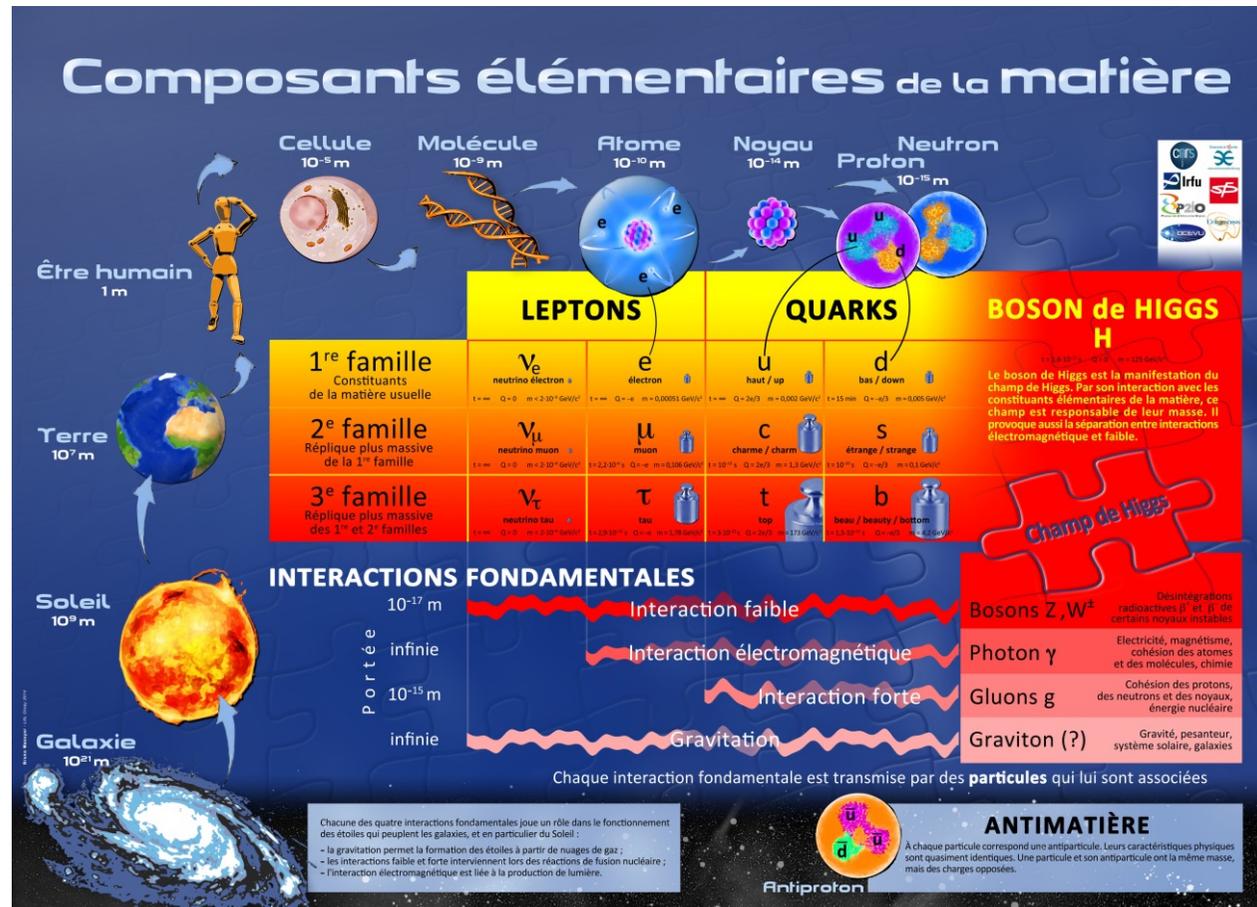


# Introduction à la physique des particules



19 janvier 2015, Formation PAF  
 académie de Reims, Troyes

**Nicolas Arnaud** ([narnaud@lal.in2p3.fr](mailto:narnaud@lal.in2p3.fr))  
 Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire  
 (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)



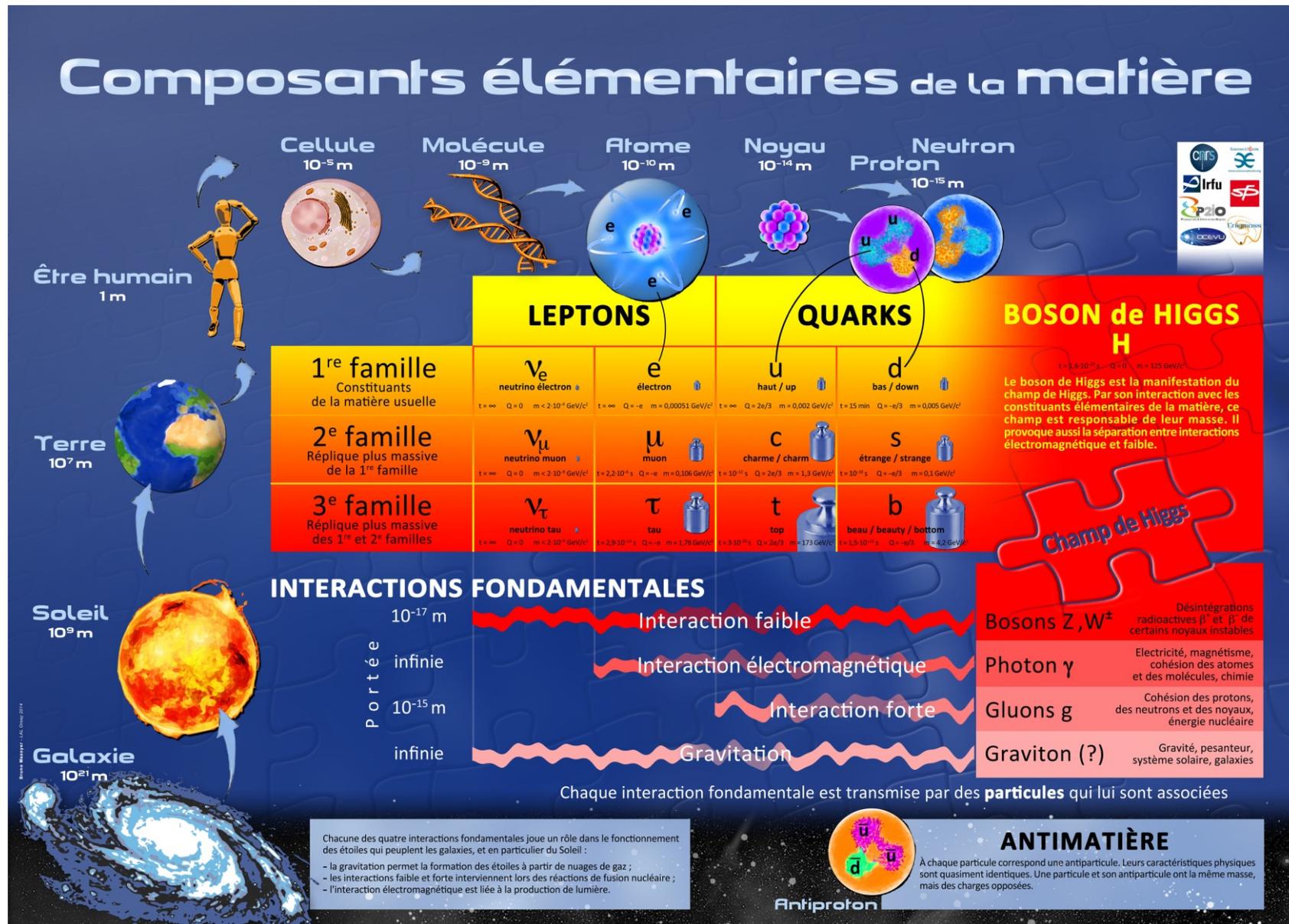
# Sommaire

- Le Modèle Standard
- Une brève histoire des particules
- Questions ouvertes

# Le Modèle Standard

# Les composants élémentaires de la matière

- Un poster tout récent – mise à jour 2014 d'une affiche de 2005



# Les composants élémentaires de la matière

- Un poster tout récent – mise à jour 2014 d'une affiche de 2005

**Composants élémentaires de la matière**

Être humain 1 m

Cellule  $10^{-5}$  m

Molécule  $10^{-9}$  m

Atome  $10^{-10}$  m

Noyau  $10^{-14}$  m

Proton

LEPTONS

1<sup>re</sup> famille  
Constituants de la matière usuelle

2<sup>e</sup> famille  
Réplique

de HIGGS

Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

Bosons  $Z, W^\pm$   
Désintégrations radioactives  $\beta^+$  et  $\beta^-$  de certains noyaux instables

Photon  $\gamma$   
Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

Gluons  $g$   
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

Graviton (?)  
Gravité, pesantEUR, système solaire, galaxies

Interaction faible

Interaction électromagnétique

Interaction forte

Gravitation

infinie

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

**ANTIMATIÈRE**

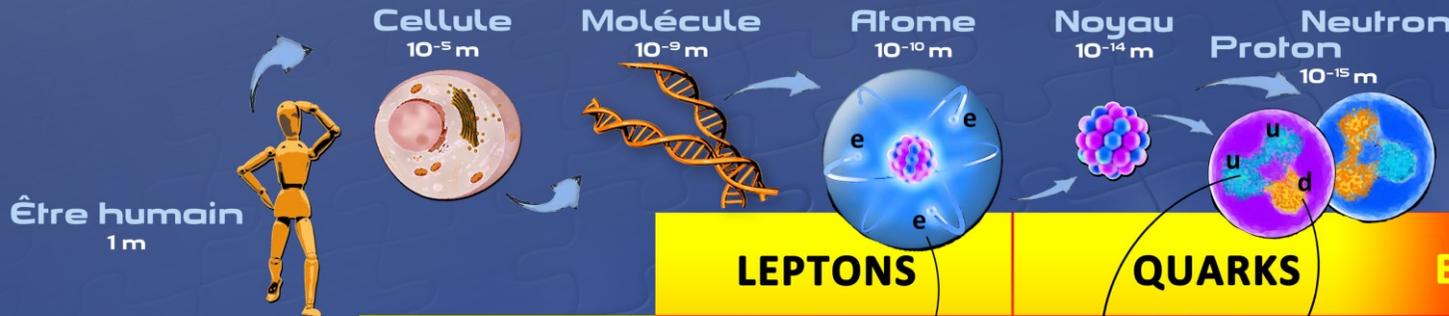
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

Logos: CNRS, Irfu, Spio, CEA, OCEVU

# Découvrons ensemble cette affiche ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t = 1,6 \cdot 10^{-25} \text{ s}, Q = 0, m = 125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	



### INTERACTIONS FONDAMENTALES

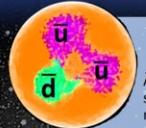
Portée	Interaction	Particule associée
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$
infinie	Gravitation	Graviton (?)

<b>Bosons <math>Z, W^\pm</math></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons <math>g</math></b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

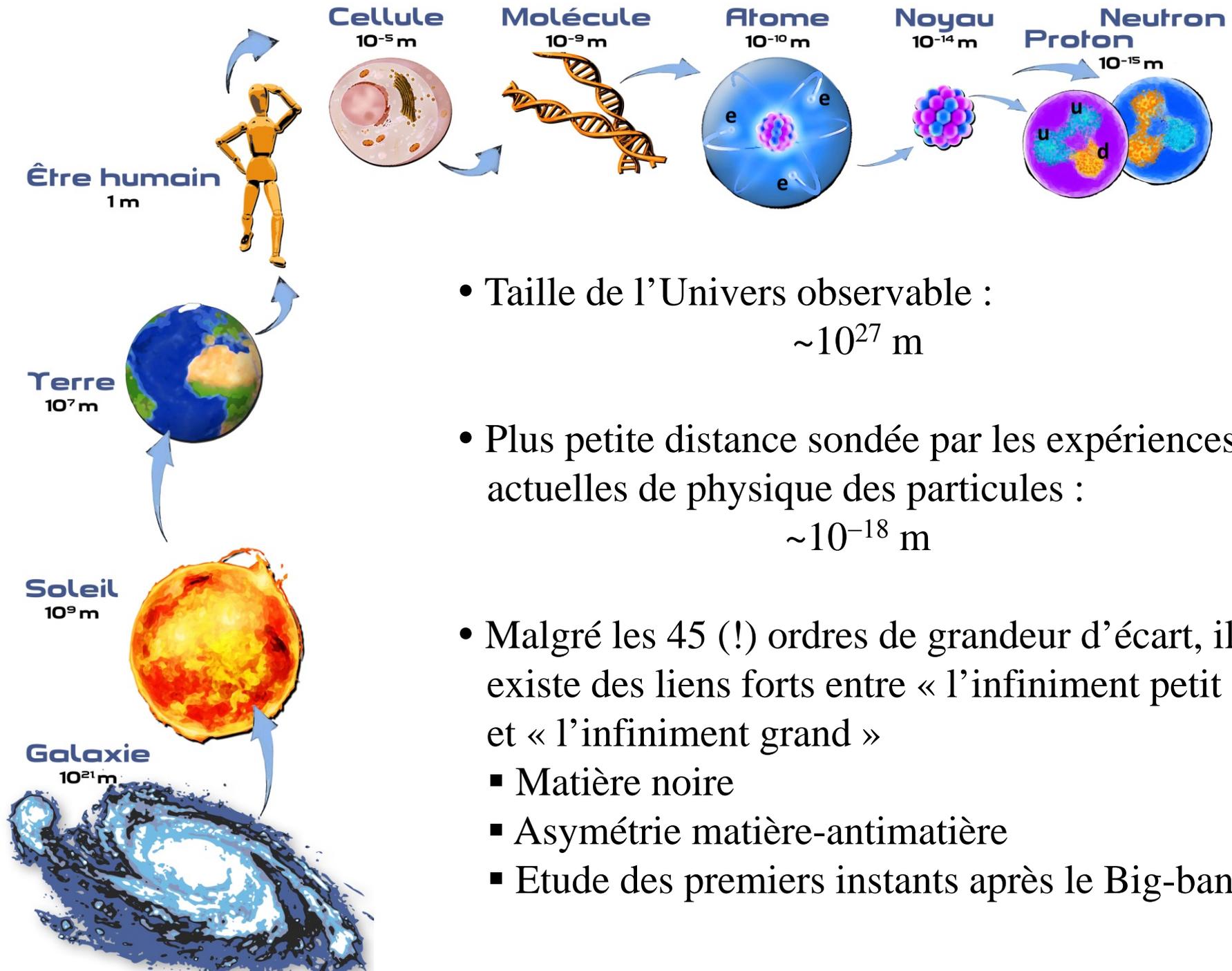


### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# Echelle des distances



- Taille de l'Univers observable :  
 $\sim 10^{27}$  m
- Plus petite distance sondée par les expériences actuelles de physique des particules :  
 $\sim 10^{-18}$  m
- Malgré les 45 (!) ordres de grandeur d'écart, il existe des liens forts entre « l'infiniment petit » et « l'infiniment grand »
  - Matière noire
  - Asymétrie matière-antimatière
  - Etude des premiers instants après le Big-bang

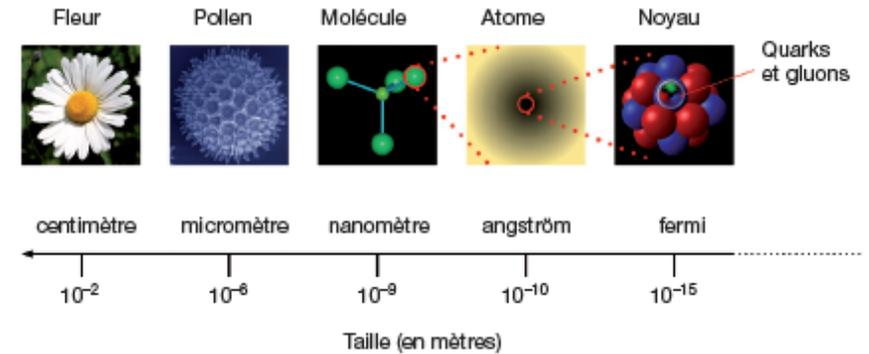
# Mécanique quantique et relativité

- **Grandes énergies ↔ petites distances**

- **Energie** du photon :  $E = h\nu$

- **Longueur d'onde de De Broglie** :  $\lambda = h/p$

- **Accélérateur** ~ « microscope géant » [LHC]



- **Relativité restreinte** :  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$

- Unité commode d'énergie : l'**électron-volt** (eV)

- de masse :  $eV/c^2$

- **Principe d'incertitude** (mécanique quantique, **W. Heisenberg**)

- Aux petites échelles, l'instrument de mesure interagit avec l'objet mesuré

- $\Delta x \Delta p \geq h$  [Idée d'exercice : comparaison pomme – proton]

- $\Delta E \Delta t \geq h$  : l'énergie peut fluctuer d'une quantité  $\Delta E$  pendant la durée  $\Delta t$

- **Des nombres quantiques sont associées aux particules**

- Exemple : le spin, entier pour les bosons, demi-entiers pour les fermions  
[particules de matière]

- **Principe d'exclusion de Pauli** : deux fermions ne peuvent pas avoir exactement les mêmes nombres quantiques

- Explique la **structure en couches** des électrons autour des noyaux

# 12 particules élémentaires : des fermions

## Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1 m

Cellule  
10<sup>-5</sup> m

Molécule  
10<sup>-9</sup> m

Atome  
10<sup>-10</sup> m

Noyau  
10<sup>-14</sup> m

Proton  
Neutron  
10<sup>-15</sup> m

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	<p><b>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.</b></p> <p><i>Champ de Higgs</i></p>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

portée

- 10<sup>-17</sup> m : Interaction faible
- infinie : Interaction électromagnétique
- 10<sup>-15</sup> m : Interaction forte
- infinie : Gravitation

**Bosons Z, W<sup>±</sup>**  
Désintégrations radioactives  $\beta^+$  et  $\beta^-$  de certains noyaux instables

**Photon  $\gamma$**   
Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

**Gluons g**  
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

**Graviton (?)**  
Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

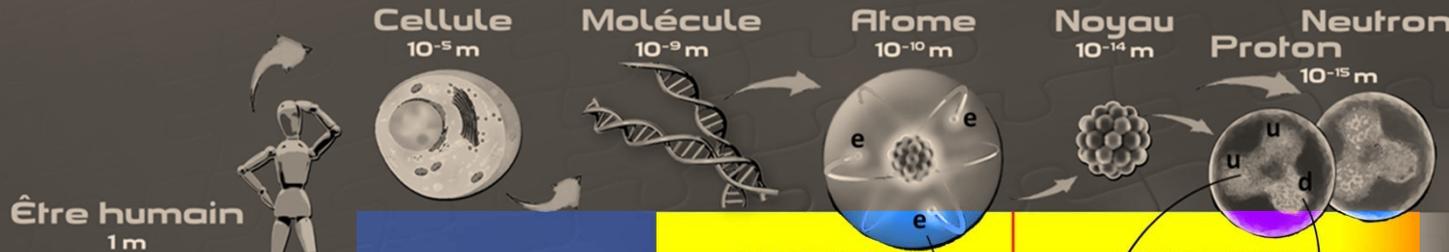
Antiproton

**Soleil**  
10<sup>9</sup> m

**Galaxie**  
10<sup>21</sup> m

# Particules réparties en 3 familles de 4

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t = 3.6 \cdot 10^{-25} s, Q = 0, m = 125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

### ANTIMATIÈRE



À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# Même structure pour les trois familles

## Composants élémentaires de la matière

Cellule  $10^{-5}$  m    Molécule  $10^{-9}$  m    Atome  $10^{-10}$  m    Noyau  $10^{-14}$  m    Neutron Proton



1 neutrino, 1 lepton chargé, un quark de type « u », un quark de type « d »

Être humain  
1 m

Terre  
 $10^7$  m

Soleil  
 $10^9$  m

Galaxie  
 $10^{21}$  m

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

1<sup>ère</sup> famille : particules stables formant la matière ordinaire

2<sup>nde</sup> et 3<sup>ème</sup> familles : des « copies » de la 1<sup>ère</sup> famille, formées de particules instables

Il n'existe sans doute pas de 4<sup>ème</sup> famille du même type

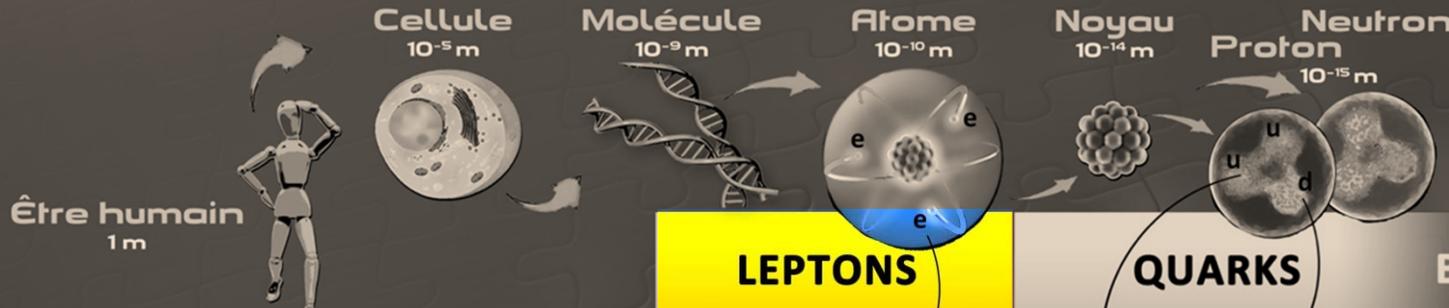
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;  
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

mais des charges opposées.

Antiproton

# Leptons

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t=3.6 \cdot 10^{-25} s, Q=0, m=125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

**INTERAC** 3 neutrinos | Leptons chargés : électron, muon, tau

Portée	Interaction	Bosons	Effets
infinie	Interaction faible	Bosons Z, W	radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



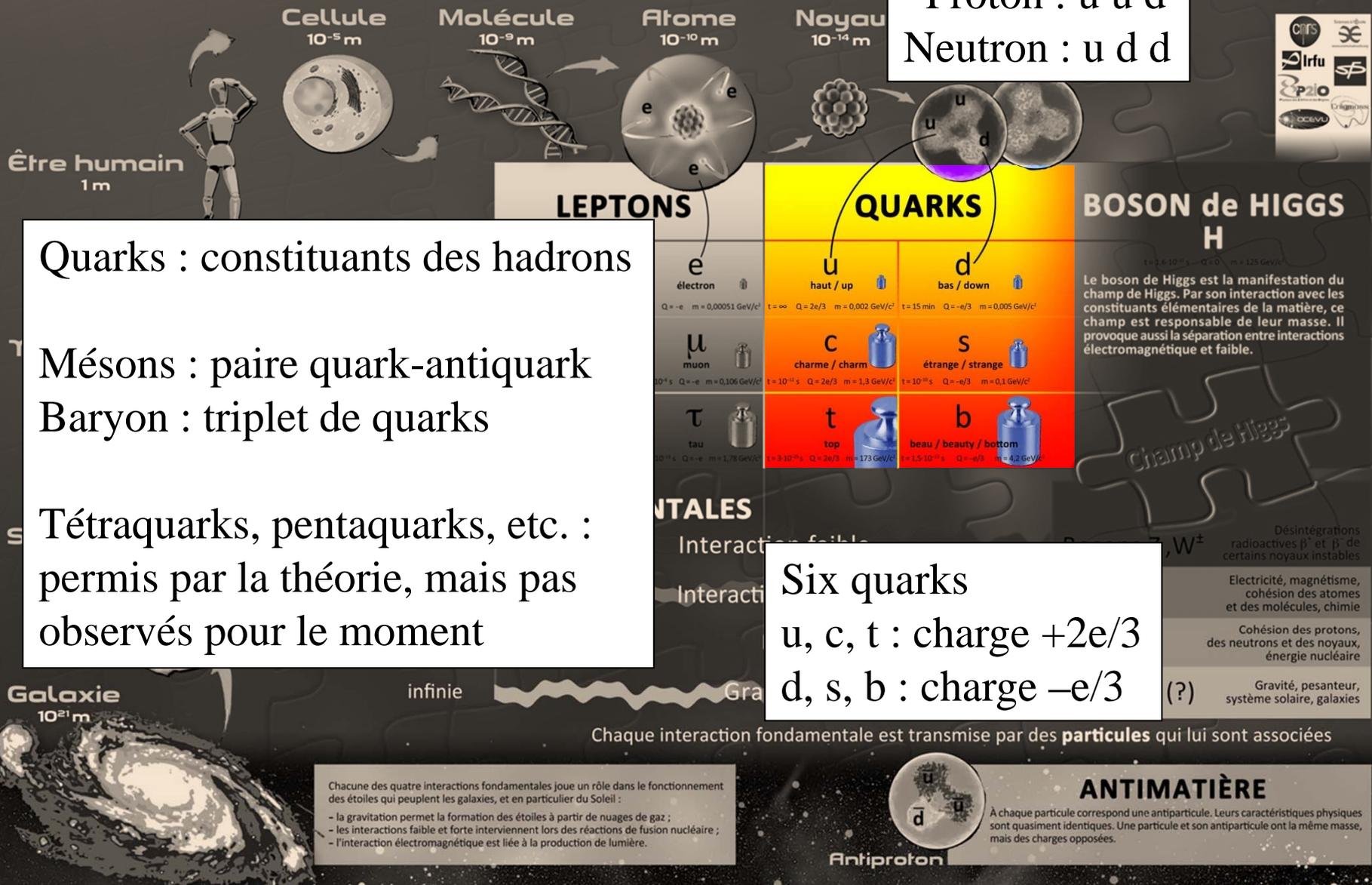
Antiproton

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Quarks

## Composants élémentaires de la matière



Proton : u u d  
Neutron : u d d

Quarks : constituants des hadrons

Mésons : paire quark-antiquark

Baryon : triplet de quarks

Tétraquarks, pentaquarks, etc. : permis par la théorie, mais pas observés pour le moment

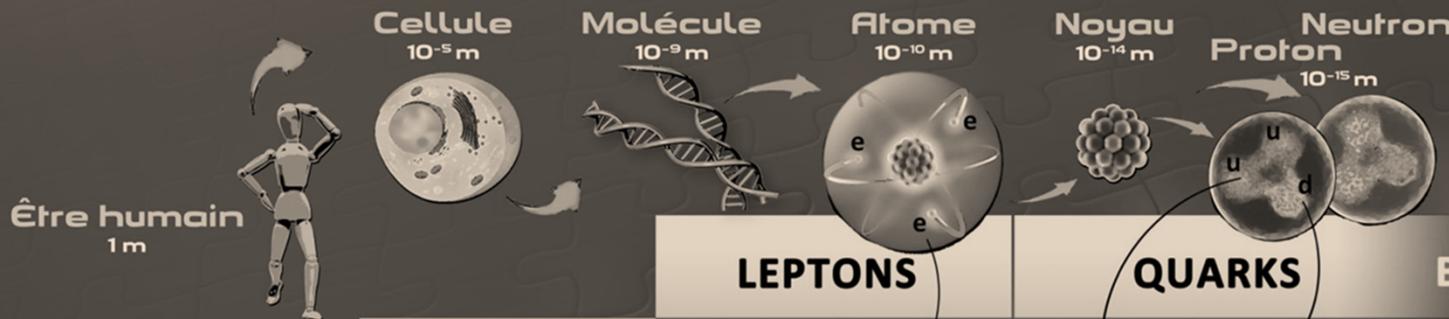
Six quarks

u, c, t : charge +2e/3

d, s, b : charge -e/3

# 4 (3+1) interactions fondamentales ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t=3.6 \cdot 10^{-25} s, Q=0, m=125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES		
Portée	$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte
	infinie	Gravitation

<b>Bosons <math>Z, W^\pm</math></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons <math>g</math></b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# 4 (3+1) interactions fondamentales ...

## Composants élémentaires de la matière

**Étre humain** 1 m

**Terre**  $10^7$  m

**Soleil**  $10^9$  m

**Galaxie**  $10^{21}$  m

**Cellule**  $10^{-5}$  m

**Molécule**  $10^{-9}$  m

**Atome**  $10^{-10}$  m

**Noyau**  $10^{-14}$  m

**Proton**  $10^{-15}$  m

**Neutron**  $10^{-15}$  m

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	$125 \text{ GeV}/c^2$ Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charm	$s$ strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tauon	$t$ top	$b$ bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES			
Portée	$10^{-17}$ m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup> Désintégrations radioactives $\beta^-$ et $\beta^+$ de certains noyaux instables
	infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$ Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
	$10^{-15}$ m	Interaction forte	Gluons g Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
	infinie	Gravitation	Graviton (?) Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des particules qui lui sont associées.

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

Théorie quantique des champs :  
mécanique quantique + relativité restreinte  
« Infiniment petit »

Relativité générale  
« Infiniment grand »

# ... toutes à l'œuvre dans le Soleil

## Composants élémentaires de la matière

**Étre humain** 1 m

**Terre**  $10^7$  m

**Soleil**  $10^9$  m

**Galaxie**  $10^{21}$  m

**Cellule**  $10^{-5}$  m

**Molécule**  $10^{-9}$  m

**Atome**  $10^{-10}$  m

**Noyau**  $10^{-14}$  m

**Proton**  $10^{-15}$  m

**Neutron**  $10^{-15}$  m

**LEPTONS**

**QUARKS**

**BOSON de HIGGS H**

**1<sup>re</sup> famille**  
Constituants de la matière usuelle  
 $\nu_e$  (neutrino électron),  $e$  (électron),  $u$  (haut / up),  $d$  (bas / down)

**2<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive de la 1<sup>re</sup> famille  
 $\nu_\mu$ ,  $\mu$ ,  $c$ ,  $s$

**3<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive des 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> familles

**INTERACTION**

Portée: infinie,  $10^{-15}$  m, infinie

Interaction électromagnétique (Photon  $\gamma$ )

Interaction forte (Gluons  $g$ )

Gravitation (Graviton (?))

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

**Antiproton**

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

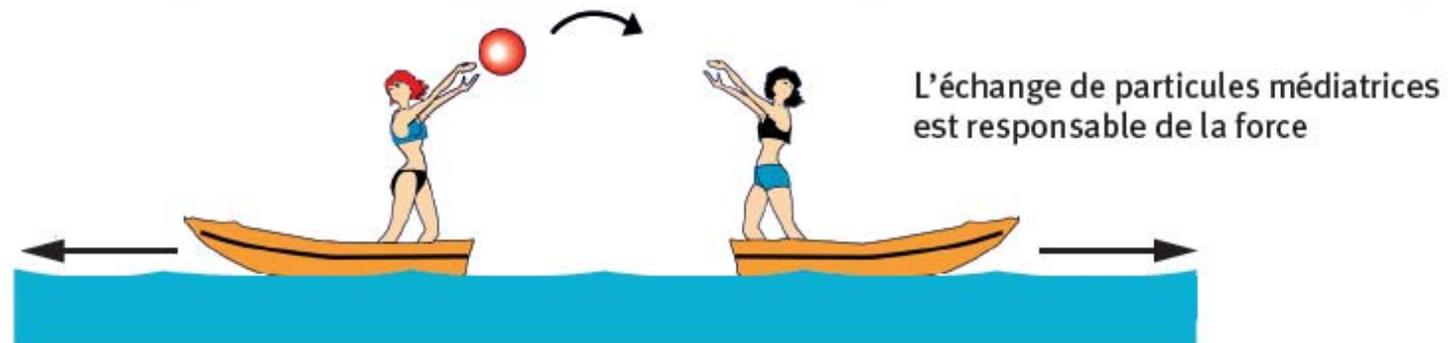
- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

# Interactions fondamentales

- 3 interactions fondamentales d'intensités relatives très différentes
  - Gravitation **complètement négligeable** à l'échelle des particules élémentaires

## Les forces fondamentales

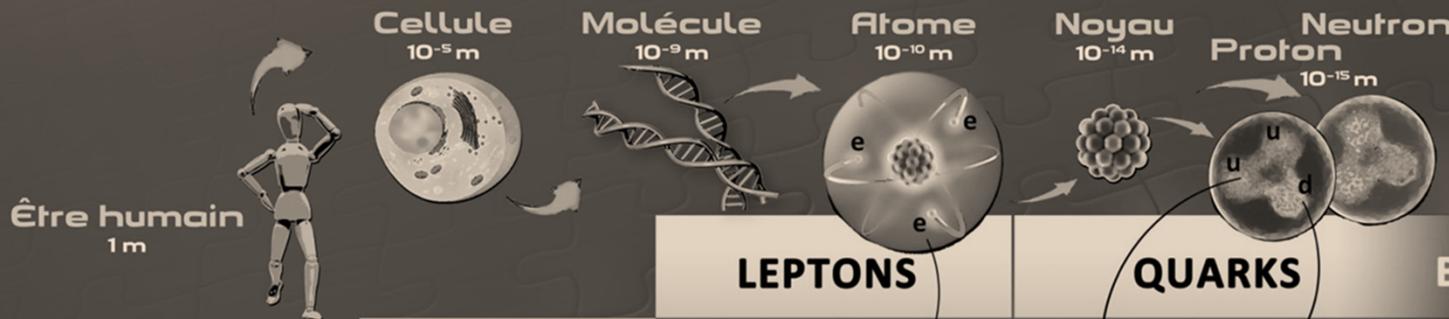
Type	Intensité relative	Particules médiatrices	Domine dans
Force forte	$\sim 1$	Gluons	noyau atomique
Force électromagnétique	$\sim 10^{-3}$	Photon	électrons entourant le noyau
Force faible	$\sim 10^{-5}$	Boson $Z^0, W^+, W^-$	désintégration radioactive bêta
Gravitation	$\sim 10^{-38}$	Graviton ? (pas encore observé)	astres



- Une particule est sensible à une force si sa charge associée est non nulle
- L'action d'une force opère par **échange de particules médiatrices**, des « bosons »
  - Plus le boson médiateur est lourd, plus l'interaction est à courte portée

# L'interaction électromagnétique

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t=3.6 \cdot 10^{-12} s, Q=0, m=125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées	Effets
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



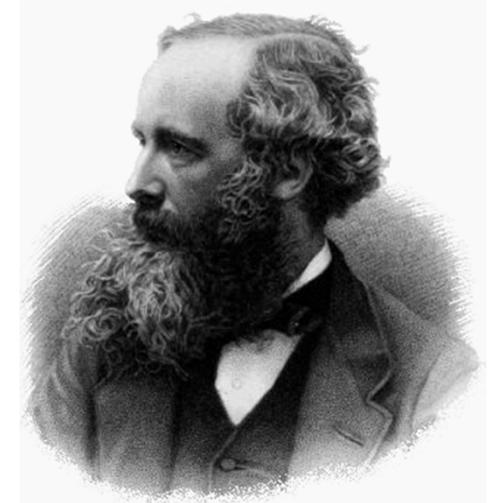
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

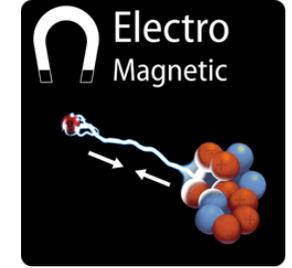
# L'électromagnétisme

- **James Clerk Maxwell** (1864) : « La convergence des résultats semblent montrer que lumière et magnétisme sont deux facettes d'une même substance et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois de l'électromagnétisme »



- **L'électricité et le magnétisme sont un seul et même phénomène dont les manifestations sont différentes**
- Les champs se propagent dans l'espace, sous forme d'ondes, et à la vitesse de la lumière, constante.
- Fondations de la **physique moderne**, de **l'ingénierie électrique**, de **l'astronomie**, des **communications radio**, de **la télévision...**
- **Einstein** parlant des travaux de **Maxwell** : « [Ce sont] les plus profonds et les plus fertiles en physique depuis l'époque de **Newton** »

# Électromagnétisme



- **Electrostatique**
- **Magnétisme** – dû au mouvement des charges électriques
- **Particule médiatrice** : le **photon** de **masse nulle**
- **Force répulsive** ou **attractive** selon que les charges sont ou non de même signe  
→ Bien que sa portée soit en principe infinie – force  $\propto 1 / (\text{distance})^2$ ,  
le **phénomène d'écrantage** la limite le plus souvent en pratique
  - **Exemple** : **dans 2 litres d'eau** « neutres » on trouve  $\sim 10^8$  C de charges négatives  
et autant de charges positives : les charges se compensent exactement  
→ Deux corps chargés ainsi et placés à un mètre de distance  
créeraient une force  $\sim$  au poids de la Terre pesée sur une autre Terre
- Cas de l'atome d'hydrogène dans l'état fondamental :  $F_{EM} / F_{Grav} \approx 10^{39}$  !!!
- **Gouverne les échelles atomiques et humaines**
  - Liaisons électrons – noyaux
  - Les structures ioniques (NaCl)
  - Les liaisons chimiques entre atomes d'une molécule
  - L'attraction entre les molécules d'un solide

# L'interaction forte

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t = 3.6 \cdot 10^{-25} s, Q = 0, m = 125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

**BOSON de HIGGS H**  
 $t = 3.6 \cdot 10^{-25} s, Q = 0, m = 125 \text{ GeV}/c^2$   
 Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées	Effets
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

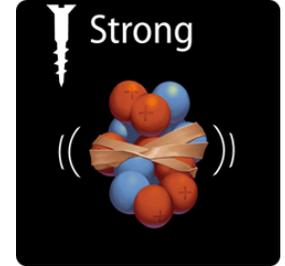
- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



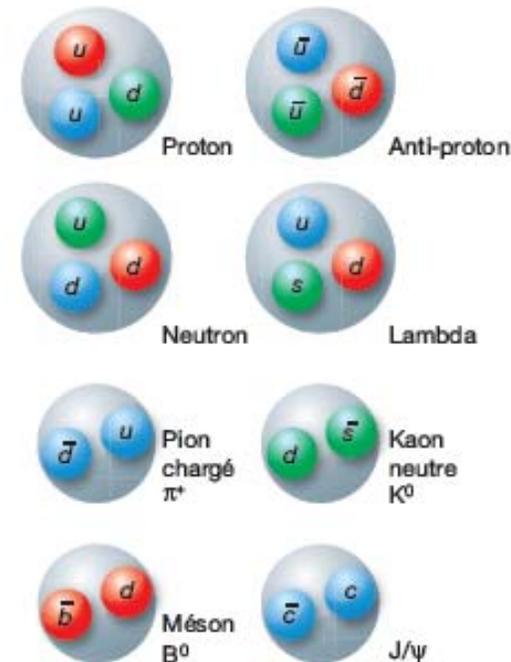
Antiproton

**ANTIMATIÈRE**  
 À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Interaction forte

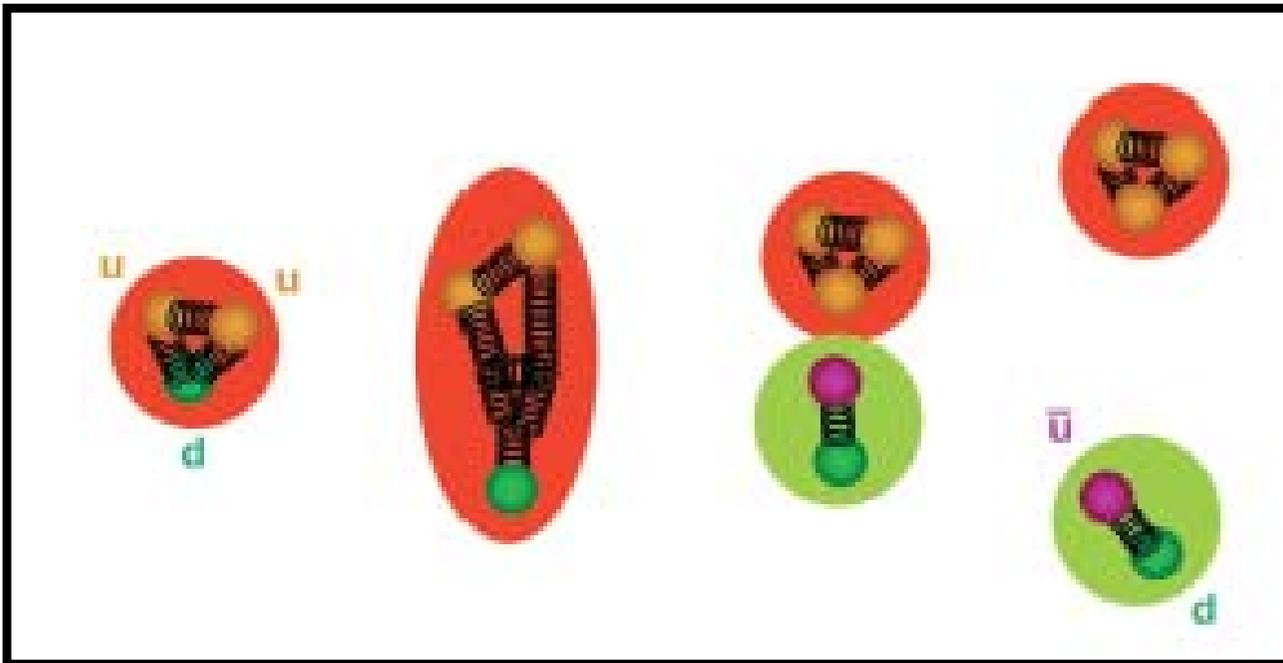


- **Nécessaire pour expliquer la cohésion des noyaux**
  - 2 protons séparés par la taille du noyau ressentent une force électromagnétique répulsive  $10^{10}$  fois supérieure à celle qui lie l'électron et le proton de l'atome d'H
- **Portée très limitée : à peine quelques diamètres de noyaux**
  - Durée associée  $\sim 10^{-23}$  s : temps caractéristique de l'interaction forte
- **Domine à l'échelle nucléaire**
  - 100 à 1000 fois plus intense que la force électromagnétique
- **L'interaction forte agit sur les quarks**
  - **Particules médiatrices** : les **gluons**
  - **Charge de « couleur »**
- **Trois couleurs : rouge, bleu, vert**
  - Chaque (anti)quark porte une (anti)couleur
  - **Les particules sont « blanches »**
    - **couleur + anti-couleur : mésons**
    - **les trois couleurs : baryons**
  - Les gluons sont eux-même colorés !
    - Interaction plus riche – et plus complexe ...



# Interaction forte

- Deux propriétés fondamentales
  - Confinement : impossible d'isoler un quark

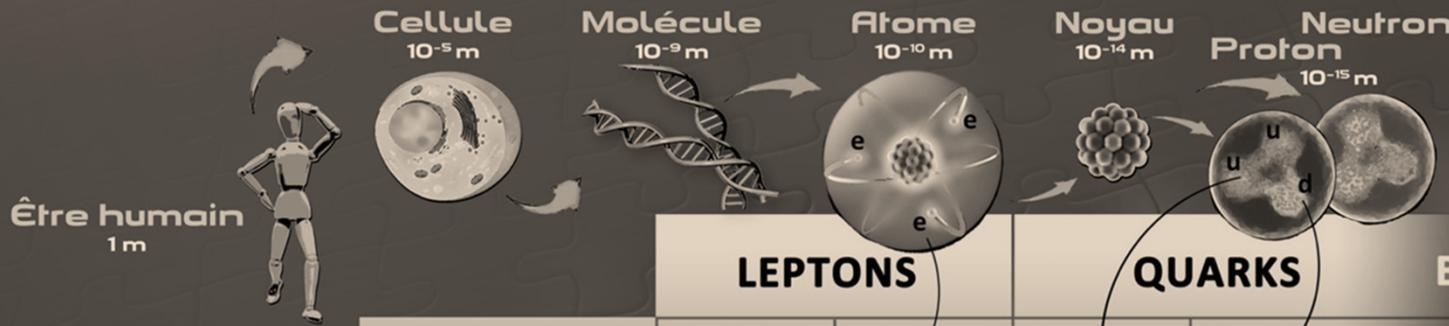


Voici ce qui se passe quand on essaye d'arracher un quark à une particule  
→ Les « gluons » portent bien leur nom !

- Liberté asymptotique : l'intensité de la force diminue avec la distance

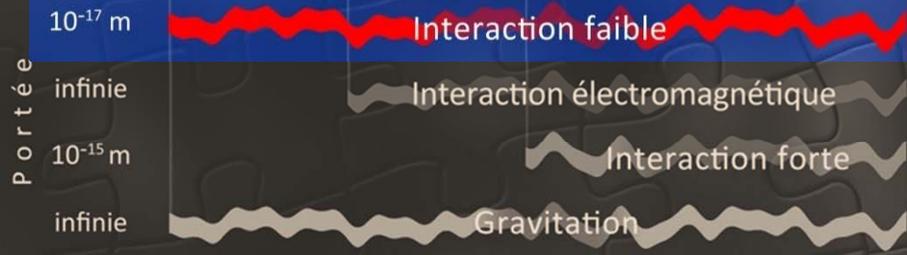
# L'interaction faible

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>	

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> et de certains noyaux instables
<b>Photon γ</b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

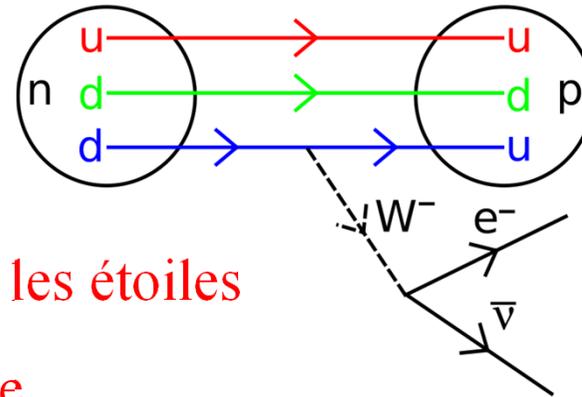
Antiproton

# Interaction faible



- Explique la radioactivité bêta ( $\beta$ )

→ Par exemple la désintégration du neutron :  
[Durée de vie du neutron :  $\sim 15$  minutes]



- Gouverne les réactions thermonucléaires dans les étoiles

- Portée encore plus faible que l'interaction forte

- A peine quelques centièmes de la taille du nucléon

→ Particules médiatrices  $\sim 100$  fois plus massives que le proton !

- Se désintègrent en un temps extrêmement court ( $\leq 10^{-24}$  s)

→ Interaction presque ponctuelle

- Environ  $10^{14}$  fois plus faible que l'interaction forte

- Charge faible : la « saveur » – exemple : chaque quark a une saveur différente

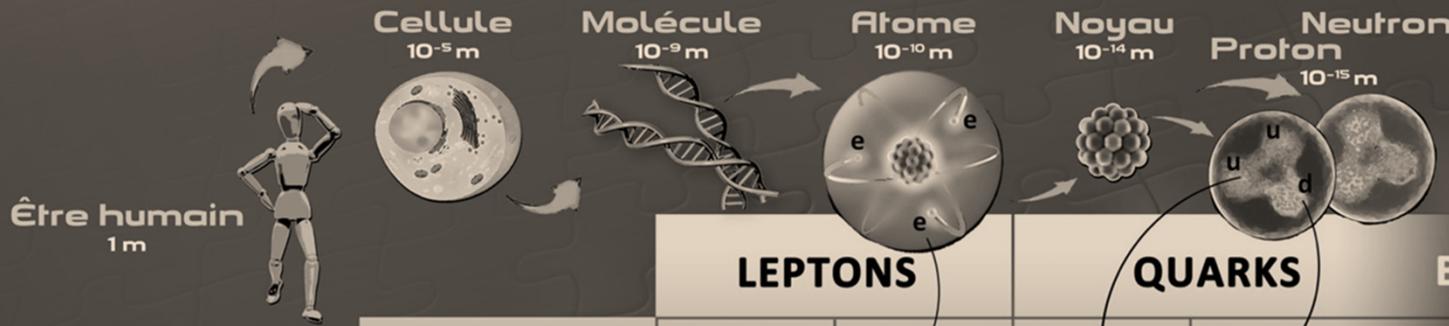
- Il n'existe pas d'états liés de particules dus à l'interaction faible

- L'interaction faible est aujourd'hui unifiée à haute énergie avec l'interaction électromagnétique

→ Voir plus loin

# La gravitation

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.  <i>Champ de Higgs</i>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>	

INTERACTIONS FONDAMENTALES		
portée	$10^{-17}$ m	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	$10^{-15}$ m	Interaction forte
	infinie	Gravitation

Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

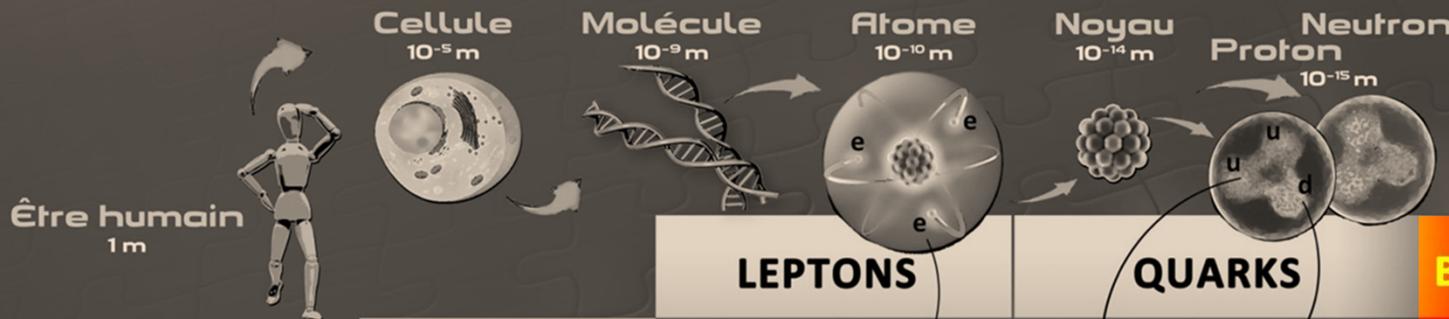
# Gravitation



- **Seule force toujours attractive**  
→ Impossible de l'absorber, de la transformer ou de s'en protéger
- Force  $\propto 1 / (\text{distance})^2$  : **portée (vraiment) infinie** – pas « d'écrantage »
- Loi de la gravitation universelle (Newton) → Relativité Générale (Einstein)
- **Force extrêmement faible**  
→ Un aimant de frigo retient un clou attiré par la Terre entière !
- **Complètement négligeable à l'échelle des particules élémentaires pour des énergies « normales »**  
→ Importante au niveau de **l'énergie de Planck**  $E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$   
→ Masse, temps ( $\approx 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$ ) et longueur de Planck ( $\approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ )
- **Domine aux échelles astronomiques**
- **Impossibilité de décrire la Relativité Générale et les trois autres interactions (force, faible, électromagnétique) dans un cadre théorique commun**  
→ Particule médiatrice hypothétique : le graviton de masse nulle

# Le champ (boson) de Higgs

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

**BOSON de HIGGS H**

$t = 1.6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 \text{ GeV}/c^2$

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

**Champ de Higgs**

### Clef de voûte du Modèle Standard



Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

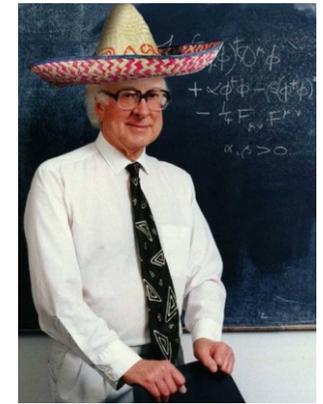


Antiproton

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

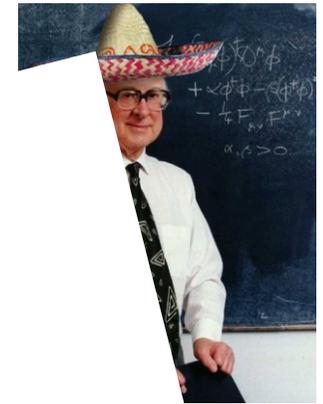
# Le boson de Higgs



- **Motivation théorique** au départ :  
« quelque chose » doit donner leur masse aux particules élémentaires
- **Sans ingrédient supplémentaire, la théorie échouerait à décrire la Nature** :  
toutes les particules voyageraient à la vitesse de la lumière !  
→ Une conséquence (parmi d'autres) : elles seraient sans masse ... **Ce qui est faux !**
- **Postulat** : un « champ » (dit de **Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble**) emplirait tout l'espace et interagirait avec les particules  
**interaction**  $\Rightarrow$  **ralentissement**  $\Leftrightarrow$  **masse** (vitesse < vitesse de la lumière)
- Plus une particule ralentit sous l'effet de ce champ, plus elle est massive.
- **Peter Higgs** : si ce mécanisme est vrai, il doit exister une particule « associée »  
→ Le fameux **boson de Higgs**
- **Problème** : le boson de Higgs est la pierre angulaire du **Modèle Standard** mais il n'a pas encore été découvert !!!!!



# Le boson de Higgs

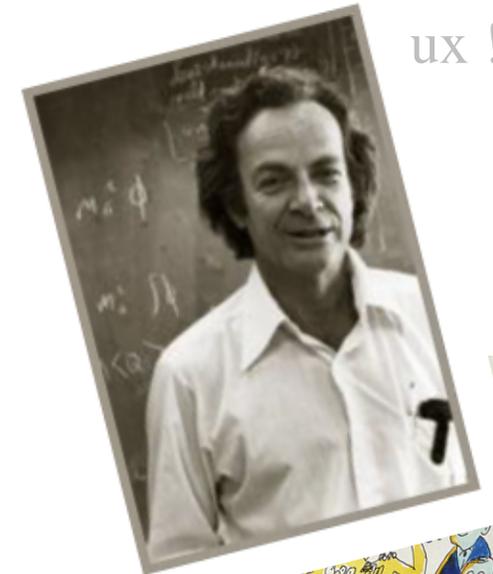


- Motivation théorique au départ :  
« quelque chose » doit donner la masse

- Sans inconnues

▶ Do you want to be famous?  
 ▶ Do you want to be a king?  
 ▶ Do you want more than the nobel prize?  
 - Then solve the mass Problem -  
 R.P. Feynman

- P  
pl
- Pet  
il de  
→ L
- Problè



ux !



Le boson de Higgs est la pierre angulaire du Modèle Standard  
 mais il n'a pas encore été découvert !!!!

# Brisure spontanée de symétrie

- **Brisure spontanée de la symétrie électrofaible via le mécanisme de Higgs**

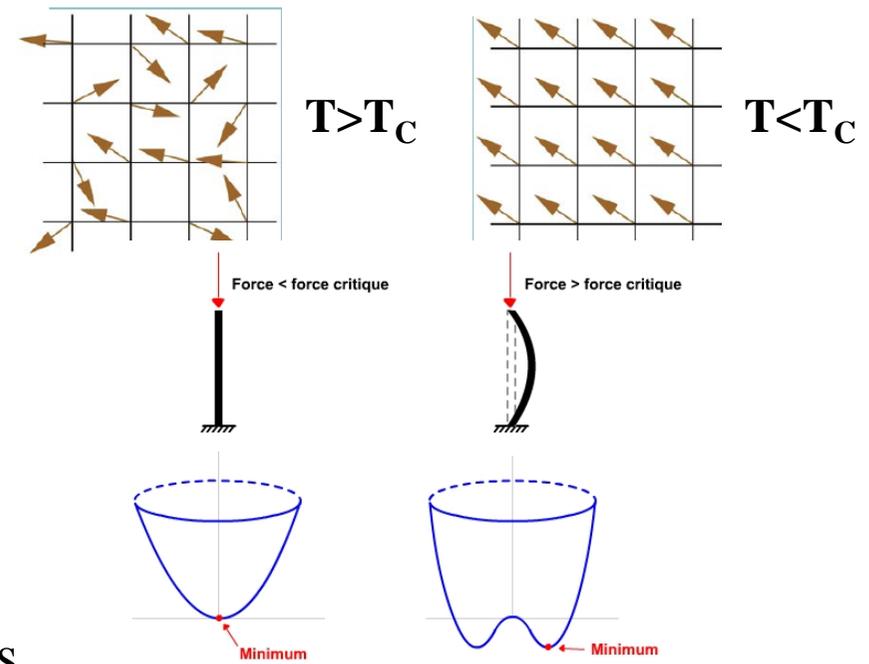
- Les interactions – et donc les équations – respectent une symétrie mais la solution des équations la brise

- **Exemples de brisure spontanée de symétrie**

- Résultat d'un tirage à pile ou face
- Balle tombant d'une colline
- **Matériau ferromagnétique** en-dessous de la température de Curie  $T_C$
- **Flambage** d'une poutre métallique

- **Mécanisme de Higgs**

- Degrés de liberté supplémentaires introduits « à la main » dans la théorie : champ de Higgs
- Permet de **résoudre deux problèmes**
  - **Théorie électrofaible** devient renormalisable
  - **Les particules** acquièrent une masse par interaction avec le champ de Higgs
- **Au moins une nouvelle particule: le boson de Higgs**



# Matière et antimatière

## Composants élémentaires de la matière

Être humain 1m

Cellule  $10^{-5}$  m

Molécule  $10^{-9}$  m

Atome  $10^{-10}$  m

Noyau  $10^{-14}$  m

Proton  $10^{-15}$  m

Neutron  $10^{-15}$  m

**LEPTONS**

**QUARKS**

**BOSON de HIGGS H**

1<sup>re</sup> famille  
Constituants de la matière usuelle

$\nu_e$  neutrino électron

$e$  électron

$u$  haut / up

$d$  bas / down

$t = \infty$   $Q = 0$   $m < 2 \cdot 10^{-9}$  GeV/c<sup>2</sup>

$t = \infty$   $Q = -e$   $m = 0,00051$  GeV/c<sup>2</sup>

$t = \infty$   $Q = 2e/3$   $m = 0,002$  GeV/c<sup>2</sup>  $t = 15$  min  $Q = -e/3$   $m = 0,005$  GeV/c<sup>2</sup>

$t = 1,3 \cdot 10^{-22}$  s  $Q = 0$   $m = 125$  GeV/c<sup>2</sup>

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il

Terre  $10^7$  m

Soleil  $10^9$  m

Galaxie  $10^{21}$  m

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

A chaque particule de matière est associée une particule d'antimatière

Particule / antiparticule :

Propriétés similaires (ex : même masse, même durée de vie)

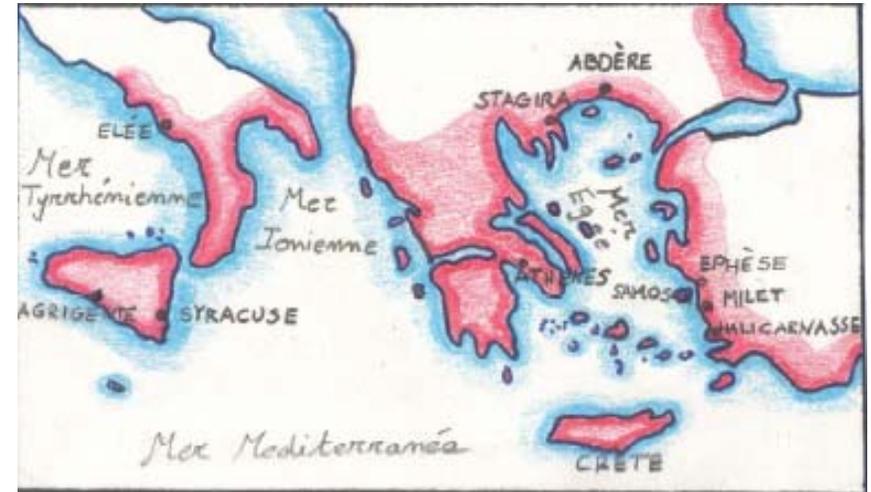
Nombres quantiques opposés (ex : charge électrique)

Exemple : électron / positron

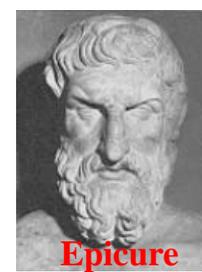
# Une brève histoire des particules

# Un zeste de philosophie antique

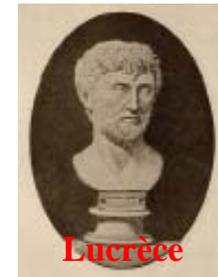
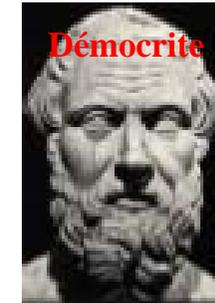
- L'**atome** : un concept vieux de 2500 ans
- **Une question naturelle** :  
« De quoi est fait le monde ? »
- **Des réponses surnaturelles** : des créatures extraordinaires (dieux, titans, esprits...) créent, modèlent et ordonnent l'Univers entier
- Tout change à partir du VI<sup>ème</sup> siècle avant J-C  
→ Les philosophes cherchent à **comprendre** et à **expliquer** la **Nature** (*Physis* en grec)
- **Thales de Millet** : « L'eau est la cause matérielle de toutes les choses »
- **Héraclite d'Ephèse** : « Tout varie, rien ne perdure »
- **Empedocle** : « L'Univers est une combinaison de 4 éléments : l'Eau, la Terre, le Feu et l'Air ; ils sont gouvernés par 2 forces fondamentales : l'Amour et la Haine. »
- **Anaxagore** : « Il y a quelque chose de chaque chose dans toutes les choses »  
→ Toute chose est faite de « grains indivisibles » infiniment petits, infinis en nombre, toujours intimement combinés ou séparés.
- l'**Atomisme** : **Démocrite**, **Epicure** et **Lucreèce**



# L'Atomisme



- « **Atoma** » signifie « **indivisible** » en Grec
  - ⇒ Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
  - ⇒ Autour il y a le vide (infini) dans lequel les atomes peuvent se déplacer, se grouper or se disperser



- **Les êtres vivants et les choses sont créés par des assemblages d'atomes**
- Il y a de **nombreux types d'atomes différents**
- Toutes les sensations (chaud, froid, amer, sucré, salé...) peuvent être expliquées par les différents types d'atomes et leurs assemblages
- Les atomes les plus légers forment l'âme
  
- A la mort, les atomes se séparent et sont relâchés dans le vide.  
**Comme ils sont éternels, ils peuvent à nouveau se rassemble plus tard pour former de nouvelles structures/ de nouveaux univers**
  
- Après des siècles de controverses philosophiques (pour/contre les atomes), cette conception de la Nature **disparait pour un millénaire** quand le **Christianisme** devient la religion dominante de l'empire romain.

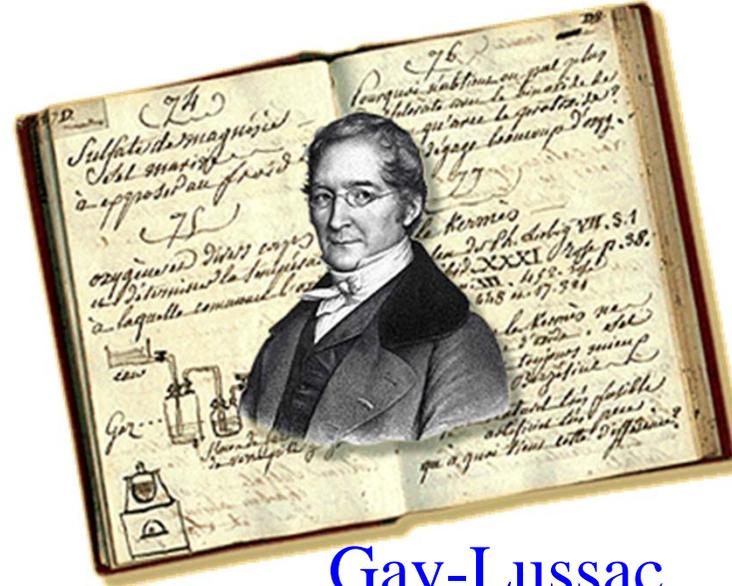
# Les premiers chimistes



Boyle



Lavoisier



Gay-Lussac



Cavendish



Dalton

- **Boyle** : Une théorie scientifique valable repose sur l'expérience.
- **Lavoisier** : les « composés » (molécules) sont faits de plus d'un élément
- **Gay-Lussac** : l'Hydrogène et l'oxygène se combinent dans des rapports précis pour donner de l'eau :  $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$   
⇒ éléments chimiques = composants de base de la matière
- **Dalton** : chaque élément chimique est fait d'un seul type d'atomes.  
Environ 20 atomes différents sont connus à l'époque.

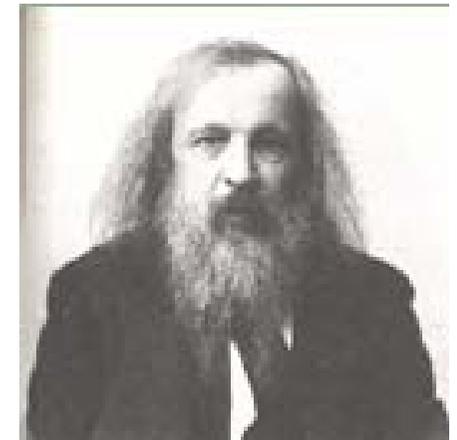
# La classification périodique

1869

1 H																	2 He
3 Li	4 Be															10 Ne	
11 Na	12 Mg															18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Uuq														
		73 Ce	74 Pr	75 Nd	76 Pm	77 Sm	78 Eu	79 Gd	80 Tb	81 Dy	82 Ho	83 Er	84 Tm	85 Yb	86 Lu		
		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

101<sup>ème</sup> élément :  
Le Mendelevium  
(1957)

Mendeleïev



- Une classification plus que brillante :
  - ✓ intuitive, basée sur les résultats expérimentaux
  - ✓ expliquée seulement des dizaines d'années plus tard une fois la structure électronique des atomes connue.
- Mendeleïev a laissé des emplacements libres pour des éléments encore inconnus mais qui *devaient* exister d'après sa théorie  
→ Tous furent effectivement découverts !

# Découverte de la radioactivité



Röntgen (1895)  
Rayons X



Becquerel (1896)  
Radioactivité naturelle



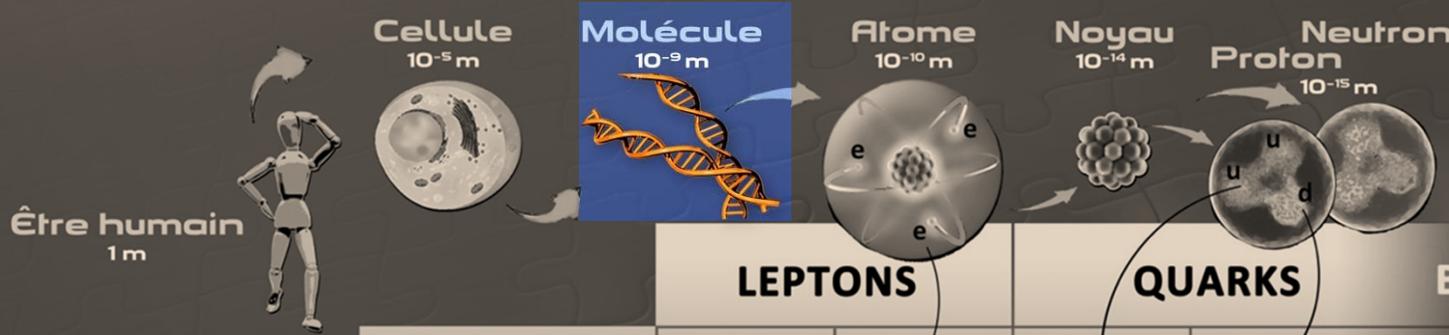
Pierre and Marie Curie  
Le Polonium et  
le Radium (1898)

La radioactivité est une émission spontanée de radiation  
(= d'énergie) par un objet : carbone-14, uranium ...

Ces découvertes auront un impact essentiel [ sur la science du XX<sup>ème</sup> siècle  
sur le monde entier

# Une brève histoire des particules ...

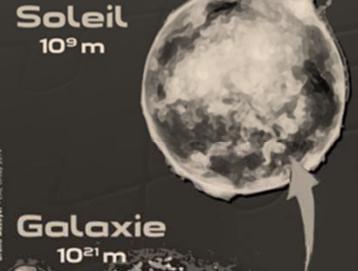
## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$H$ boson de Higgs
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées	Effets
$10^{-17}$ m	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15}$ m	Interaction forte	Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



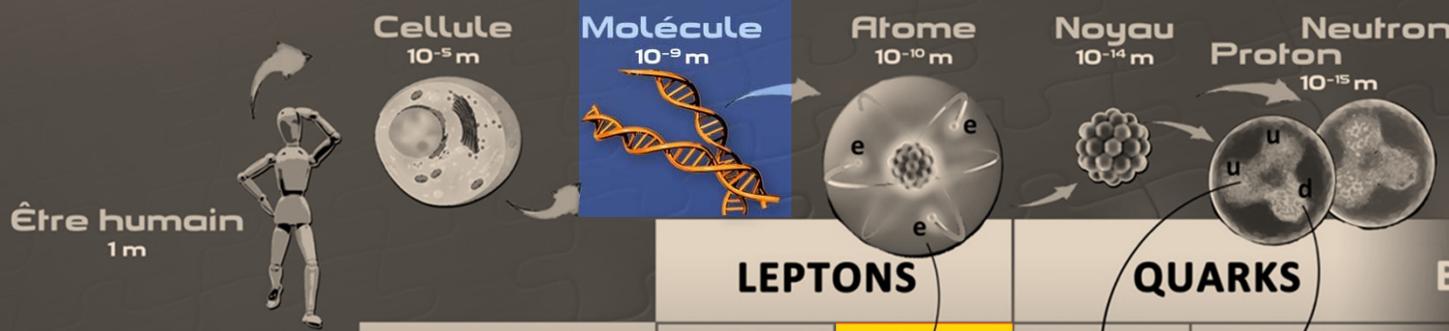
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	<b>e</b> électron	u haut / up	d bas / down	$t = 3.2 \times 10^{-12} s$ , $Q = 0$ , $m = 125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées	Effets
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

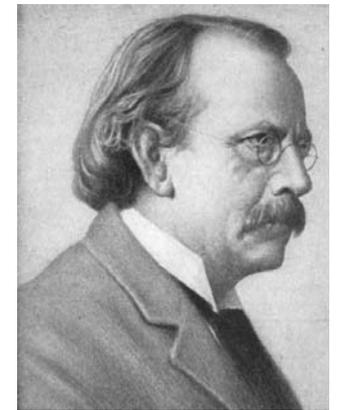


Antiproton

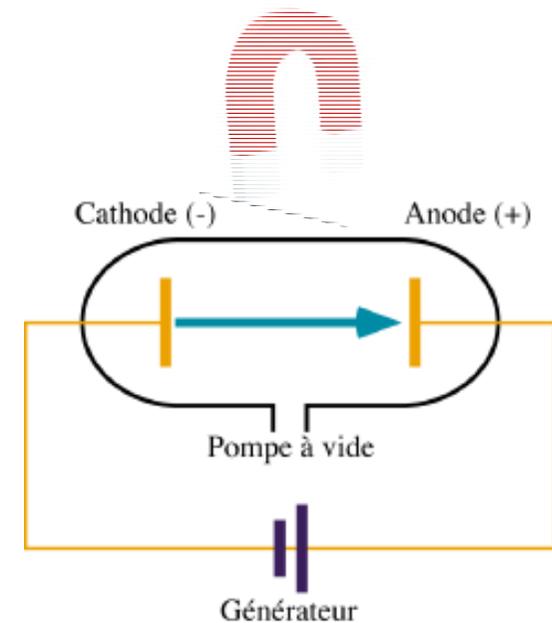
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# La découverte de l'électron

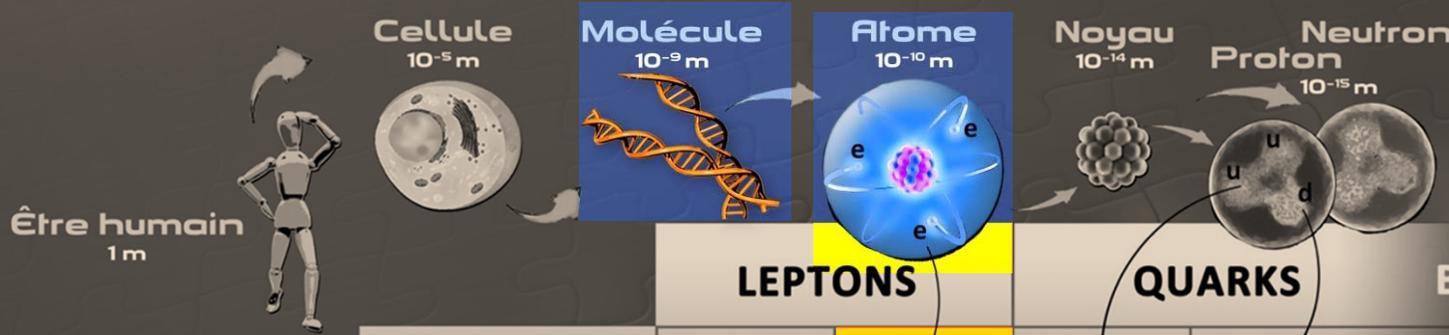


- Joseph John (« J.J ») Thomson (1897)
  - Etude des rayons cathodiques
- Charge négative
- Sensibilité à un champ électrique
  - **Caractéristiques des particules chargées**
- Rapport charge sur masse  $\sim 1000$  plus élevé que pour un atome d'hydrogène
  - **Ces nouveaux « corpuscules » sont soit très chargés, soit très petits**
- Ce rapport est indépendant du matériel utilisé pour réaliser l'expérience
  - **Ces rayons sont universels**



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



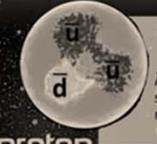
	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$H$ Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES		Interaction faible		Bosons Z, W <sup>±</sup>	
Portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction électromagnétique		Photon $\gamma$	
	infinie	Interaction forte		Gluons g	
	10 <sup>-15</sup> m	Gravitation		Graviton (?)	
infinie				Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies	

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Les atomes existent-ils vraiment ?

Robert Brown (1827)



Mouvement d'un grain de pollen dans de l'eau

Quelle est son origine ?

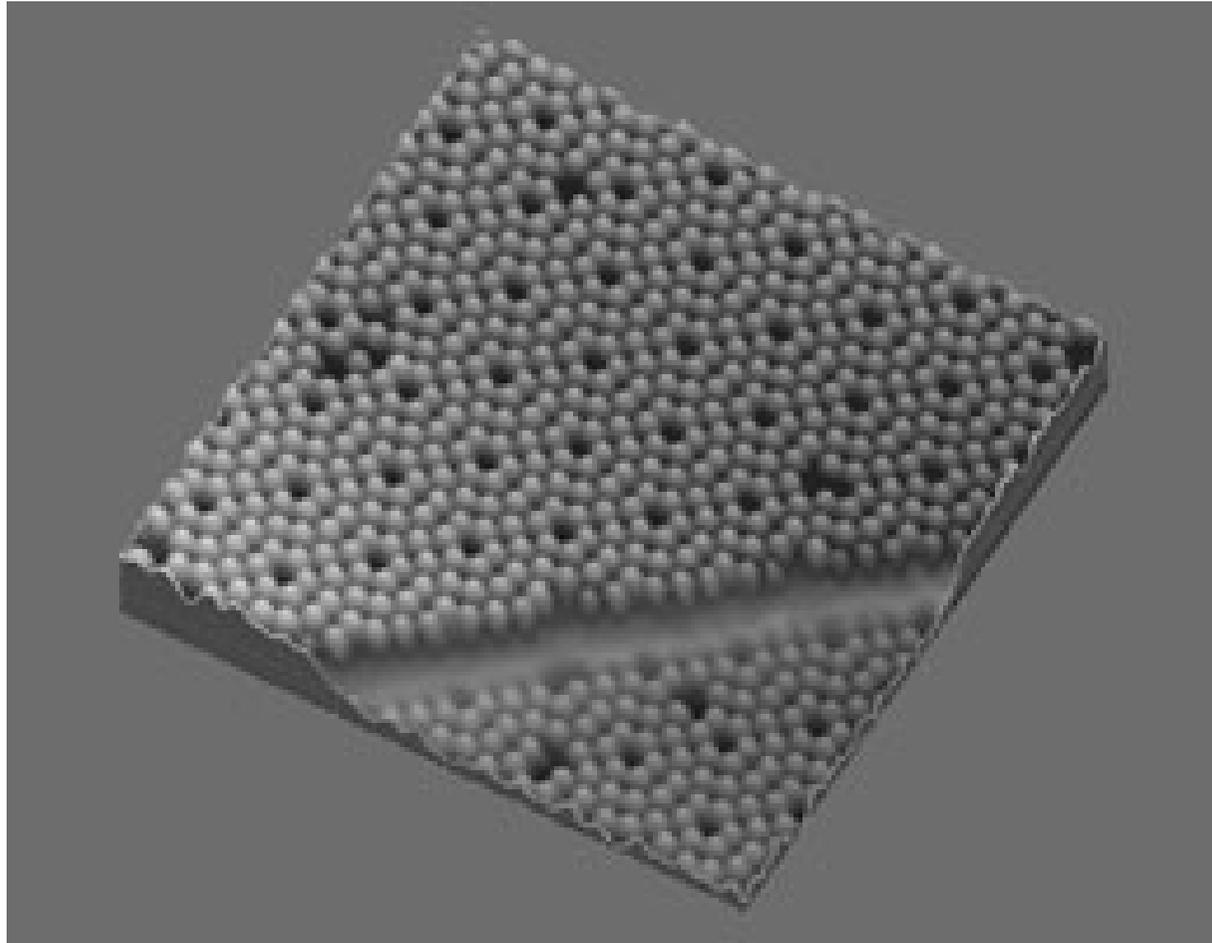
1905 (« annus mirabilis »)

Ce mouvement est dû à des collisions aléatoires et répétées entre le grain de pollen et les molécules d'eau

Il y a à peine un siècle !

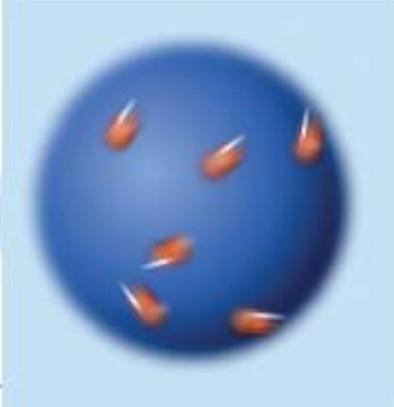


# Oui ils existent !



**Atomes de silicium** observés à l'aide d'un  
Microscope électronique à effet tunnel  
Université de Lund (Suède)

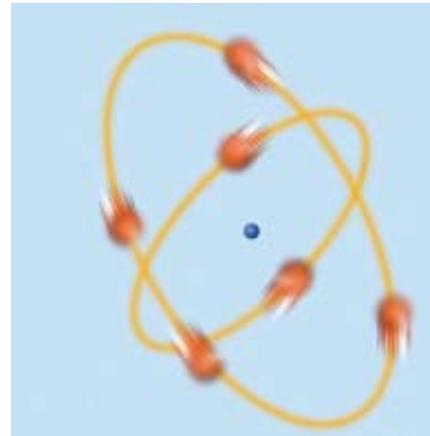
# A quoi ressemble un atome ?



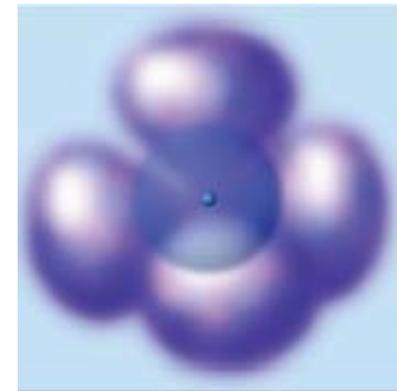
Thomson (1903)  
Modèle du  
« Plum-Pudding »



Rutherford (1909)



Bohr (1913)

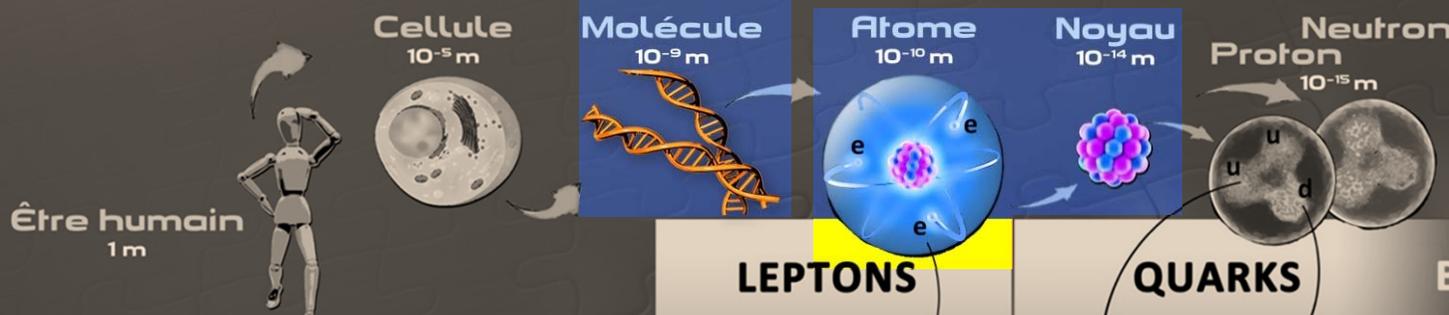


Atome « moderne »

- Les électrons se trouvent sur différents niveaux d'énergie
- Ce sont plutôt des « nuages » que des particules ponctuelles  
→ Leur évolution est gouvernée par des probabilités

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t = 3.6 \cdot 10^{-25}$ s, $Q = 0$ , $m = 125$ GeV/c <sup>2</sup>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées	Effets
$10^{-17}$ m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15}$ m	Interaction forte	Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



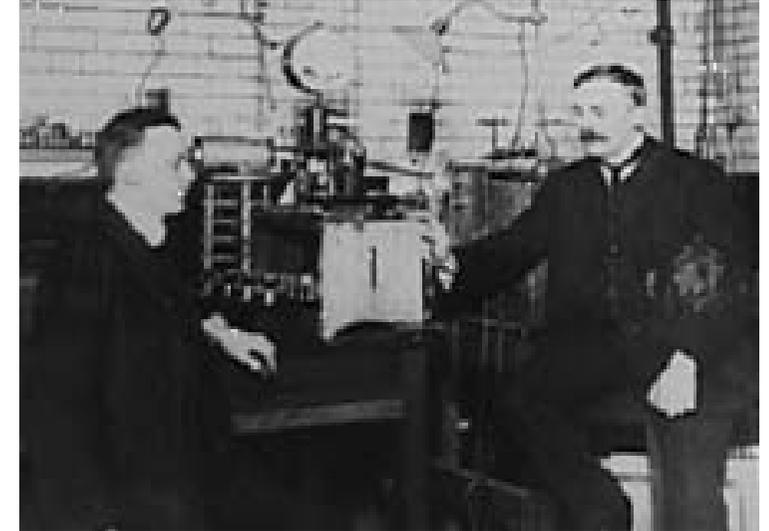
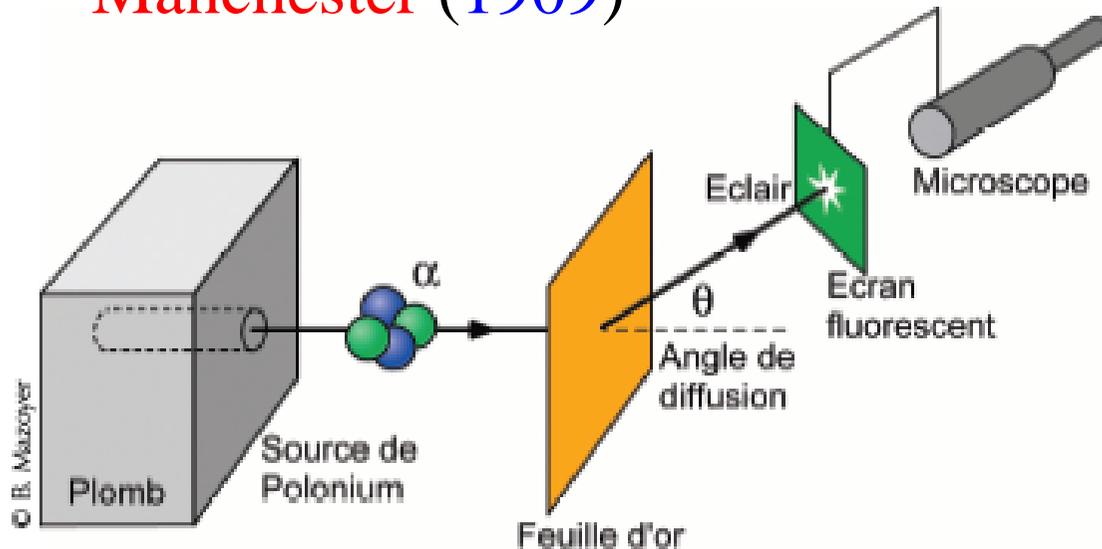
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# Les atomes sont presque vides

Manchester (1909)

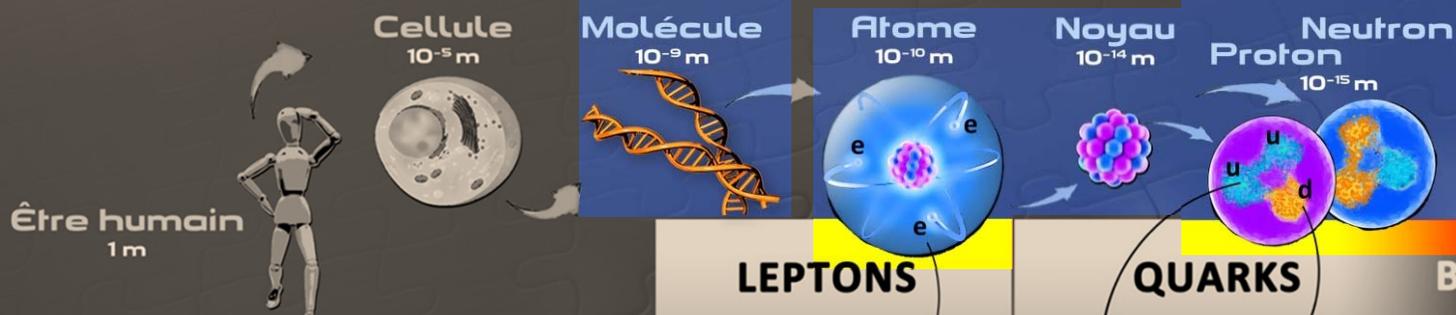


Geiger & Rutherford

- Des noyaux d'Helium (particules  $\alpha$ ) vont frapper une **fine feuille d'or**
- La plupart des noyaux ne sont pas déviés  $\Rightarrow$  ils ne voient « rien » !
- Une petite fraction repart « **en arrière** »  
 $\Rightarrow$  ils ont heurté quelque chose de petit et de dur : **le noyau atomique**  
10 000 fois plus petit que l'atome !

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$t=3.6 \cdot 10^{-25} s, Q=0, m=125 \text{ GeV}/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

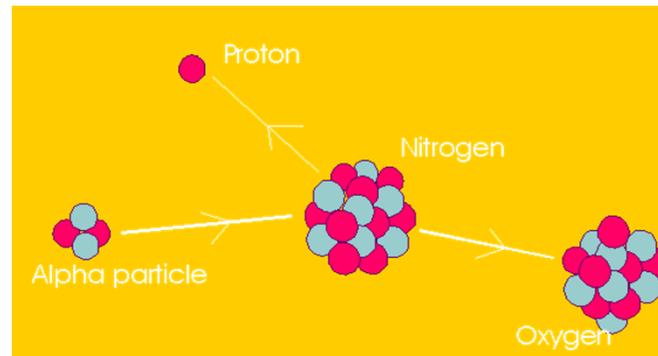
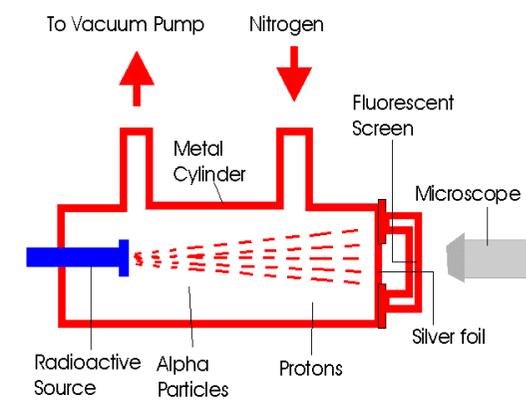


### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Découverte du proton

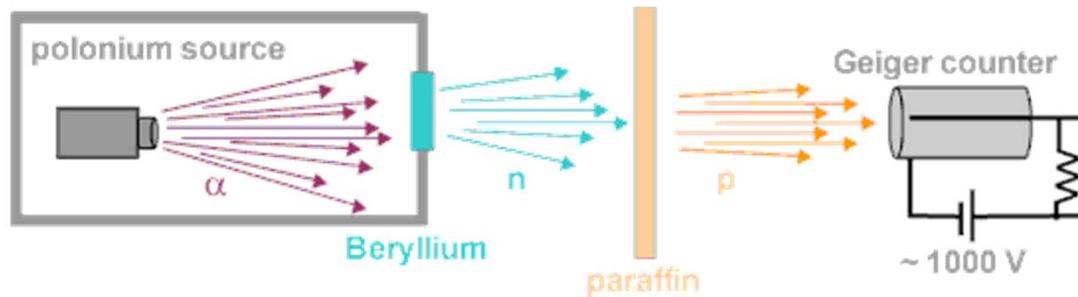
- Ernest Rutherford (1918)
- Diffusion de particules  $\alpha$  sur du diazote
  - Rutherford observe la trace de noyaux d'hydrogène
  - Il prouve que cet hydrogène provient nécessairement du diazote
  - **L'azote doit donc contenir le noyau d'hydrogène !**



- **Il propose de faire du noyau d'hydrogène une particule élémentaire ...**
- ... baptisée « proton » en l'honneur de **William Prout** qui, en 1815 (!), avait fait l'hypothèse que la masse atomique de chaque élément était un multiple entier de celle de hydrogène, suggérant ainsi que l'atome d'hydrogène était la seule particule vraiment élémentaire.

# Découverte du neutron

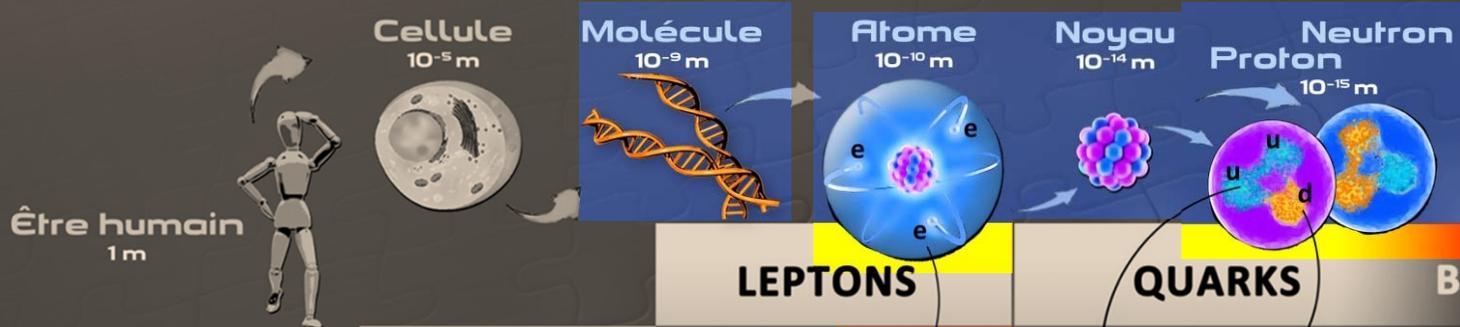
- « Neutrone »  $\Leftrightarrow$  « gros neutre » en Italien
- Une radiation inconnue émise par une cible de béryllium bombardée par des particules (noyaux d'Helium)



- Phénomène observé d'abord en France par Irène et Frédéric Joliot-Curie  
→ Ils en font une mauvaise interprétation
- James Chadwick réalise une expérience similaire  
et en tire la bonne conclusion qu'il publie en janvier 1932
- Les Joliot-Curie et Chadwick reçoivent des prix Nobel en 1935  
Radioactivité artificielle      Neutron

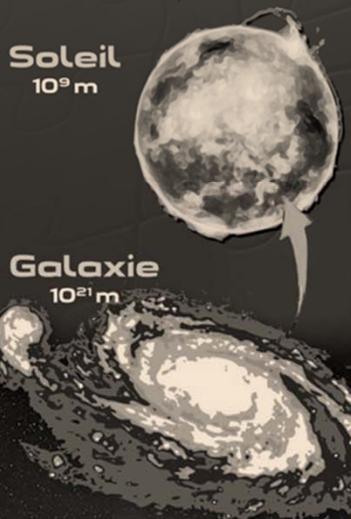
# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	$H$ $t = 3.6 \cdot 10^{-12} s$ , $Q = 0$ , $m = 125 GeV/c^2$
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES		Bosons Z, W <sup>±</sup>	
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> de certains noyaux instables	
infinie	Interaction électromagnétique	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie	
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire	
infinie	Gravitation	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies	



Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

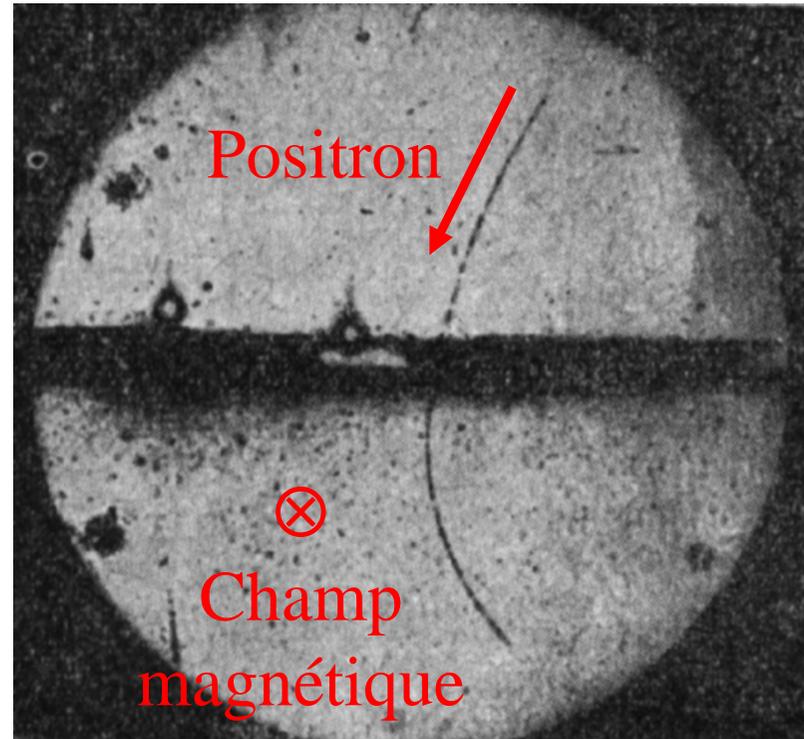
- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

**ANTIMATIÈRE**

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

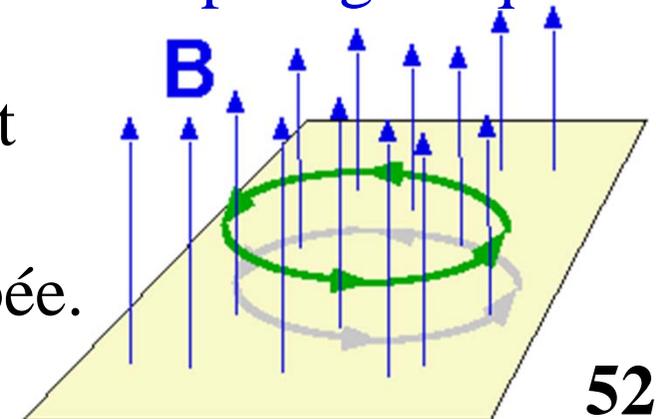
# Découverte du positron (1932)



- Charge positive
- Plus léger qu'un proton
- Première particule d'**antimatière**
- Prédite par le théoricien **P.A.M. Dirac** in 1928.

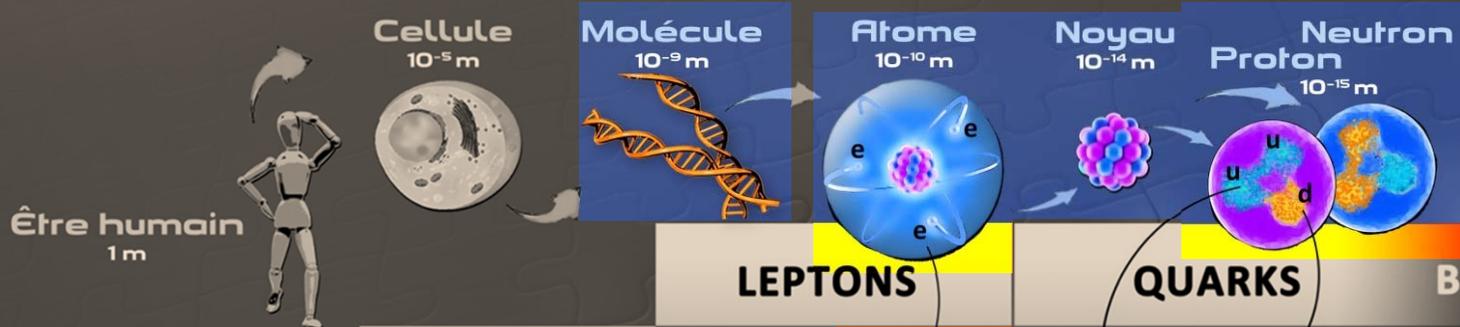
Mouvement d'une particule dans un **champ magnétique**

Plus sa vitesse est élevée, moins sa trajectoire est courbée.



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051 \text{ GeV}/c^2$	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	$d$ bas / down $t = 15 \text{ min}$ $Q = -e/3$ $m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$	<b>BOSON de HIGGS H</b> $t = 3,6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ $Q = 0$ $m = 125 \text{ GeV}/c^2$ Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$	$c$ charme / charm $t = 10^{-12} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 0,1 \text{ GeV}/c^2$	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}/c^2$	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ $Q = -e$ $m = 1,78 \text{ GeV}/c^2$	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ $Q = -e/3$ $m = 4,2 \text{ GeV}/c^2$	

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées	Rôles
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Découverte du muon

- A nouveau **Carl Anderson** (1936)
- Le **muon** a la même charge que l'électron
- Sa masse est entre celle de l'électron et du proton

→ On n'attendait pas ce nouveau membre de la famille des particules!

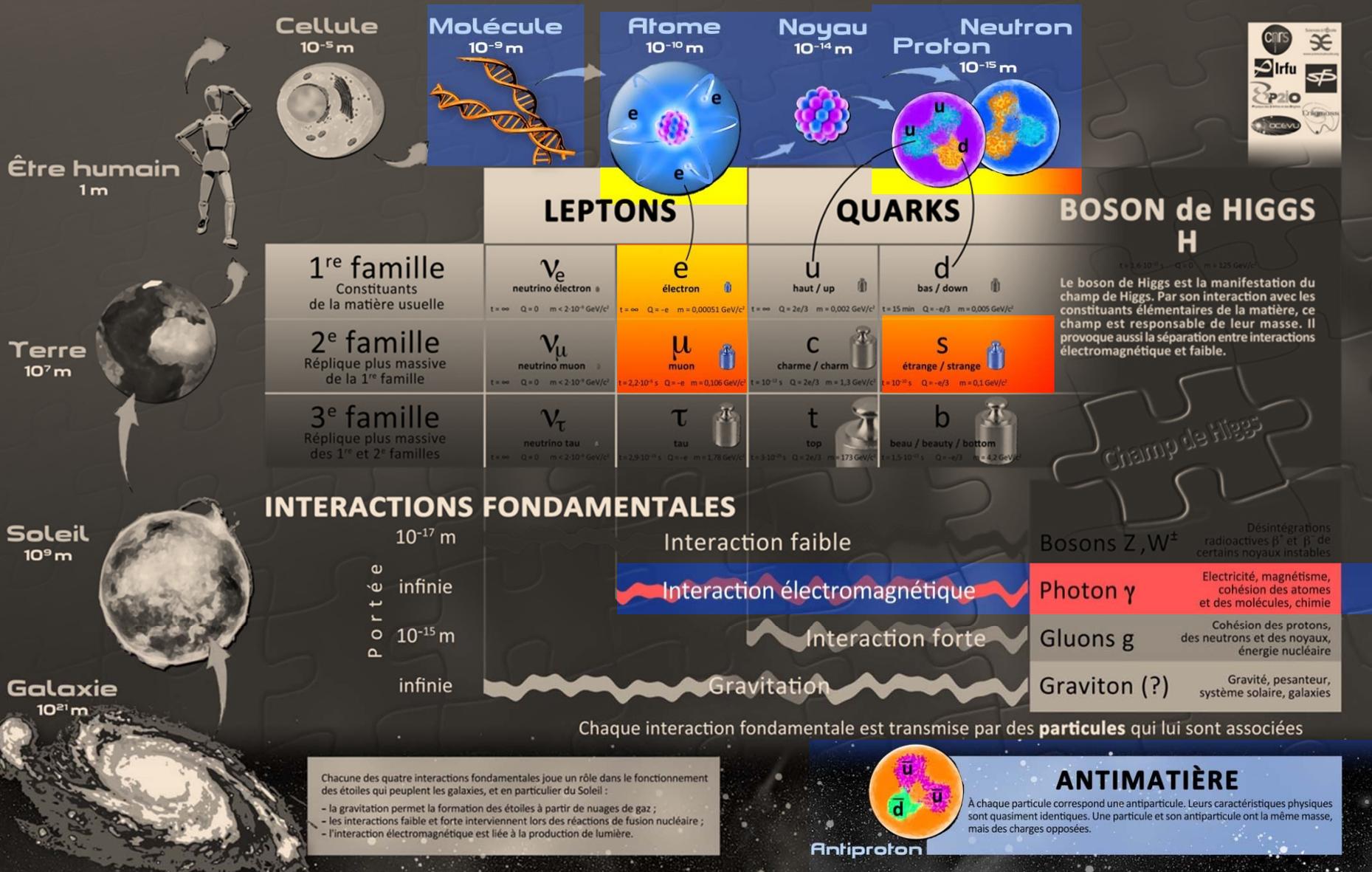


**I. Rabi**, Prix Nobel de Physique 1944

→ **Aucune théorie disponible pour expliquer l'existence de cette nouvelle particule**

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière

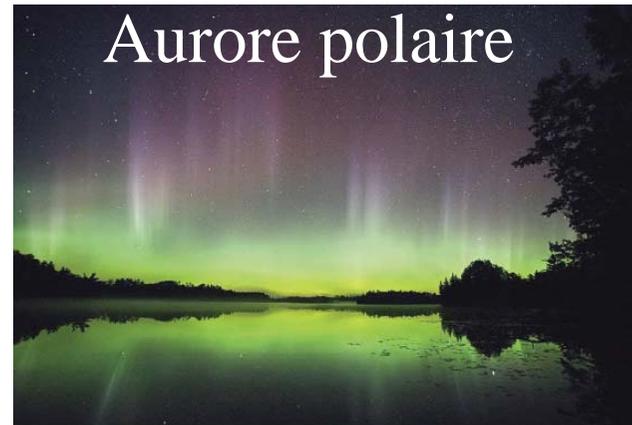
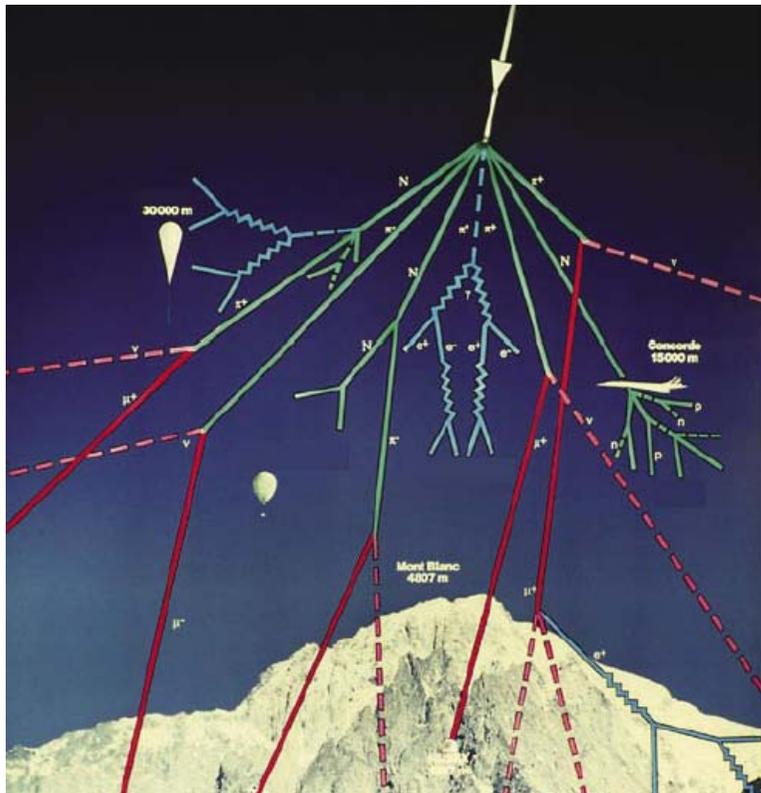


# Les Rayons cosmiques

- Des particules énergétiques en provenance de l'espace :  
~90% protons, ~9% noyaux d'Hélium, ~1% électrons...
- Sources: le Soleil, des étoiles particulières, situées dans notre galaxie ou au-delà
- Peuvent être aussi énergétiques qu'une balle de tennis !



Victor Hess



Aurore polaire



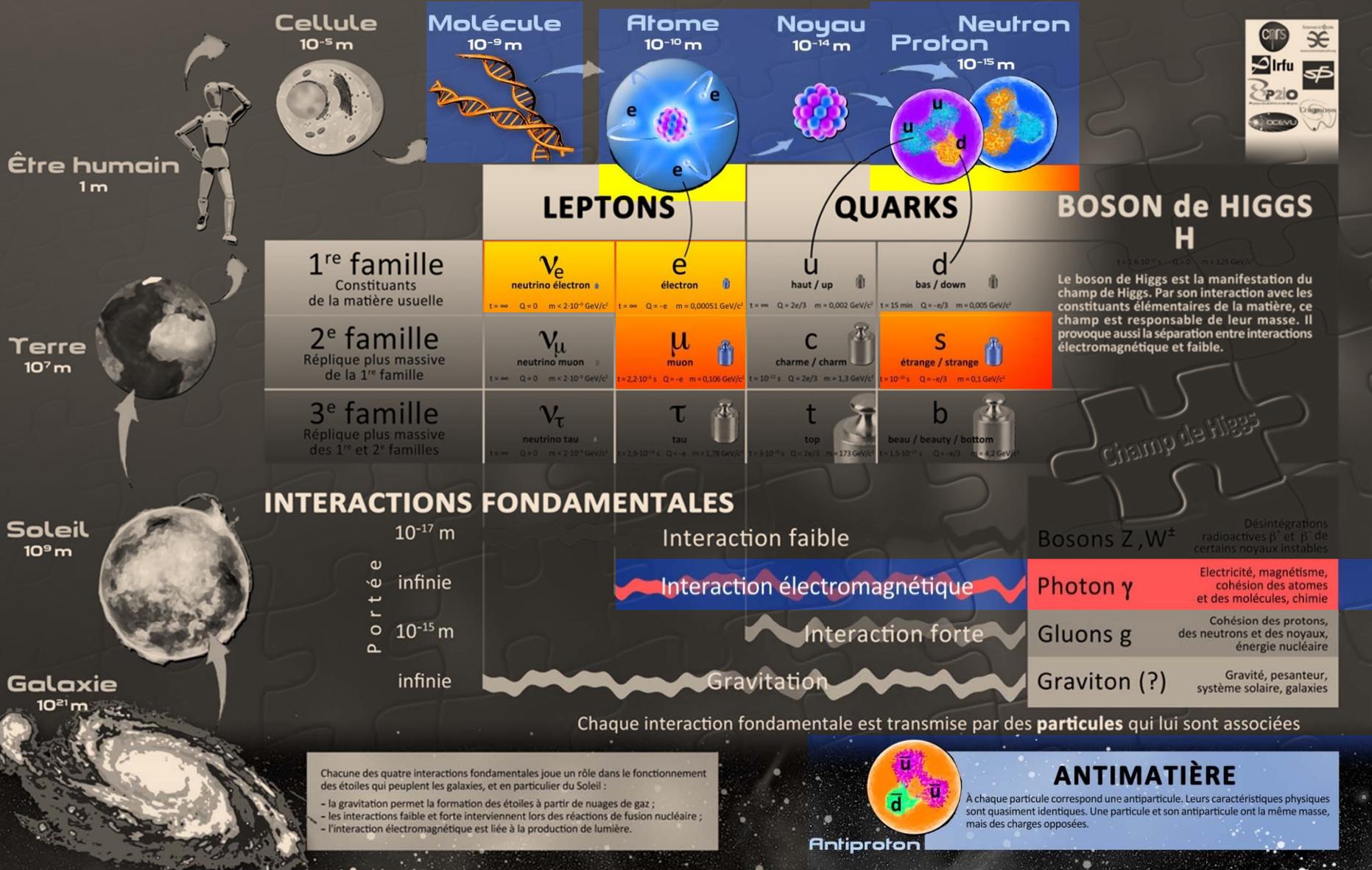
Vol en ballon

Aurore vue de la navette spatiale



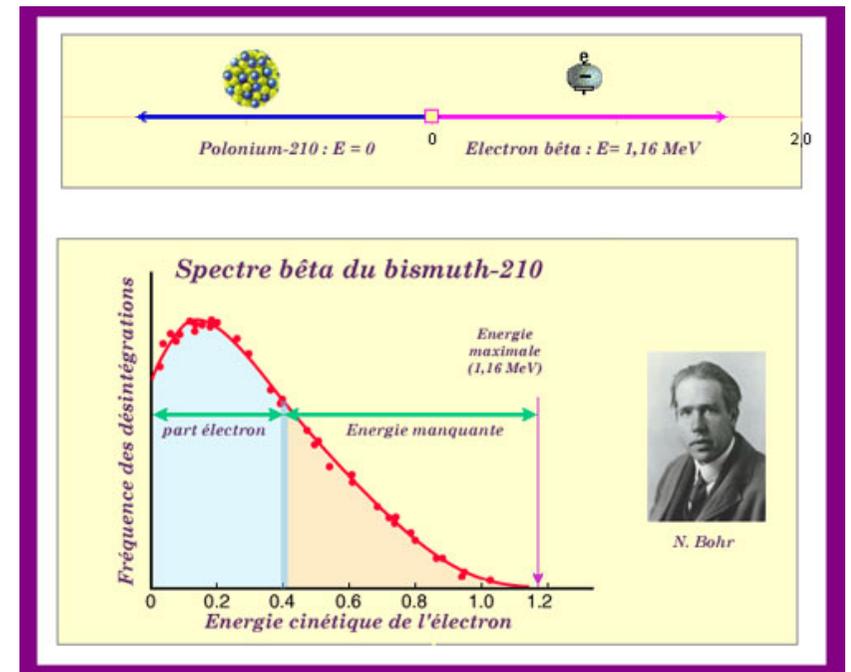
# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



# Les neutrinos

- Particules très légères et neutres électriquement
  - N'interagissent que via l'interaction faible
    - Très difficile à détecter
- « Inventés » en 1930 par Pauli pour « sauver » le principe de conservation de l'énergie, mis à mal par l'étude des spectres de désintégrations  $\beta$
- Pauli : « I have done a terrible thing. I have proposed a particle that cannot be detected. It is something no theorist should ever do ».
- Neutrinos inclus dans la théorie de Fermi pour l'interaction faible
  - « Petit neutre »



## La lettre de Pauli

Zurich, 4 décembre 1930,

Chères Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs,

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique « fausse » concernant les noyaux N et Li6 [azote et lithium-6] ainsi que le spectre bêta continu, l'idée d'un expédient pour sauver le « principe d'échange » de la statistique et le principe de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotés d'un spin de valeur 1/2, obéissant au principe d'exclusion et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons doit être du même ordre de grandeur que celle des électrons, et en tout cas non supérieure à 0,01 de celle des protons. - Le spectre bêta continu se comprendrait alors en admettant par hypothèse que lors de toute désintégration bêta est émis, outre l'électron, aussi un neutron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante. [...]

A l'heure actuelle, cependant, je ne m'aventurerai pas à publier quelque chose sur cette idée, et je me tourne d'abord en toute confiance vers vous, chers Radioactifs, pour vous demander ce qu'il en serait d'une expérimentation établissant l'existence d'un tel neutron [...]

Je concède que mon expédient pourrait bien apparaître a priori comme peu crédible, parce que si les neutrons existaient, on les aurait sans doute vus depuis bien longtemps. Mais il faut oser pour réussir, et la gravité de la situation en ce qui concerne le spectre bêta continu est bien mise en lumière par un propos de mon très éminent prédécesseur, M. Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh, c'est comme pour les nouveaux impôts : il vaut mieux ne pas y penser du tout ! »

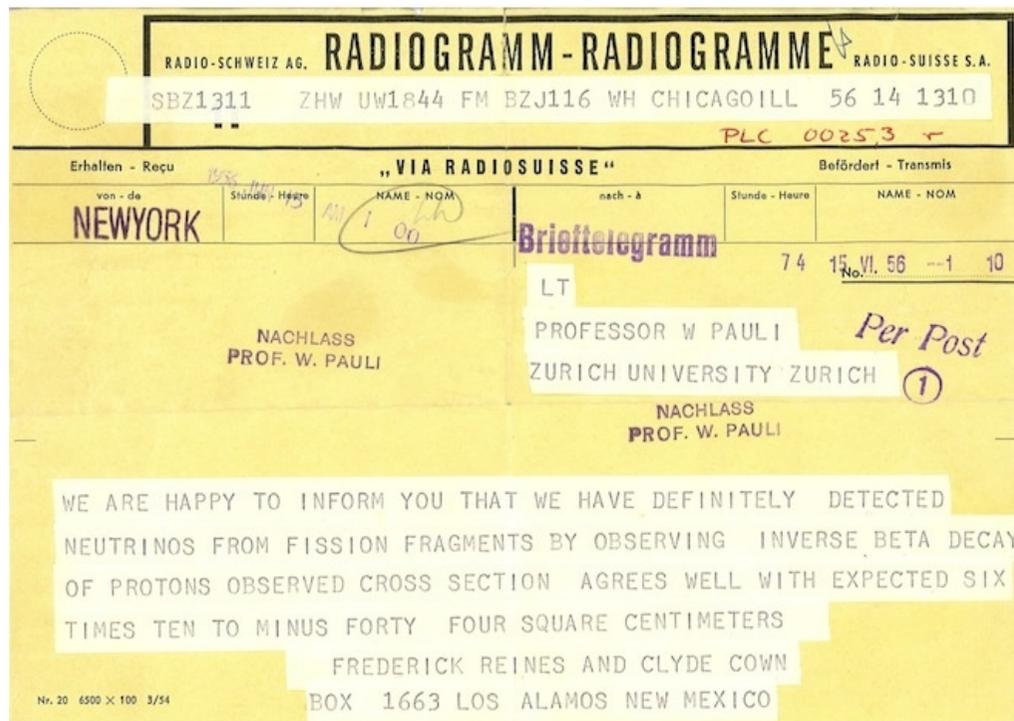
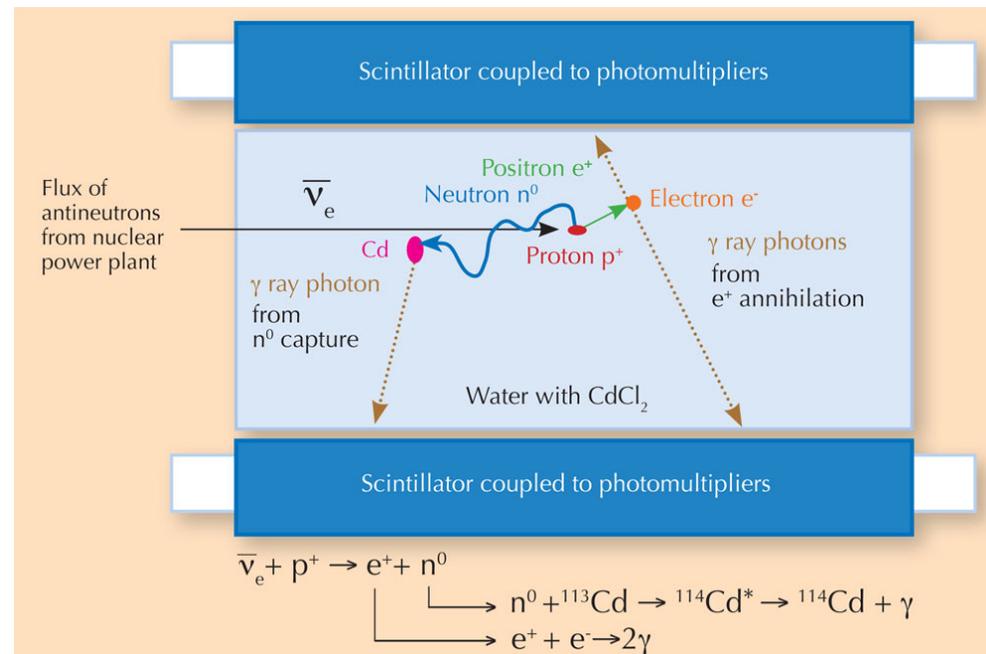
Mais c'est bien pourquoi il importe de discuter sérieusement de tout chemin qui pourrait nous mener hors de l'impasse. - Ainsi donc, chers Radioactifs, examinez et jugez. - Malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tübingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre. - [...]

Votre très dévoué,

W. Pauli

# Les neutrinos

- Découverte de l'antineutrino électron par Reines et Cowan en 1956, auprès du réacteur nucléaire de Savannah River
  - Flux typique d'un réacteur nucléaire  $> 10^{20} \bar{\nu}$  « détectables » / s
- Découverte des deux autres saveurs de neutrinos en 1962 (muon) et 2000 (tau)



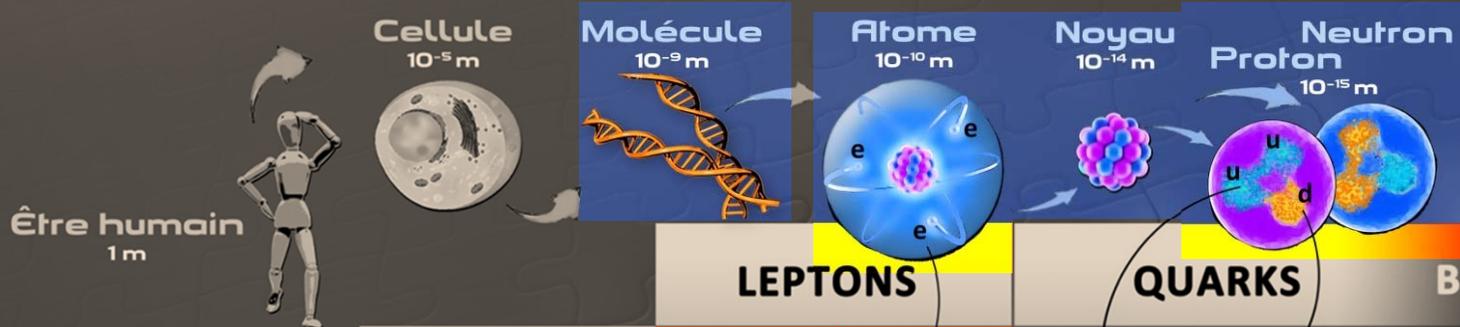
Frederick REINES and Clyde COWAN  
 Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to  
 him who know how to wait.

Pauli

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	$t = 3.6 \cdot 10^{-25} s$ , $Q = 0$ , $m = 125 \text{ GeV}/c^2$
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Fermilab, 1962

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

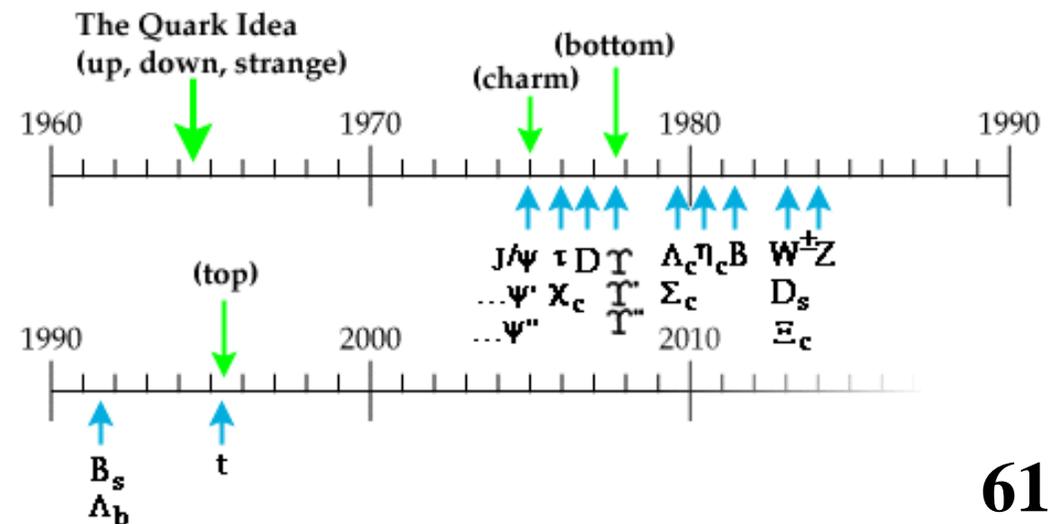
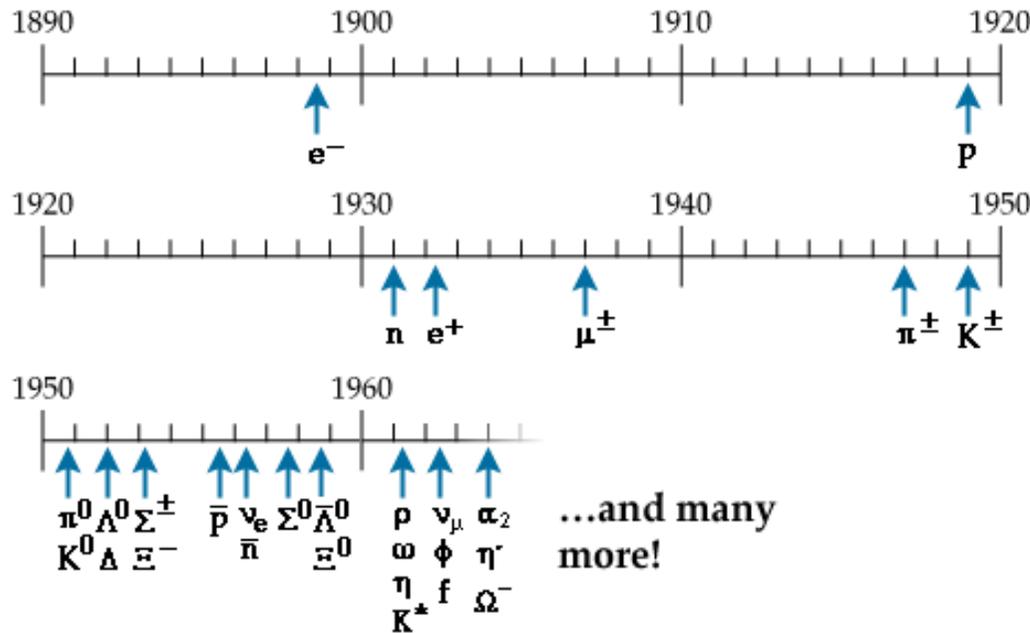
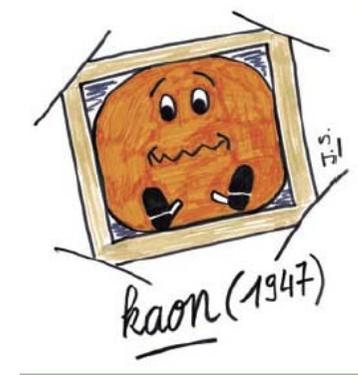
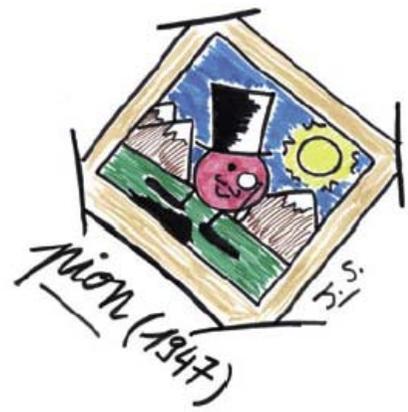


### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

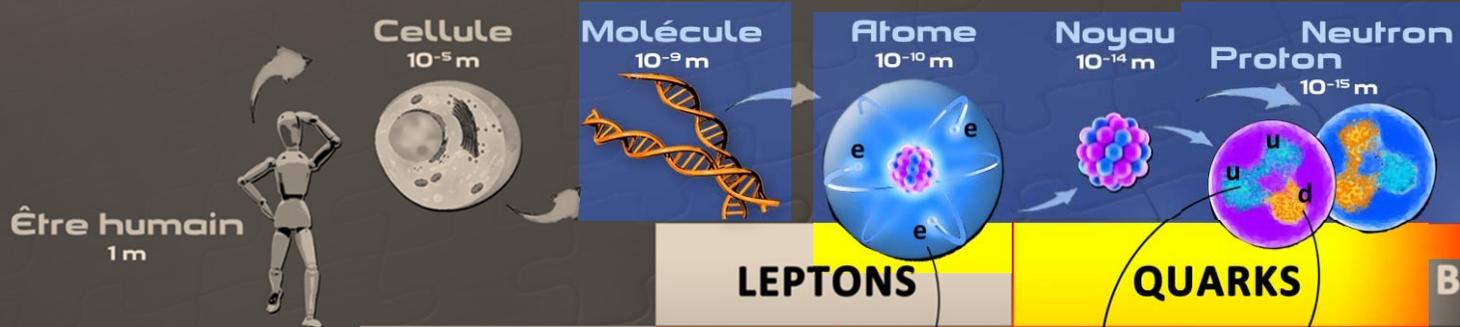
Antiproton

# Un vrai « zoo » de particules



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

**BOSON de HIGGS H**  
 $t = 3.6 \cdot 10^{-25} s$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 \text{ GeV}/c^2$   
 Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées
$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible	Bosons $Z, W^\pm$
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte	Gluons $g$
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



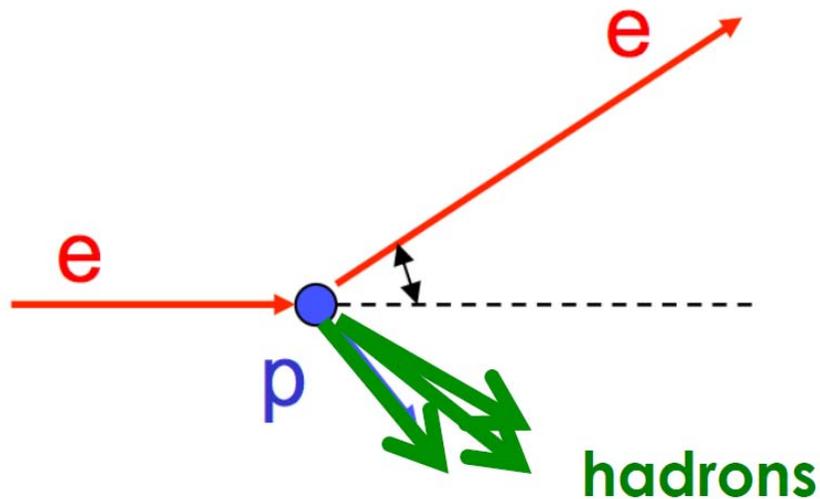
Antiproton

### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# Structure du proton

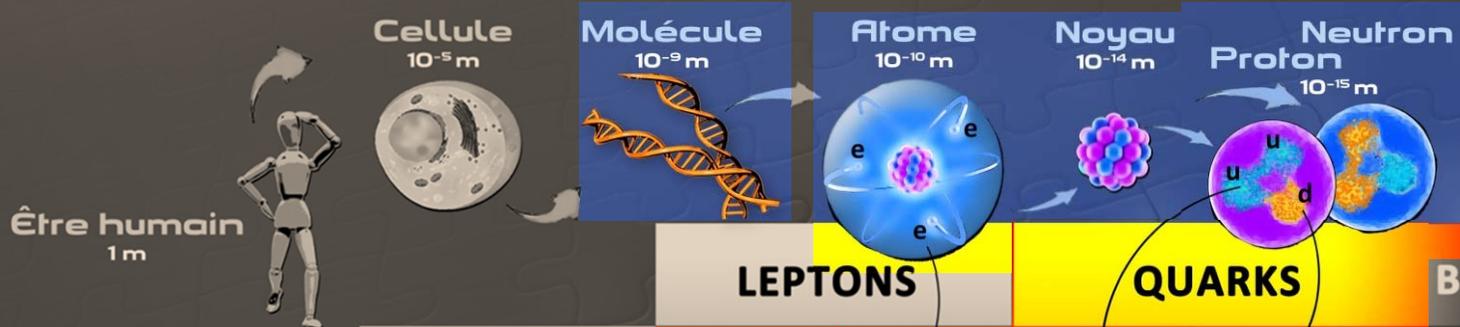
- 1968 à SLAC (Californie) :  
Friedman, Kendall & Taylor
- Expérience « à la Rutherford » :  
diffusion profondément inélastique d'un  
électron très énergétique sur un proton



- Résultats comparables à ceux d'une diffusion élastique  
sur des constituants ponctuels : les quarks
  - Aucun effet mesurable lié à la taille des quarks  $\Rightarrow$  particules ponctuelles
- Aucun effet avec un électron pour cible  $\Rightarrow$  particule ponctuelle

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

### BOSON de HIGGS H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



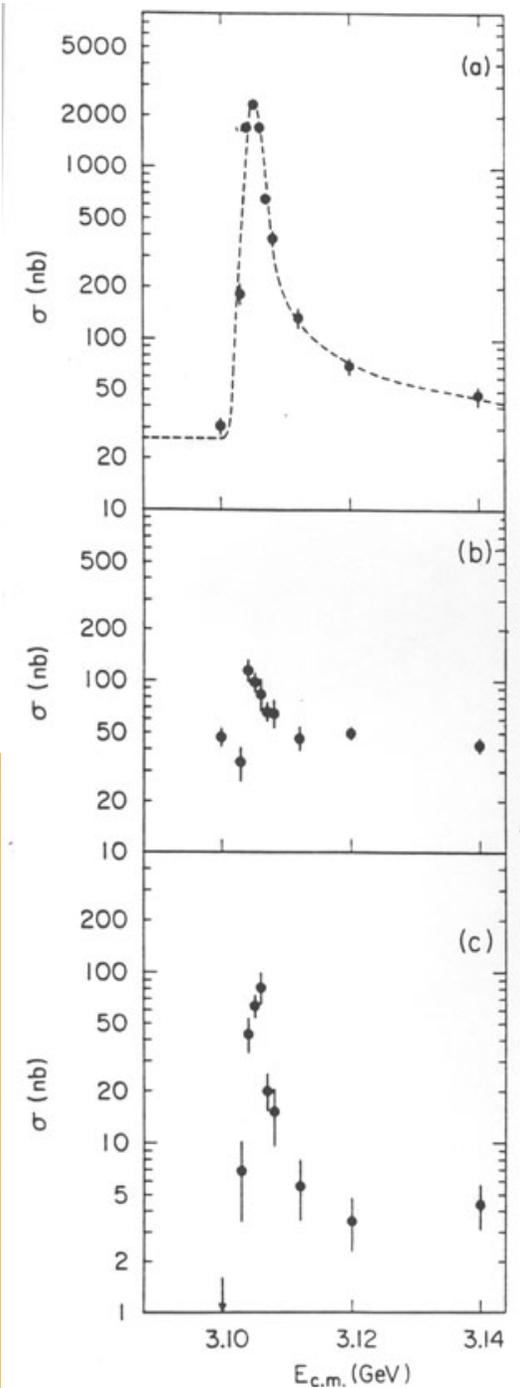
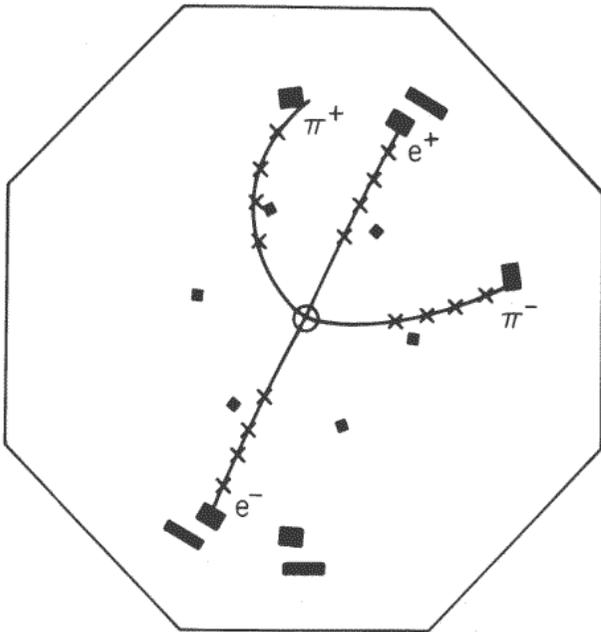
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

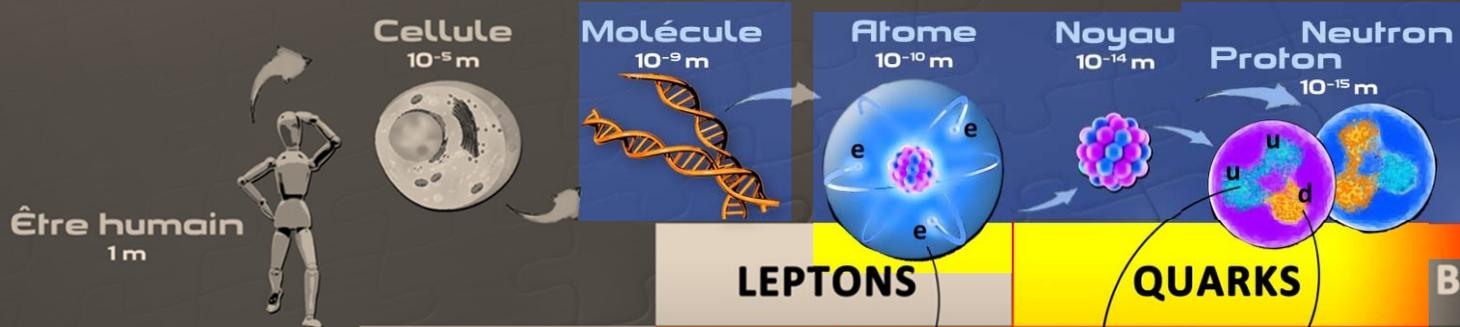
# La révolution de novembre

- Novembre 1974 : découverte simultanée à SLAC (côte ouest des USA) et à Brookhaven (côte est) d'une nouvelle particule : le  $J/\Psi$
- Etat lié  $c\bar{c}$  : découverte du 4<sup>ème</sup> quark
  - Prédit théoriquement quelques années plutôt  
→Glashow, Illiopoulos, Maiani (GIM)



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>

### BOSON de HIGGS H

$t = 3 \cdot 10^{-22}$  s  $Q = 0$   $m = 125$  GeV/c<sup>2</sup>

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées	Effets
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

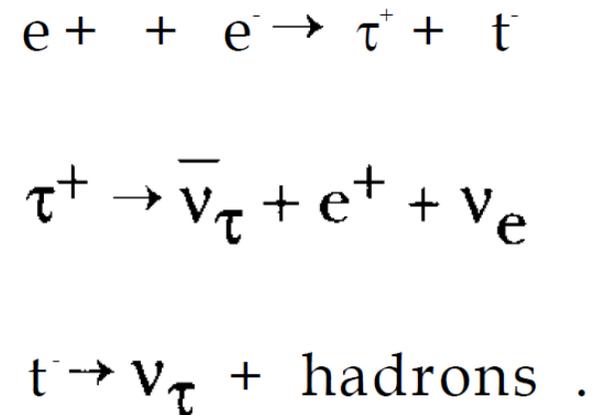
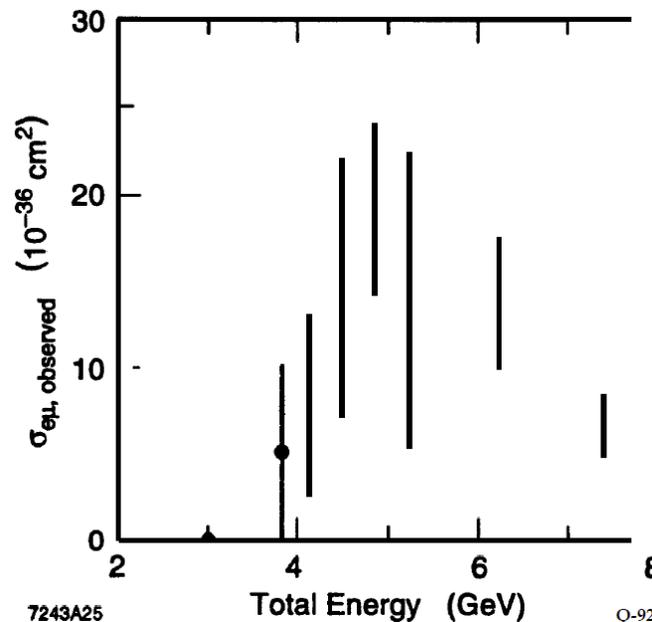
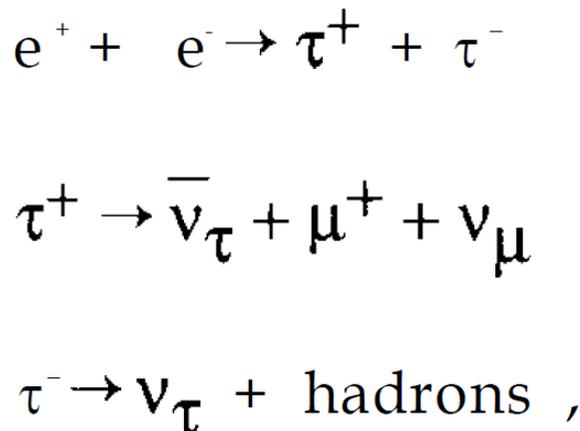
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# La 3<sup>ème</sup> famille

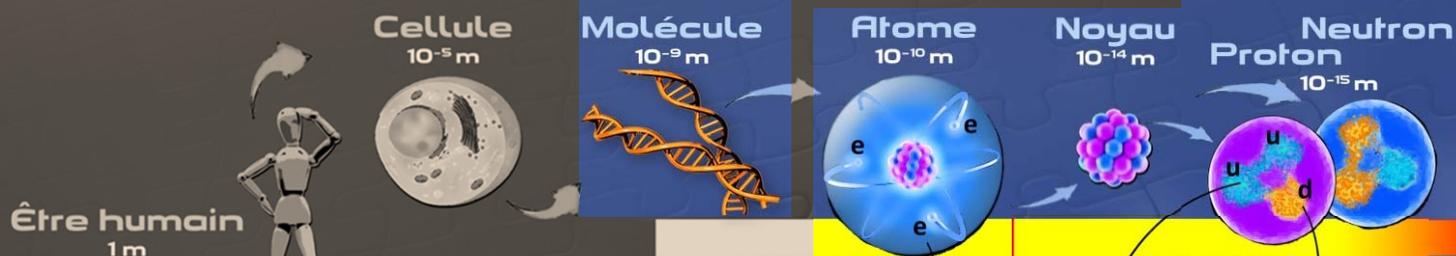
- Découverte par la collaboration Mark-I (toujours à SLAC !) vers 1975-1976
  - Sous la direction de Martin Perl
- Recherche difficile car le lepton tau produit des neutrinos (indétectables) lors de sa désintégration
  - Mise en évidence d'un signal mystérieux, réel et impossible à expliquer avec les particules alors connues :

électron + positron  $\rightarrow$   $\underbrace{\text{électron ou muon}}_{\text{Détecté}} + \underbrace{\text{hadrons}}_{\text{Détecté}} + \underbrace{\text{énergie manquante}}_{\text{neutrinos}}$



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

### BOSON de HIGGS H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction	Particules associées
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



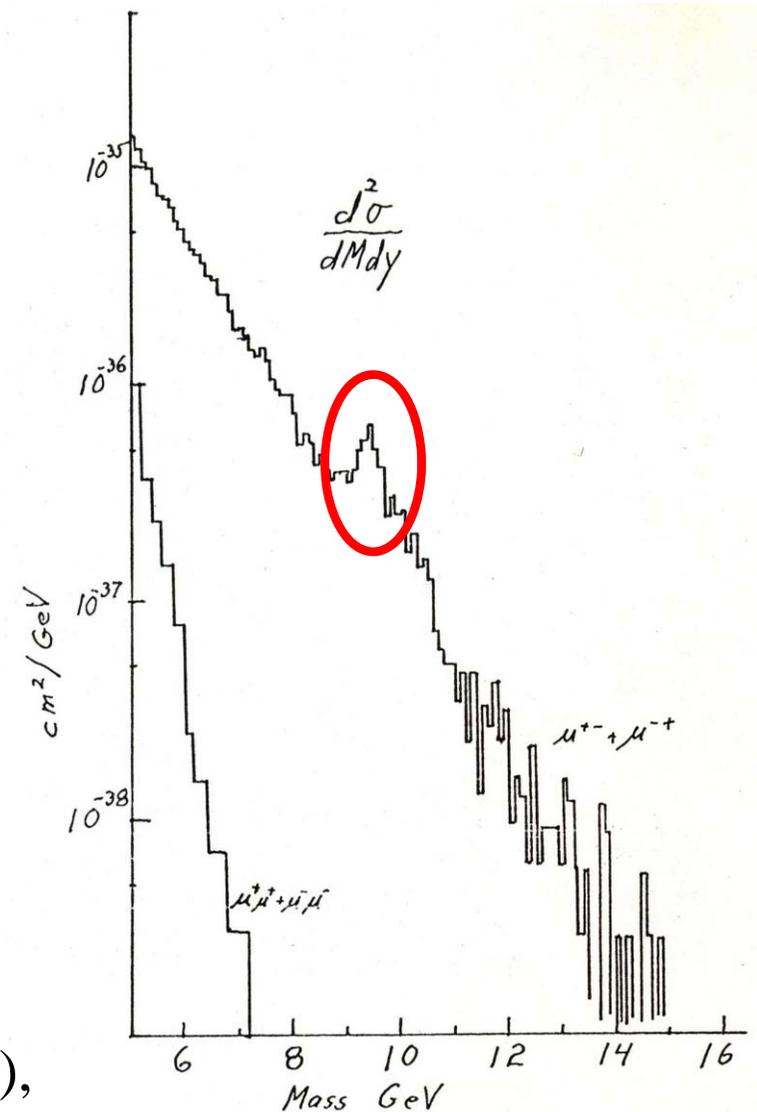
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

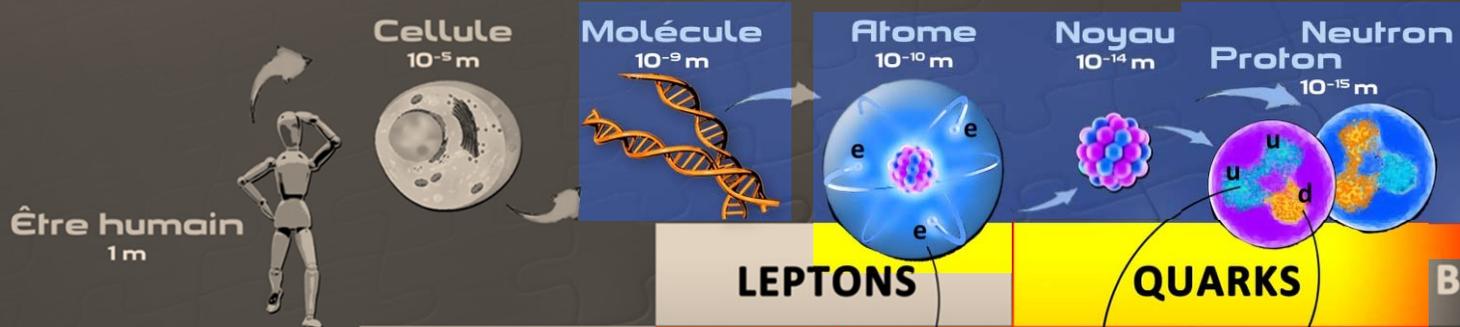
# Quark b et mésons B

- Découverte en 1977 au Fermilab (près de Chicago) par l'expérience E-288 (collisions de protons sur une cible fixe de platine), dirigée par L. Lederman, de la résonance  $\Upsilon$  (« upsilon ») : un état lié  $b\bar{b}$   
→ Le 5<sup>ème</sup> quark : la 3<sup>ème</sup> famille se remplit !
  - Les mésons B, formés de deux quarks dont un quark b, se sont révélés de formidables laboratoires pour tester le Modèle Standard en réalisant des mesures de précision, notamment dans le domaine de l'étude des différences entre matière et antimatière
- ⇒ De nombreuses expériences étudient ces particules :
- Les (super-)usines à B : BaBar (USA) & Belle (Japon), puis Belle-2 (Japon également) d'ici à la fin de la décennie
  - LHCb au LHC



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

### BOSON de HIGGS H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



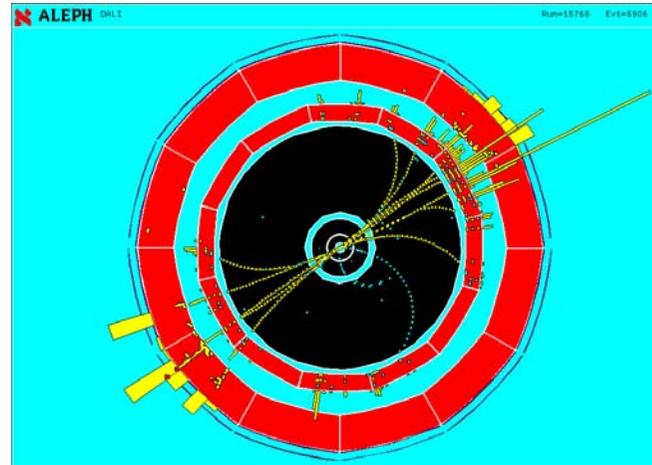
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

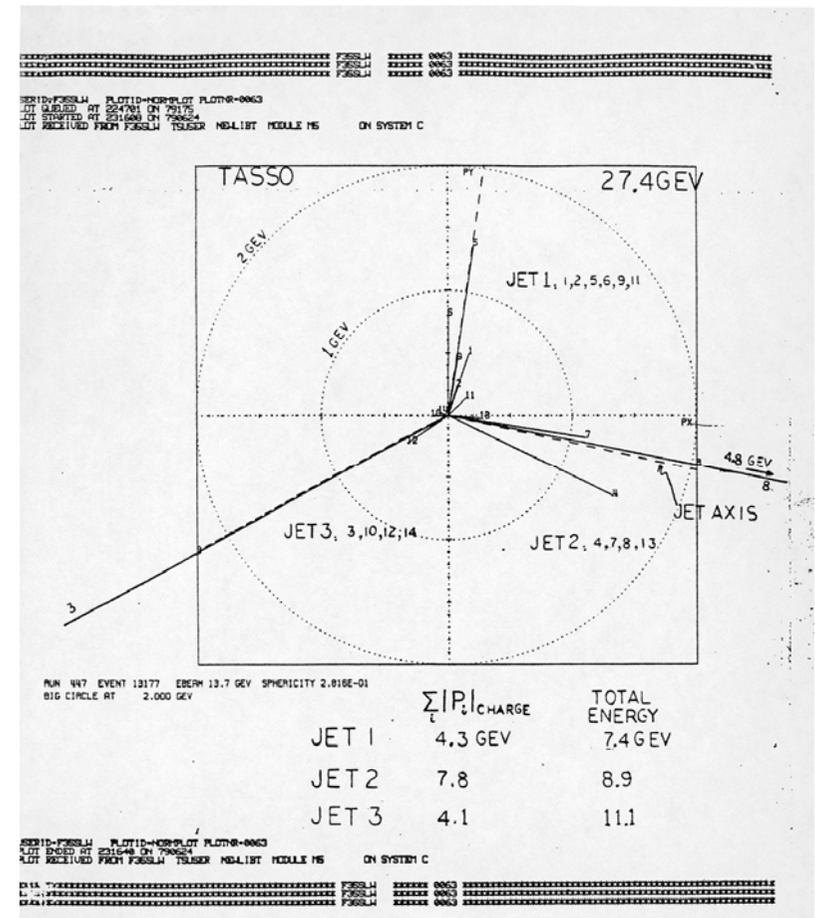
Antiproton

# Interaction forte et « jets »

- Les quarks n'existent pas à l'état libre
  - A peine produits, ils s'hadronisent : expérimentalement, on observe des « jets » de particules alignés avec la direction initiale des quarks

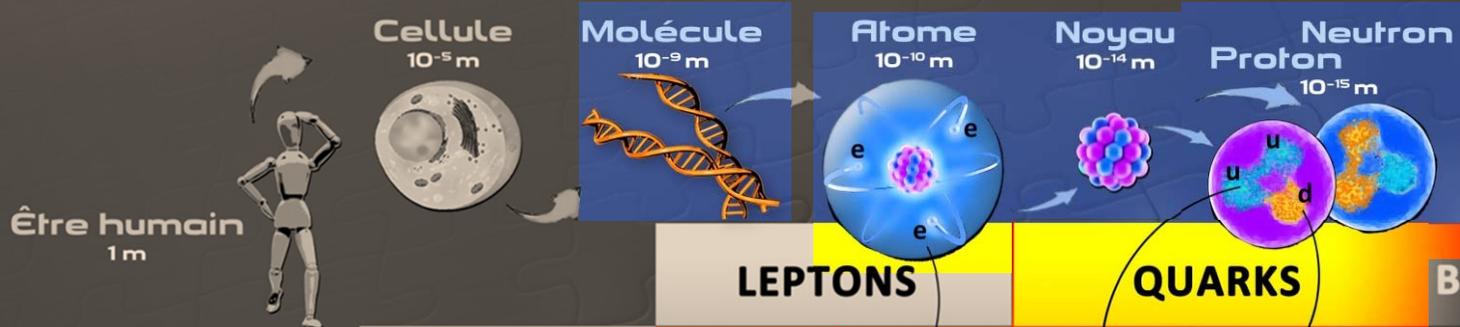


- 1979 : la collaboration Tasso observe un événement issu d'une collision électron-positron qui contient 3 jets
  - L'un des quarks issus de l'événement  $e^- + e^+ \rightarrow q + \bar{q}$  a rayonné un gluon qui s'est lui-même hadronisé
  - Il faut que les énergies en jeu soient suffisamment élevées pour pouvoir séparer les jets du quark et du gluon



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière

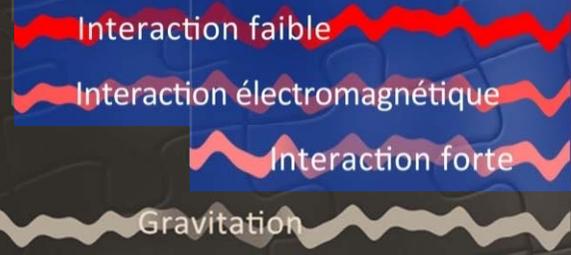
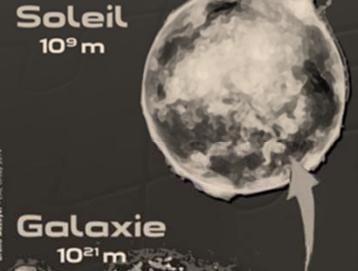


	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

**BOSON de HIGGS H**  
 $t = 3.6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 \text{ GeV}/c^2$

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



<b>Bosons Z, W<sup>±</sup></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons g</b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



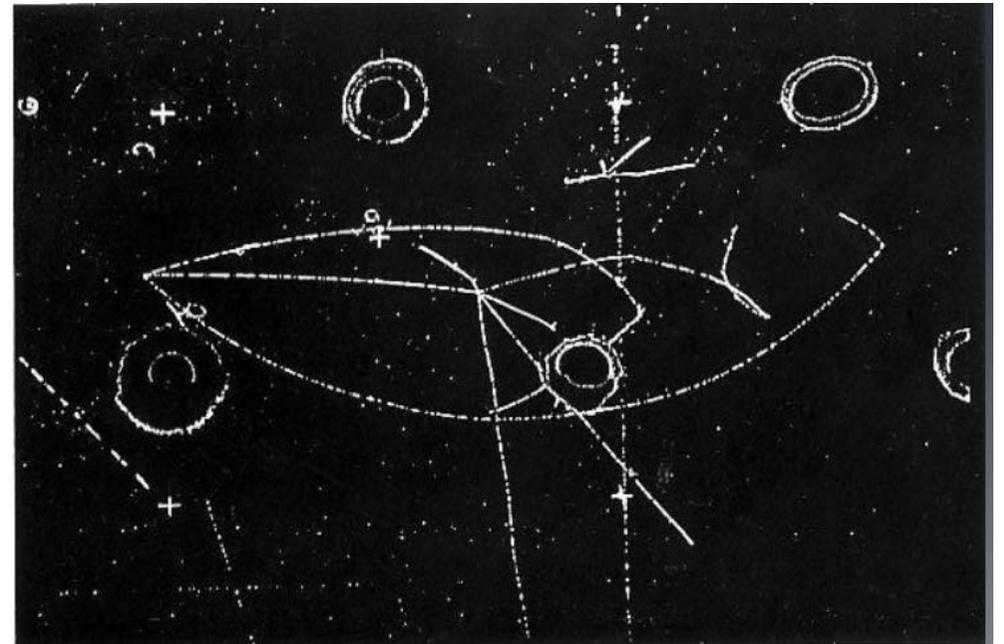
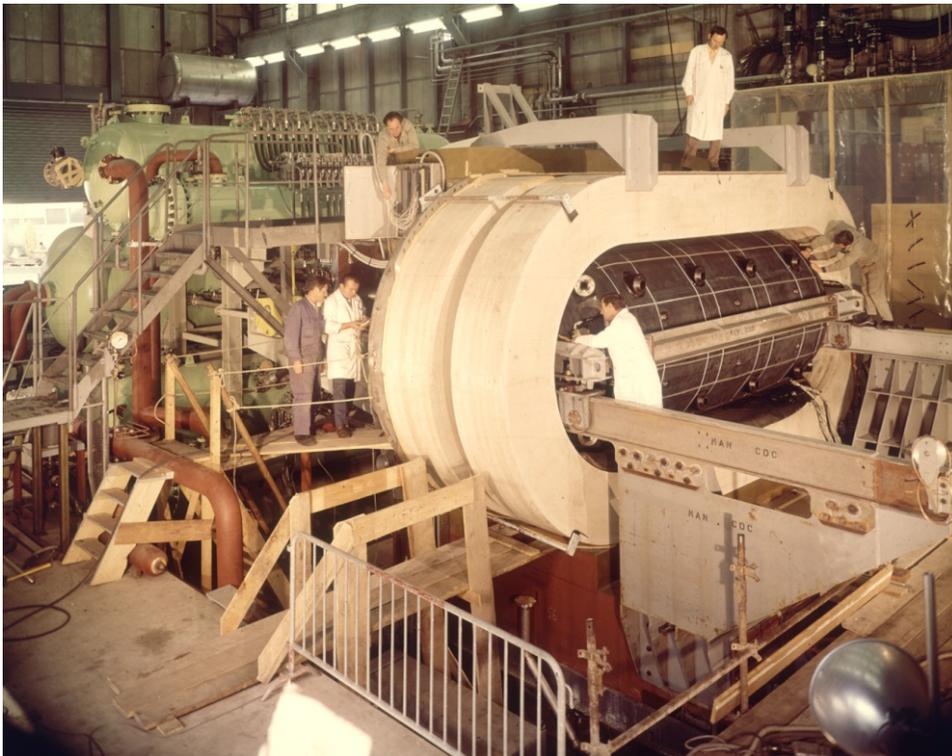
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

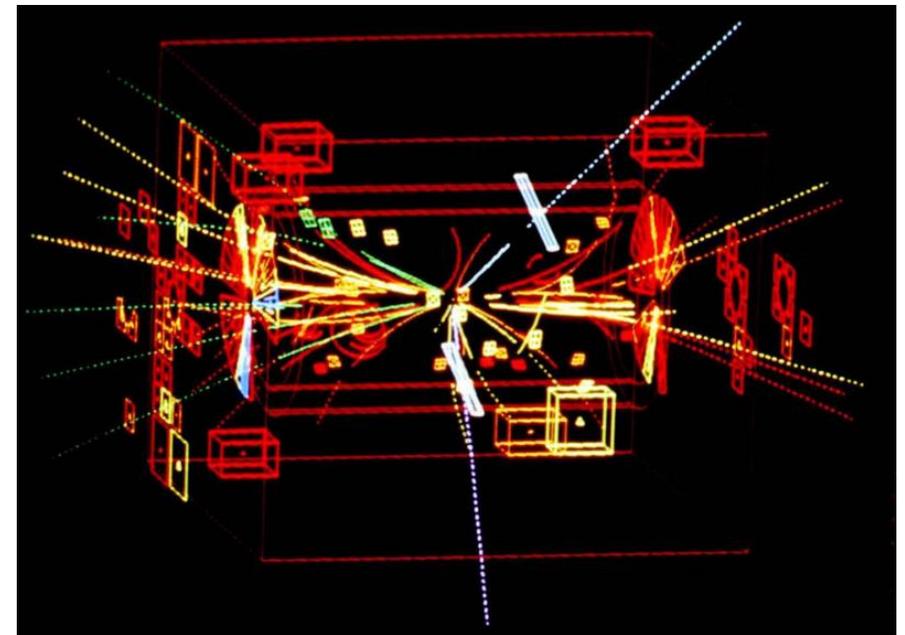
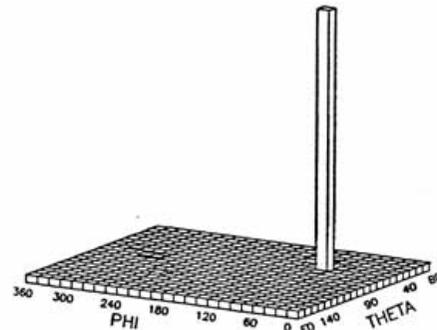
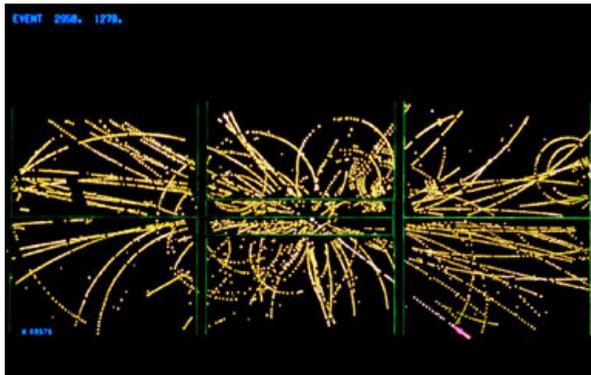
# L'unification électrofaible

- 1973 : la grande chambre à bulles du CERN Gargamelle trouve trois clichés (sur plus d'un million) montrant un nouveau phénomène, « les courants neutres » c'est-à-dire la diffusion élastique d'un neutrino sur un électron ou un nucléon.
  - Signe la présence d'un boson médiateur neutre, le Z, justement prédit par une théorie qui unifie les interactions électromagnétique et faible, laquelle devient l'un des piliers du Modèle Standard en cours d'élaboration



# L'unification électrofaible

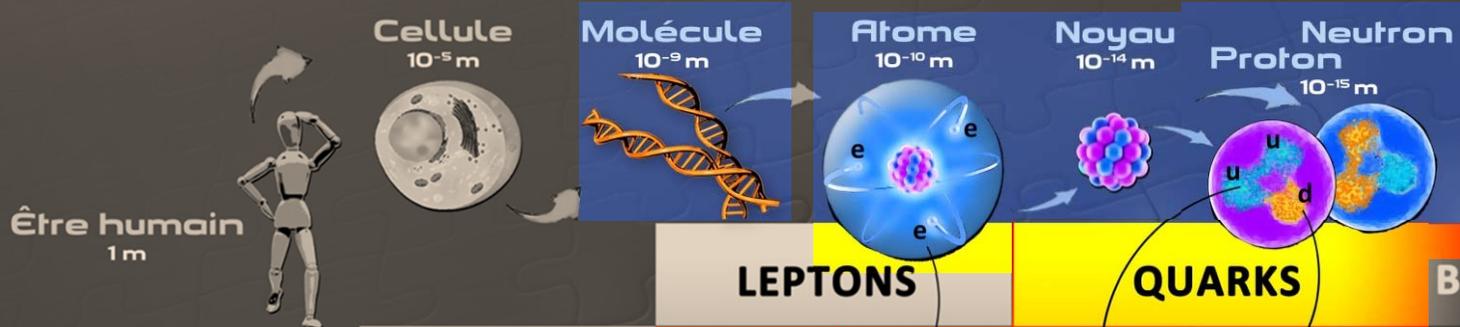
- Dernière étape : produire ces bosons électrofaibles ( $W^\pm$  et  $Z^0$ ), dont on sait qu'ils doivent être lourds – près de 100 fois la masse du proton
- Au CERN : transformation du « Synchrotron à protons » SpS en collisionneur proton-antiproton : le Sp $\bar{p}$ S – Carlo Rubbia et Simon Van der Meer
- 1983 : les expériences UA1 annoncent la découverte du W et du Z



- 1989 – 2000 : étude de ces bosons par le collisionneur LEP du CERN

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière

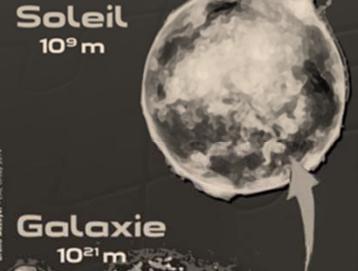


	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

**BOSON de HIGGS H**  
 $t = 3.6 \cdot 10^{-25} s$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 GeV/c^2$

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Portée	Interaction
$10^{-17} m$	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
$10^{-15} m$	Interaction forte
infinie	Gravitation

<b>Bosons <math>Z, W^\pm</math></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons <math>g</math></b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



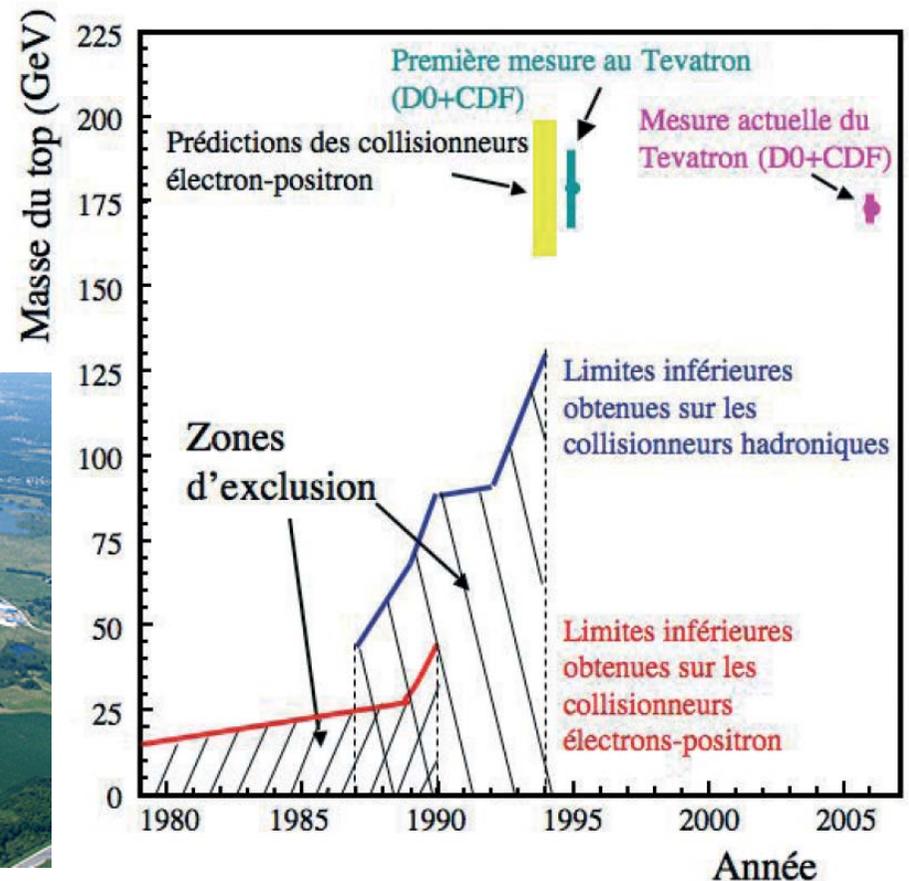
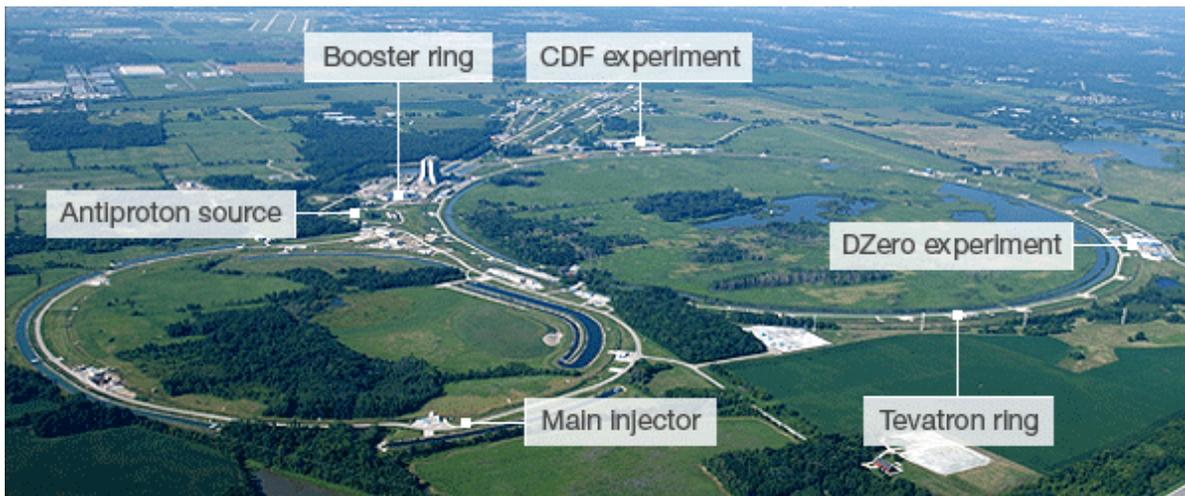
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

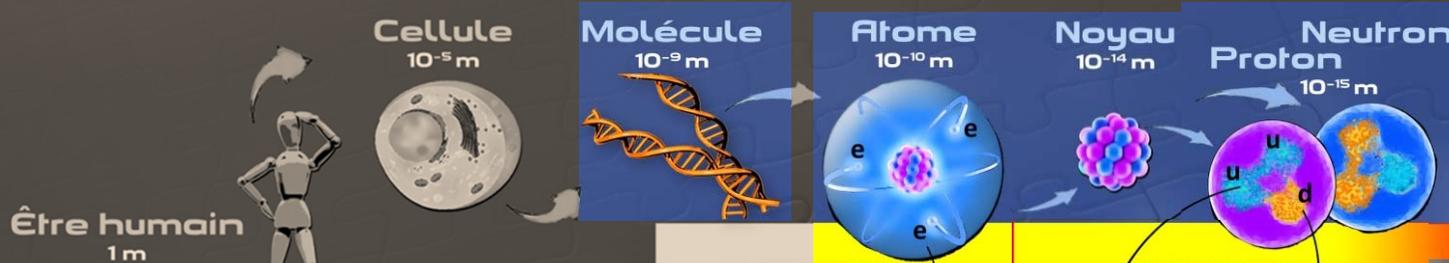
# Le quark top

- Le fermion le plus lourd :  $\sim 173$  GeV, autant qu'un atome d'or !
  - Tellement lourd qu'il se désintègre avant d'avoir eu le temps de s'hadroniser  
→ Il n'existe pas de méson  $t\bar{t}$
- Découvert en 1995 par les expériences CDF et DØ, sur le collisionneur Tevatron au Fermilab
- Masse prédite avec une bonne précision grâce à des mesures indirectes



# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



1<sup>re</sup> famille  
Constituants  
de la matière usuelle

2<sup>e</sup> famille  
Réplique plus massive

LEPTONS		QUARKS	
$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

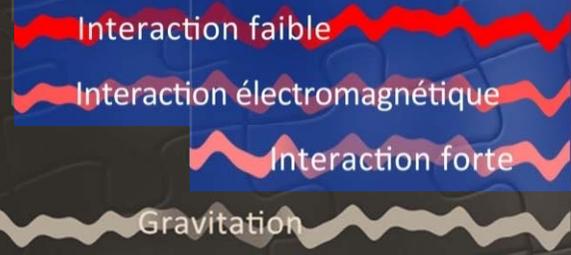
**BOSON de HIGGS H**

$t = 1.3 \times 10^{-25} \text{ s}$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 \text{ GeV}/c^2$

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

2000  
Expérience DONUT

### INTERACTIONS FONDAMENTALES



Bosons $Z, W^\pm$	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons $g$	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



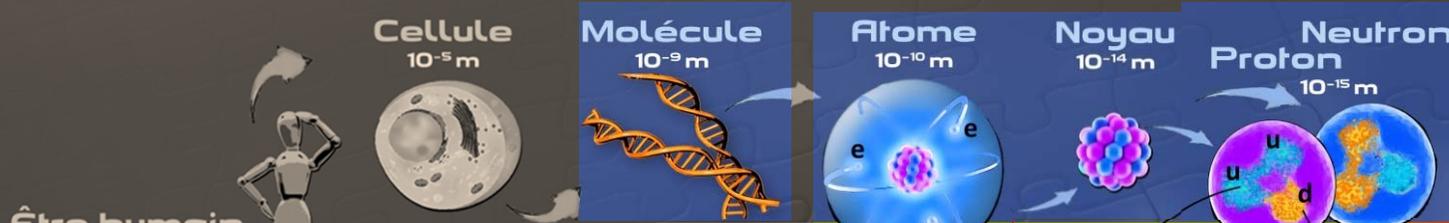
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# Une brève histoire des particules ...

## Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

### BOSON de HIGGS H

$t = 1,6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ ,  $Q = 0$ ,  $m = 125 \text{ GeV}/c^2$

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	$10^{-17} \text{ m}$	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	$10^{-15} \text{ m}$	Interaction forte
	infinie	Gravitation

<b>Bosons <math>Z, W^\pm</math></b>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
<b>Photon <math>\gamma</math></b>	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
<b>Gluons <math>g</math></b>	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
<b>Graviton (?)</b>	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

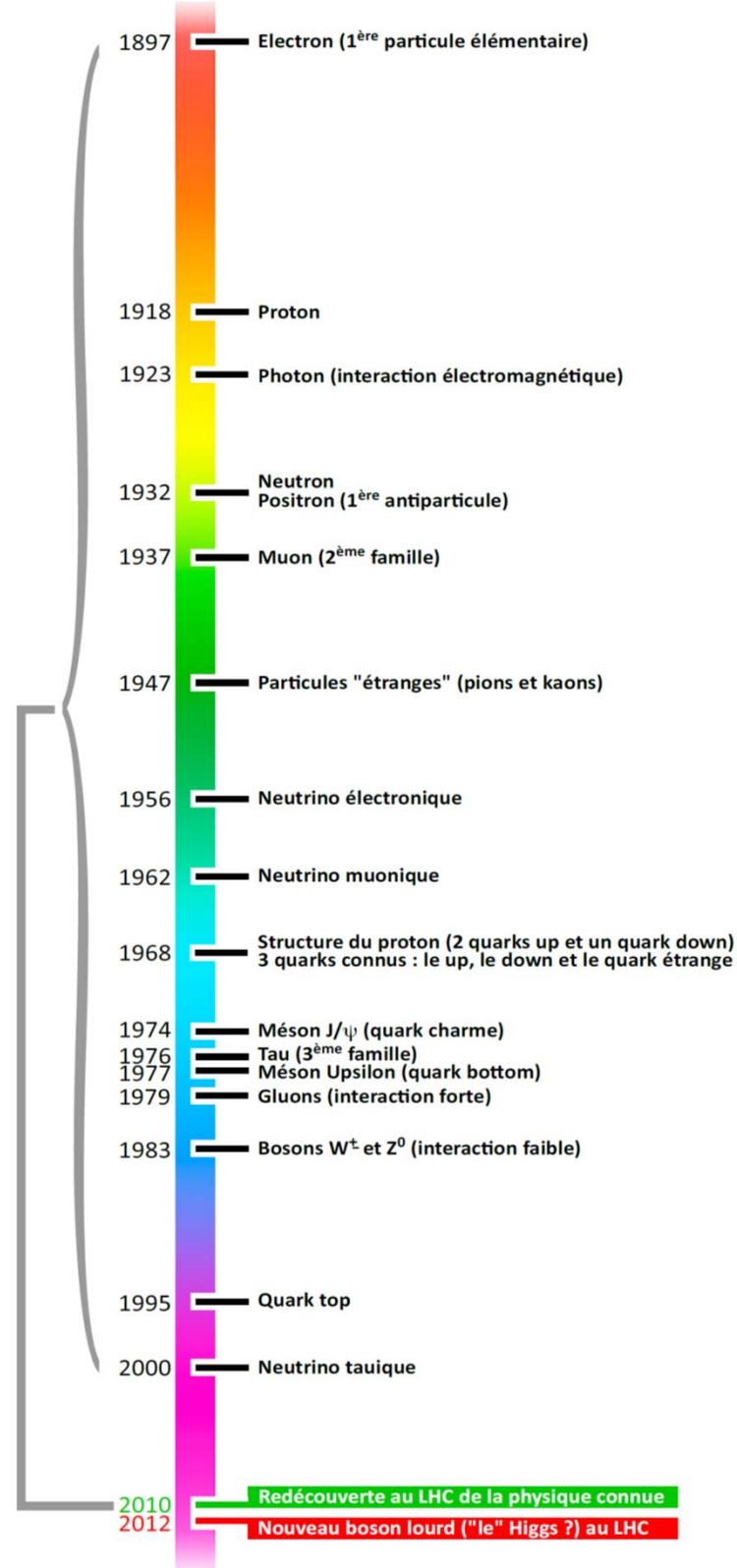
### ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Benoit Luyten - IAC, 2014

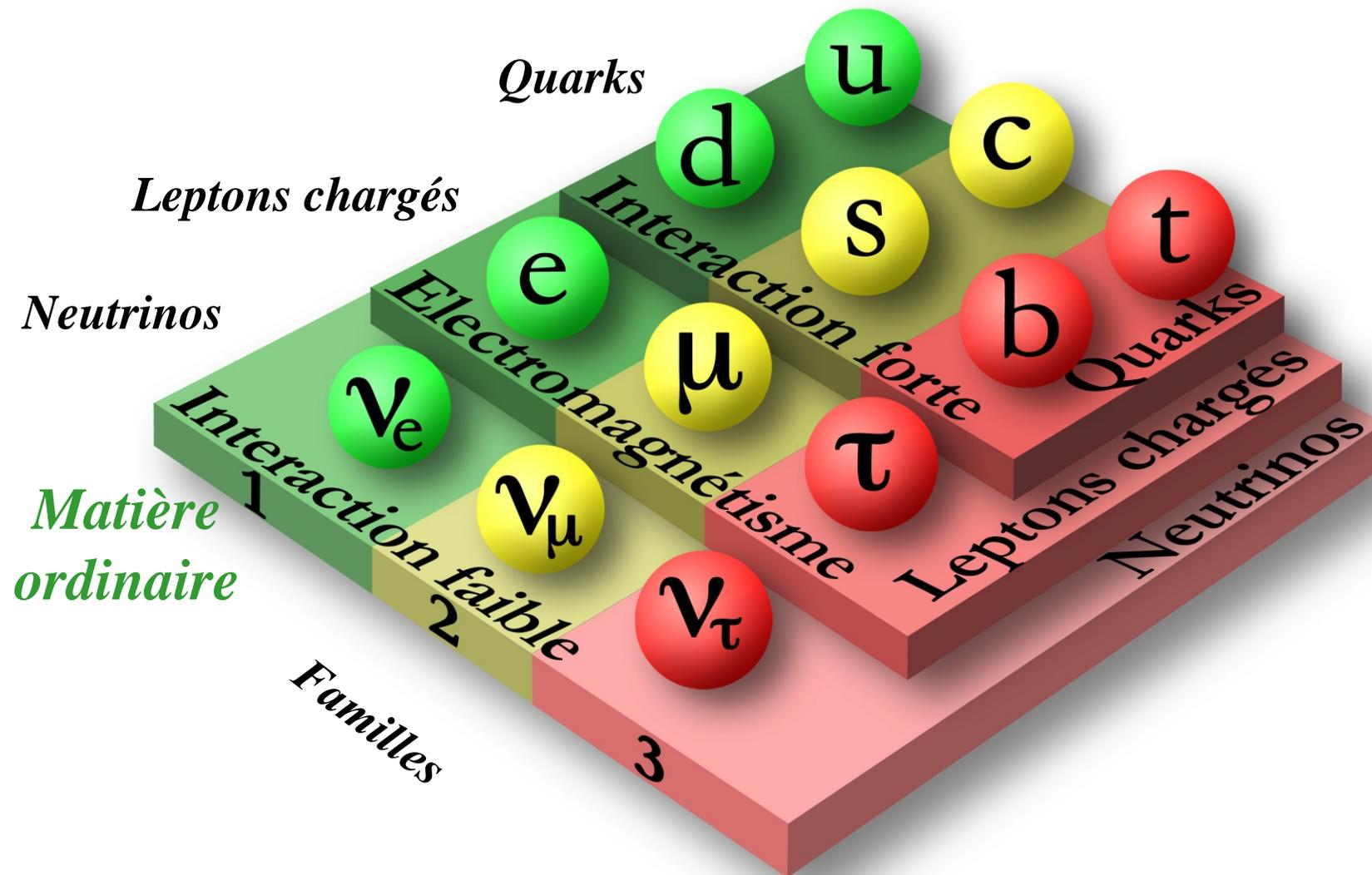
# En résumé

- Découvertes des XX<sup>ème</sup> et XXI<sup>ème</sup> siècles
- Au LHC : « redécouverte » de la physique connue en deux ans, puis découverte du boson de Higgs



# Un autre tableau des particules élémentaires

- 12 particules élémentaires (des « fermions ») réparties en 3 familles



- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**

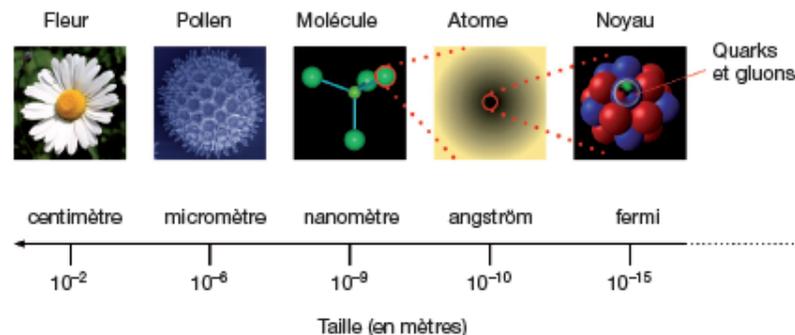
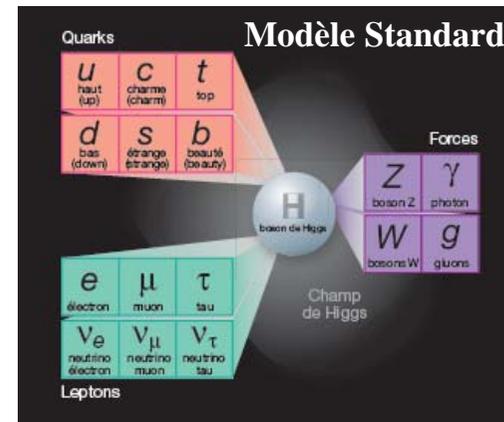
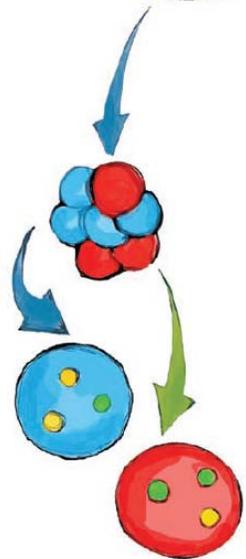
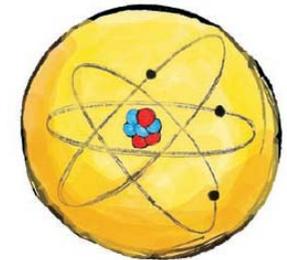
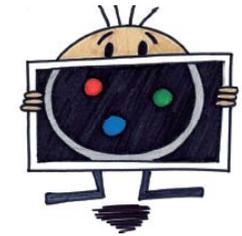
# Les particules élémentaires

- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks  
→ Il n'y a que **6 quarks au total**
- De **compliquée**,  
la situation  
redevient **simple** !

- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)

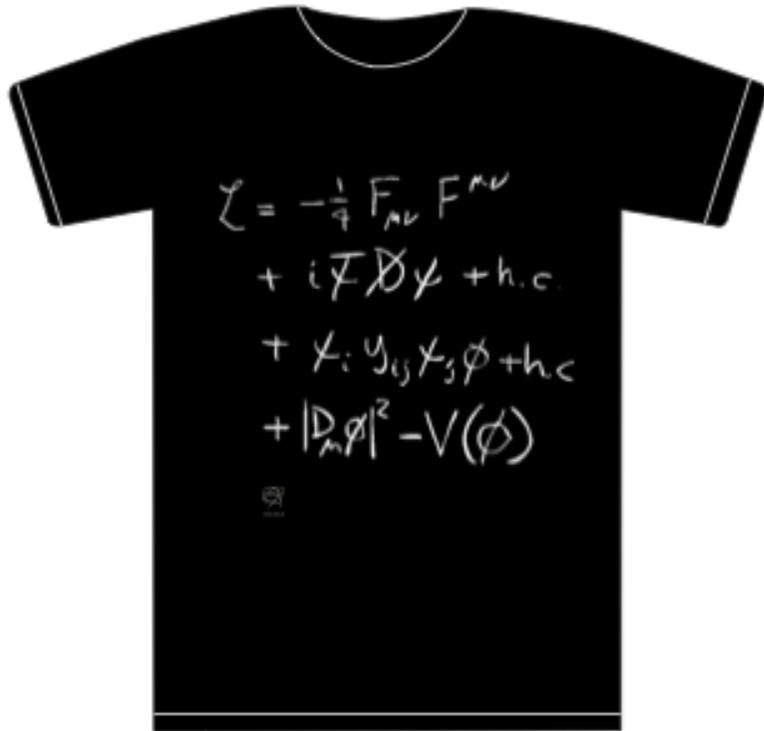
- Il y a **12 particules élémentaires** :
  - les **6 quarks**
  - l'**électron** et 2 « cousins » plus lourds, le **muon** et le **tau**
  - **3 neutrinos**

- Elles sont soumises à **3 forces** :
  - l'**interaction forte**
  - l'**interaction faible**
  - la **force électromagnétique**



# Vu sous l'angle des Mathématiques ...

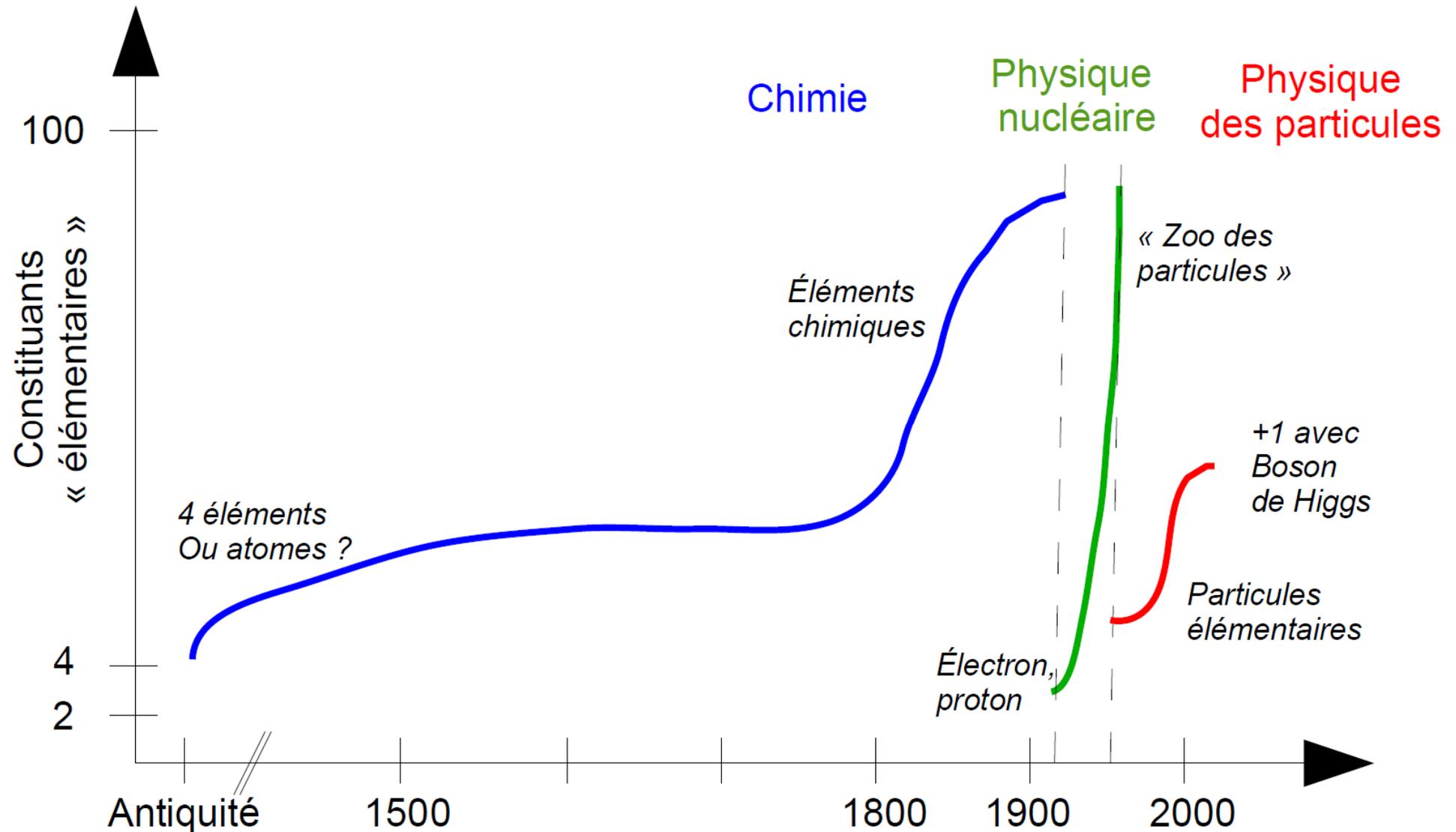
- Le **Lagrangien**  
du **Modèle Standard**



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\dagger \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
 & - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
 & - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
 & - i g c_w \left[ \partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
 & - i g s_w \left[ \partial_\nu \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
 & - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) \\
 & + g^2 s_w c_w \left[ \Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[ H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
 & - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h \left[ H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2 \right] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
 & - \frac{1}{2} i g \left[ W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2} g \left[ W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
 & + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + i g s_w M \Lambda_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1 - 2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
 & - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + i g s_w \Lambda_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[ H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \left[ H^2 + (\phi^0)^2 \right. \\
 & \left. + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
 & + \frac{1}{2} i g^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \nu^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
 & - \bar{u}_j^\dagger (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\dagger (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w \Lambda_\mu [-(e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
 & + \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 \left[ (\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[ (\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[ (e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ -\phi^+ (\nu^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ H (e^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
 & + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[ -m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[ m_d^\lambda (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
 & - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{i g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- \\
 & + \bar{X}^0 \left( \partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) \\
 & + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w \Lambda_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H \\
 & + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1 - 2c_w^2}{2c_w} i g M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \frac{1}{2c_w} i g M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + i g M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) \\
 & + \frac{1}{2} i g M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0)
 \end{aligned}$$

# A la bourse des particules « élémentaires »

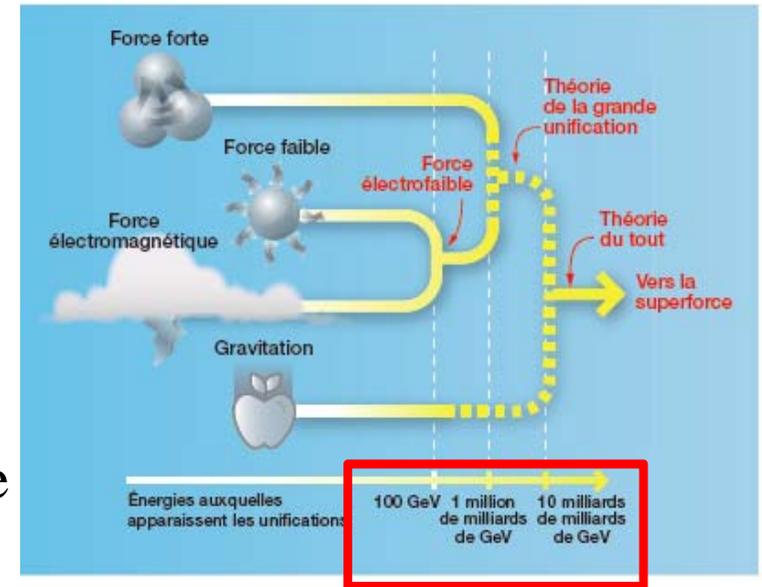
- Evolution de la notion de « constituant élémentaire » au cours des siècles



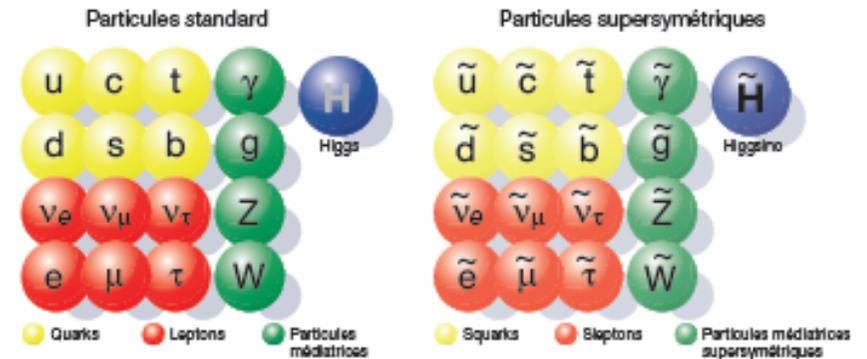
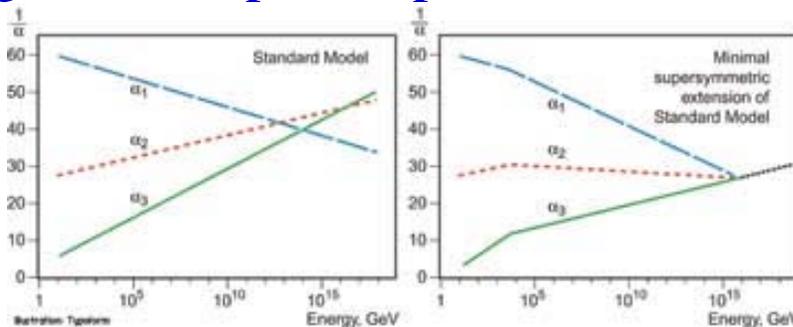
# Questions ouvertes

# Unification des forces

- **Un des moteurs du développement de la physique**
  - **Newton** : pesanteur + mécanique céleste
  - **Coulomb** :  $F_{\text{électrostatique}} \propto 1/r^2$  comme la gravitation
  - **Maxwell** : électrostatique + magnétisme
  - **Einstein** : espace & temps
  - **Glashow-Weinberg-Salam** : interaction électrofaible [Nobel de physique 1979]



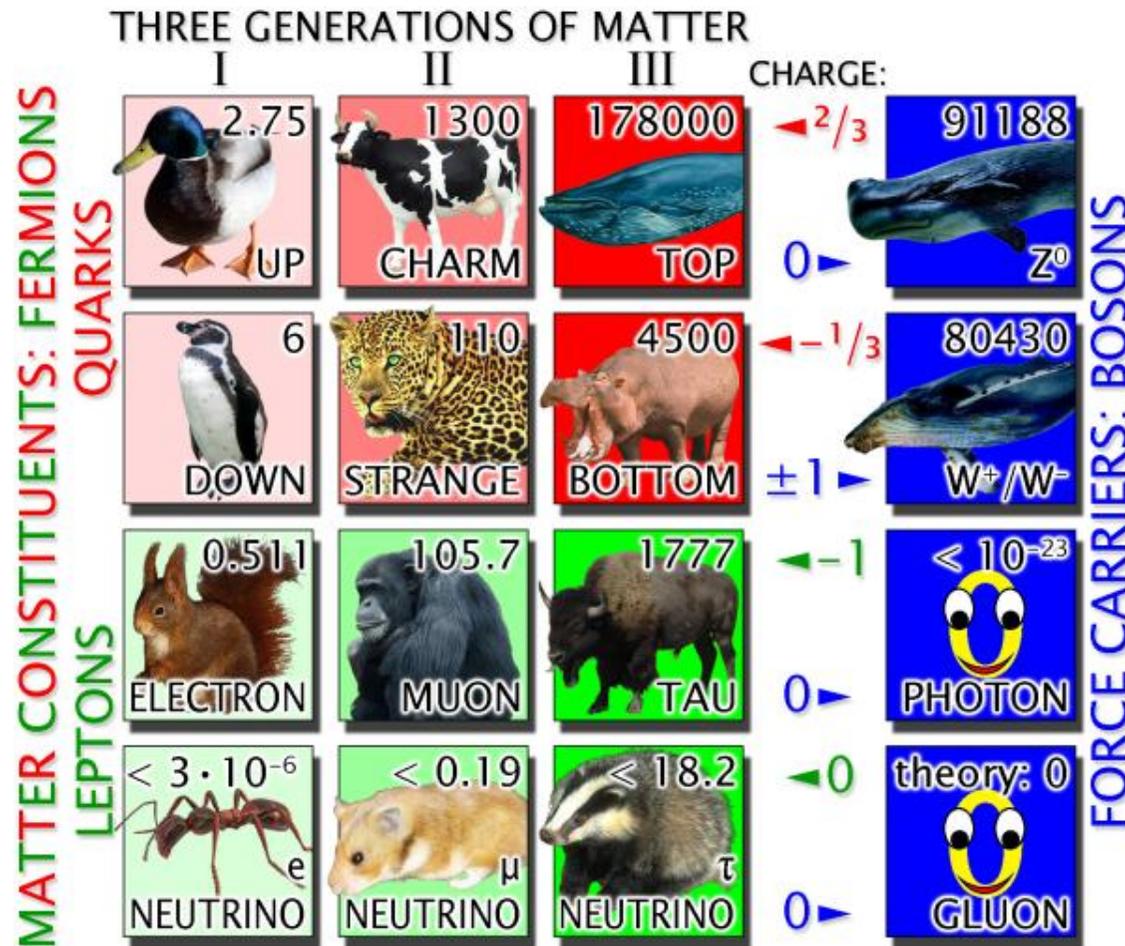
- Les unifications suivantes auraient lieu à des **échelles d'énergie extrêmes**
  - Très difficile de tester des théories unifiées
  - Désintégration du proton pas observée ( $\tau > 10^{32}$  années)



- **Pas de théorie actuellement satisfaisante**
  - Le Modèle Standard ne permet pas l'unification
  - **Nouvelle physique** : supersymétrie, 4<sup>ème</sup> génération, etc.

# La diversité des masses des particules élémentaires

- Pourquoi le champ de Higgs agit-il de manière différente sur ces particules ?

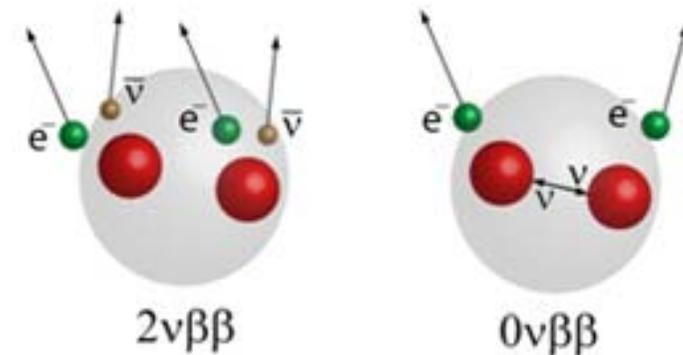
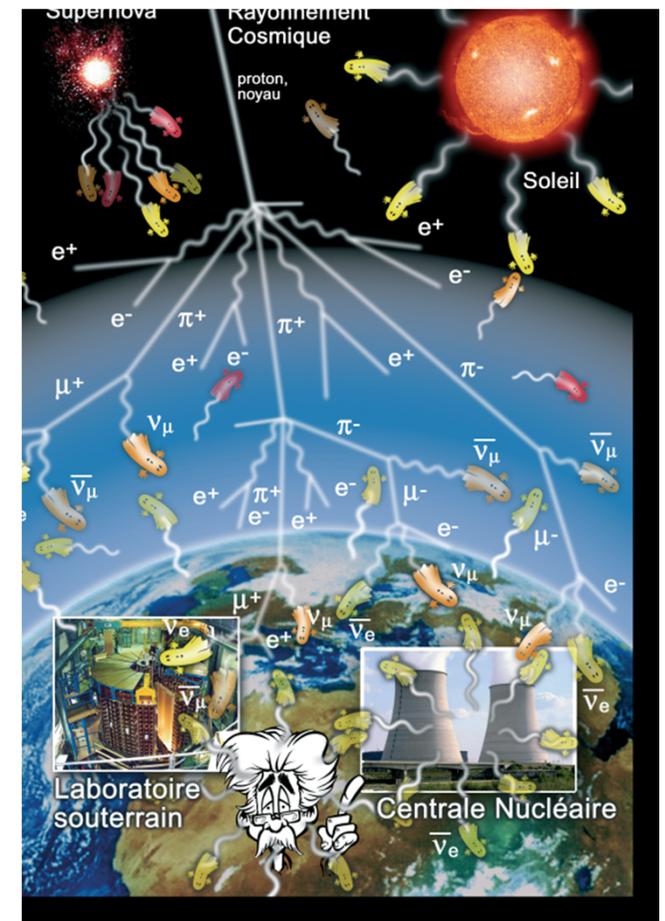


ALL MASSES IN MEV;  
ANIMAL MASSES  
SCALE WITH  
PARTICLE MASSES

The Standard Model  
fundamental particle zoo

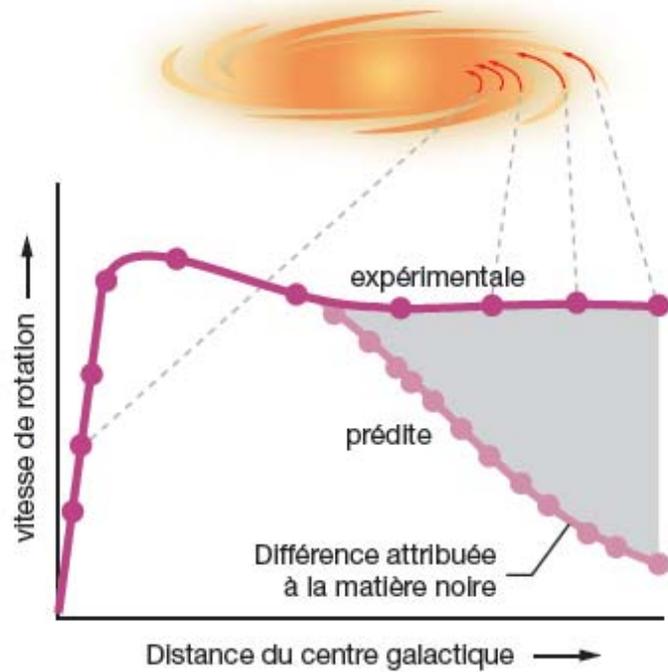
# Les neutrinos

- D'où vient la masse des neutrinos ?
- Particules « inventées » en 1930 par Pauli
- Finalement découvertes en 1956 (Reines & Cowan)
- Elles baignent l'Univers mais interagissent très peu avec la matière  $\Rightarrow$  presque indétectables
- Sans masse pour le Modèle Standard
  - En contradiction avec l'expérience :  
les neutrinos ont des masses très faibles mais non nulles  
 $\rightarrow$  Phénomènes « d'oscillations » observés depuis 1998
- Nature du neutrino
  - Le neutrino est-il sa propre antiparticule ?

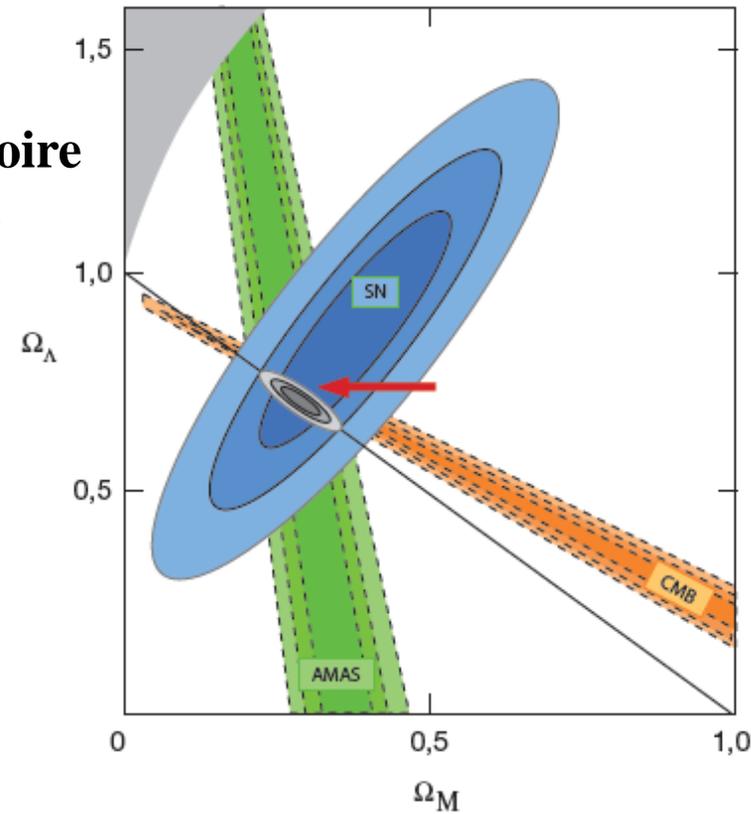


# Matière noire & énergie noire

- Origine et constitution inconnues

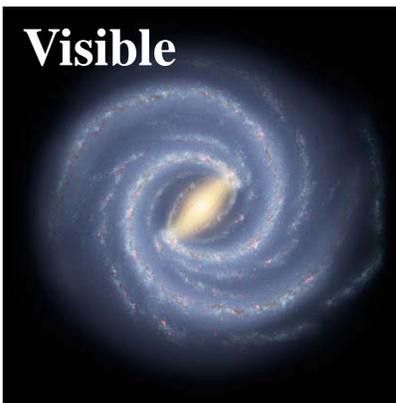


Énergie noire  
~ 70%



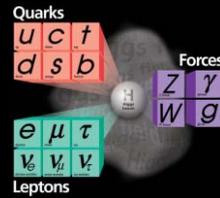
Matière  
~ 30%

Densité : ~ 3 atomes d'H / m<sup>3</sup>



Représentations de la Voie lactée





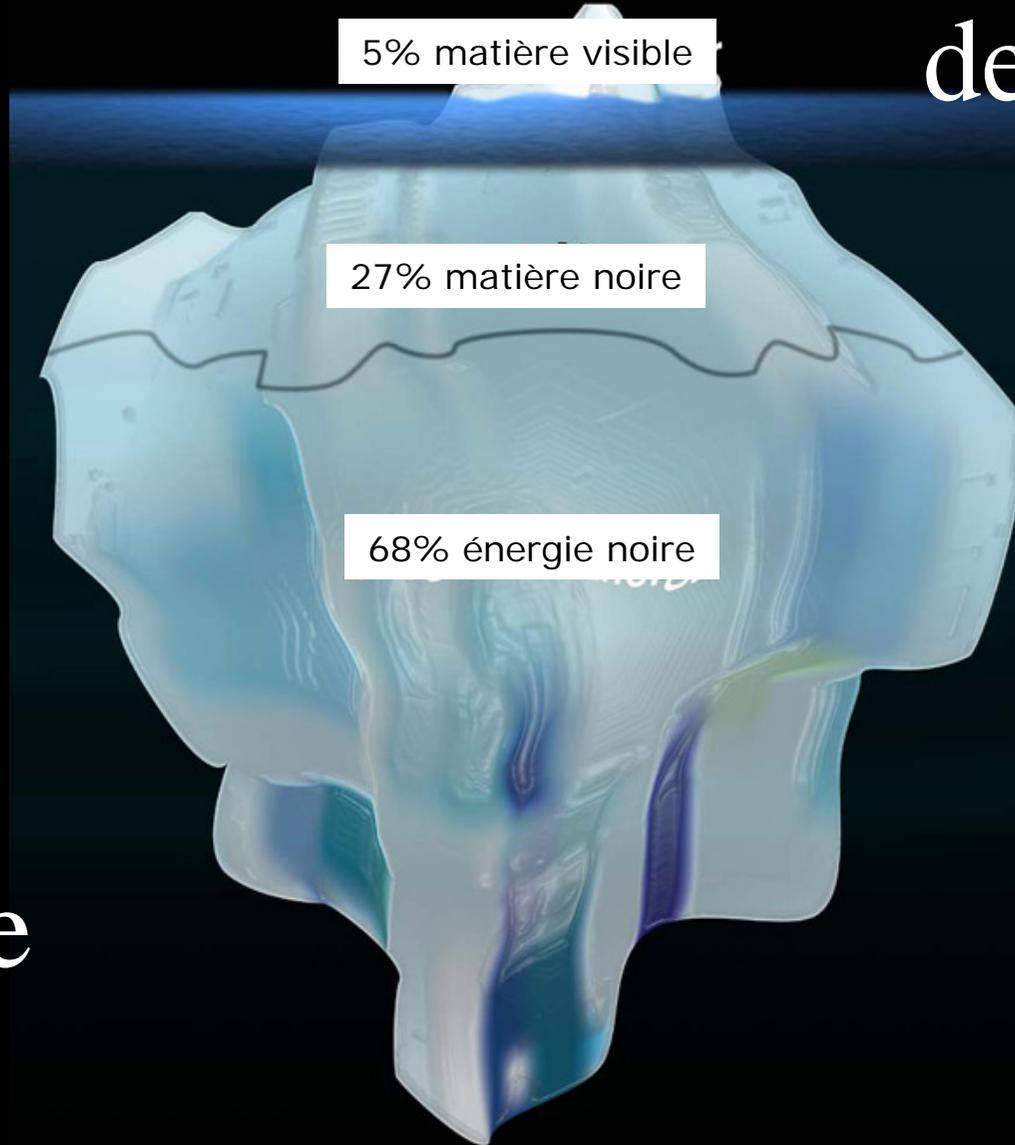
# Le contenu énergétique de l'Univers

5% matière visible

27% matière noire

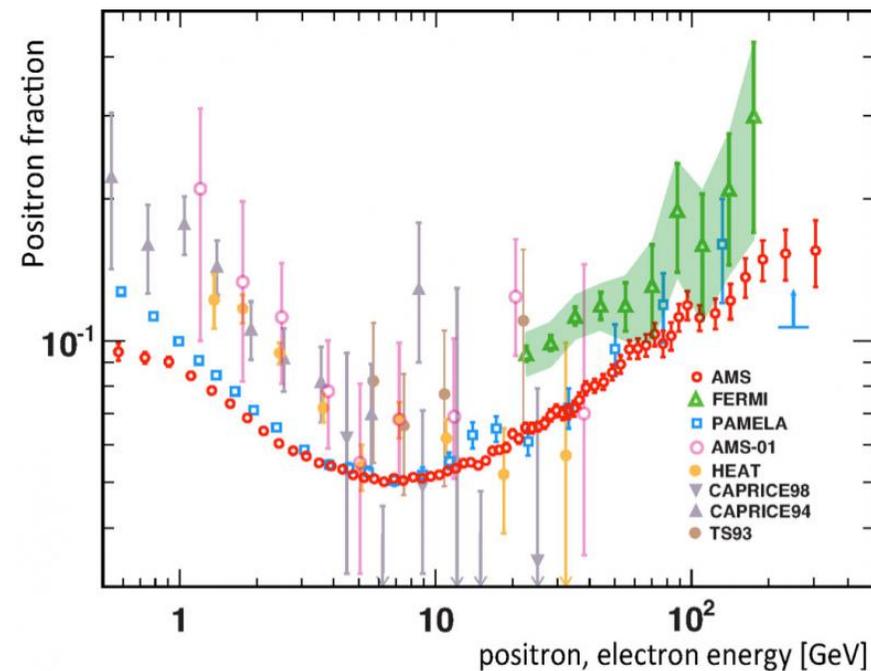
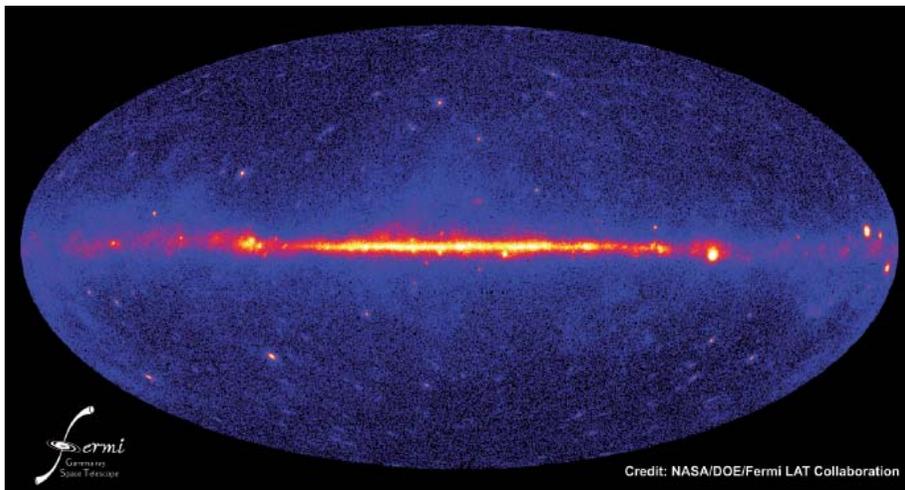
68% énergie noire

Résultats  
du satellite  
Planck  
(2013)



# Où est passée l'antimatière dans l'Univers ?

- Matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big bang
- Matière & antimatière s'annihilent  
→ Un milliardième de la matière créée a survécu
- Pas de trace d'antimatière dans l'Univers observable  
→ Univers fait de matière  $\Leftrightarrow$  matière a prédominé sur l'antimatière : pourquoi ?



- Asymétrie matière-antimatière observée en physique des particules (K, B)
  - ☺ Résultats expérimentaux conformes aux prédictions théoriques ...
  - ☹ ... mais effet bien trop faible pour expliquer l'asymétrie dans l'Univers !

# L'inflation a-t-elle existé ?

- Les observations montrent un **Univers homogène et isotrope**
  - **Exemple : la température du CMB** est pratiquement constante sur tout le ciel
  - **Comment est-ce possible alors que certaines régions n'ont pas pu avoir de « contact » entre elles, étant trop éloignées ?**
- **D'où viennent les petites fluctuations du CMB qui, en se développant, ont donné les objets astronomiques actuels ?**
- C'est pour répondre, entre-autres, à ces questions que **la théorie de l'inflation** a été proposée aux débuts des années 1980
  - **Juste après le Big-bang ( $10^{-36}$  s  $\rightarrow$   $10^{-33}$  s ou  $10^{-32}$  s), l'Univers aurait grandi d'un facteur énorme ( $\times 10^{26}$ , voire beaucoup plus) sous l'effet d'une mystérieuse substance accélératrice**
  - **Tout l'Univers observable proviendrait d'une petite région et aurait donc une origine commune !**
- Les observations cosmologiques les plus récentes (en particulier les résultats de Planck) sont en accord avec les prédictions de l'inflation
  - **D'autres conséquences de l'inflation doivent encore être testées**
  - Un tel scénario ne fait actuellement pas l'unanimité parmi les physiciens

# Pour en savoir plus

- Un nouveau portail de ressources pédagogiques (encore en construction ...)
  - <http://www.particuleselementaires.fr>
- La présentation en fin de matinée sur le même thème
  - Ainsi que les liens supplémentaires dans l'agenda de la formation :
    - [http://indico.lal.in2p3.fr/e/PAF2014-2015\\_Reims](http://indico.lal.in2p3.fr/e/PAF2014-2015_Reims)

