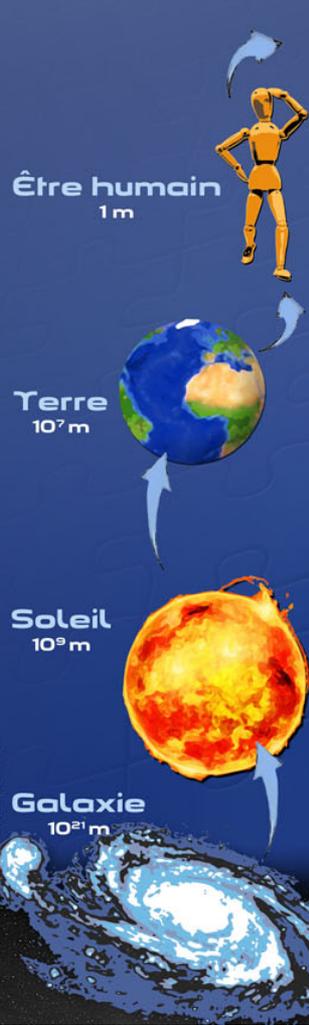


**Des fluides vitreux et résineux à l'électron:  
l'histoire d'une particule**

*Iro Koletsou, Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules  
Université Savoie-Mont Blanc*

## 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	$t = 1.6 \cdot 10^{-12} s, \tau = 9 \cdot 10^{-12} s, m = 125 \text{ GeV}/c^2$
<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 <sup>-17</sup> m	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte
	infinie	Gravitation

Champ de Higgs	
Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives β <sup>+</sup> et β <sup>-</sup> de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesantueur, 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.

## 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

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

	<b>1930→1956</b> <b>LEPTONS</b> 1897	<b>QUARKS</b>	<b>2012</b> <b>BOSON de HIGGS H</b> <small><math>t = 1.6 \cdot 10^{-12}</math> s, <math>Q = 0</math>, <math>m = 125</math> GeV/c<sup>2</sup></small> 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>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron <small><math>t = \infty</math>, <math>Q = 0</math>, <math>m &lt; 2 \cdot 10^{-6}</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$e$ électron <small><math>t = \infty</math>, <math>Q = -e</math>, <math>m = 0,00051</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$u$ haut / up <small><math>t = \infty</math>, <math>Q = 2e/3</math>, <math>m = 0,002</math> GeV/c<sup>2</sup></small>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon <small><math>t = \infty</math>, <math>Q = 0</math>, <math>m &lt; 2 \cdot 10^{-6}</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\mu$ muon <small><math>t = 2,2 \cdot 10^{-6}</math> s, <math>Q = -e</math>, <math>m = 0,106</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$c$ charme / char <small><math>t = 10^{-12}</math> s, <math>Q = 2e/3</math>, <math>m = 1,27</math> GeV/c<sup>2</sup></small>
<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 <small><math>t = \infty</math>, <math>Q = 0</math>, <math>m &lt; 2 \cdot 10^{-6}</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\tau$ tau <small><math>t = 2,9 \cdot 10^{-13}</math> s, <math>Q = -e</math>, <math>m = 1,777</math> GeV/c<sup>2</sup></small>	$s$ étrange <small><math>t = 3 \cdot 10^{-11}</math> s, <math>Q = -e/3</math>, <math>m = 0,138</math> GeV/c<sup>2</sup></small>
	<b>2000</b>	<b>1975</b>	<b>1974</b>
			<b>1977</b>
			<b>1983</b>
			<b>1979</b>

**Terre**  
10<sup>7</sup> m

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

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

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

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

**Champ de Higgs**

Bosons Z, W<sup>±</sup>  
Désintégrations radioactives β<sup>+</sup> et β<sup>-</sup> de certains noyaux instables

Photon γ  
Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

Gluons g  
de quarks, protons, noyaux, nucléaire

Graviton (?)  
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.

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.

## 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  
10<sup>-15</sup> m

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

2012

**LEPTONS** 1897

**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 / char	$s$ strange
	<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$	$\tau$	$t$ top	$b$ beau / beauty / bottom

1930 → 1956

2000

1897

1975

1974

1977

2012

1983

1979

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

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

**Terre**  
10<sup>7</sup> m

**Lepton**

**Quark**

**Boson de Higgs**

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

**Champ de Higgs**

**Bosons Z, W<sup>±</sup>**

**Photon  $\gamma$**

**Gluons g**

**Graviton (?)**

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

**Antiprotone**

**ANTIMATIÈRE**

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.

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.

But: retracer l'histoire qui mène à la découverte de l'électron

- Anecdote:

Dans l'imaginaire "scientifique": le cas de Richard Laming

- Evolution de lu concept de l'électricité  
au fur et à mesure des expériences scientifiques, entre le 18ème et le 20ème siècle

- Rayons cathodiques

Expérience de Jean Perrin (1895)

Expérience de J.J. Thomson (1897)

- Acceptation générale de l'électron

1838, Saint-Germain-en-Laye: nouvelle description de l'atome par R. Laming

Grandes lignes:

- *Atomes électriques* : unités de charge négative circulant en toute indépendance et obéissant à la loi Coulomb
- Structurés autour d'un noyau
- Atomes en déficience électrique attirant des *atomes électriques*
- Niveau de déficience: type de matière qu'ils peuvent former
- Atomes incomplets: combinaisons par échange ou partage d'atomes électriques
- Expérimentation par mesure de la masse : sans succès

Les propositions de Laming ne joueront probablement aucun rôle dans cette histoire

➤ Manque de méthode scientifique

*W.V. Farrar B.Sc. Ph.D. (1969) Richard Laming and the coal-gas industry, with his views on the structure of matter, Annals of Science, 25:3, 243-253, DOI: 10.1080*

1838, Saint-Germain-en-Laye: nouvelle description de l'atome par R. Laming

Grandes lignes:

électron

- *Atomes électriques* : unités de charge négative circulant en toute indépendance et obéissant à la loi de Coulomb
- Structurés autour d'un noyau
- Atomes en déficience électrique attirant des *atomes électriques*
- Niveau de déficience: type de matière qu'ils peuvent former
- Atomes incomplets: combinaisons par échange ou partage d'atomes électriques
- Expérimentation par mesure de la masse : sans succès

modèle atomique

liaison covalente

Les propositions de Laming ne joueront probablement aucun rôle dans cette histoire

➤ Manque de méthode scientifique

*W.V. Farrar B.Sc. Ph.D. (1969) Richard Laming and the coal-gas industry, with his views on the structure of matter, Annals of Science, 25:3, 243-253, DOI: 10.1080*

18<sup>ème</sup> siècle

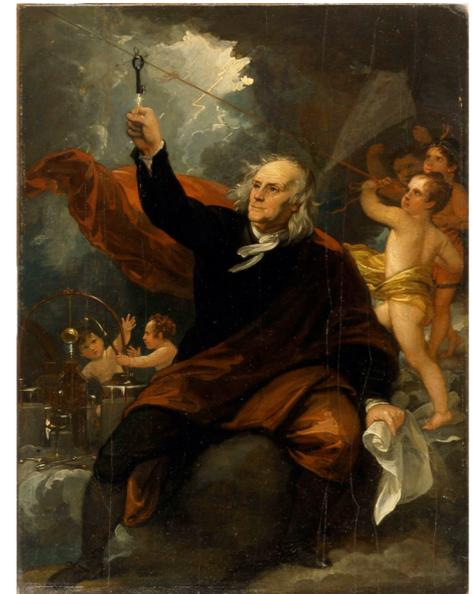
- Electricité vue comme un fluide

Deux écoles:

- Fluides vitreux et résineux
- Une sorte de fluide dont le mouvement est dû à des "états de pression" différents

Benjamin Franklin, 1752, Philadelphie

- Rapprochement entre les éclairs et l'électricité



18<sup>ème</sup> siècle

1745: Ewald Jurgen Georg von Kleist

➤ premier condensateur (très) artisanal

1746: Pieter van Musschenbroek, professeur à Leyde

➤ Evolution instrumentale importante

Suivis par une multitude de tentatives

Mais l'interprétation reste difficile sans bagage théorique

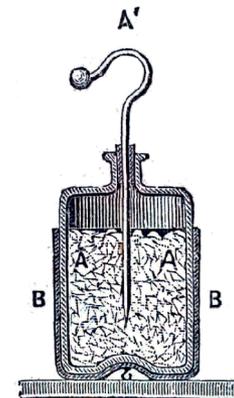
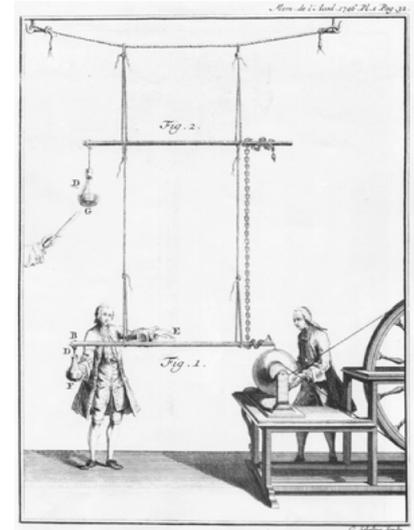


FIG. 142. — Bouteille de Leyde. — A, armature intérieure; B, armature extérieure.

*La main n'est pas déplacée dans cette commotion, mais le bras et tout le corps sont affectés d'une manière terrible que je ne puis exprimer. En un mot, je crus que c'en était fait de moi...*

Pieter van Musschenbroek

*Je reçus, un jour, un terrible coup, en empoignant avec les deux mains deux fioles pendues à un canon de fusil. Ce coup était si énorme que j'en fis étourdi comme si on m'avait donné un grand coup sur le crane et je ne me suis pas avisé de répéter l'expérience.*

Pr Johan Heinrich Winckler

*Vous ressentirez un coup prodigieux qui frappe tout votre corps. C'est un coup de foudre.*

Jean Nicolas Sebastien Allamand

1838: Michael Faraday

- Passage de courant électrique dans un tube à air raréfié
- Arc lumineux entre l'anode et la cathode

Décennies suivantes: évolution de l'instrumentation

- haute tension et vide

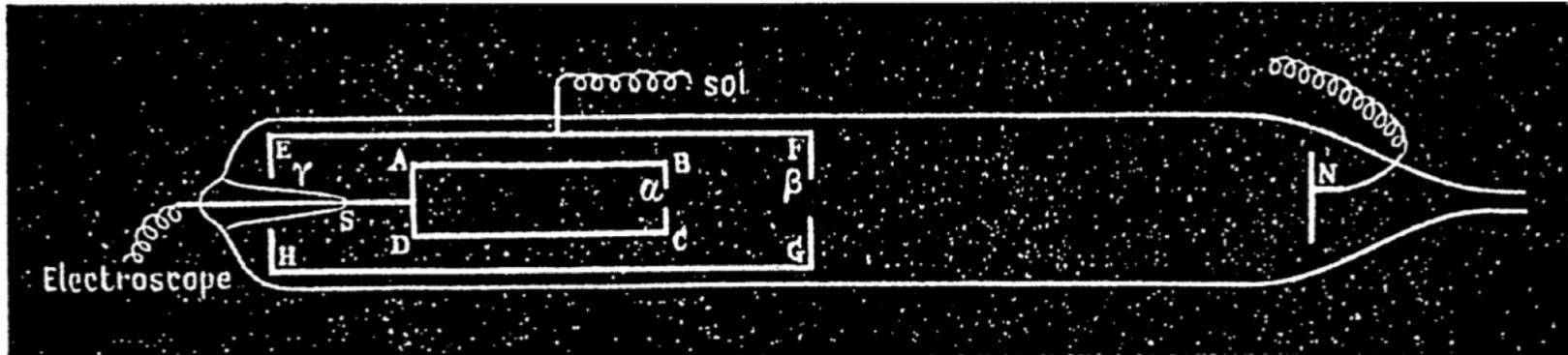
1875: Tube de Crooks

Deux écoles

- ondulatoire
- corpusculaire

1891: terme *électron* (George Johnstone Stoney)

Mise en évidence de la charge électrique transportée par les rayons cathodiques



- Pénétration des rayons dans le cylindre ABCD: électrisation
- Déviation des rayons: ABCD neutre

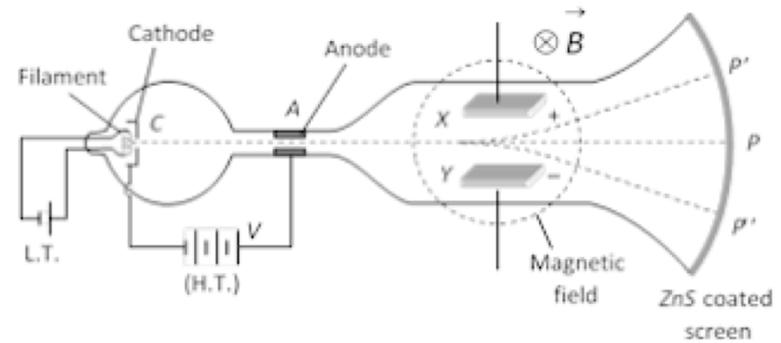
Jean Perrin : *L'ensemble de ces résultats ne paraît pas facilement conciliable avec la théorie qui fait des rayons cathodique une lumière ultra-violette. Ils s'accordent bien au contraire avec la théorie qui en fait un rayonnement matériel*

➤ Pas encore une preuve suffisante pour affirmer l'existence de l'électron

Jean Perrin, *Thèse présentée à la Faculté des sciences de Paris pour obtenir le grade de docteur ès-sciences physiques*, Paris, Gauthier-Villars, 1897

### 3 expériences consécutives de JJ Thomson

1. Déviation des rayons par champ magnétique
2. Déviation des rayons par champ électrique
  - en accord avec la théorie corpusculaire
3. Equilibre entre les deux champs:
  - détermination d'un rapport  $e/m$  **élevé** et **constant**



J. J. Thomson: *Où qu'il se trouve [le corpuscule] il préserve son individualité,  $e/m$  étant toujours égal à une certaine valeur constante. Le corpuscule semble former une partie de tout type de matière aux conditions les plus variées ; il semble donc naturel de le considérer comme une des briques dont l'atome est fait*

J. J. Thomson M.A. F.R.S. (1897) XL. *Cathode Rays*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 44:269, 293-316, DOI: [10.1080/14786449708621070](https://doi.org/10.1080/14786449708621070)

# Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1 m

Terre  
10<sup>7</sup> m

Soleil  
10<sup>9</sup> m

Galaxie  
10<sup>21</sup> 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

Neutron Proton 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	<b>e</b> 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>	
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

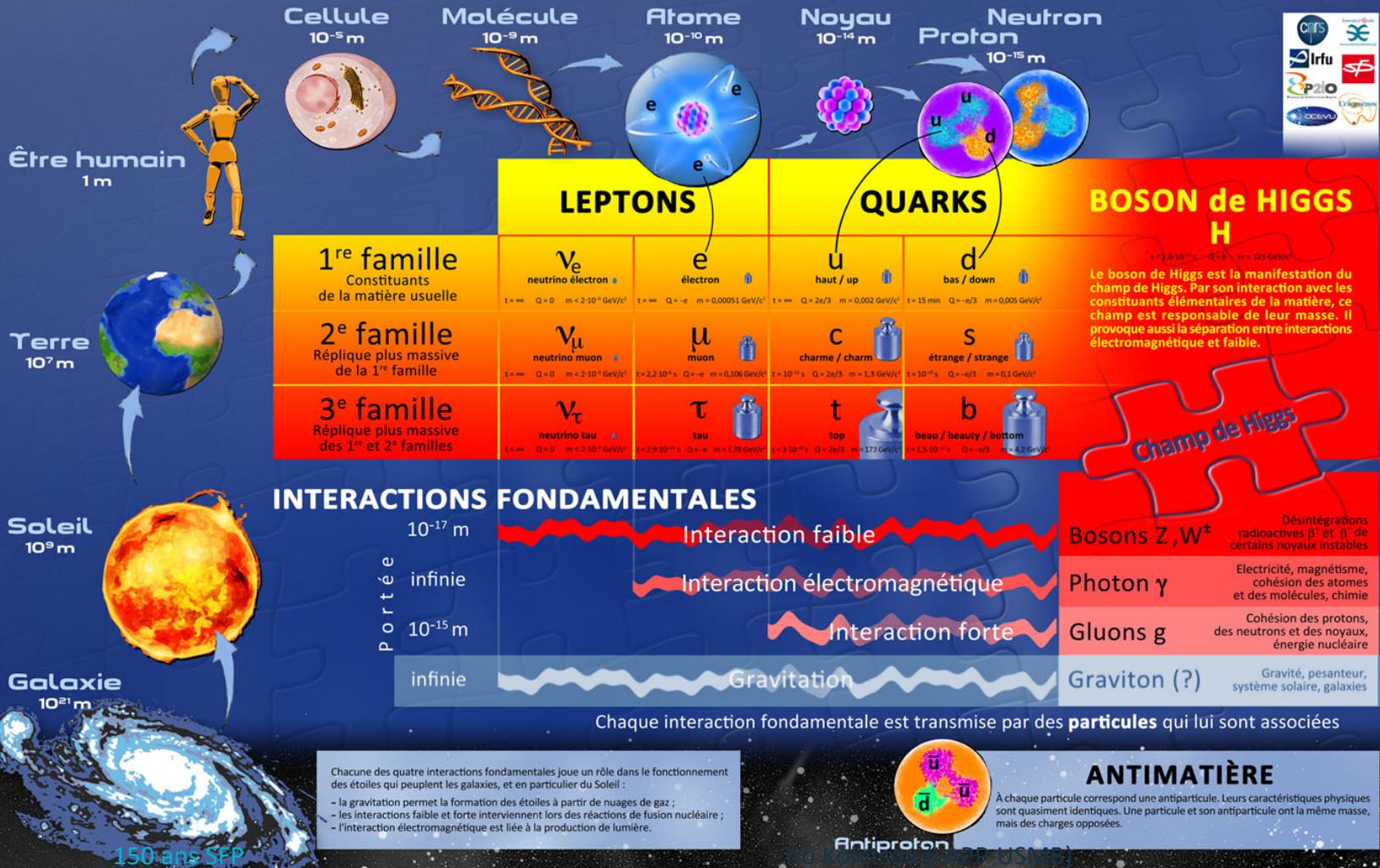
Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- 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.

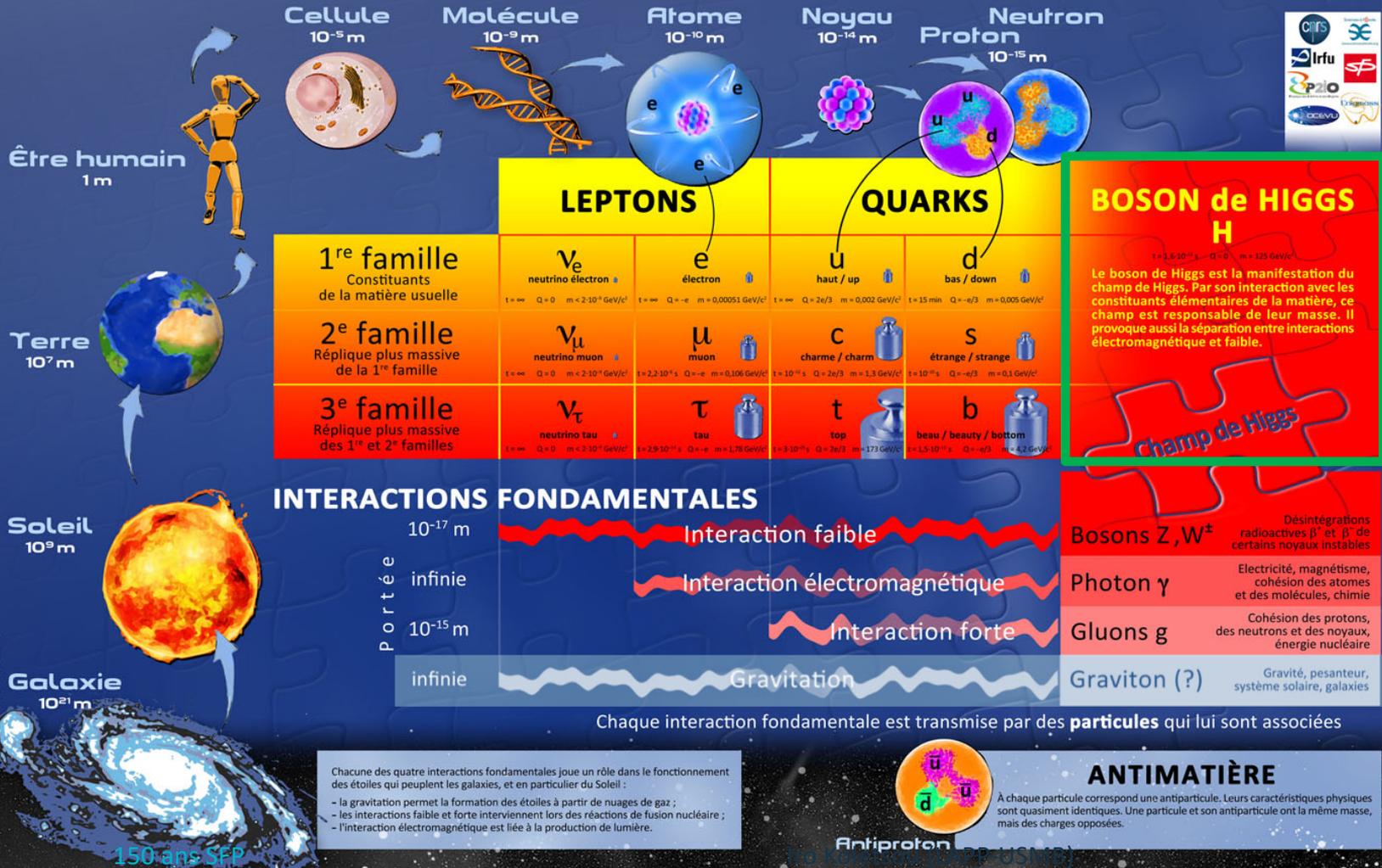
**ANTIMATIÈRE**

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

# Composants élémentaires de la matière



# Composants élémentaires de la matière



Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- Observations et questions ouvertes qui lui précèdent
- Hypothèse (de complexité variable)
- Test d'hypothèse expérimental
- Ouverture d'un nouveau champs de recherches

Les évolutions des concepts et la manière de prédire puis observer expérimentalement une particule ont évolué le long de ces 150 dernières années

Une manière de mettre cette évolution en évidence: retracer les histoires des particules élémentaire du Modèle Standard

Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- **Observations et questions ouvertes qui lui précèdent**
- **Hypothèse (de complexité variable)**
- Test d'hypothèse expérimental
- Ouverture d'un nouveau champs de recherches

### **Exemple: le boson de Higgs**

- Glashow, en 1961: première esquisse de la théorie électrofaible
- aucun moyen connu pour faire acquérir de la masse aux bosons de jauge
- brisure spontanée de la symétrie électrofaible via le mécanisme de Higgs
- prédiction du boson de Higgs

Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- Observations et questions ouvertes qui lui précèdent
- Hypothèse (de complexité variable)
- **Test d'hypothèse expérimental**
- Ouverture d'un nouveau champs de recherches

Boson de Higgs: Dispositif et protocole expérimentaux mis en place pour sa découverte

**Choice of the liquid: liquid krypton had been left as an option for the barrel calorimeter. Detailed simulations were made, using in particular the Higgs boson decays into two photons and into four electrons. The anticipated benefit in terms of mass resolution was not found large enough to counterbalance the excess in cost and complexity [1-4], therefore liquid argon was chosen for both the barrel and the two end-caps.**

*[ATLAS liquid-argon calorimeter : Technical Design Report » \(CERN-LHCC-96-041\)](#)*

Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- Observations et questions ouvertes qui lui précèdent
- Hypothèse (de complexité variable)
- Test d'hypothèse expérimental
- **Ouverture d'un nouveau champs de recherches**

Des centaines de publications depuis sa découverte:

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>

<https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIG/HIG.html>

Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- Observations et questions ouvertes qui lui précèdent
- **Hypothèse (de complexité variable)**
- Test d'hypothèse expérimental
- Ouverture d'un nouveau champs de recherches

### Modelé Standard

- Théories de jauge
- Groupes de symétrie:  
U(1)xSU(2)xSU(3)

### Mathématisation importante

- **Considérations esthétiques**

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Chaque découverte de particule élémentaire a une histoire riche et révélatrice

- Observations et questions ouvertes qui lui précèdent
- Hypothèse (de complexité variable)
- Test d'hypothèse expérimental
- Ouverture d'un nouveau champs de recherches

**Les évolutions des concepts et la manière de prédire puis observer expérimentalement une particule ont évolué le long de ces 150 dernières années**

**Une manière de mettre cette évolution en évidence: retracer les histoires des particules élémentaire du Modèle Standard**