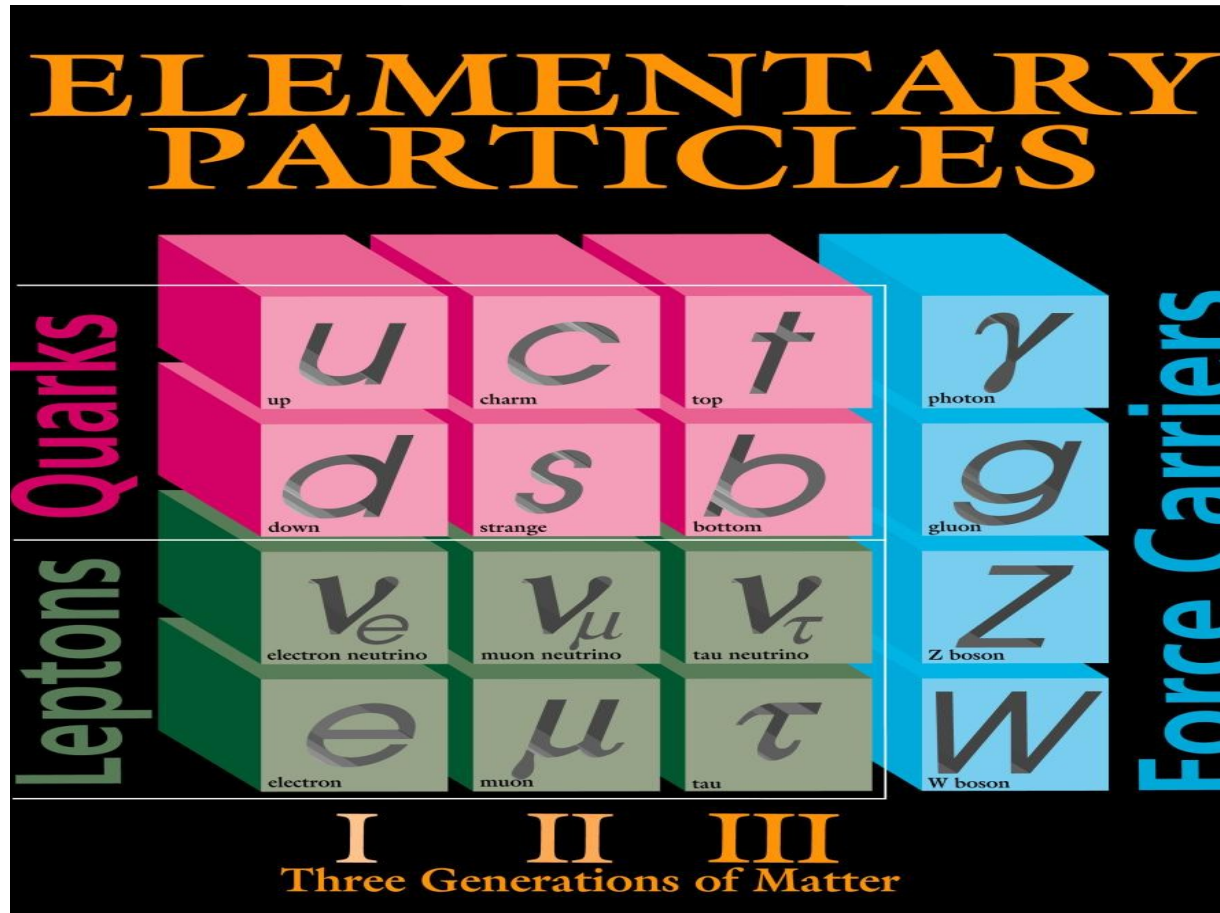


# Les objets de la physique des particules



Julien Cogan

# Plan

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

Les particules « ordinaires »

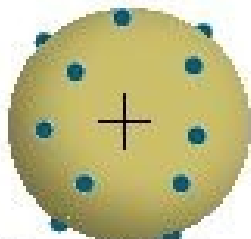
# L'électron

Découvert par J-J Thomson en 1897

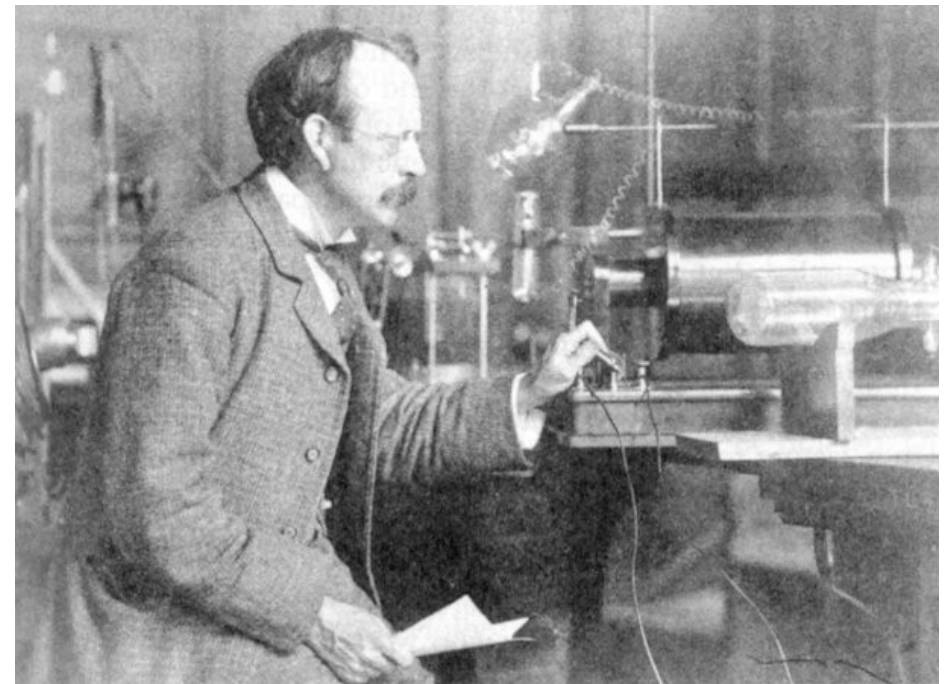
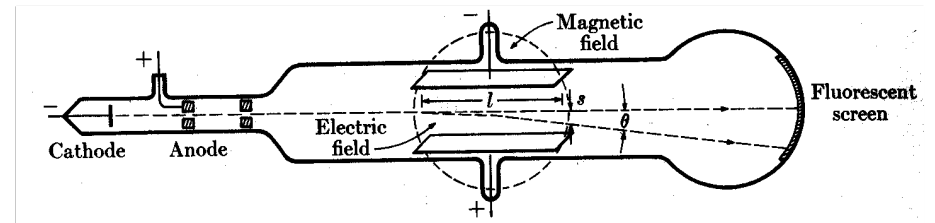
- charge électrique  $= -1,6 \cdot 10^{-10} \text{ C}$   
(charge électrique élémentaire = -1)
- mesure sa masse  $m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$

L'atome selon Thomson

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



«Plum-Pudding»  
1897

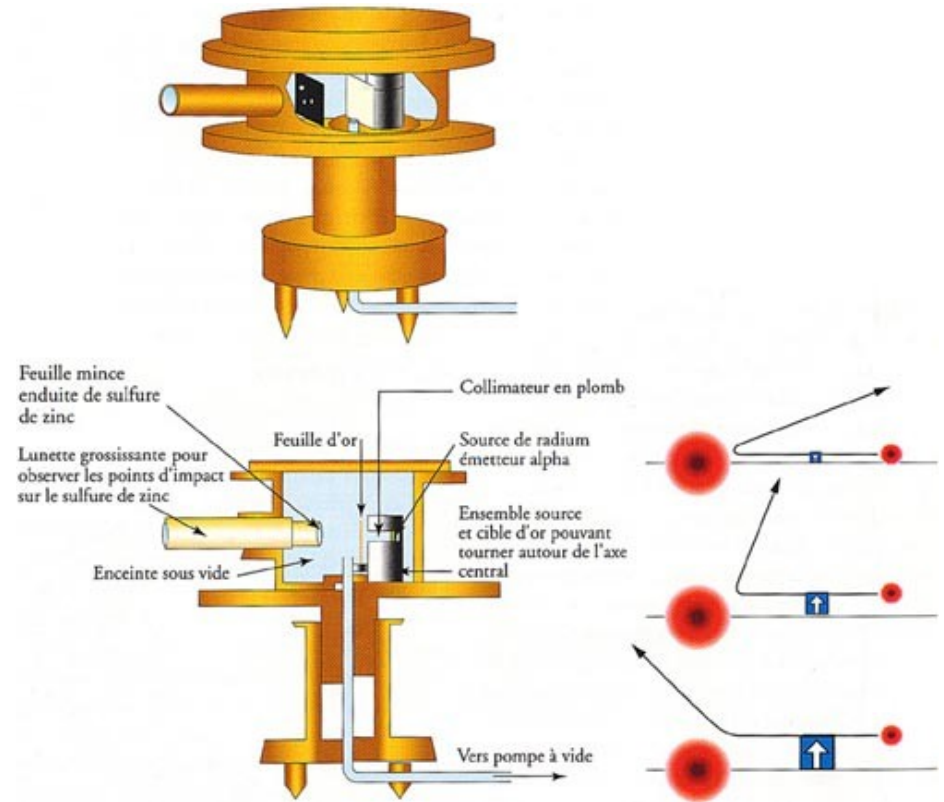


# Le noyau atomique

## 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

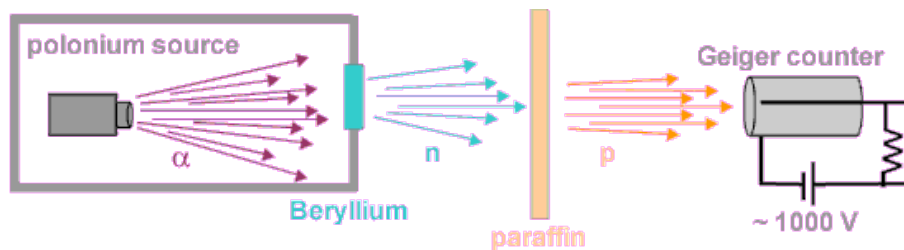


# Les nucléons, les constituants du noyau

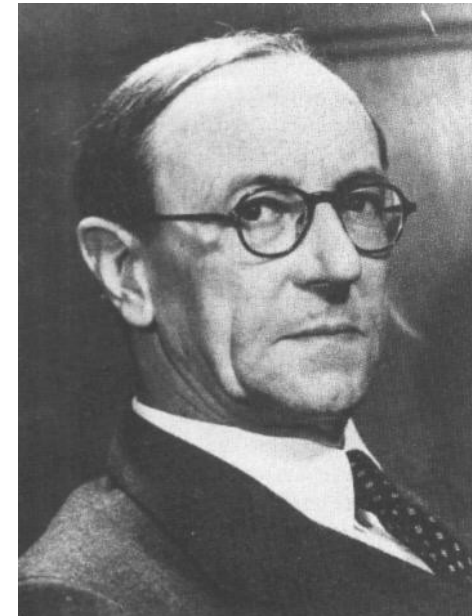
## Mise en évidence du **proton** (1919, Rutherford)

- charge +1

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



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



# Les nucléons sont-ils élémentaires ?

Protons et neutrons sont composés de « quarks »

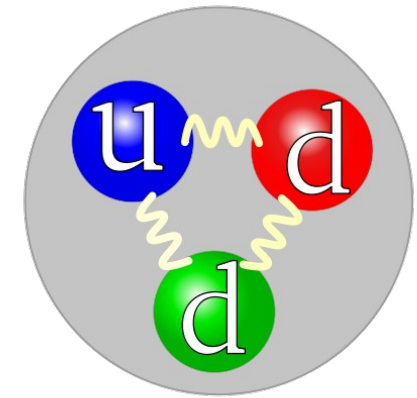
2 types de quarks : up (u) et down (d)

Charge électrique fractionnaire :

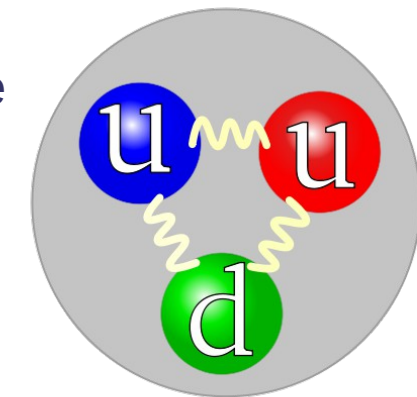
u	+2/3
d	-1/3

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

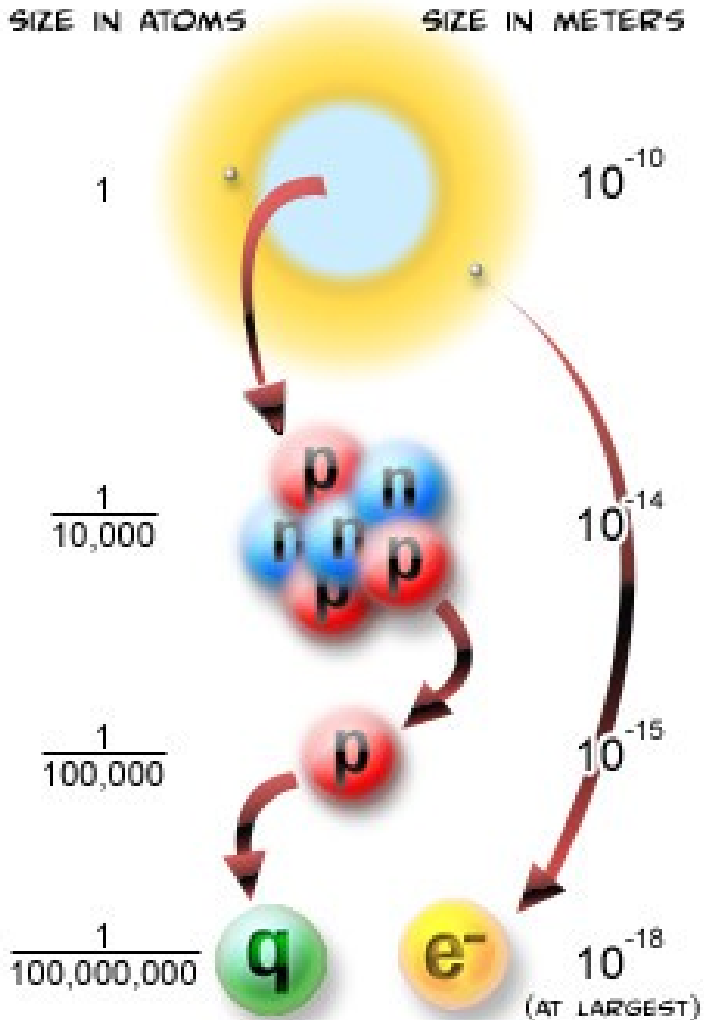


neutron



proton

# Les constituants du noyau moderne



Unité de longueur usuelle

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

Constituants élémentaires :

- électrons
- quarks :  $u u u d d d$



# Interlude

# 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* »

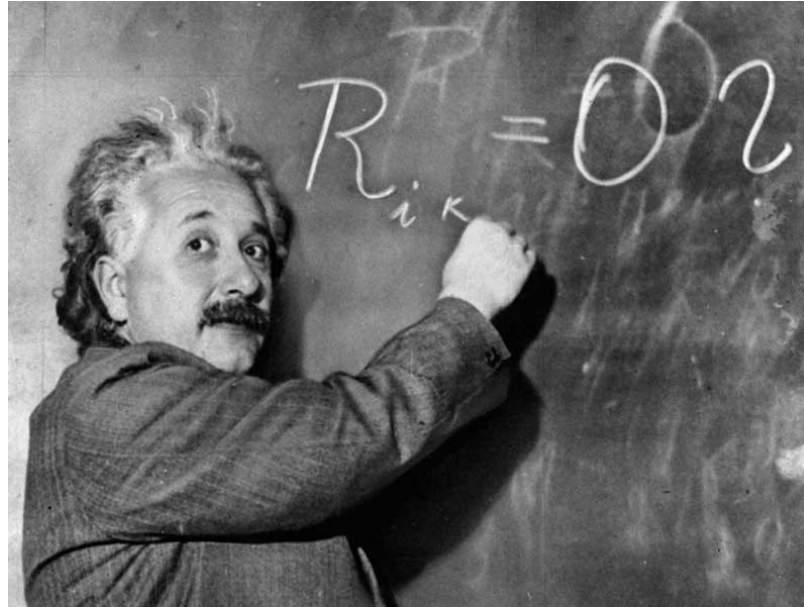
## Formes:

- 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** :  $E_m = mc^2$  (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

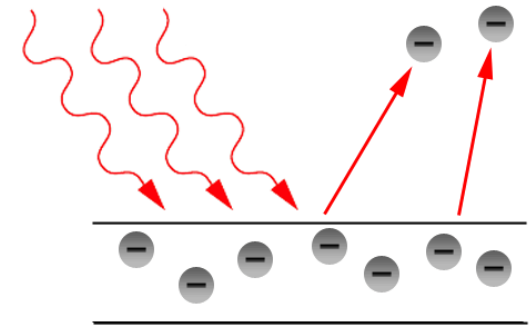
- vitesse de la lumière : vitesse limite (maximale) et absolue
- l'espace temps est relatif : il est différent pour 2 observateurs en mouvement
- équivalence entre énergie et matière :
  - $E = mc^2$
  - l'énergie d'un système au repos est reliée à sa masse

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

# L'atome de Bohr

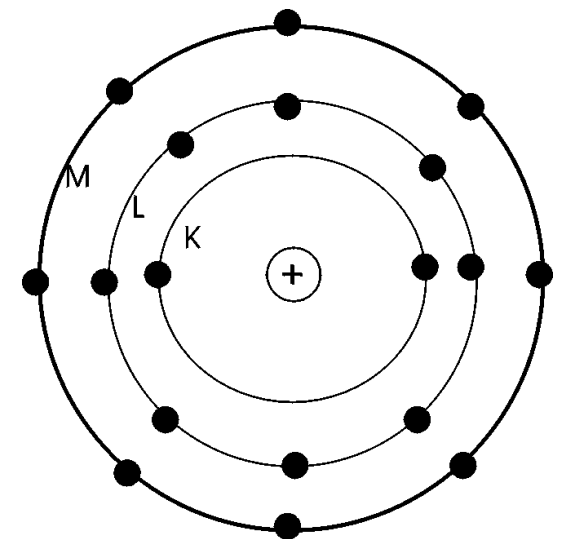
## La théorie des quanta :

- 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. »

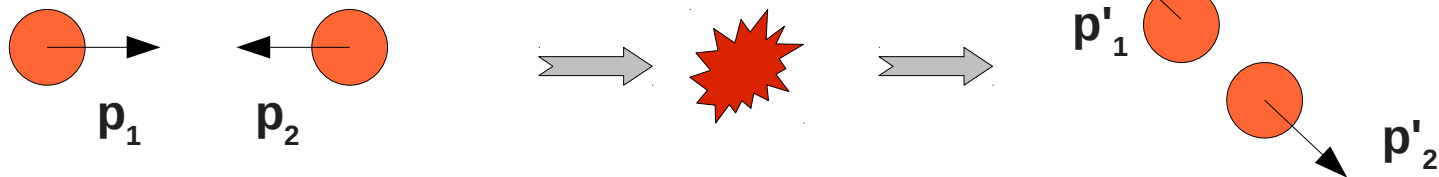
Mécanique classique :  $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$

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  $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$

→  $E = mc^2$

– la mécanique quantique

→ indispensable dès l'échelle atomique

Marque la naissance de la physique de particules modernes

– théorie quantique & relativiste

Les particules « ordinaires »

suite

# 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



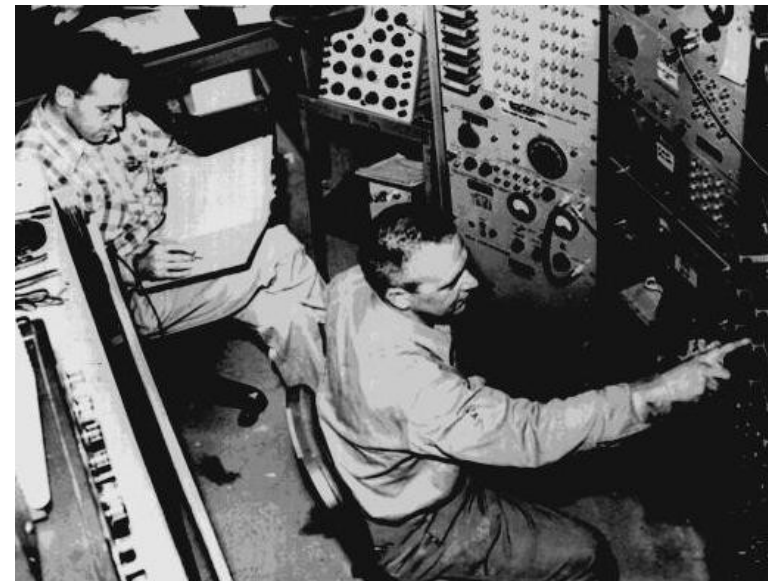
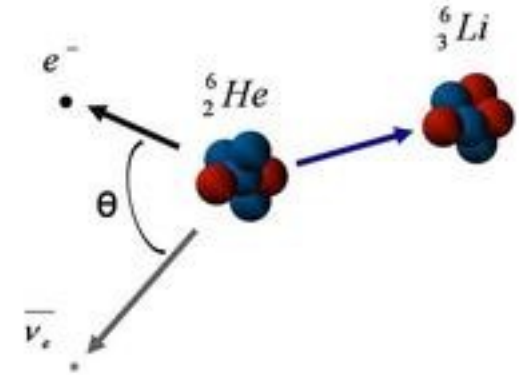
# Les désintégrations $\beta$

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 comportant des quarks u et d



What else ?

# Le positron

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 de l'électron 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

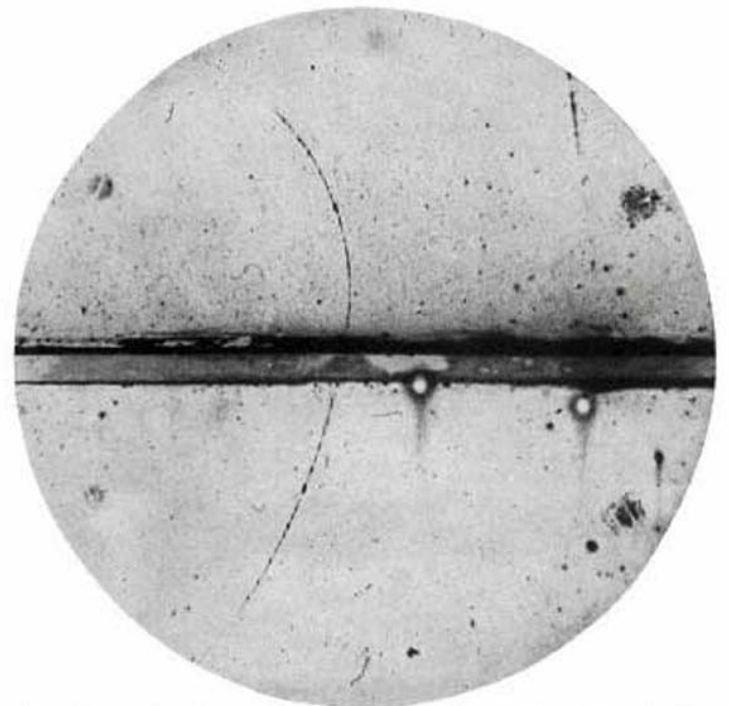


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H\rho = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H\rho = 7.5 \times 10^5$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this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

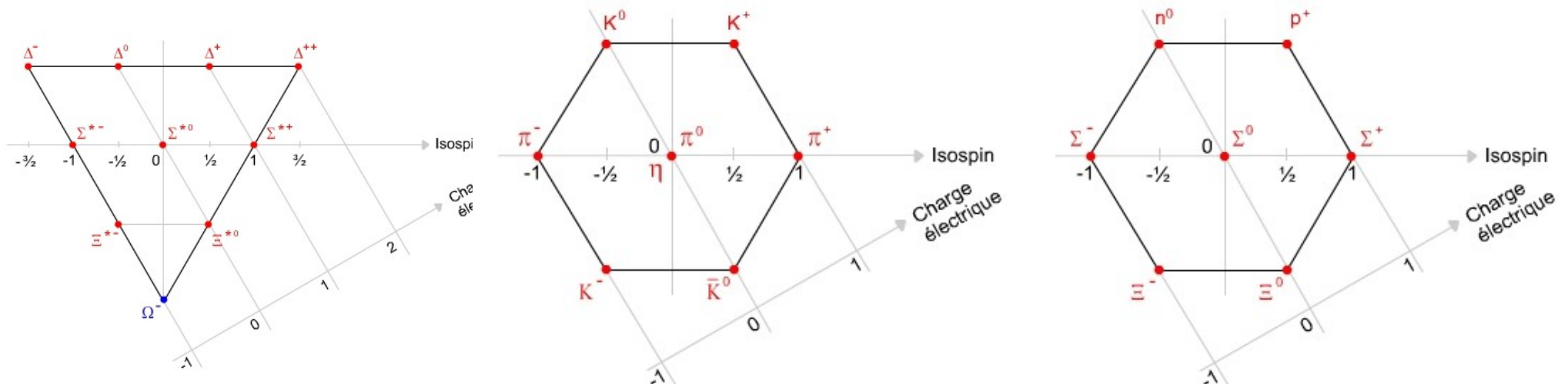
# De nouvelles particules

## 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

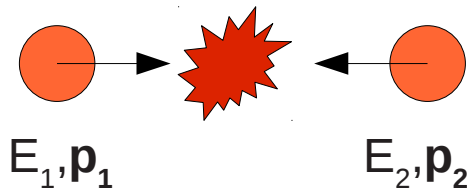


# Interlude

# Comment ces nouvelles particules sont produites ?

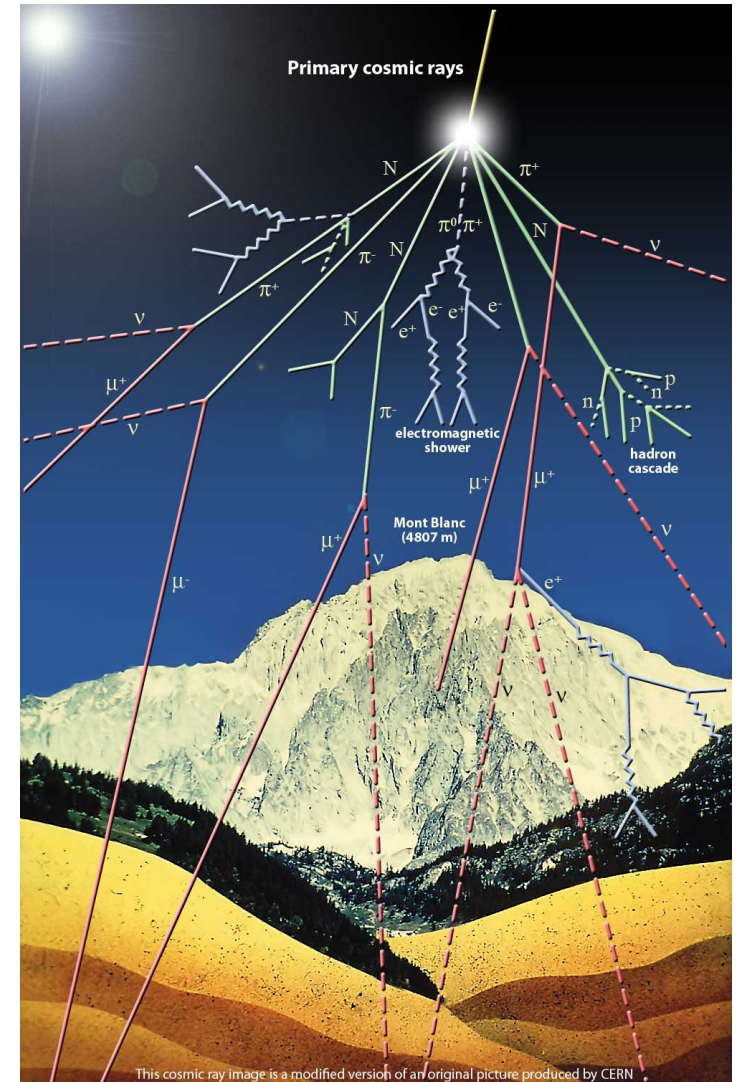
## Avec de l'énergie (cinétique)

- $E = mc^2$  : 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

- « 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

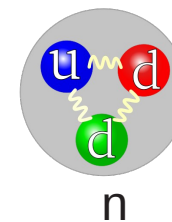
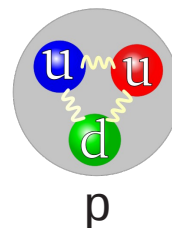
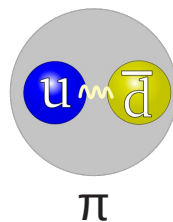
# Les quarks (2/2)

## 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 (b,v,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 (protons, neutrons, ...) contiennent 3 quarks
  - les mésons ( $\pi$ , K, ...), contiennent 1 quarks et 1 anti-quark



# 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

		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	$\nu_e$	neutrino tau	$\nu_\tau$

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

# Les interactions fondamentales

# Qu'est-ce qu'une interaction ?

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

La compréhension du mécanisme des forces est l'un des objets de la physique des particules

Interaction : un terme plus général que « forces »

- attraction / répulsion
- création / annihilation de matière

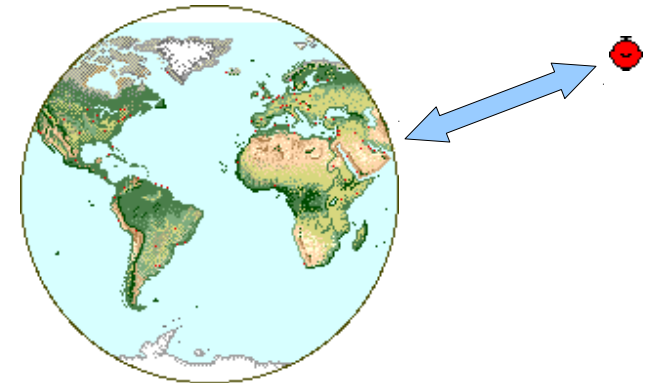
# Les 4 interactions fondamentales

Tous les phénomènes physiques connus peuvent être expliqués à l'aide de seulement 4 interactions fondamentales :

- l'interaction **gravitationnelle**: responsable de la pesanteur, des marées ou des phénomènes astronomiques
- l'interaction **électromagnétique** : responsable de l'électricité, du magnétisme, de la lumière, des réactions chimiques ou biologiques
- l'interaction **forte** : responsable de la cohésion du noyau
- l'interaction **faible** : responsable de la radioactivité  $\beta$

Ce que nous appelons « forces » est la résultante d'une quasi-infinité de minuscules interactions

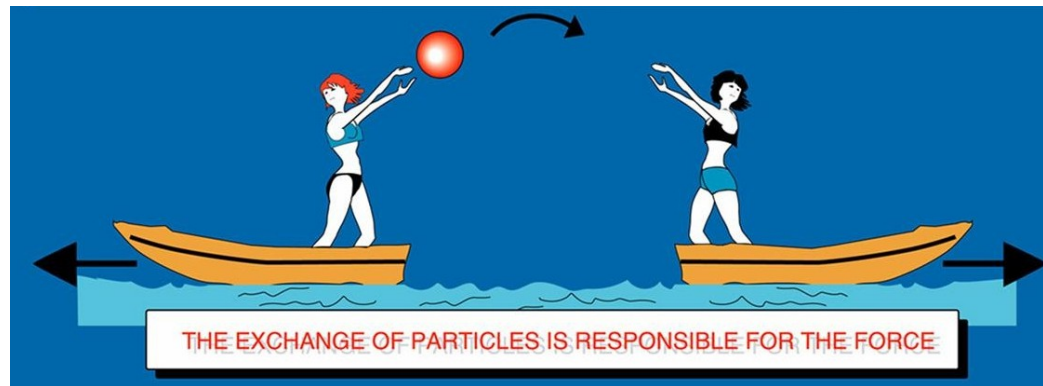
- l'attraction entre le satellite et la terre est la somme d'une myriade d'attractions individuelles entre les atomes des 2 objets



# Interactions et messagers

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

- principe d'action-réaction :



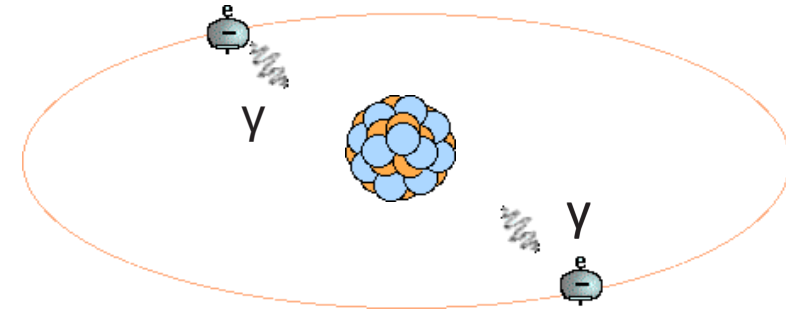
- idem en physique des particules : les interactions entre particules sont décrites comme l'échange de vecteurs. Ces vecteurs sont eux-mêmes des particules. Ce sont des **bosons** (par opposition aux particules de matière qui sont des **fermions**)



# Les bosons vecteurs et charges

Les bosons vecteurs des 4 interactions sont :

- le **photon** ( $\gamma$ ) pour l'interaction électromagnétique
- les **gluons** (g) pour l'interaction forte
- les bosons  $Z^0$ ,  $W^+$  et  $W^-$  pour l'interaction faible
- le **graviton** pour la gravitation



La capacité d'interaction des particules est donnée par leur « charge » :

- charge **électrique** pour l'interaction électromagnétique
- charge de **couleur** pour l'interaction forte
- charge d'**isospin** pour l'interaction faible
- **masse** pour la gravitation

# Loi de conservation

## Nombre quantique interne :

- les particules sont caractérisées par leur propriétés intrinsèques
- les particules élémentaires sont des objets quantiques
- leurs propriétés internes sont définies par des nombres quantiques
  - les charges (électrique, de couleur, faible)
  - le spin (moment orbitales intrinsèque = demi-entier pour les fermions)
  - la saveur (c.à.d. le type)

Les interactions sont caractérisées par leur capacité à modifier (ou non) certains des nombres quantiques internes des particules

## Les interactions respectent les symétries d'espace temps :

- conservation de l'énergie
- conservation de l'impulsion
- conservation du moment angulaire

# Caractérisation d'une interaction

## Médiateur :

- types de bosons vecteurs

## Charge :

- types de charges sur lesquelles agissent les bosons vecteurs

## Portée :

- distance à laquelle l'interaction se fait sentir
- est déterminée par la masse du boson vecteur en jeu

## Intensité :

- couplage entre le boson et le fermion

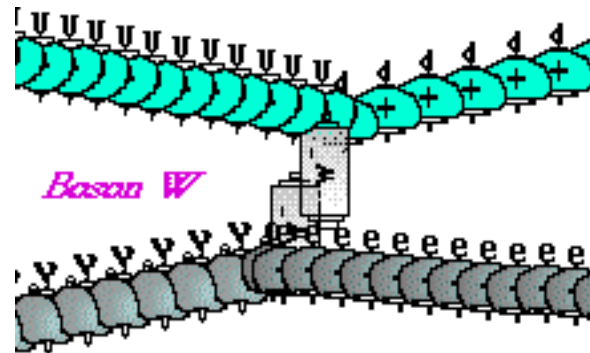
## Quantités conservées :

- nombres quantiques respectés ou ignorés

# Interactions élémentaires

## Echange de bosons vecteurs :

- transfert d'énergie et d'un certains nombres de caractéristiques physique d'une particule à l'autre

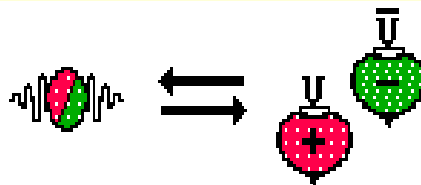


échange d'un boson W  
entre un quark et un  
neutrino

## Création ou destruction de particules :

- ces créations et annihilation passent par l'intermédiaire des mêmes bosons vecteurs

Gluon  $\longleftrightarrow$  Quark-antiquark



annihilation d'un gluon en  
un quark et un anti-quark  
(la réaction est réversible)

# L'interaction électromagnétique

Agit sur les particules portant une charge électrique

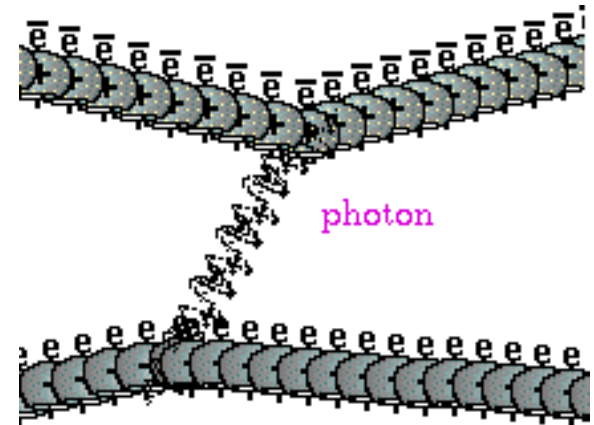
– pas sur les neutrinos !

Véhiculée par les photons

– les photons ont une masse nulle

A très longue portée

Domine à l'échelle de l'atome



# L'interaction forte

Agit sur les particules portant une charge de couleur

- pas sur les leptons !

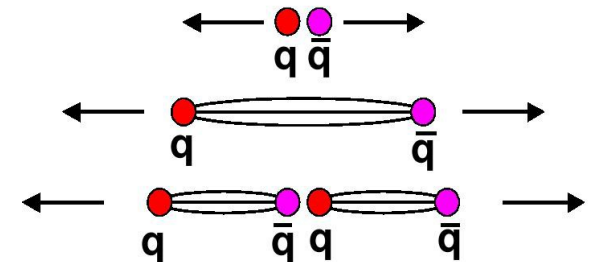
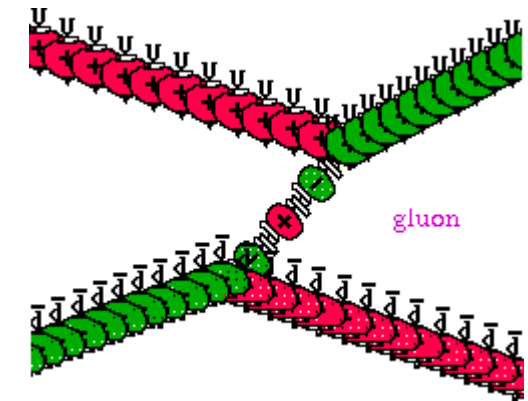
Véhiculée par les gluons

- de masse nulle
- portent une couleur et une anti-couleur
- les gluons peuvent interagir entre eux

Très intense et de très courte portée ( $\sim 1$  fermi)

- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fermi)
- quand l'énergie disponible est suffisante, de nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m^q$ )

S'exerce à l'intérieur des noyaux



as energy decreases... hadrons freeze out



# L'interaction faible

## Agit sur toutes les particules

- seule force ressentie par les neutrinos !

## Véhiculée par les bosons $Z^0$ , $W^+$ et $W^-$

- extrêmement massifs

## Porté quasi nulle ( $10^{-3}$ fermi)

## Peut changer la nature (saveur) d'une particule

- ne conserve pas le type des particules (peut changer un  $u$  en  $d$  ou un  $e$  en  $\nu_e$ )

# Focus : la désintégration du $Z^0$

$Z^0$  est neutre

Conservation de la charge  $\Rightarrow$

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

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

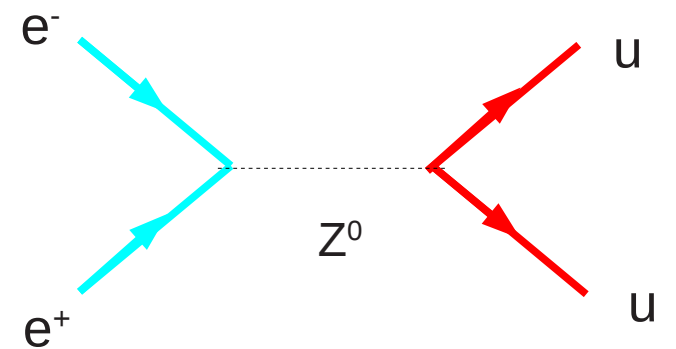
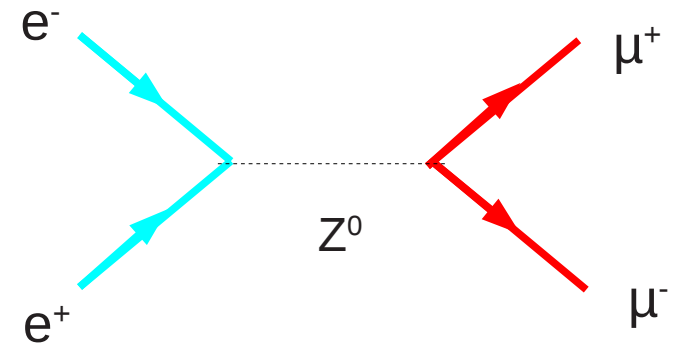
$$\rightarrow \tau^+ \tau^- : +1 - 1 = 0$$

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

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

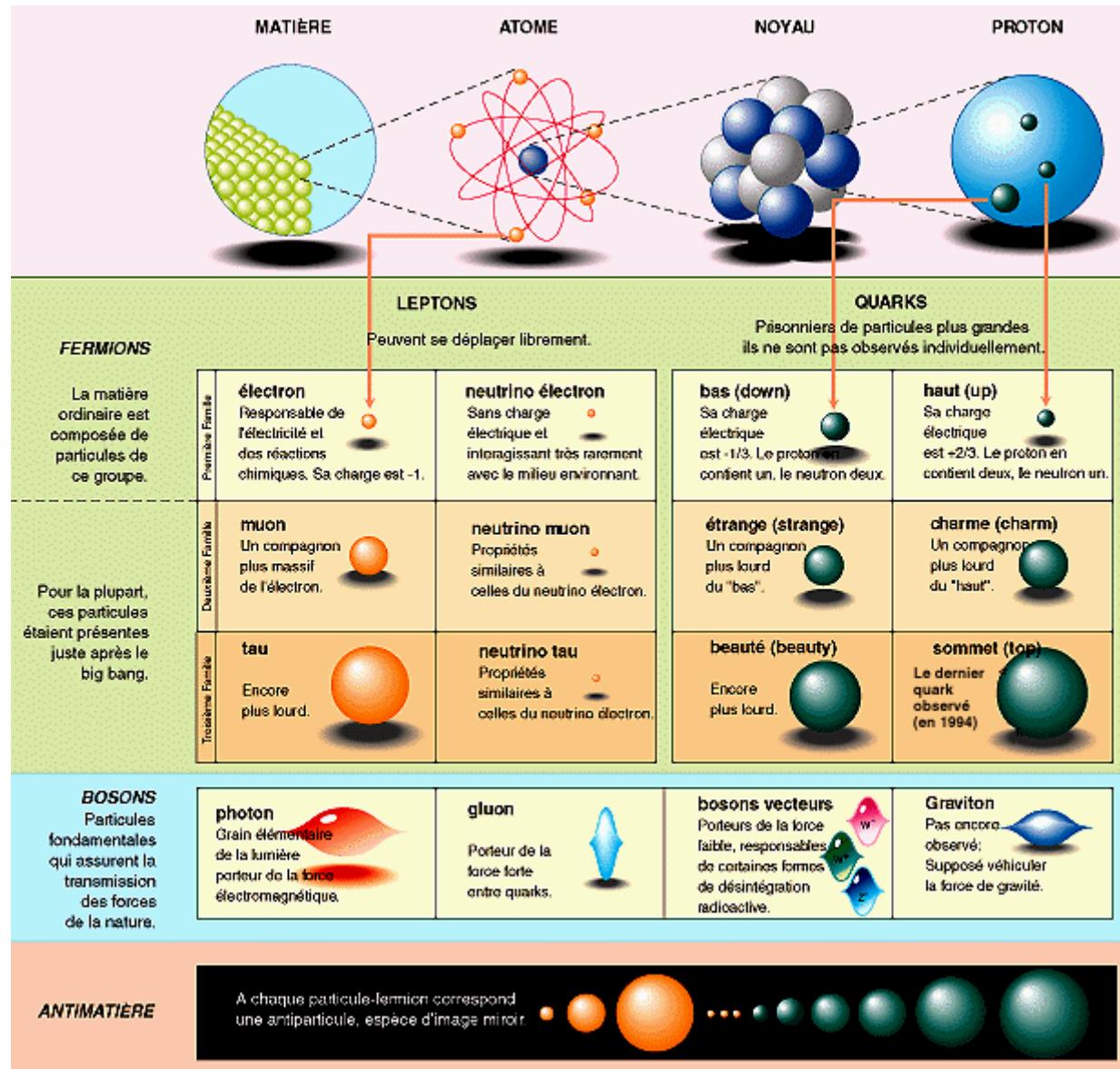
$$\rightarrow \nu \bar{\nu} : 0 + 0 = 0$$

Plusieurs mode de désintégration possibles.





# Résumé



Conclusion

# Les questions en suspens

Le Modèle Standard 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 :

→ 95% 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