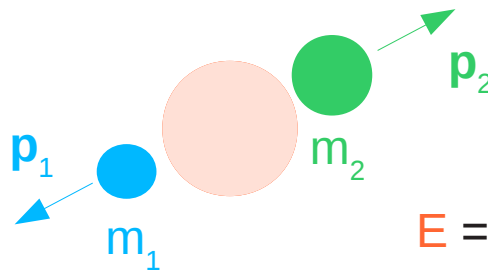
## Qu'est qu'une particule instable ?

- une particule qui se désintègre spontanément.

## Comment est-ce possible ?

- parce que les lois de la physique l'autorise !
  - Symétrie d'espace-temps, par ex. la conservation de l'énergie :  $E = E_1 + E_2$

$$\begin{cases} E = M \\ E_1^2 = M_1^2 + P_1^2 \\ E_2^2 = M_2^2 + P_2^2 \end{cases}$$



$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ E^2 &= (E_1 + E_2)^2 \\ E^2 &= E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \\ m &= f(m_1, m_2, p_1, p_2) \end{aligned}$$

$$M^2 = M_1^2 + M_2^2 + P_1^2 + P_2^2 + 2\sqrt{(M_1^2 + P_1^2)} * \sqrt{(M_2^2 + P_2^2)}$$

# Qu'est-ce qu'une désintégration ?

## Qu'est-ce qu'une désintégration ?

- disparition de la particule initiale et création de nouvelles particules (les *produits de la désintégration*). NB : **les particules créées n'étaient pas présentes initialement.**

## Qu'est qu'une particule instable ?

- une particule qui se désintègre spontanément.

## Comment est-ce possible ?

- parce que les lois de la physique l'autorise !
  - Symétrie d'espace-temps, par ex. la **conservation de l'énergie** :  $E = E_1 + E_2$

la somme des masses des produits de désintégration est plus petite que la masse de la particule initiale. Le reste de l'énergie est communiqué aux produits de désintégration sous forme d'énergie cinétique. **Masse invariante**

Les particules les plus légères sont stables !

- Il existe des processus physiques qui permettent cette transformation

## Peut-on prévoir les désintégrations ?

- en terme de probabilité seulement
  - la stabilité d'une particule est caractérisé par sa durée de vie (temps de vie moyen)

# Qu'est-ce qu'une désintégration ?

## Qu'est-ce qu'une désintégration ?

- disparition de la particule initiale et création de nouvelles particules (les *produits de la désintégration*). NB : **les particules créées n'étaient pas présentes initialement.**

## Qu'est qu'une particule instable ?

- une particule qui se désintègre spontanément.

## Comment est-ce possible ?

- parce que les lois de la physique l'autorise !

→ Symétrie d'espace-temps, par ex. la **conservation de l'énergie** :  $E = E_1 + E_2$

la somme des masses des produits de désintégration est plus petite que la masse de la particule initiale. Le reste de l'énergie est communiqué aux produits de désintégration sous forme d'énergie cinétique. **Masse invariante**

Les particules les plus légères sont stables !

→ Il existe des processus physiques qui permettent cette transformation

## Peut-on prévoir les désintégrations ?

- en terme de probabilité seulement

→ la stabilité d'une particule est caractérisé par sa durée de vie (temps de vie moyen)

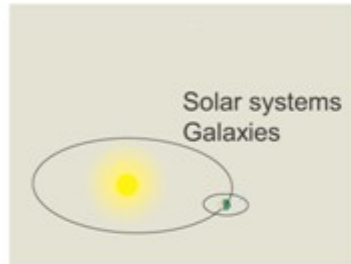
→ cette stabilité est déterminée par le nombre d'**états finaux accessibles**

# Les interactions fondamentales

# Les 4 interactions fondamentales

## gravitation

pesanteur  
mouvements astres  
agit sur les objets massifs

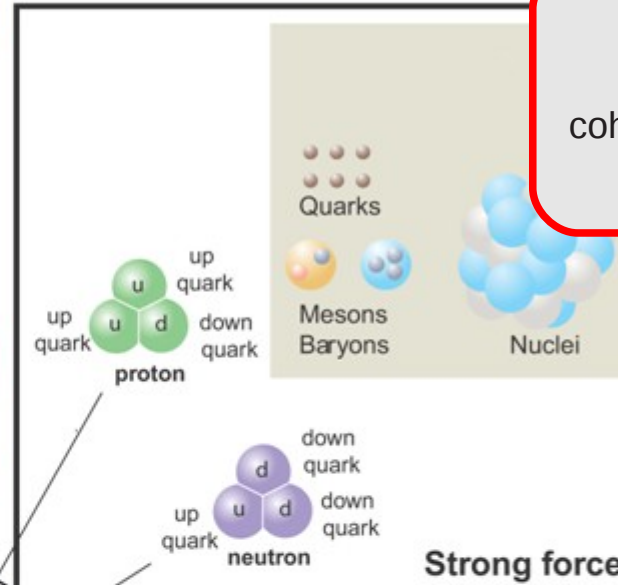


Gravity Force



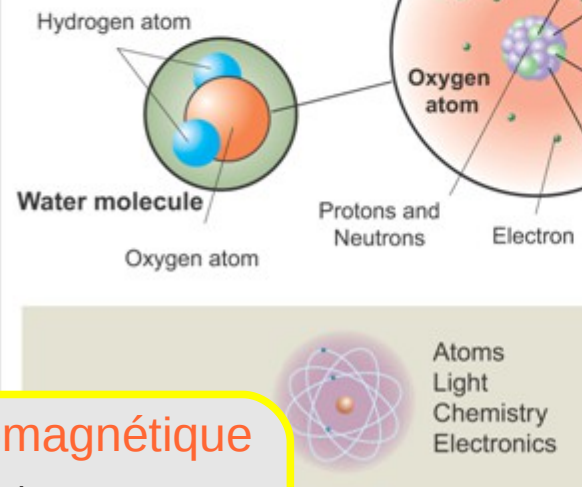
## Interaction forte

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



Strong force

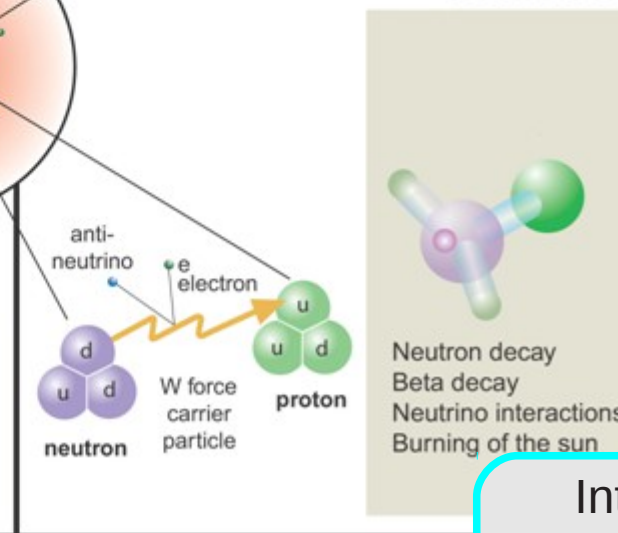
## Electromagnetic force



## Interaction électromagnétique

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

## Weak force



## Interaction faible

désintégration du neutron,  
radioactivité  $\beta$ , ...  
agit sur toutes les particules

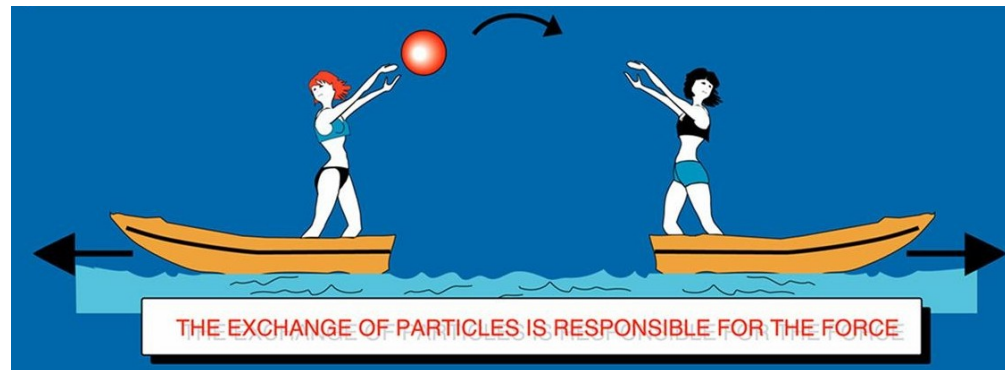
# Comment décrire une interaction ?

La compréhension du mécanisme des **interactions fondamentales** à l'œuvre dans l'univers est l'un des objets de la physique des particules

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

→ principe d'action-réaction :

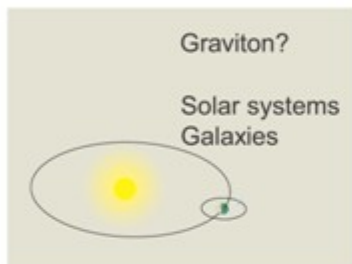


→ idem en physique des particules : les interactions entre particules sont décrites comme l'échange de vecteurs. Ces vecteurs sont eux-mêmes des particules. Ce sont des **bosons** (par opposition aux particules de matière qui sont des **fermions**)

# Interactions, bosons vecteurs et charges

## gravitation

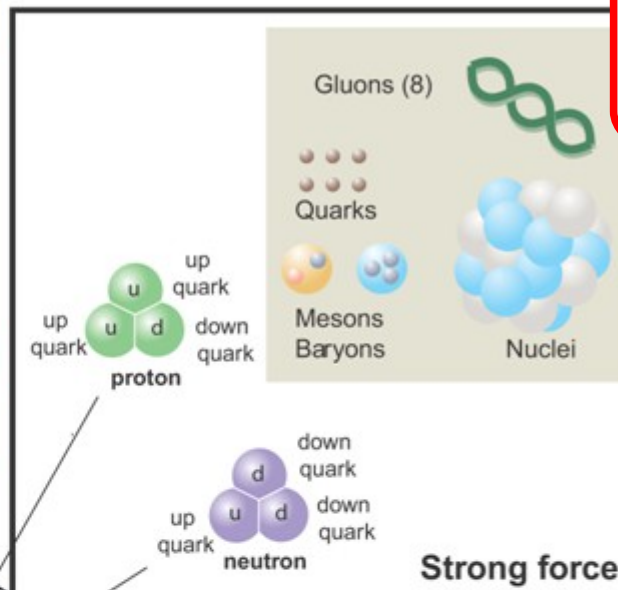
vecteur : graviton ?  
charge : masse



Gravity Force

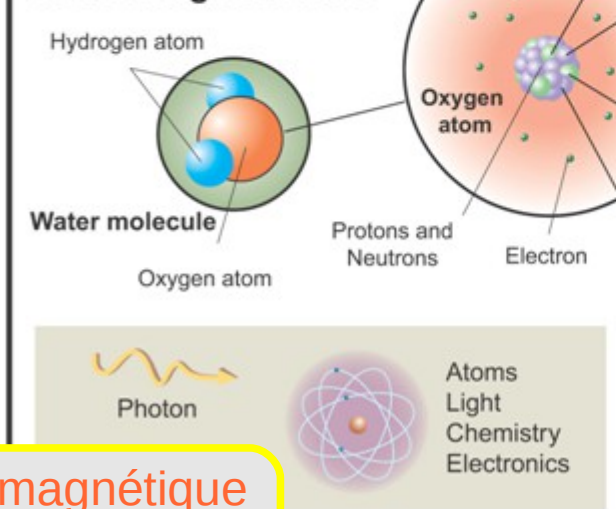
## Interaction forte

vecteur : gluon (g)  
charge : couleur



Strong force

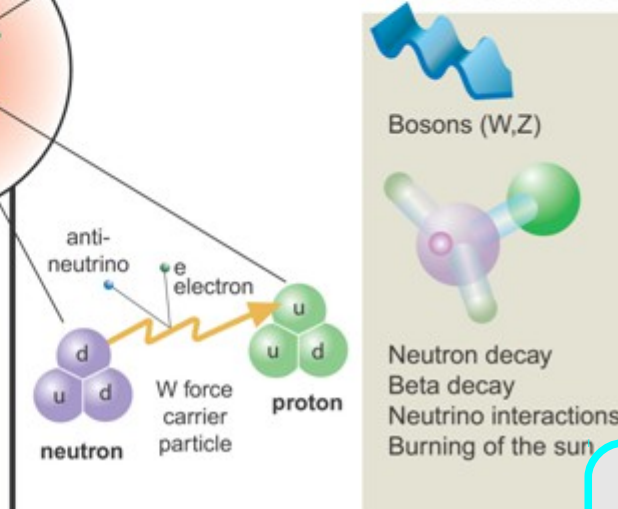
## Electromagnetic force



## Interaction électromagnétique

vecteur : photon ( $\gamma$ )  
charge : charge électrique

## Weak force

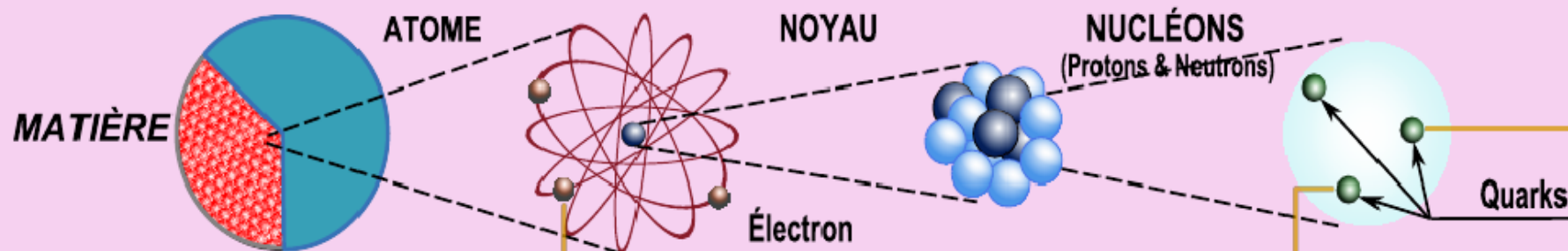


## Interaction faible

vecteur :  $Z^0, W^+, W^-$   
charge : isospin



# Récapitulatif



## FERMIONS

La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.

Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.

## ANTIMATIÈRE

A chaque particule correspond une antiparticule.

## LEPTONS

peuvent se déplacer librement

## QUARKS

prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.

Famille	Lepton	Neutrino	Quark	Description
Première famille	<b>ÉLECTRON</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1.	<b>NEUTRINO ÉLECTRON</b> Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.	<b>DOWN</b> Sa charge électrique est $-1/3e$ . Le Proton en contient 1, le Neutron 2.	<b>UP</b> Sa charge électrique est $+2/3e$ . Le Neutron en contient 1, le Proton 2.
Deuxième famille	<b>MUON</b> Un compagnon plus massif de l'électron.	<b>NEUTRINO MUON</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	<b>ÉTRANGE (STRANGE)</b> Un compagnon plus lourd du quark down.	<b>CHARME (CHARM)</b> Un compagnon plus lourd du quark up.
Troisième famille	<b>TAU</b> Un compagnon encore plus lourd que le muon.	<b>NEUTRINO TAU</b> Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	<b>BEAUTÉ (BEAUTY, BOTTOM)</b> Un compagnon encore plus lourd du quark down.	<b>TOP</b> Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du quark up.

## BOSONS VECTEURS

Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.

### PHOTON

Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.



### GLUON

Porteur de la force "forte" entre quarks.



### BOSONS INTERMÉDIAIRES : $W^+$ , $W^-$ et $Z^0$

Porteurs de la force "faible", responsable des désintégrations radioactives.



examples

# Focus : la désintégration du $Z^0$

$Z^0$  est neutre

Conservation de la charge  $\Rightarrow$

$$\rightarrow e^+ e^- : +1 - 1 = 0$$

$$\rightarrow \mu^+ \mu^- : +1 - 1 = 0$$

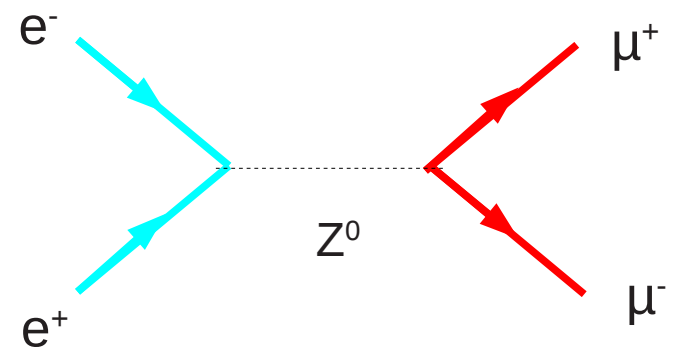
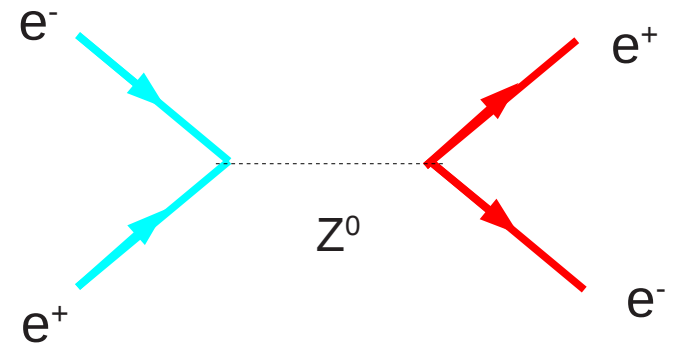
$$\rightarrow \tau^+ \tau^- : +1 - 1 = 0$$

$$\rightarrow q \bar{q} : +1/3 - 1/3 = 0 \text{ (x2 (u,c))}$$

$$\rightarrow q \bar{q} : +2/3 - 2/3 = 0 \text{ (x3 (d,s,b))}$$

$$\rightarrow \nu \bar{\nu} : 0 + 0 = 0$$

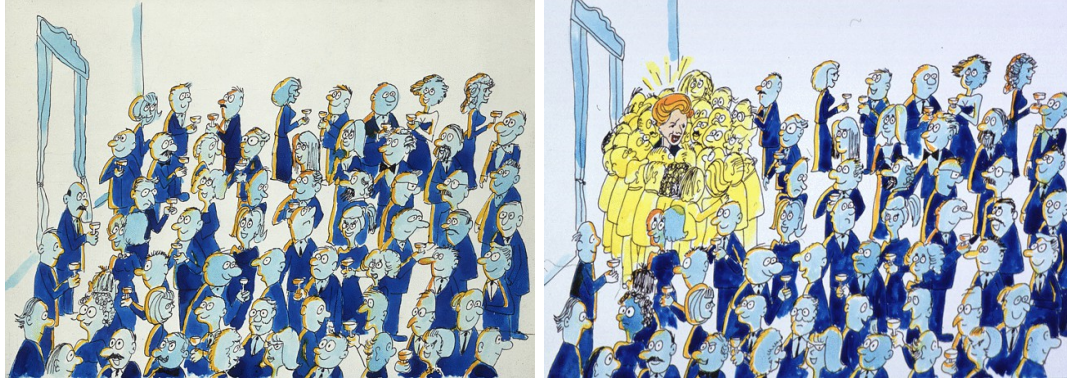
Plusieurs mode de désintégration possibles.



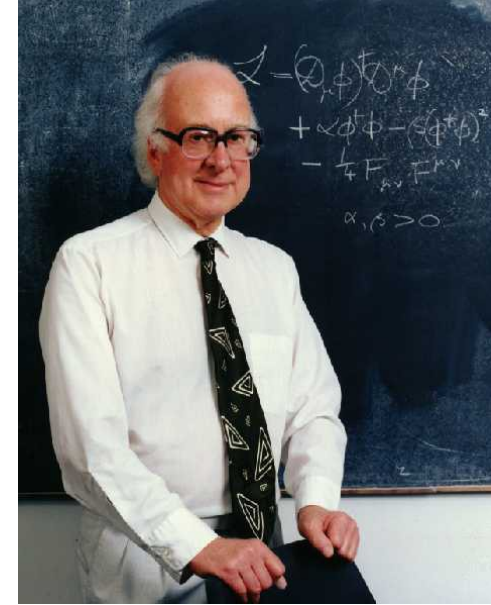
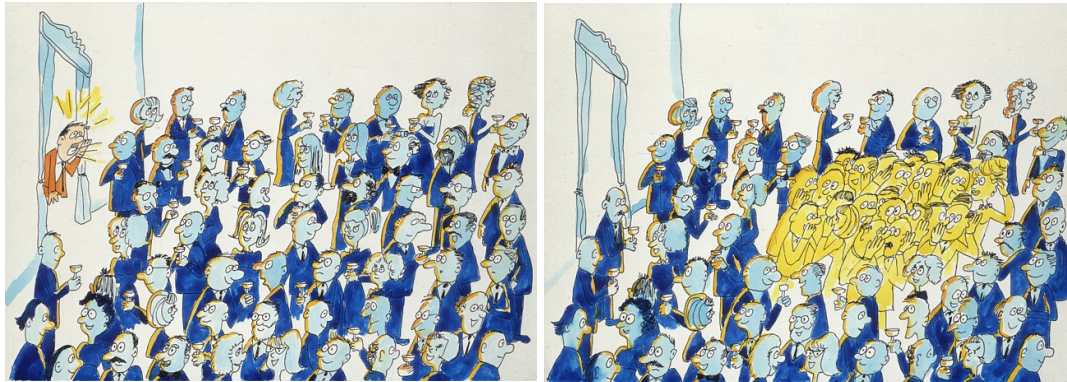
C'est tout ?

# Le boson manquant : le boson de Higgs

## Le mecanisme



## Le boson



La seule particule prédite par le modèle et non encore observée !

Conclusion

# Les questions en suspens

Le Modèle Standard (MS) décrit très précisément tous les phénomènes aujourd'hui observés

→ il reste un élément prédit par le MS non encore observé : le **boson de Higgs**

Pour autant, il reste insatisfaisant :

→ pourquoi **3 familles** de particules ?

→ pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g.  $m(t) \sim 10^5 m(u)$  !

→ le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).

□ pourquoi la force forte est-elle si différente ?

□ GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY (supersymétrie) ?

□ quid de la gravitation ?

→ il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

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

→ **96%** de l'énergie de l'univers est d'origine inconnue (**énergie noire**)

→ **75%** de la matière dans l'univers est d'origine inconnue (**matière noire**)



# 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