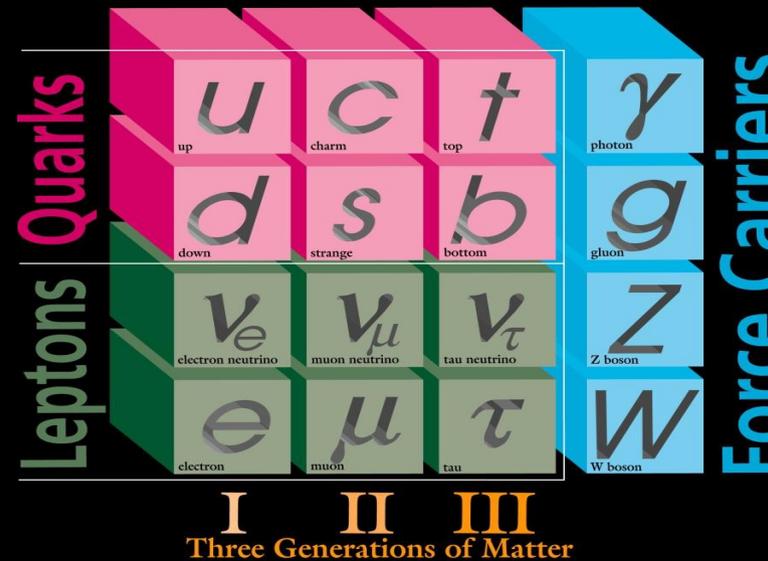


# Introduction à la physique des particules élémentaires

## ELEMENTARY PARTICLES



Julien Cogan

# Sommaire

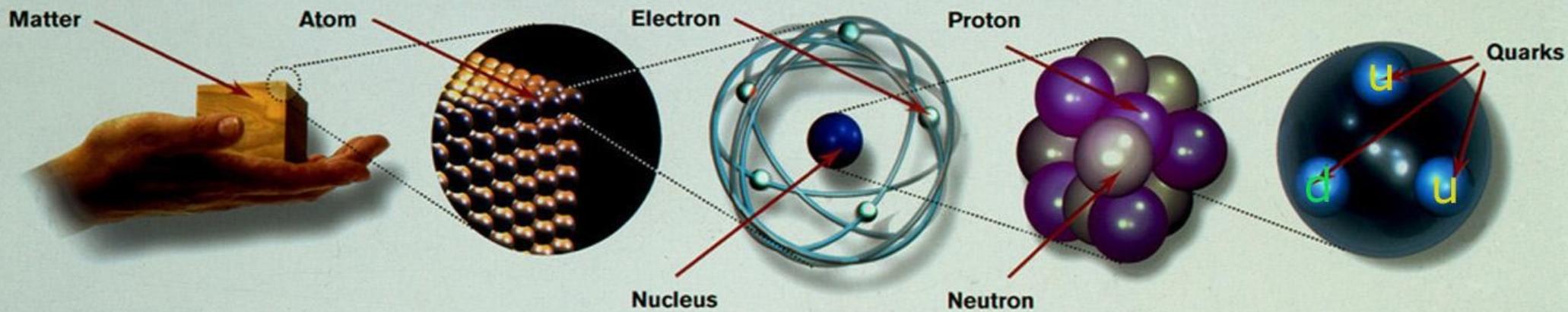
Descente vers l'infiniment petit : structure la matière ordinaire

Le Modèle Standard de la physique des particules

Illustrations

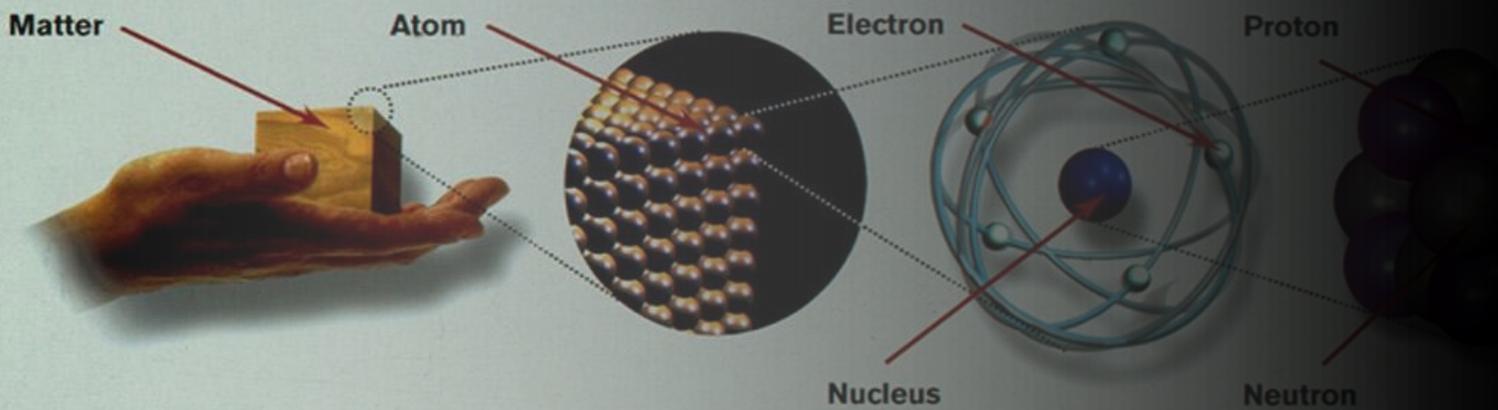
Observations

Conclusion

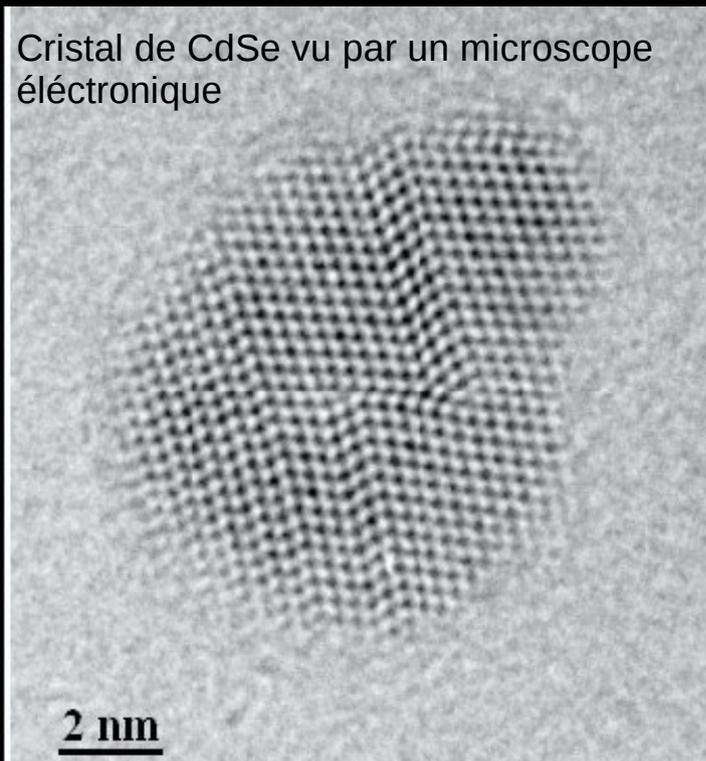


# Descente vers l'infiniment petit

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



Cristal de CdSe vu par un microscope électronique

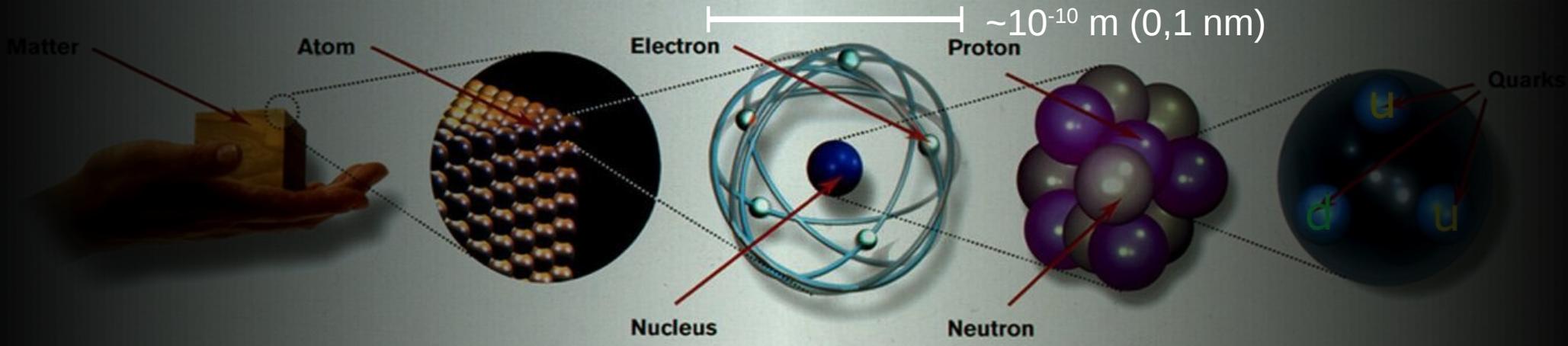


La matière qui nous entoure tient ses propriétés des molécules qui la composent.

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 |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|--------|-----|-----|---------|-----|-----|--------|-----|----|----------|----|----|----|----|----|----|----|
| * Lanthanides                             |    | Ce     | Pr  | Nd  | Pm      | Sm  | Eu  | Gd     | Tb  | Dy | Ho       | Er | Tm | Yb | Lu |    |    |    |
| # Actinides                               |    | Th     | Pa  | U   | Np      | Pu  | Am  | Cm     | Bk  | Cf | Es       | Fm | Md | No | Lr |    |    |    |
| 1   | 1  | 2      |     |     |         |     |     |        |     |    | 13       | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |    |    |
| 1   | H  |        |     |     |         |     |     |        |     |    |          |    |    |    |    | He |    |    |
| 2   | Li | Be     |     |     |         |     |     |        |     |    | B        | C  | N  | O  | F  | Ne |    |    |
| 3   | Na | Mg     |     |     |         |     |     |        |     |    | Al       | Si | P  | S  | Cl | Ar |    |    |
| 4   | K  | Ca     | Sc  | Ti  | V       | Cr  | Mn  | Fe     | Co  | Ni | Cu       | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| 5   | Rb | Sr     | Y   | Zr  | Nb      | Mo  | Tc  | Ru     | Rh  | Pd | Ag       | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  | Xe |
| 6   | Cs | Ba     | La* | Hf  | Ta      | W   | Re  | Os     | Ir  | Pt | Au       | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| 7   | Fr | Ra     | Ac# | Rf  | Db      | Sg  | Bh  | Hs     | Mt  |    |          |    |    |    |    |    |    |    |
|   | 87 | 88     | 89  | 104 | 105     | 106 | 107 | 108    | 109 |    |          |    |    |    |    |    |    |    |

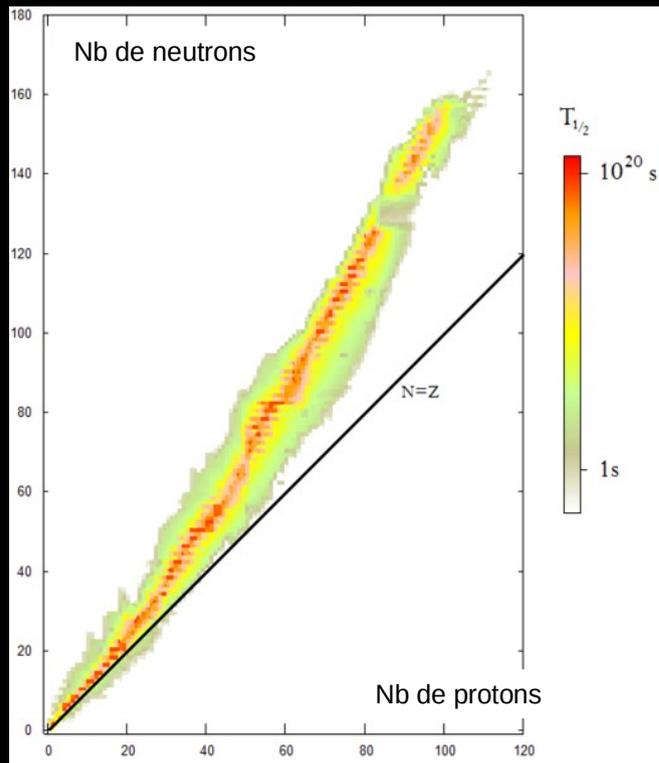
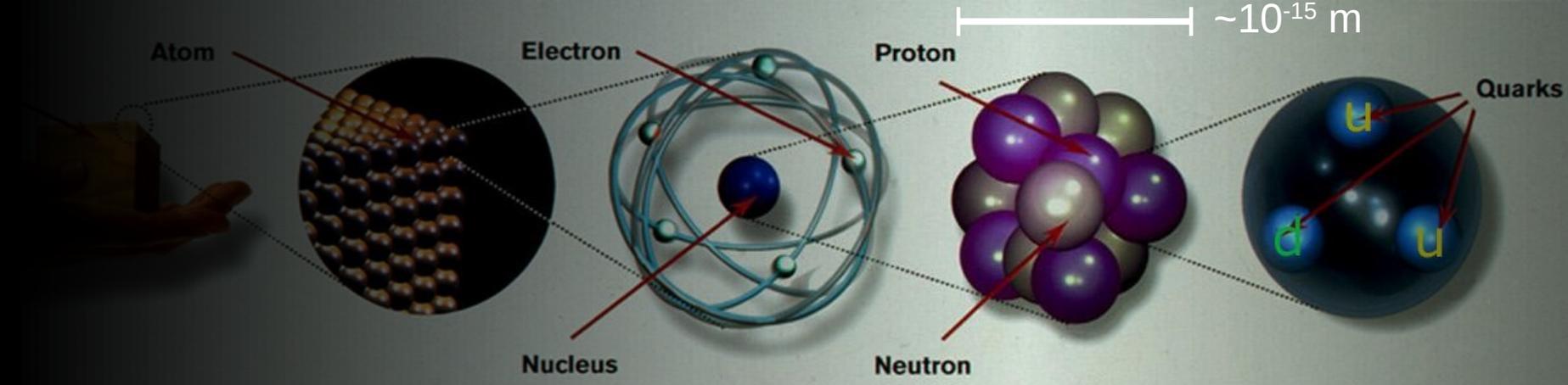
## Atomes composés :

- d'un noyau
  - ↳  $\sim 100\ 000 \times$  plus petit que l'atome
- d'un nuage d'électrons en orbite autour du noyau
  - ↳ régit les interactions entre atomes ou molécules

→ **interaction électromagnétique**

*Qu'est-ce qui différencie ces atomes ?*

→ structure du noyau



**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**

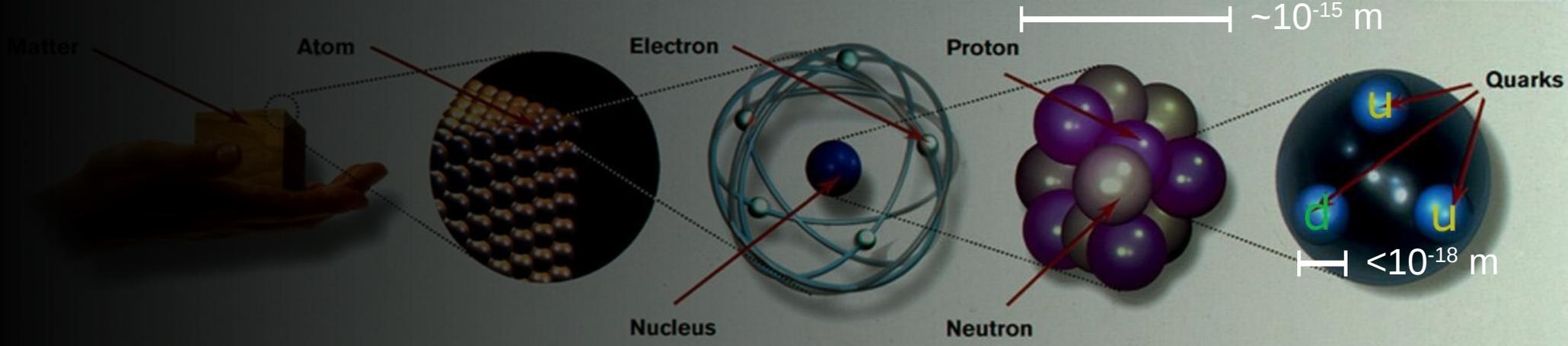
La stabilité du noyau dépend du nombre de protons et du nombre de neutrons qui le composent.

Certains noyaux instables se désintègrent en émettant un électron et un neutrino : e.g.  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e + \nu$

→ **interaction faible**

*Qu'est-ce qui différencie les protons et les neutrons ?*

→ structure du nucléon



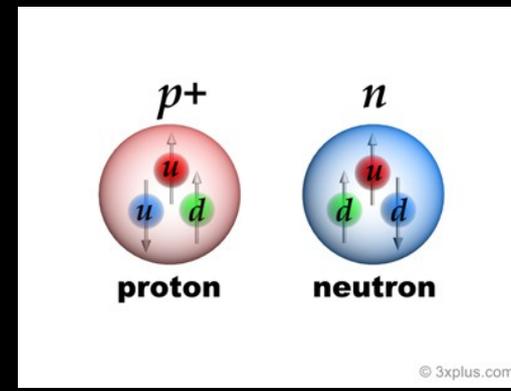
**Nucléons** (protons & neutrons) sont constitués de quarks

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

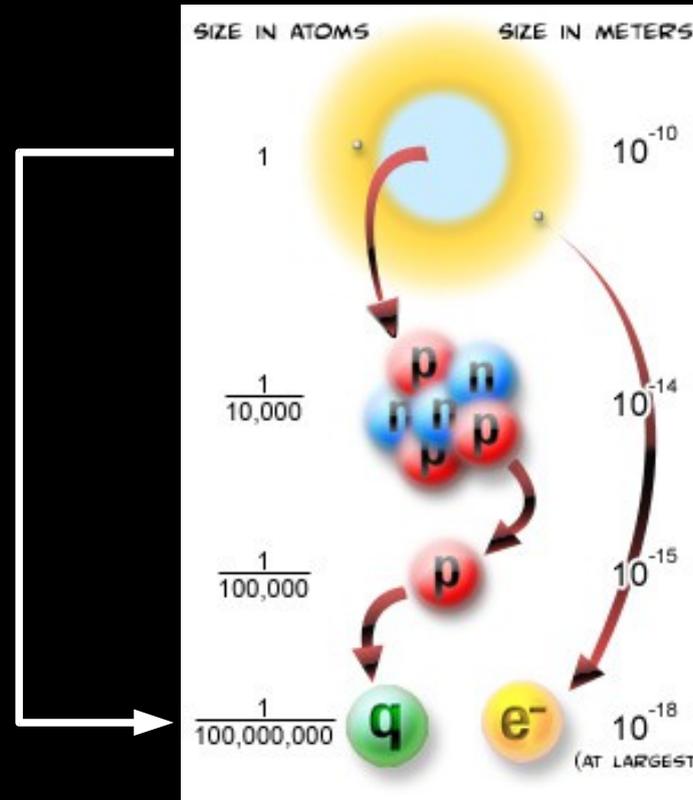


Les quarks sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'**interaction forte**

# 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 !)

# 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)

→ **Est-ce tout ?**

# Descente vers l'infiniment petit

## La matière ordinaire

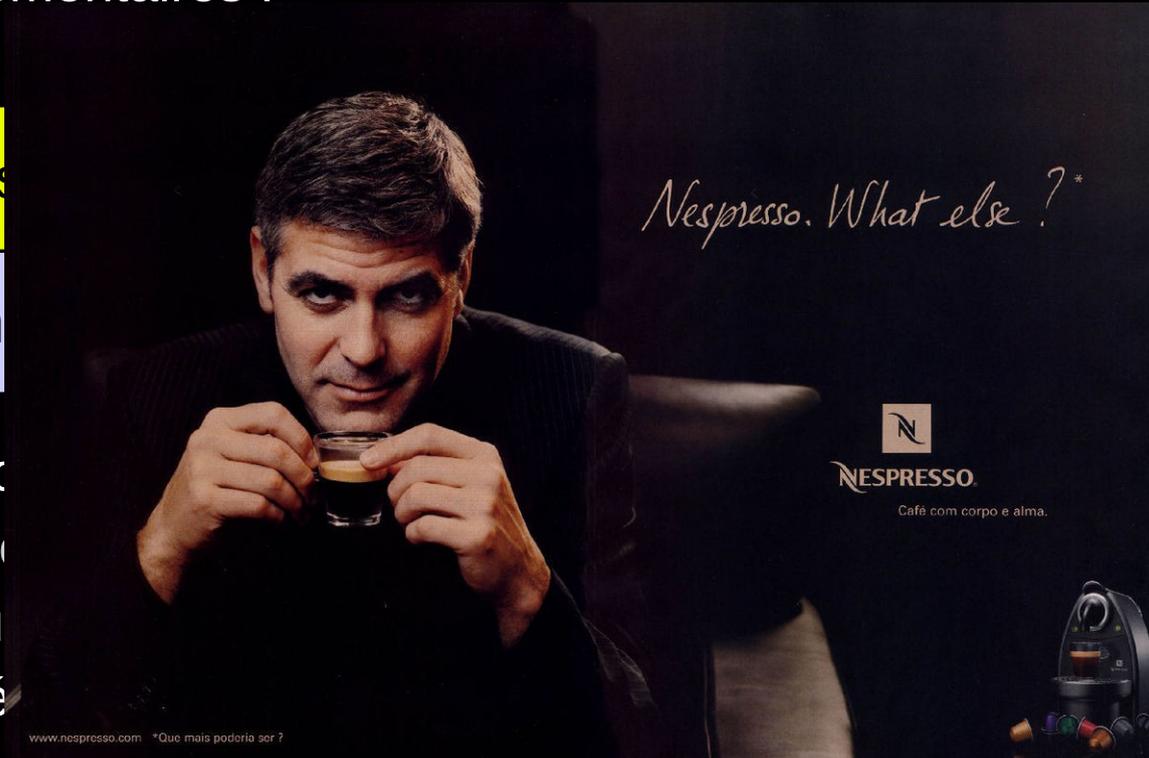
Constituants élémentaires :

Quarks

Lepton

Interactions fondamentales :

- gravitation (très faible)
- faible (agit sur les leptons et les quarks)
- électromagnétique (agit sur les leptons et les quarks)
- forte (agit sur les quarks seulement)



forte

)  
nent)

→ **What else ?**

# Descente vers l'infiniment petit

## Autres formes 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 (beauty)          | b          |
| Leptons | -1   | electron                 | e       | muon                     | $\mu$   | tau                      | $\tau$     |
|         | 0    | neutrino                 | $\nu_e$ | neutrino muon            | $\nu_e$ | neutrino tau             | $\nu_\tau$ |

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 !**

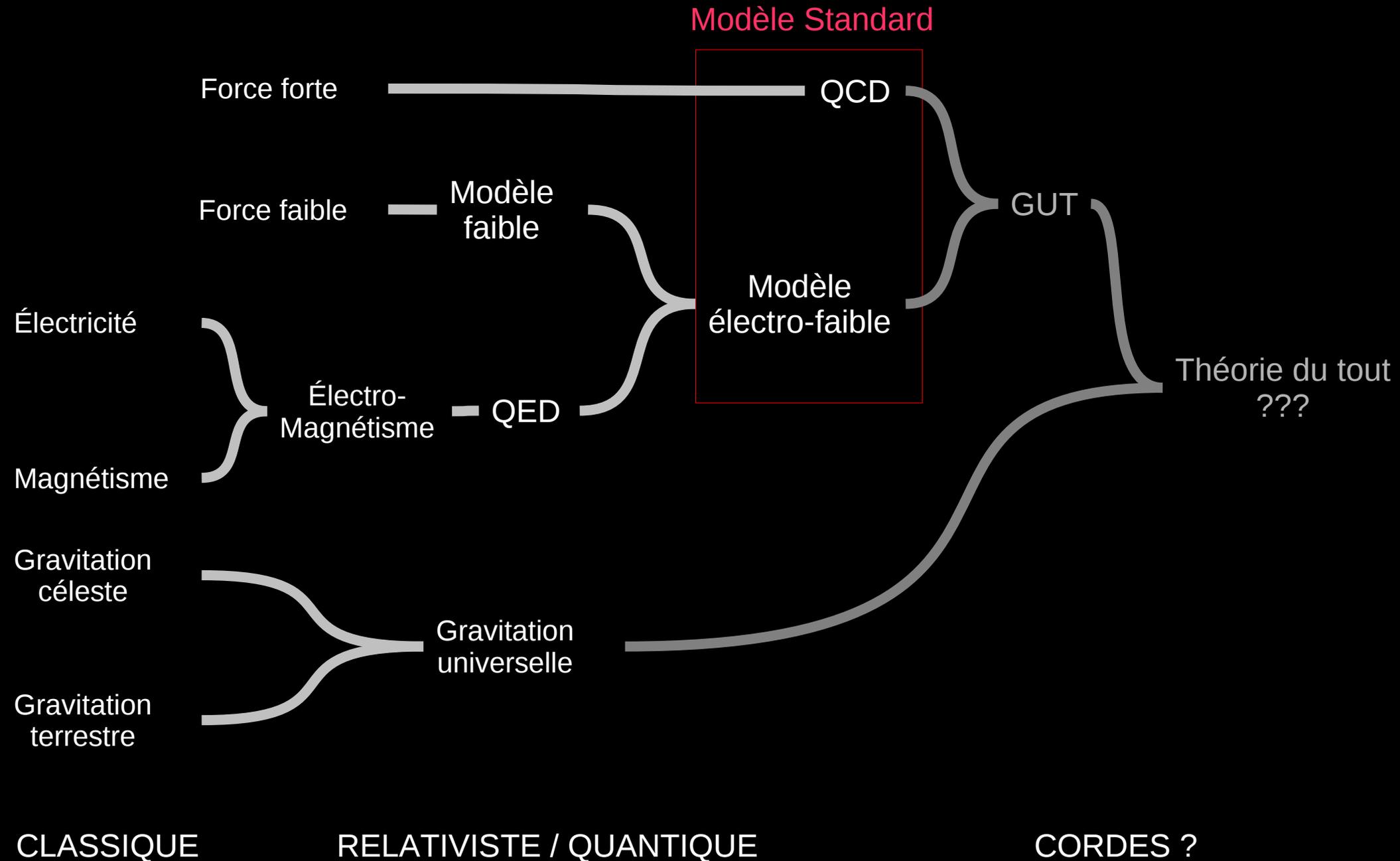
→ dont les particules sont :

‣ plus lourdes

‣ instables : vont se désintégrer spontanément en donnant des particules plus légères

# Le Modèle Standard

# Théories fondamentales

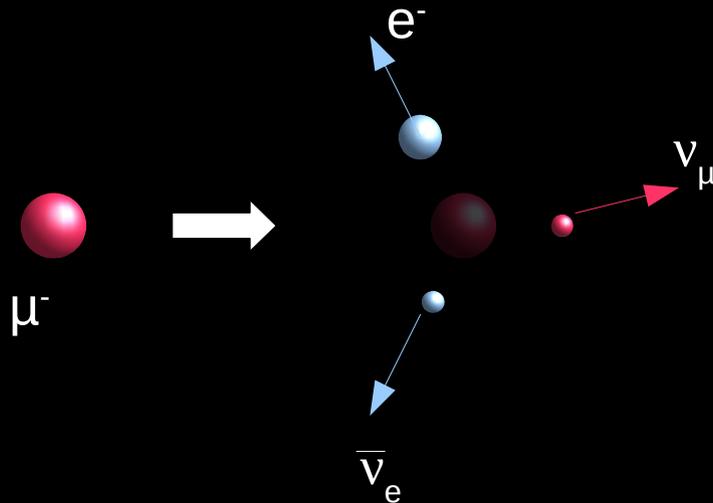


# Le Modèle Standard

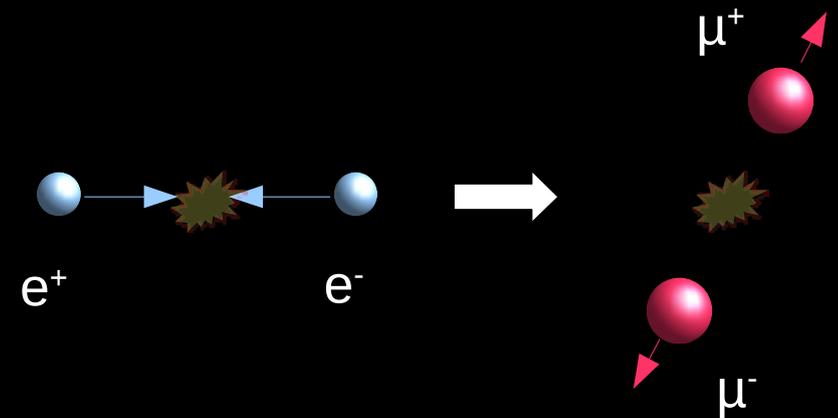
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique* **relativiste**

Relativiste : adaptée aux vitesses proches de celle de la lumière

→  $E=mc^2$  : équivalence entre matière et énergie



Désintégration du muon



Collision de particules :  
annihilation d'une paire d'électrons ( $e^+e^-$ )  
et création d'une paire de muons ( $\mu^+\mu^-$ )

→ **En mettant en jeu suffisamment d'énergie cinétique, on peut créer des particules très lourdes !**

# Le Modèle Standard

Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*

Quantique : adaptée au monde microscopique

→ dualité onde-corpuscule

↘ onde : effet d'interférence

–  $\lambda$  : longueur d'onde

↘ corpuscule : comportement individuel

–  $P$  : quantité de mouvement

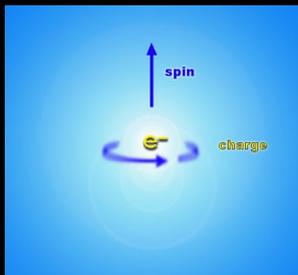
↘ dualité :

–  $\lambda = h/P$  ( $h$  = constante de Planck)

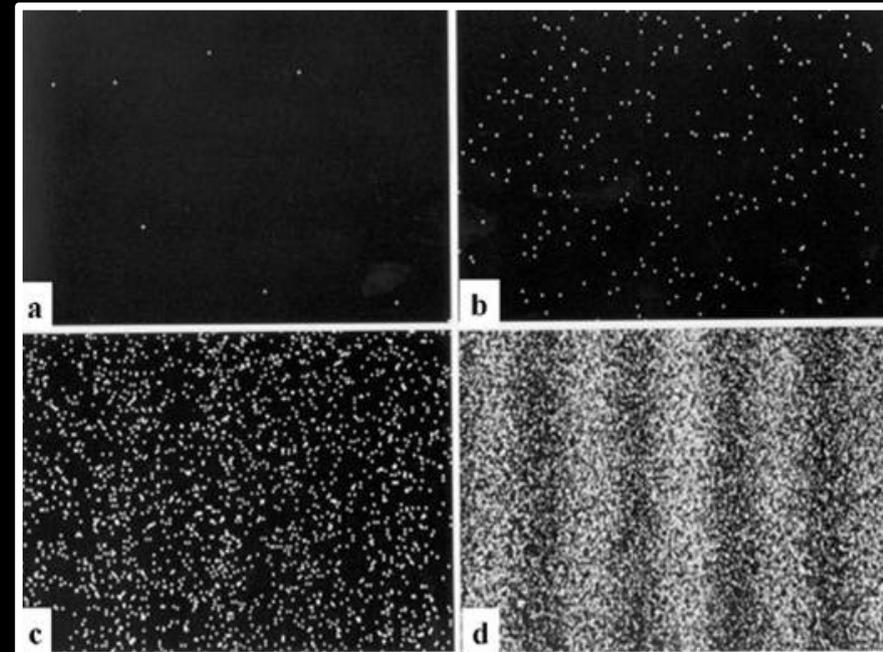
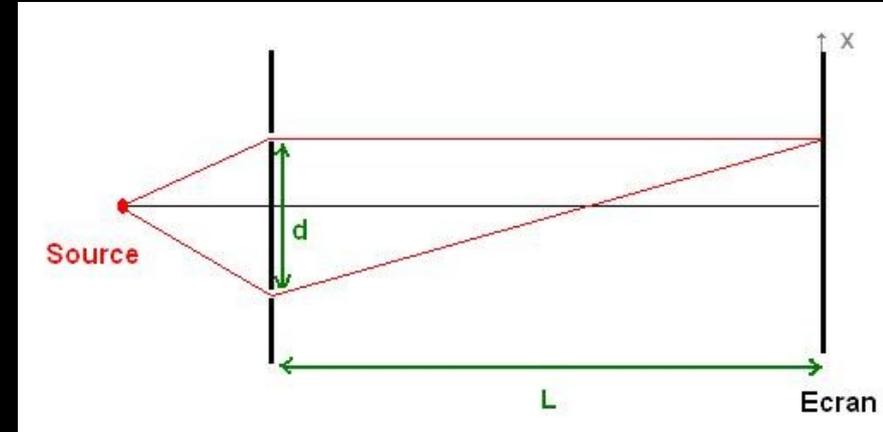
→ **Plus l'énergie est élevée, plus la longueur d'onde est faible (plus on sera sensible à des détails petits)**

→ propriétés purement quantique

↘ spin :



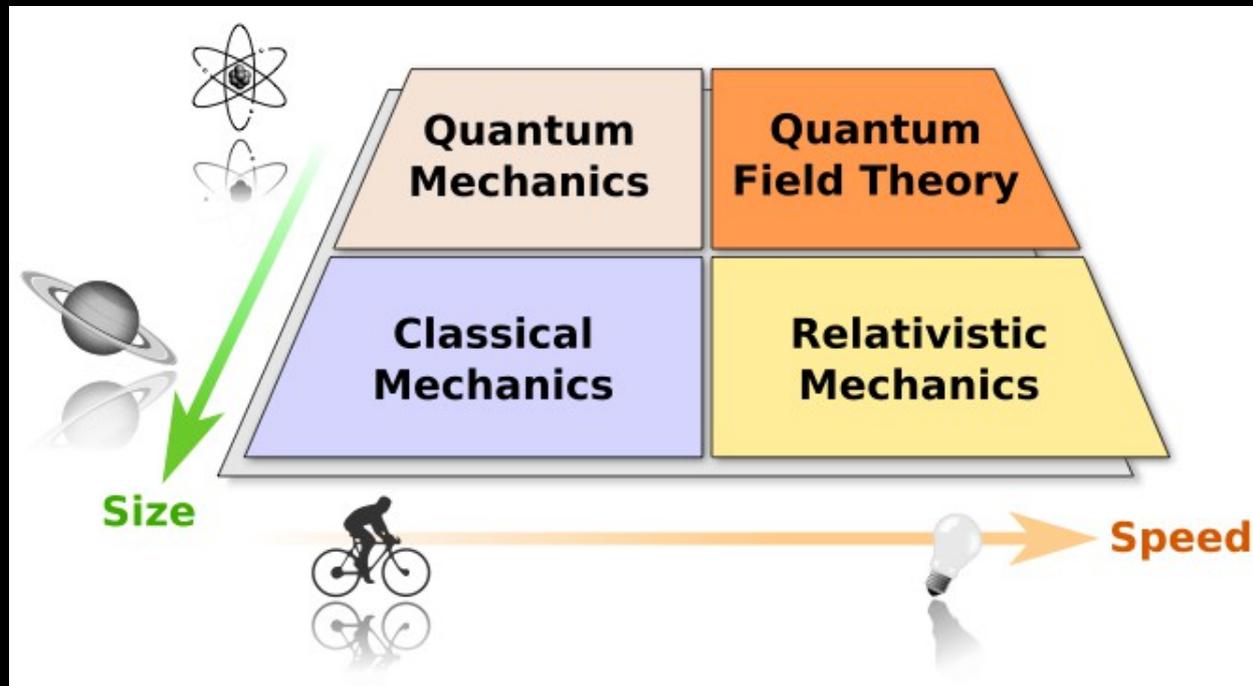
assimilable à une rotation intrinsèque d'une particule (moment angulaire)



Expérience des fentes d'Young

# Le Modèle Standard

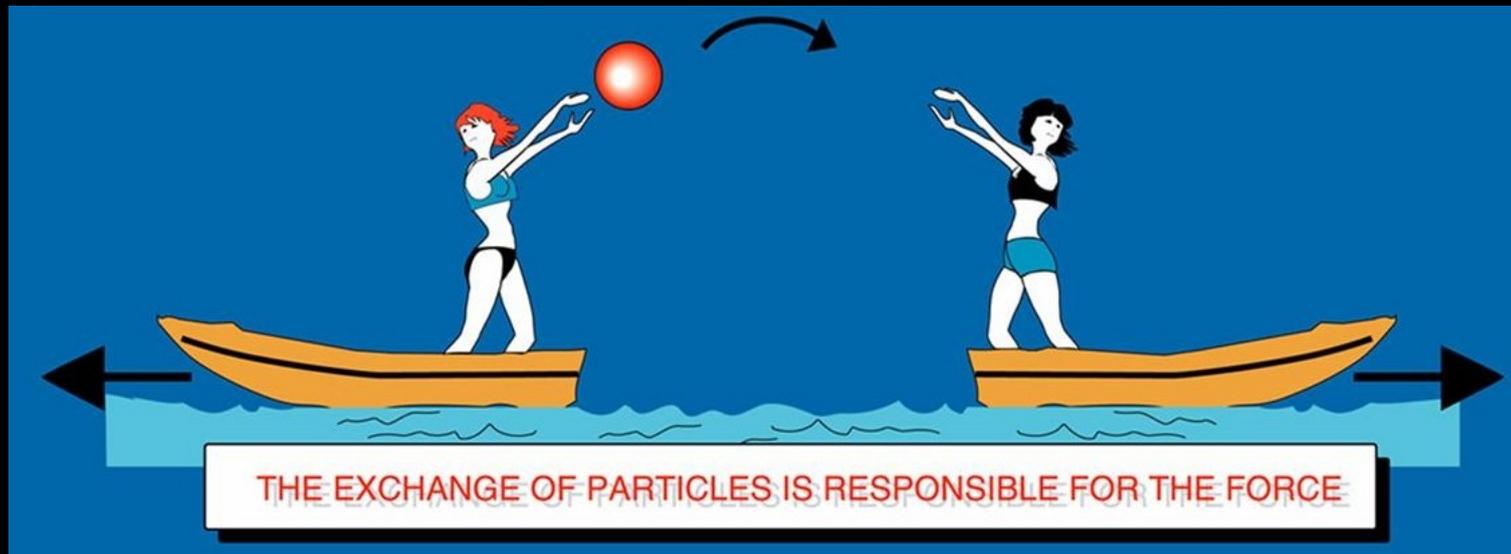
Théorie sous-jacente : *mécanique quantique relativiste*



# Le Modèle Standard

## Les interactions

Les vecteurs des interactions :



→ **les forces élémentaires sont véhiculées par des particules**

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

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

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

## Particles

### Leptons

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

### Quarks

| Particle | Electric Charge | Particle | Electric Charge |
|----------|-----------------|----------|-----------------|
| Bottom   | -1/3            | Top      | 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)** 

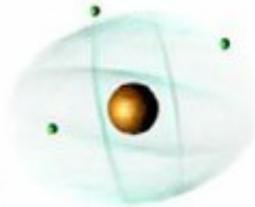
**Quarks** 

**Mesons Baryons** 

**Nucléi** 

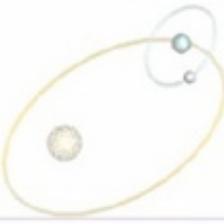
### Electromagnetic

**Photon** 

**Atoms Light Chemistry Electronics** 

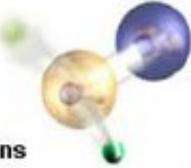
### Gravitational

**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

## L'antimatière

A toute ces particules, il faut adjoindre une **antiparticule**, c.à.d. une particule :

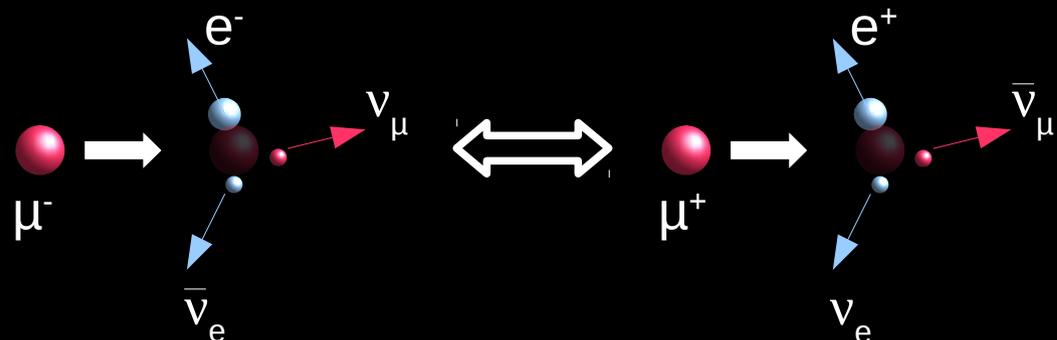
- de même masse et de même spin
- autres nombres quantiques renversés
  - e.g. : charge électrique
- notation courante :  $\bar{b}$  antiparticule associée au quark  $b$

Certaines particules sont leurs propres antiparticules, e.g. :

- le photon

Les antiparticules se comportent comme les particules (vu dans un miroir)

- en première approximation
- en réalité, la symétrie n'est pas parfaite
  - sujet d'étude très actif



# 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 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Joules

→ Multiples usuels :

□ 1 keV =  $10^3$  eV

□ 1 MeV =  $10^6$  eV

□ 1 GeV =  $10^9$  eV

□ 1 TeV =  $10^{12}$  eV

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

→  $1 \text{ eV}/c^2 = 1,8 \cdot 10^{-36}$  kg

→ exemples :

□ proton :  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg = 938 MeV/ $c^2$

□ électron :  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg = 0.511 MeV/ $c^2$

# Le Modèle Standard

## La masse des particules

### FERMIONS

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

#### Leptons spin = 1/2

#### Quarks spin = 1/2

|      | Flavor                     | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup>            | Electric<br>charge |        |
|------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------|
| ~ 0  | $\nu_L$ lightest neutrino* | $(0-0.13)\times 10^{-9}$              | 0                  |        |
| 1    | <b>e</b> electron          | 0.000511                              | -1                 |        |
| ~ 0  | $\nu_M$ middle neutrino*   | $(0.009-0.13)\times 10^{-9}$          | 0                  |        |
| 200  | $\mu$ muon                 | 0.106                                 | -1                 |        |
| ~ 0  | $\nu_H$ heaviest neutrino* | $(0.04-0.14)\times 10^{-9}$           | 0                  |        |
| 3500 | $\tau$ tau                 | 1.777                                 | -1                 |        |
|      | Flavor                     | Approx.<br>Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |        |
|      | <b>u</b> up                | 0.002                                 | 2/3                | 4      |
|      | <b>d</b> down              | 0.005                                 | -1/3               | 10     |
|      | <b>c</b> charm             | 1.3                                   | 2/3                | 3000   |
|      | <b>s</b> strange           | 0.1                                   | -1/3               | 200    |
|      | <b>t</b> top               | 173                                   | 2/3                | 340000 |
|      | <b>b</b> bottom            | 4.2                                   | -1/3               | 8000   |

# Le Modèle Standard

## La masse des particules

### BOSONS

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

#### Unified Electroweak spin = 1

| Name  | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|---|----------------------------|--------------------|
| <br>photon                       | 0                          | 0                  |
| <br>W <sup>-</sup>              | 80.39                      | -1                 |
| <br>W <sup>+</sup><br>W bosons | 80.39                      | +1                 |
| <br>Z boson                    | 91.188                     | 0                  |

#### Strong (color) spin = 1

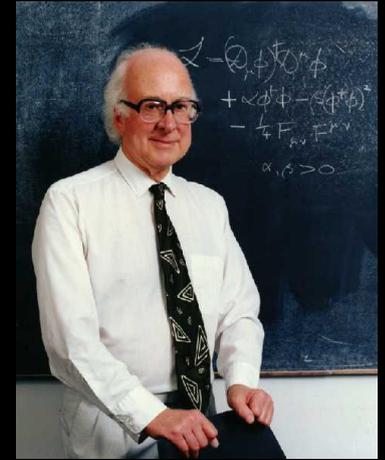
| Name   | Mass<br>GeV/c <sup>2</sup> | Electric<br>charge |
|--|----------------------------|--------------------|
| <br>gluon | 0                          | 0                  |

# Le Modèle Standard

## L'origine des masses

Dans la théorie, les particules sont sans masse.

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



Le physicien britannique  
Peter Higgs



# Le Modèle Standard

## L'origine des masses

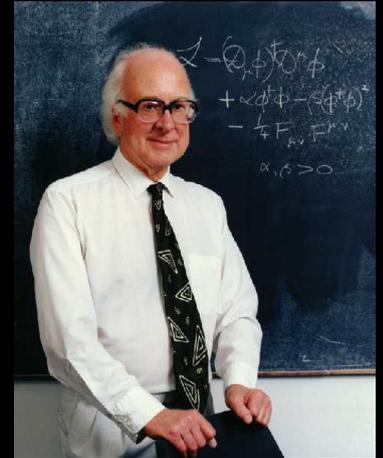
Dans la théorie, les particules sont sans masse.

Pour les faire apparaître : mécanisme de Higgs

Implique l'existence d'un bosons supplémentaire :

→ le boson de Higgs

Pas encore observé mais activement recherché



Le physicien britannique  
Peter Higgs



# Le Modèle Standard

Tout est là :

→ la **matière** : les fermions fondamentaux

- ↘ 6 quarks + 6 antiquarks
- ↘ 6 leptons + 6 antileptons

→ les vecteurs des **interactions**

- ↘ 8 gluons pour l'interaction forte
- ↘  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $\gamma$  pour l'interaction électrofaible

→ le **boson de Higgs**

- ↘ par lequel les particules acquièrent leur masse
- ↘ le chaînon manquant

Particules déjà observées

Mesures

- de plus en plus précises
- s'accordent avec les prédictions du modèle (jusqu'à présent)

Pas encore vu !

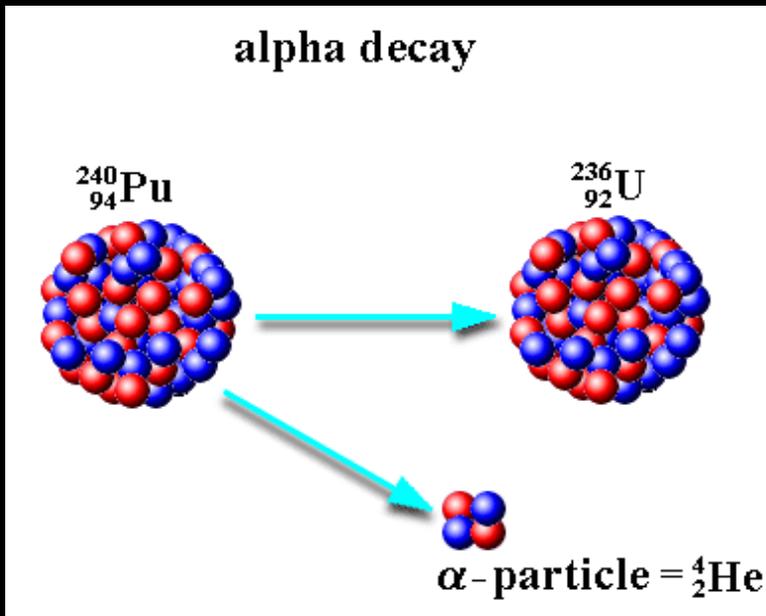
Activement recherché

# Illustrations

# Désintégrations

Qu'est-ce qu'une désintégration ?

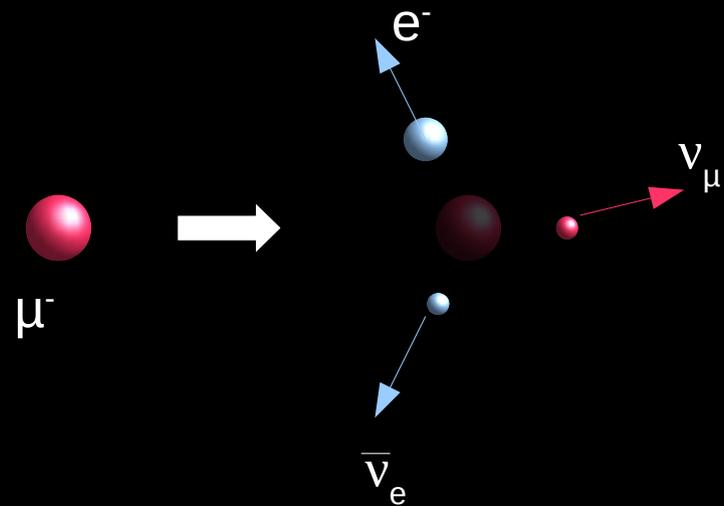
Désintégration nucléaire



Séparation des nucléons :

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

Désintégration d'une particule élémentaire



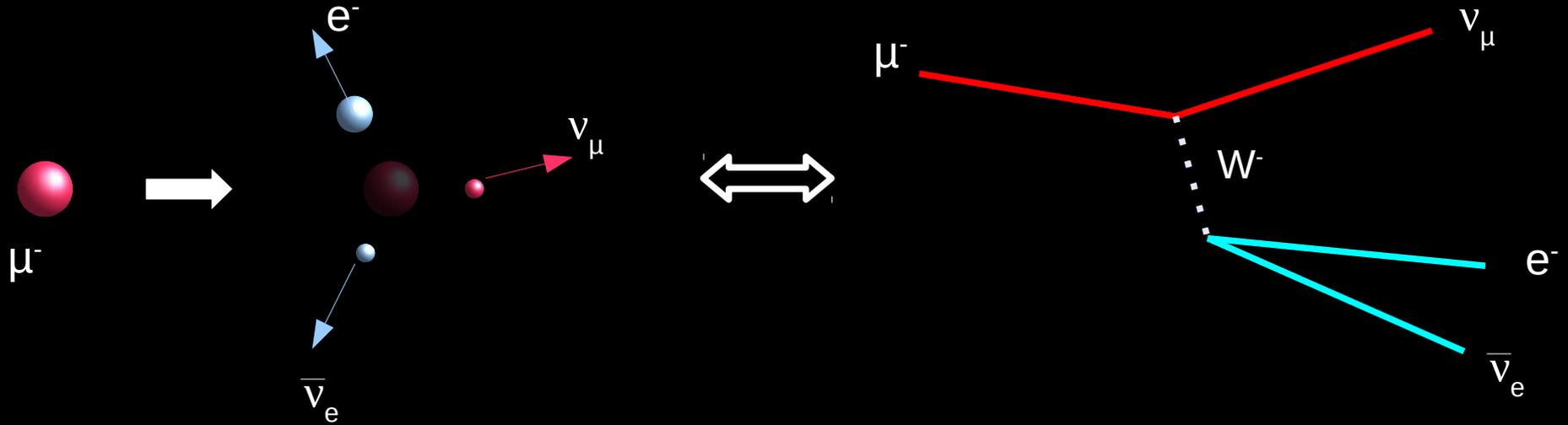
Transformation de la particule initiale :

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

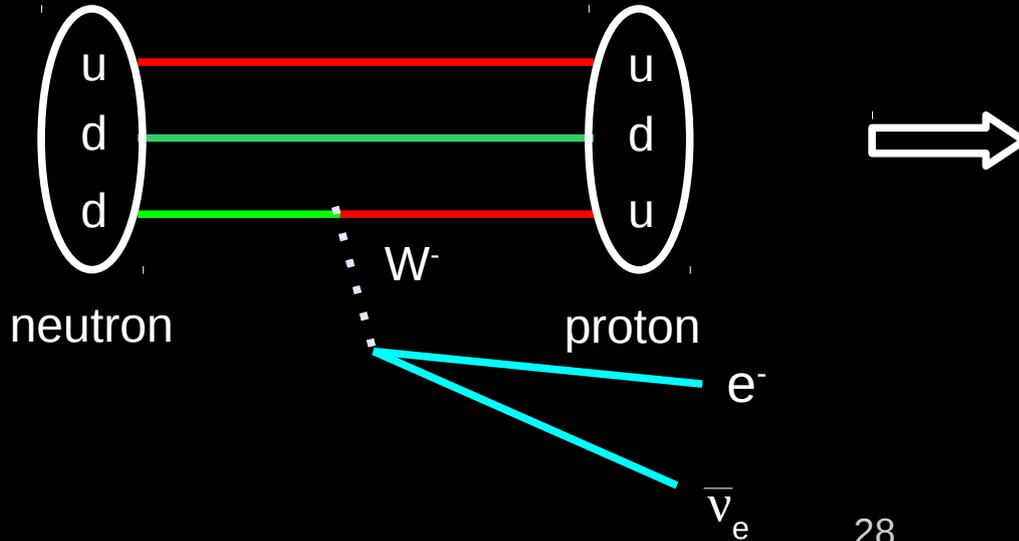
# Désintégrations

## Exemples

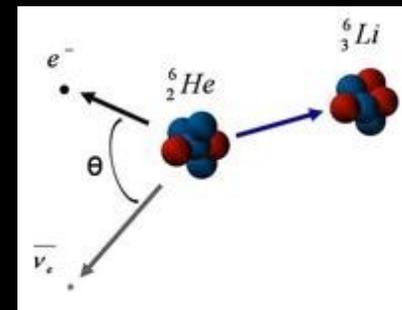
Désintégration du muon :  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu e^- \bar{\nu}_e$



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 (electro-)faible en action

Loi de conservation :

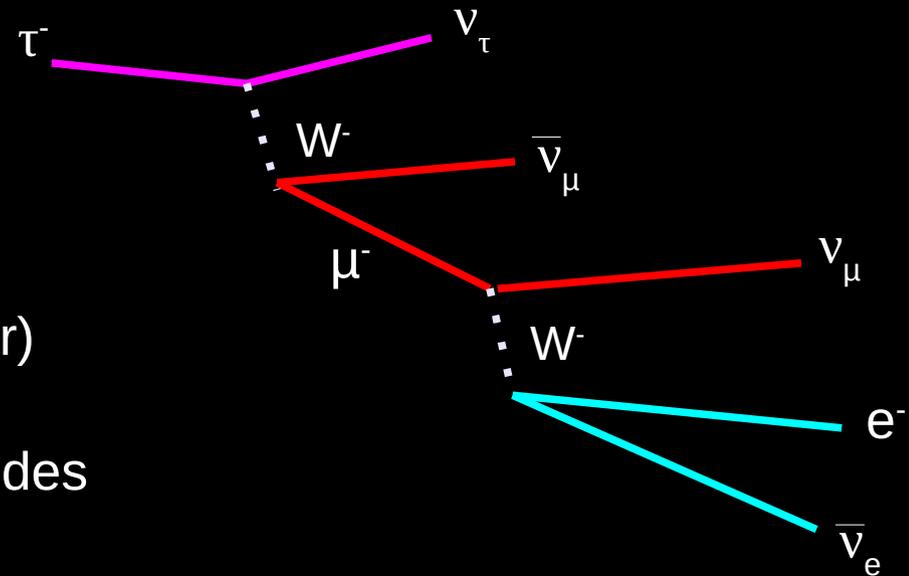
→ l'énergie totale

- 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

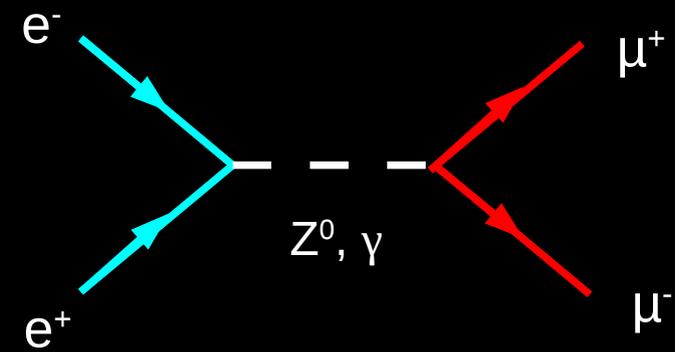
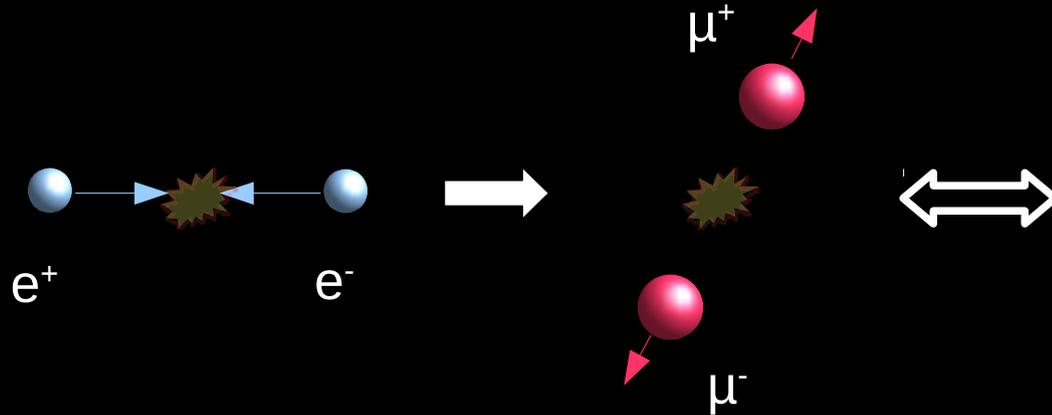
→ responsable de toute les désintégrations des particules élémentaires

- seules les plus légères sont stables

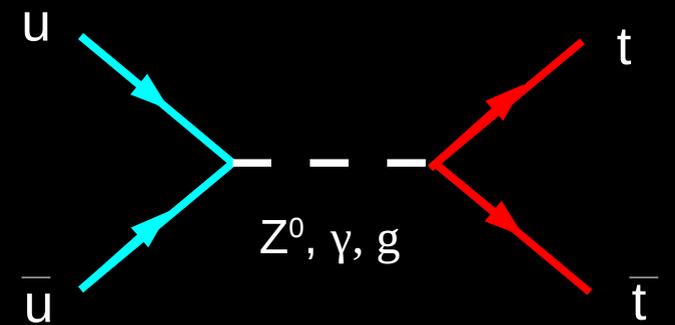
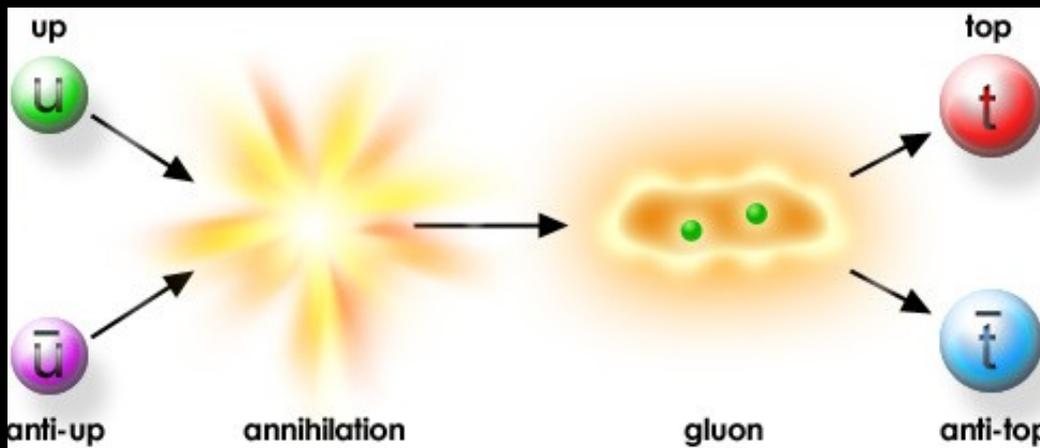
# Annihilations

## Exemples

Annihilation  $e^+e^-$  (interaction faible)



Annihilation  $q\bar{q}$



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

# Interaction forte

## Chromodynamique

Charge : couleur

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

→ les couleurs s'ajoutent vectoriellement

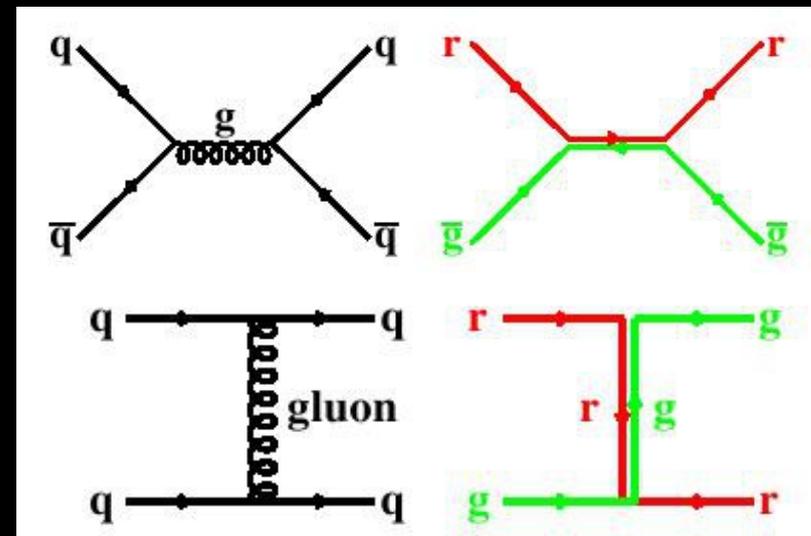
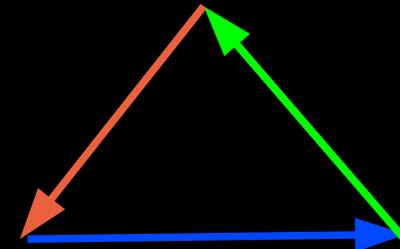
→ **B+V+R= Blanc**

→ **B+B= Blanc**

Vecteur : **gluons** (8)

→ porte une couleur et une « anticouleur »

Les couleurs sont conservées par interaction forte

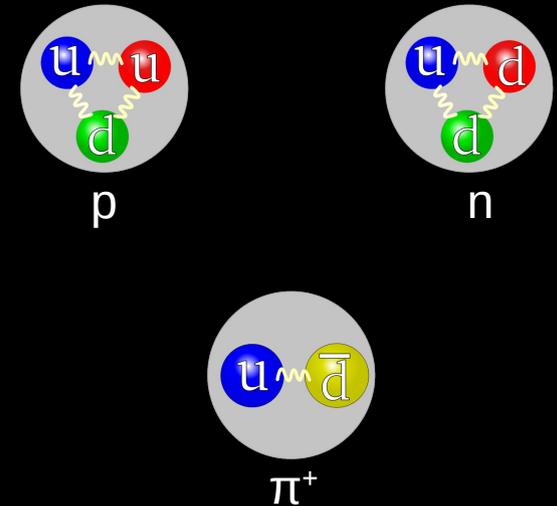


# Interaction forte

## Hadronisation

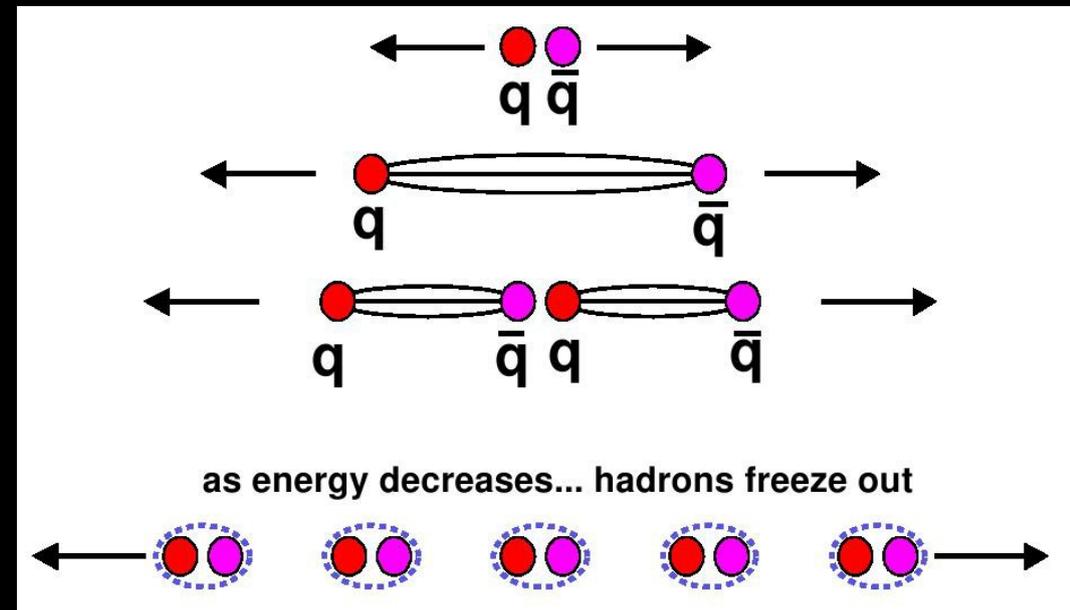
Le vide est opaque à la couleur :

- 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 :

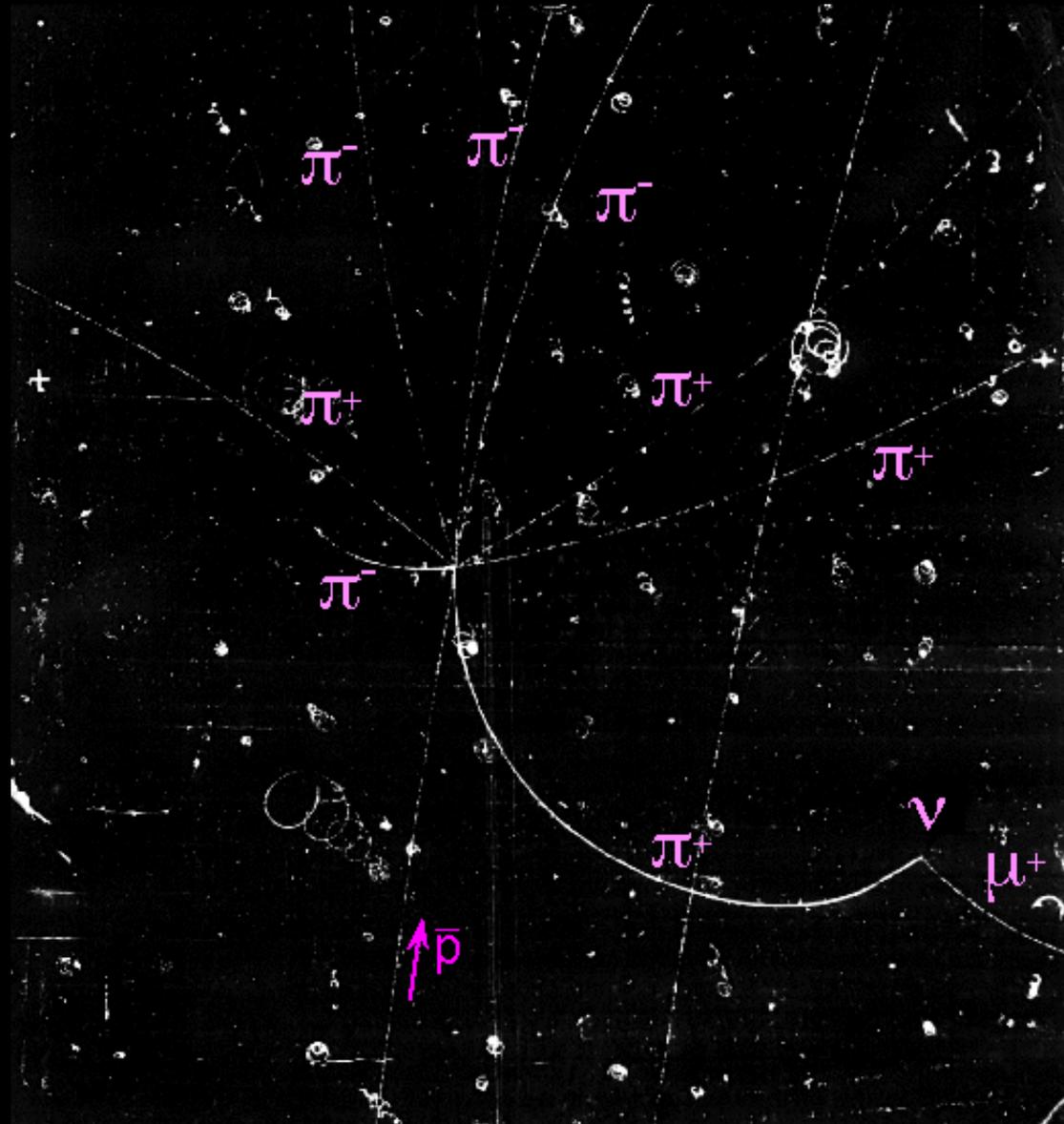
- son intensité augmente avec la distance ( 1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ( $E > 2m_q$ )



# L'interaction forte en action

En action

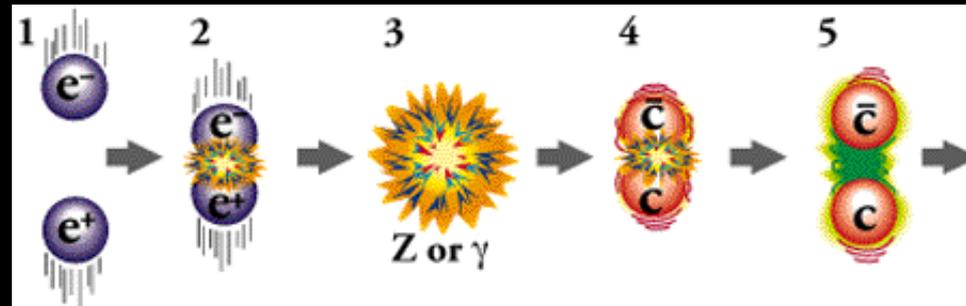
Un antiproton (projectile) s'annihile avec un proton au repos



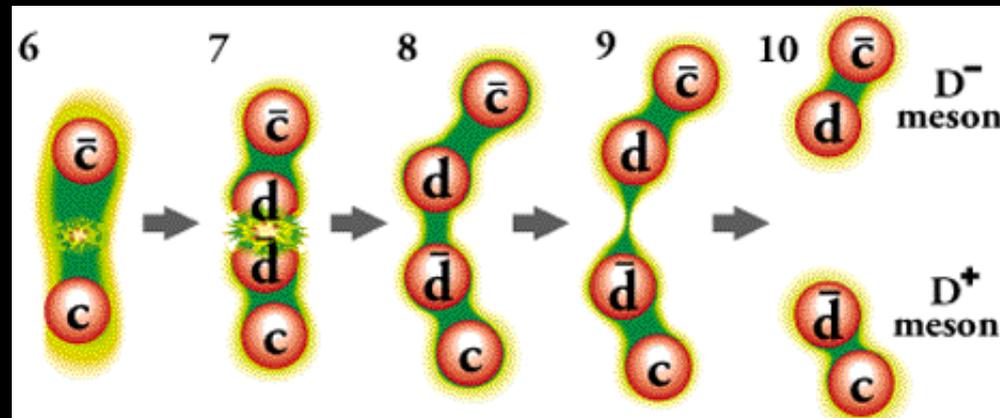
(photo de  
chambre à bulles  
)

# Un exemple complet

Annihilation électron-positron et création d'une paire de quarks (int. faible) :



Hadronisation des quarks (*int. forte*):

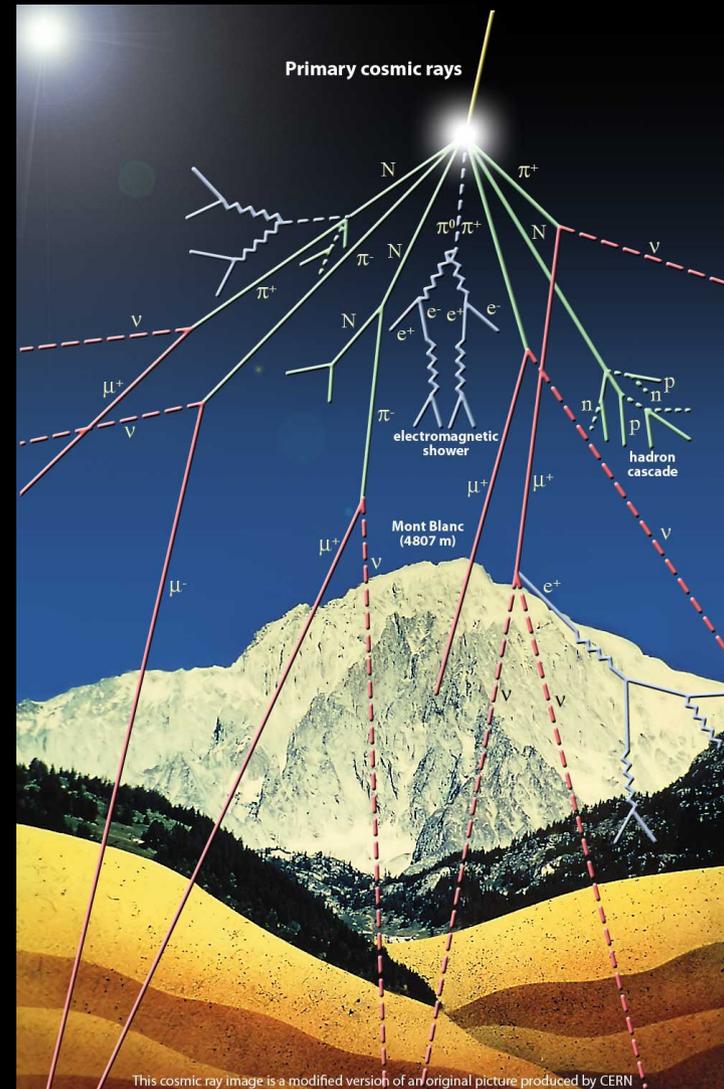


# Observation

# Création

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

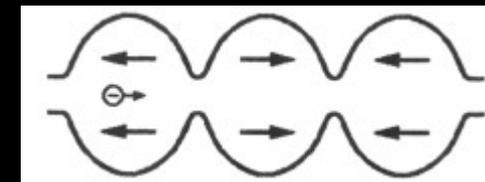
- sources naturelles :
  - ↳ e.g. rayons cosmiques



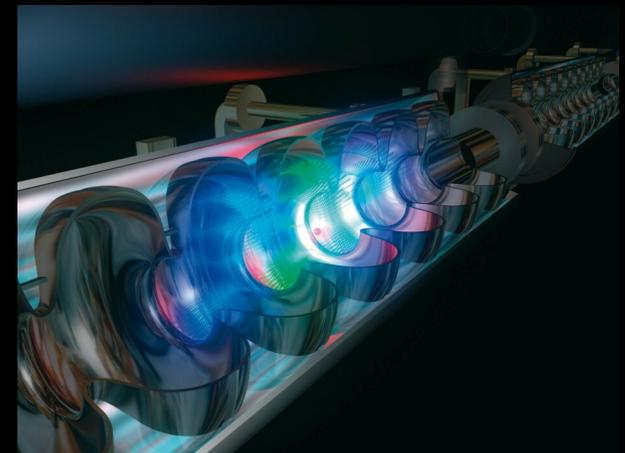
# Création

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

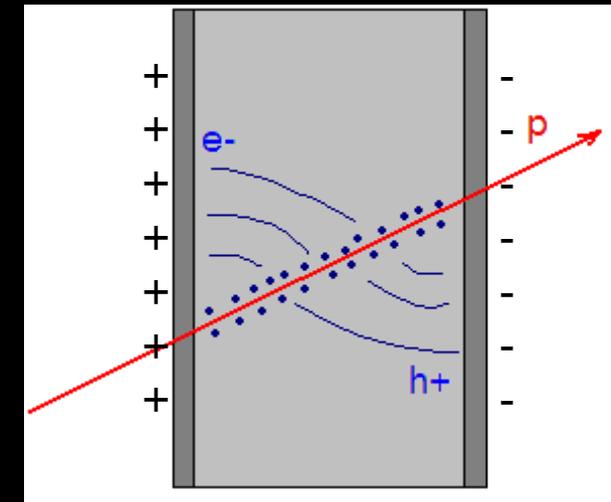


# Détection

## Principe

Détecter une particule, c'est la faire interagir dans un milieu sensible, c'est à dire, qui va rendre visible cette interaction.

- **Particules chargées** : facile, interaction électromagnétique  
principe de detection assez générale pour des particules assez énergétique :
  - milieu ionisable : création de paires  $e^-$ /ions au passage d'une particule
  - champs électrique : déplacement des  $e^-$ /ions, création d'un courant électrique
  - détection = mesure de ce courant



- **Particules neutres** : les faire interagir pour créer des particules chargées  
retour au problème précédent

# Détection

## Le détecteur classique

**Trajectographe** : au centre

ensemble d'éléments de détection permettant de reconstruire la trajectoire d'une particule (chargée) sans la perturber (ou de façon contrôlée)

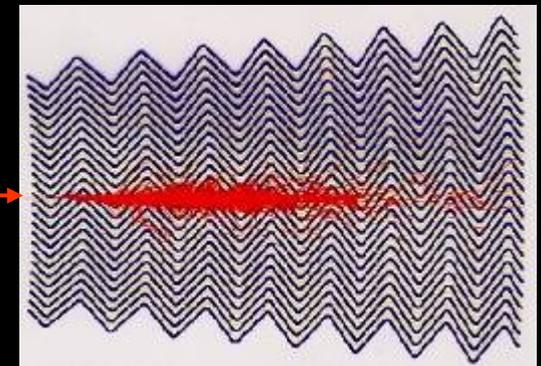
- milieu peu dense : gaz ou fine couche de silicium
- champs magnétique : courbe la trajectoire, permet la mesure de l'impulsion
- détecteur non-invasif !

**Calorimètre** : milieu dense où les particules chargées ou neutres déposent leur énergie en créant un gerbe

- électromagnétique :  $\gamma$ ,  $e^\pm$
- hadronique (plus dense, moins précis) :  $p$ ,  $n$ ,  $\pi^\pm$

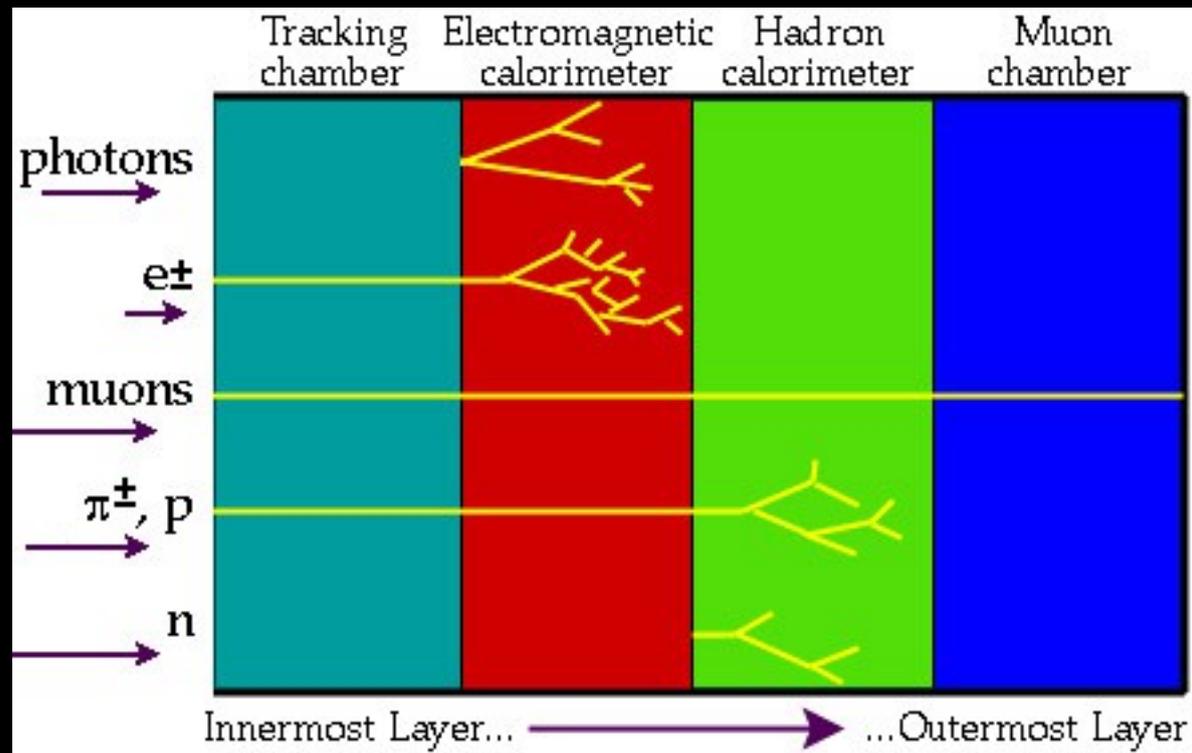
**Détecteur de muons** :

- muon : seule particule chargée capable de traverser les calorimètres
- détecteur spécifiques à l'extérieur du détecteur



# Détection

## 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 Modèle non encore observé : le 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 ?
- quid de la gravitation ?

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

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre 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)

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

# Au delà du Modèle Standard ?

Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$  !! Pour produire des particules très massive (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

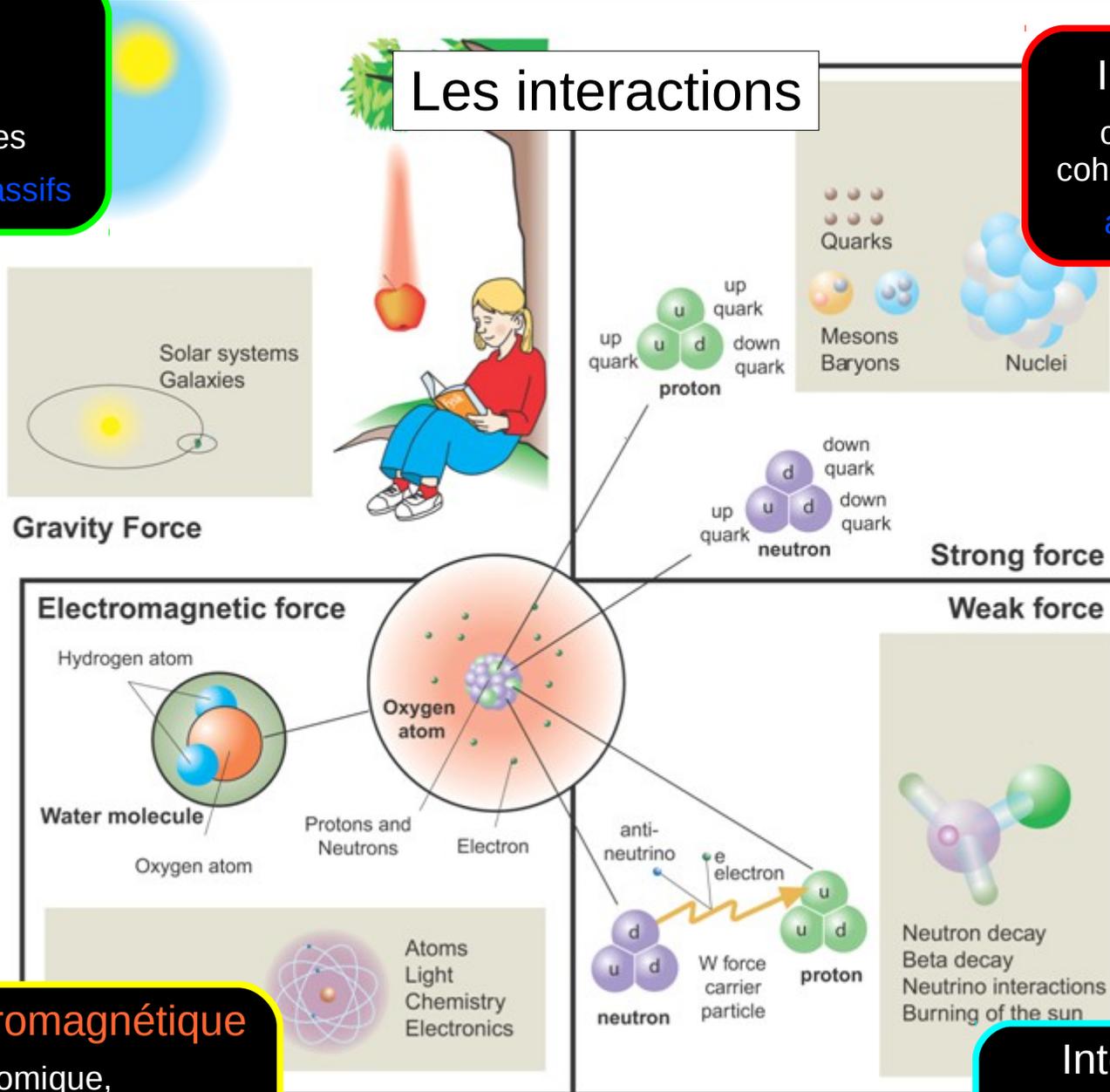
# Backup

# Les interactions

# Le Modèle Standard

## gravitation

pesanteur  
mouvements astres  
agit sur les objets massifs



## Interaction forte

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

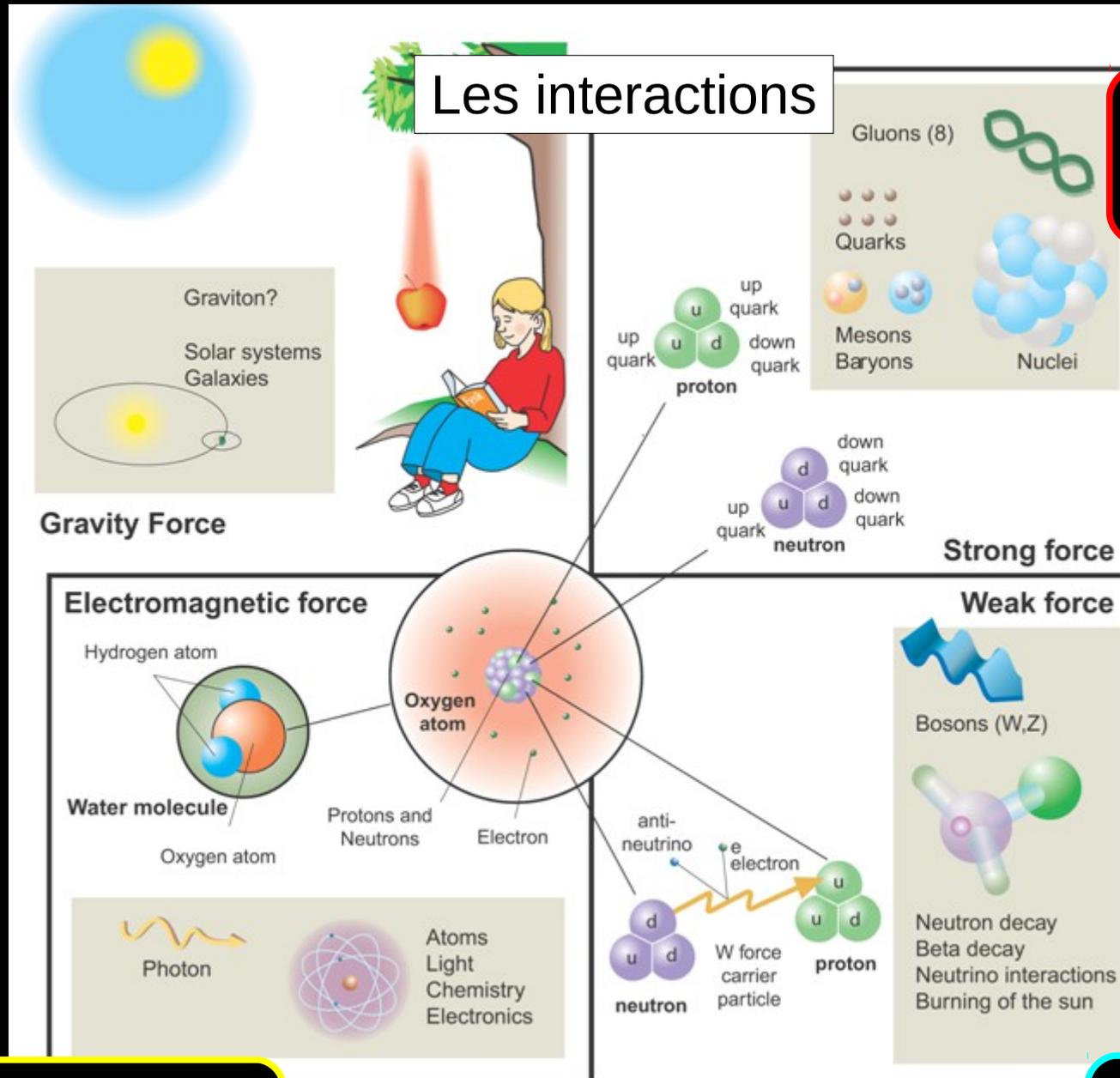
## Interaction électromagnétique

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

## Interaction faible

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

# Le Modèle Standard



**Interaction forte**  
vecteur : gluon (g)  
M=0  
charge : couleur

**Interaction électromagnétique**  
vecteur : photon ( $\gamma$ ) ; M=0  
charge : charge électrique

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

# 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

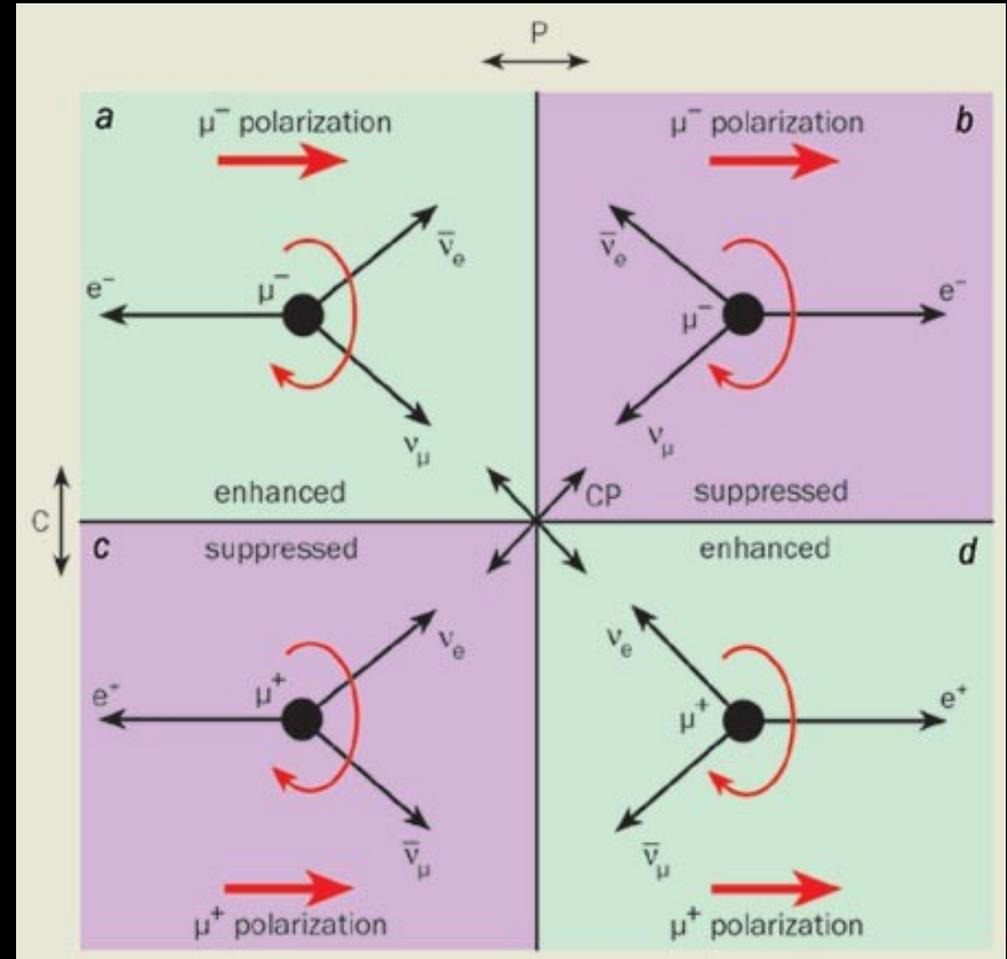
→ Opération C

□ 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.**

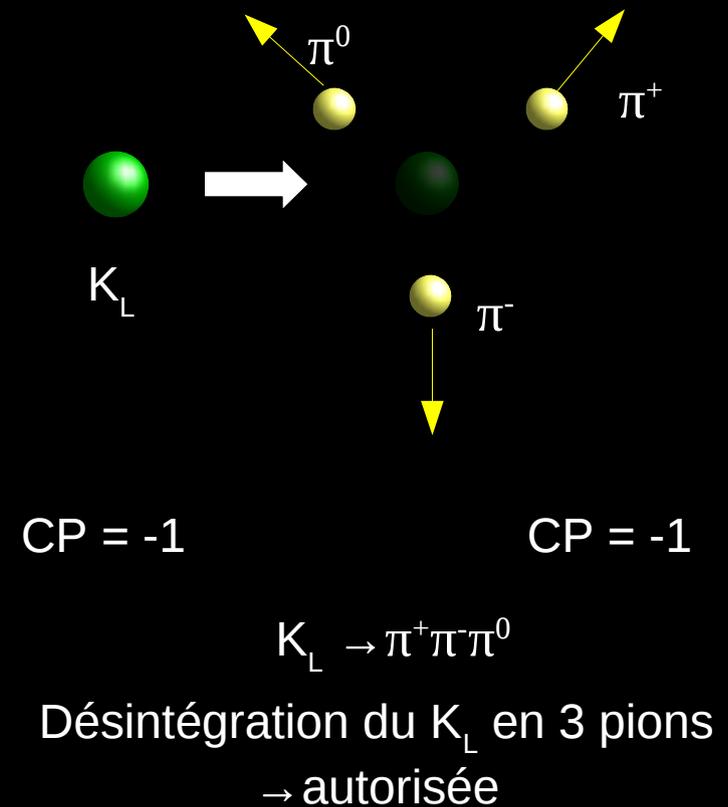
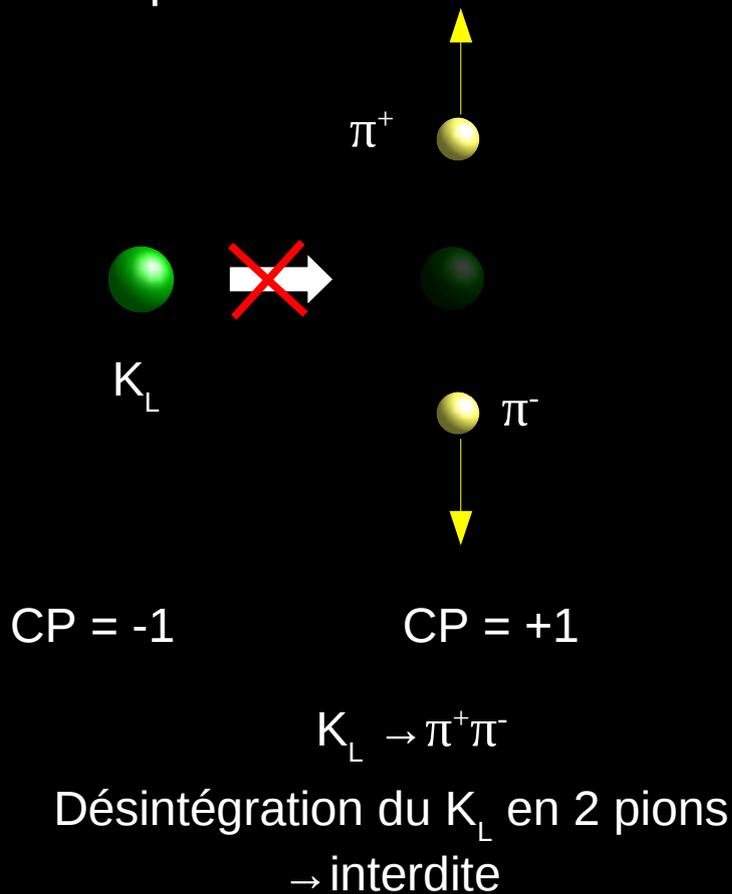


# Le Modèle Standard

## 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.