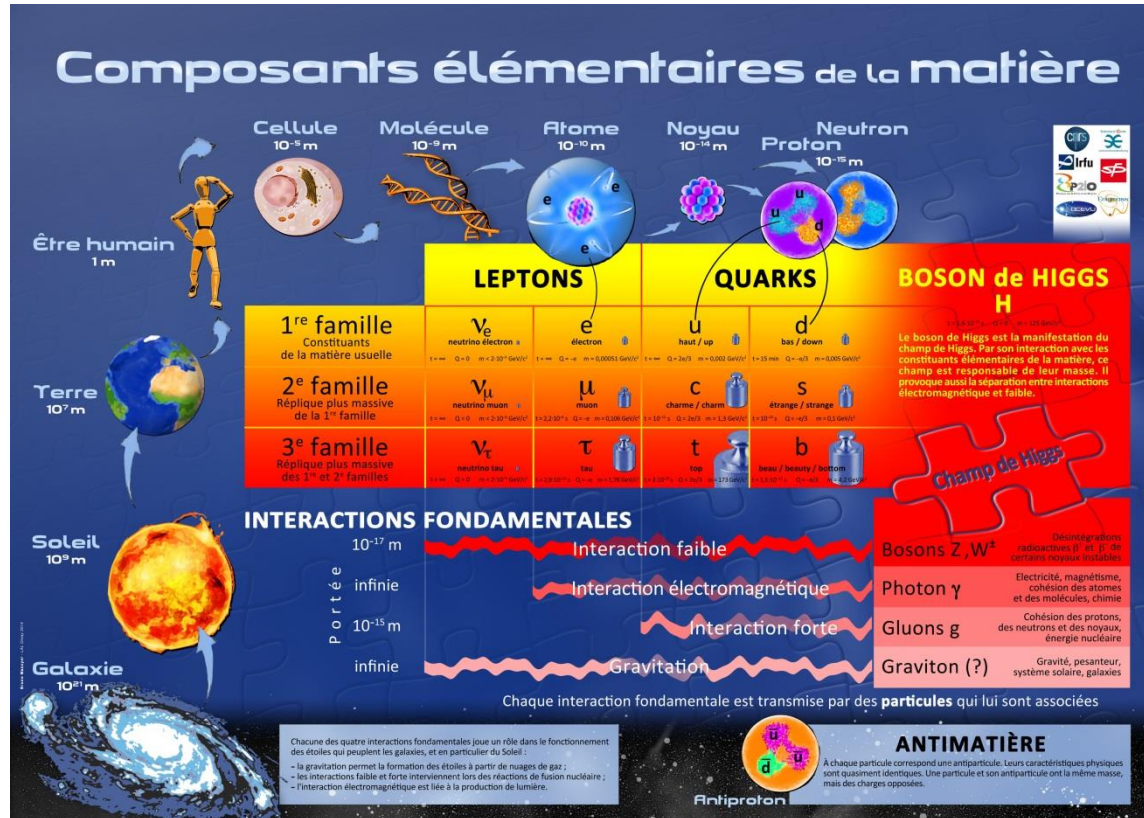


# Une brève histoire des particules



18 mai 2022

FTP 2021-2022, session 6

**Nicolas Arnaud** ([nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr](mailto:nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr))

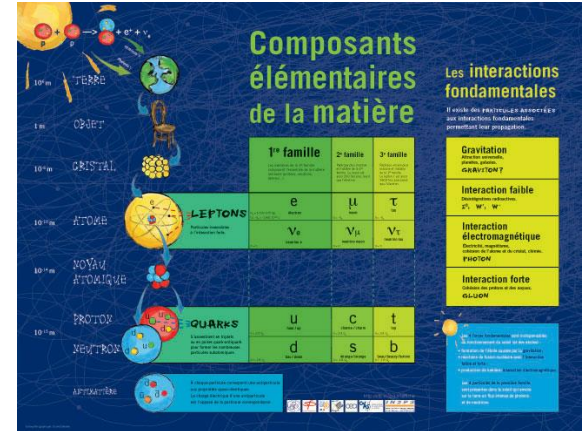
Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie  
(Université Paris-Saclay & CNRS/IN2P3)



# Le fil rouge de ma présentation

# L'affiche des composants élémentaires de la matière

- Mise à jour 2014-2015 d'une affiche datant de 2005, créée pour l'Année Mondiale de la Physique



## Composants élémentaires de la matière

Étre humain 1m, 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>-16</sup>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	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.
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	c charm / charn	s strange / 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	

**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	Glueons g
infinie	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.

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 faibles et fortes interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;  
 - l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

- Beaucoup de découvertes importantes n'apparaissent pas directement / pas du tout sur l'affiche

- Affiche centrée sur « l'infiniment petit »

# 3 transparents sur le Modèle Standard

# 12 particules élémentaires

## Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1m

Cellule  
10<sup>-6</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	
1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$e$ électron <small>t = ∞ Q = -e m = 0,00051 GeV/c<sup>2</sup></small>	$u$ haut / up <small>t = ∞ Q = 2e/3 m = 0,002 GeV/c<sup>2</sup></small>	$d$ bas / down <small>t = 15 min Q = -e/3 m = 0,005 GeV/c<sup>2</sup></small>
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\mu$ muon <small>t = 2,2 · 10<sup>-6</sup> s Q = -e m = 0,106 GeV/c<sup>2</sup></small>	$c$ charme / charm <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = 2e/3 m = 1,3 GeV/c<sup>2</sup></small>	$s$ étrange / strange <small>t = 10<sup>-10</sup> s Q = -e/3 m = 0,1 GeV/c<sup>2</sup></small>
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\tau$ tau <small>t = 2,8 · 10<sup>-13</sup> s Q = -e m = 1,78 GeV/c<sup>2</sup></small>	$t$ top <small>t = 3 · 10<sup>-25</sup> s Q = 2e/3 m = 173 GeV/c<sup>2</sup></small>	$b$ beau / beauty / bottom <small>t = 1,5 · 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c<sup>2</sup></small>

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

portée	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**

**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

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, pesantueur, système solaire, galaxies**

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

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

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

# 3(+1) interactions fondamentales

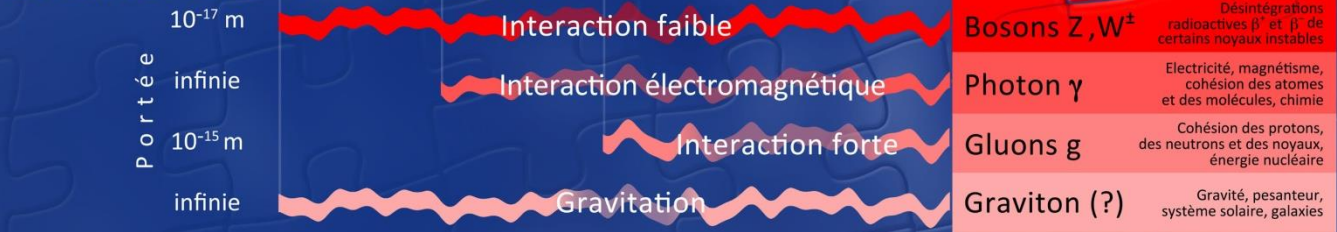
## Composants élémentaires de la matière



	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
<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.

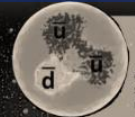
### INTERACTIONS FONDAMENTALES



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.



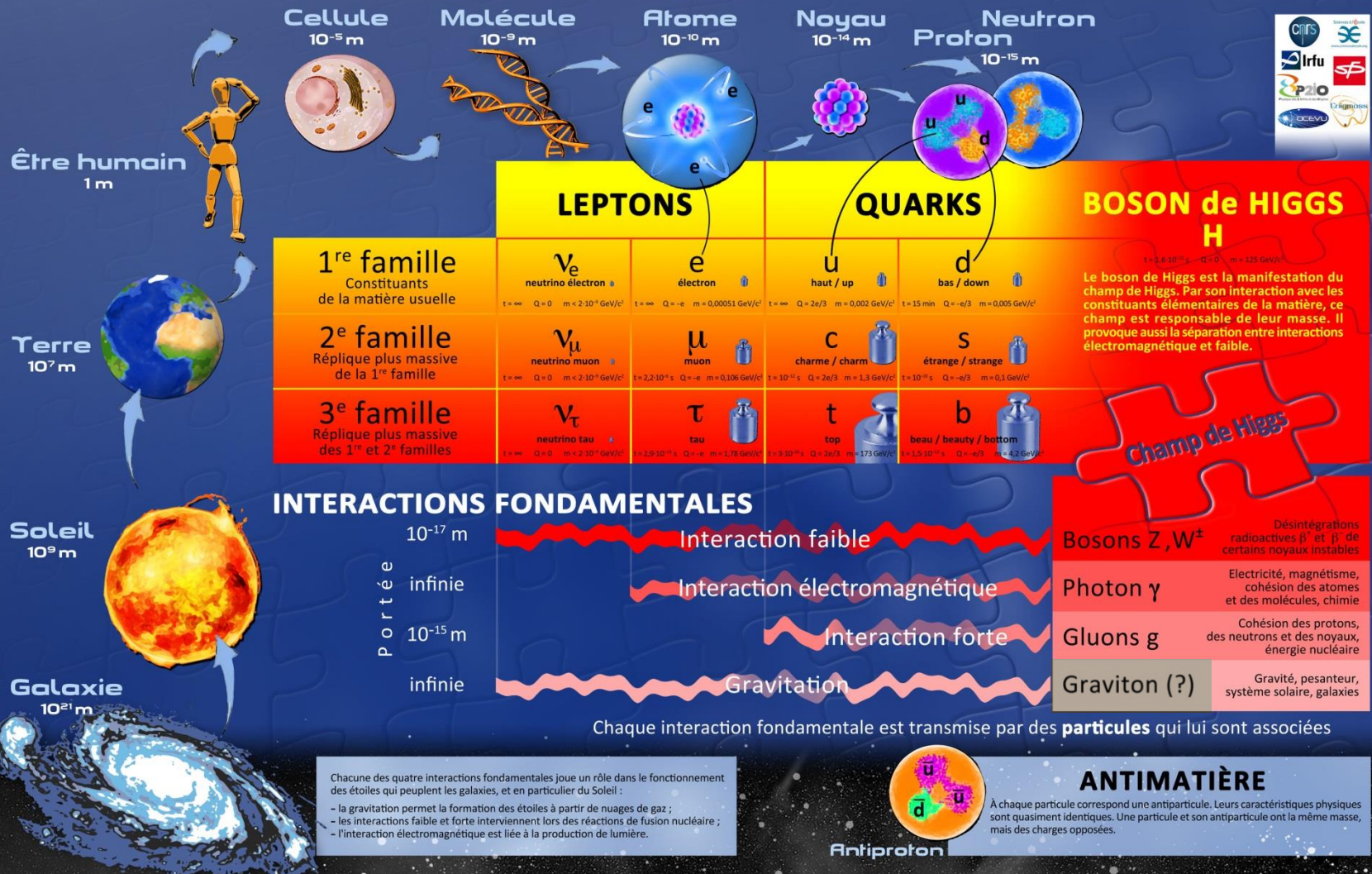
Antiproton

### 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.

# Situation actuelle (mai 2022)

## Composants élémentaires de la matière

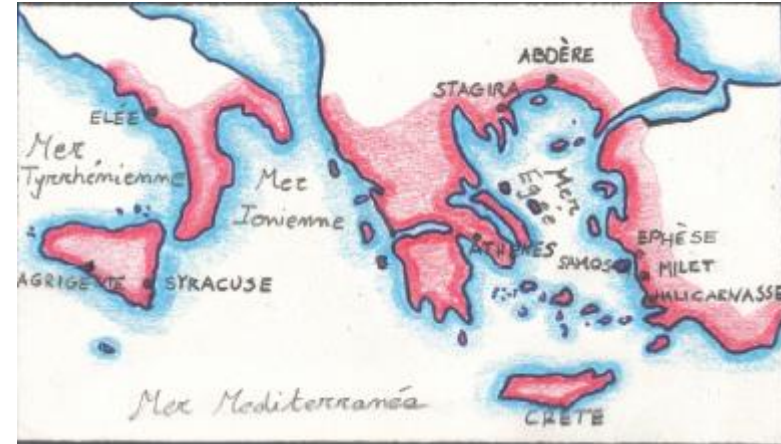


Comment en est-on  
arrivé là ?

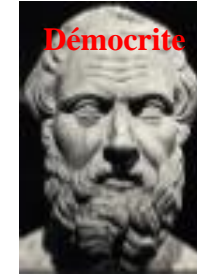
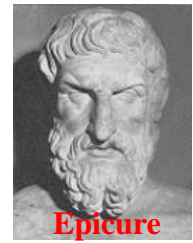


# Un zeste de philosophie antique

- 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 **Lucrèce**



# 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 **disparaît pour un millénaire** quand le **Christianisme** devient la religion dominante de l'empire romain.

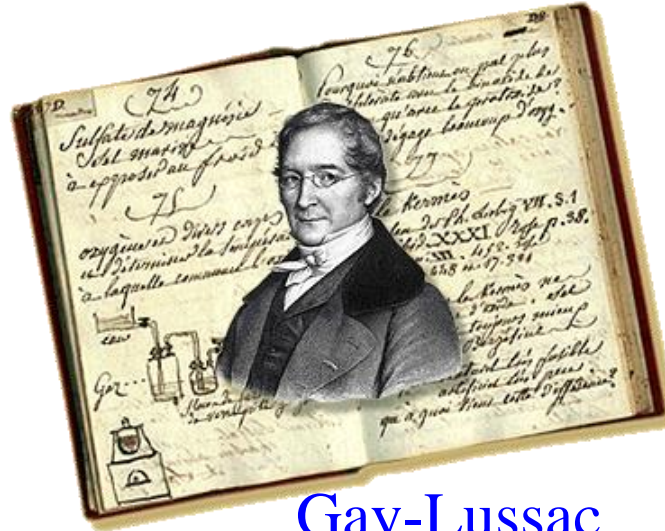
# Les premiers chimistes



Boyle



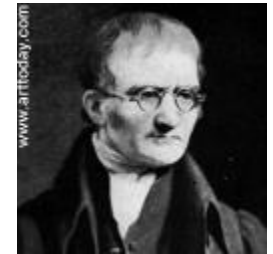
Lavoisier



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

The image shows Mendeleev's periodic table from 1869. It is a grid of elements with their symbols and atomic numbers. There are several gaps in the table, particularly in the lower right quadrant. A red circle highlights the position of the 101st element, which is labeled 'Md' (Mendelevium) in the original image. A red arrow points from a text box to this circled position.

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	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	90 Uq																		
		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						
		91 Th	92 Pa	93 U	94 Np	95 Pu	96 Am	97 Cm	98 Bk	99 Cf	100 Es	101 Fm	102 Md	103 No	104 Lw						

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



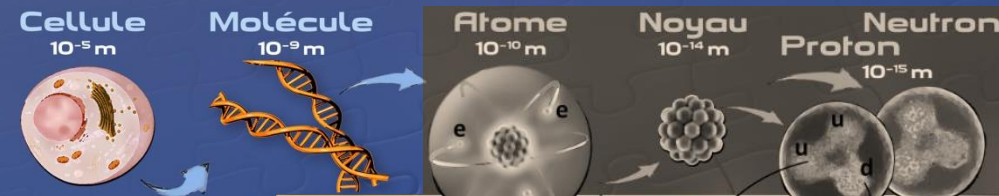
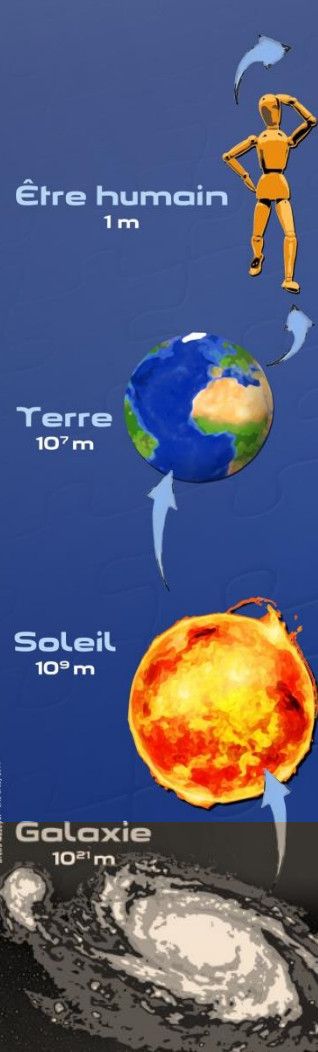
Pierre and Marie Curie  
Le Polonium et  
le Radium (1898)

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>e</sup> siècle  
sur le monde entier

# Situation en ~1896-1897

## 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	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

portée	Interaction	Particule associée	Effets
10 <sup>-17</sup> 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 <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.



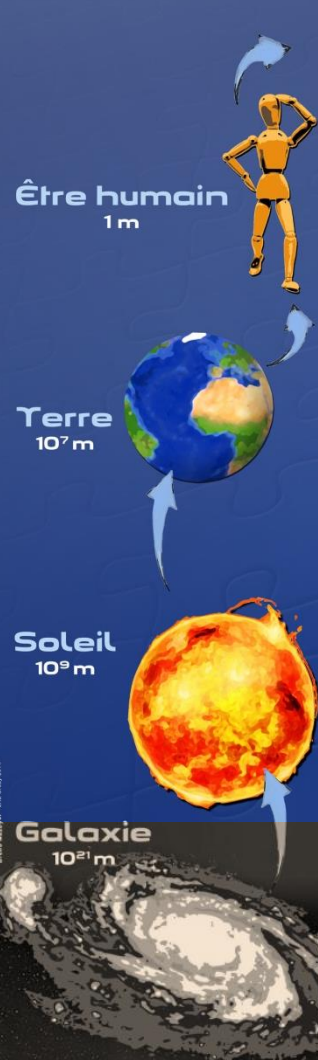
Antiproton

### 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.

# 1897 : découverte de l'électron

## 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	<p>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.</p> <p>Champ de Higgs</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	Interaction	Particule associée
$10^{-17}$ m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
$10^{-15}$ 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.

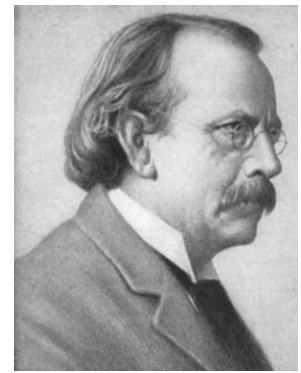


### ANTIMATIÈRE

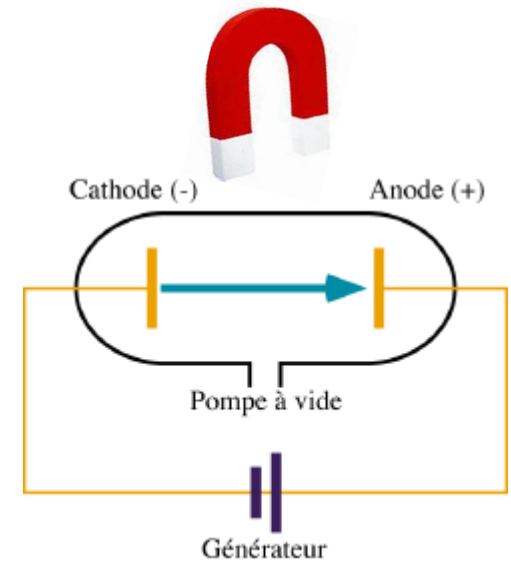
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

# La découverte de l'électron



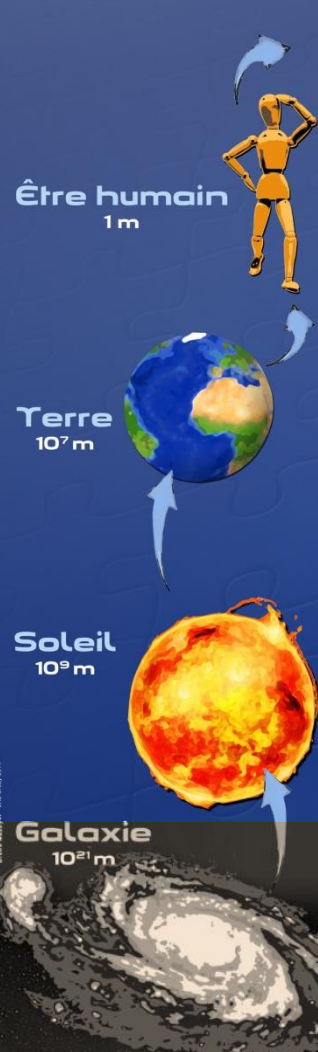
- Joseph John (« J.J ») Thomson (1897)
  - Etude des rayons cathodiques
- Charge négative
- Sensibilité à un champ électrique
  - **Caractéristiques des particules chargées**
- Rapport charge sur masse  $\sim 1000$  plus élevé que pour un atome d'hydrogène
  - **Ces nouveaux « corpuscules » sont soit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





# 1905 : preuve de la réalité des atomes

## 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	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

Portée	Interaction	Particule associée	Effets
10 <sup>-17</sup> 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 <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.

# Les atomes existent-ils vraiment ?

Robert Brown (1827)



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

Quelle est son origine ?

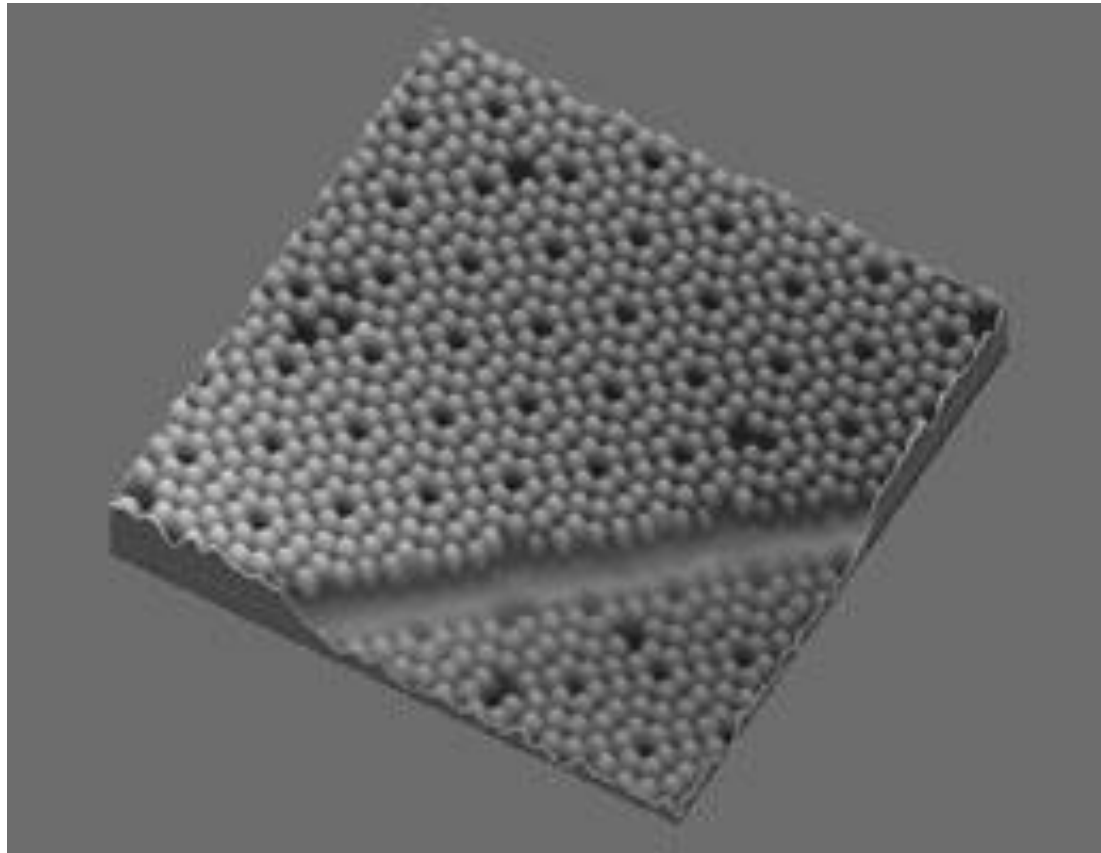
1905 (« annus mirabilis »)

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 !

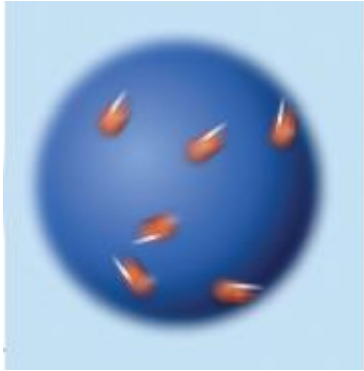


# Oui ils existent !



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

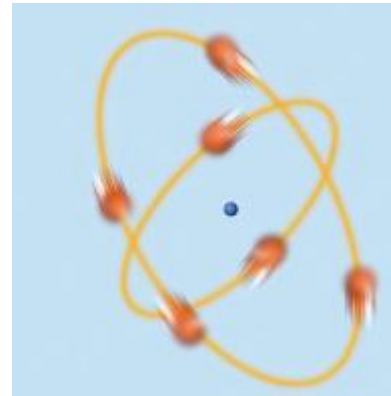
# A quoi ressemble un atome ?



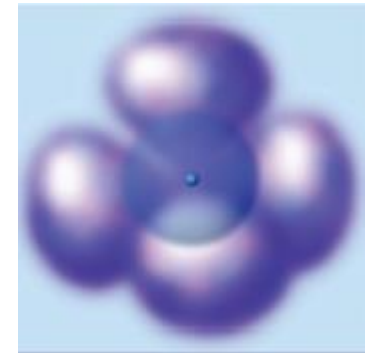
Thomson (1903)  
Modèle du  
« Plum-Pudding »



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


# 1909 : découverte du noyau atomique

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m



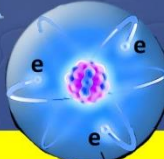
Cellule  
10<sup>-6</sup> m




Molécule  
10<sup>-9</sup> m



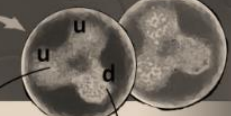
Atome  
10<sup>-10</sup> m





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	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> 
<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	Interaction	Particule associée
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 (?)

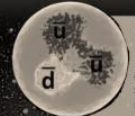
Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

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

Desintégrations radioactives  $\beta^+$  et  $\beta^-$  de certains noyaux instables

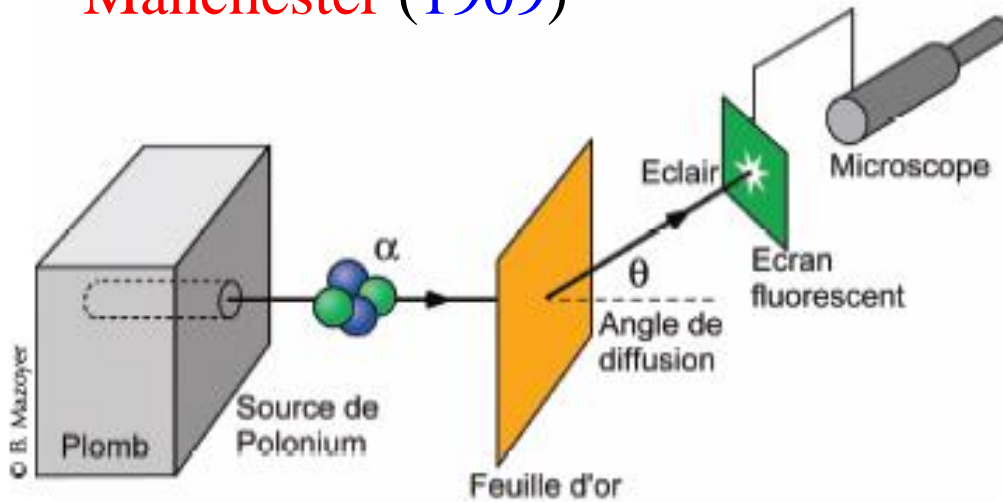
Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

# Les atomes sont presque vides

Manchester (1909)

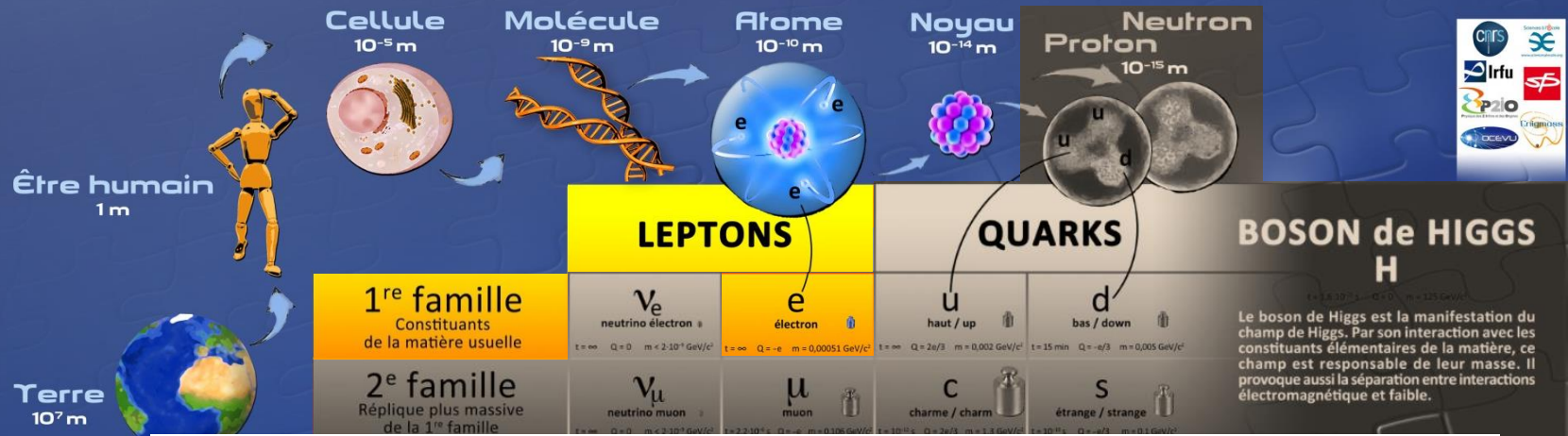


Geiger & Rutherford

- 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 !

# 1915 : relativité générale

## Composants élémentaires de la matière



Relativité générale (Einstein 1915) : généralisation de la Loi de la Gravitation Universelle (Newton, 1687)

portée	Interaction	Bosons	Effets
10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>	radioactivité $\beta$ et $\beta^+$ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	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

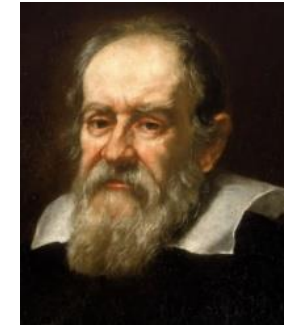
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# La mécanique céleste

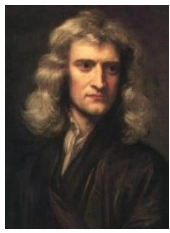
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II<sup>ème</sup> siècle de notre ère) de **Ptolémée**
  - La Terre est au centre
  - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)
- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)
  - L'église catholique l'oblige à abjurer « l'erreur » de **Copernic**
- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques
  - Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation





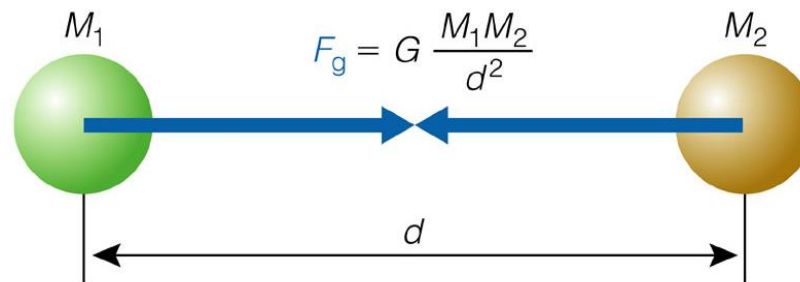


# Le génie de Newton



- **Loi de la Gravitation Universelle** (1687) :

« Deux masses ponctuelles s'attirent selon une force dirigée le long de la ligne les reliant. La force est proportionnelle au produit des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les séparent. »



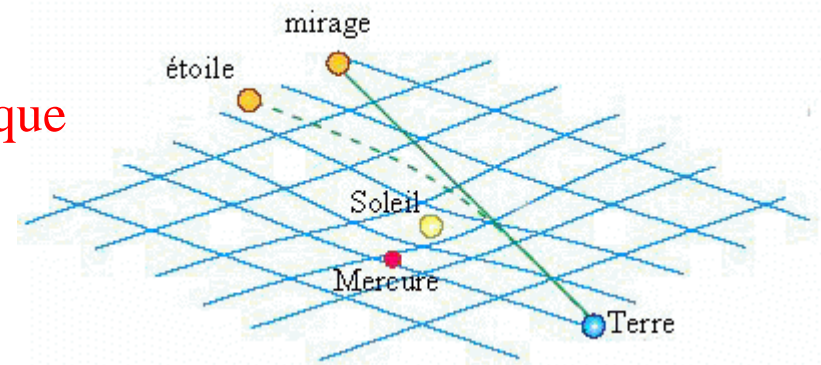
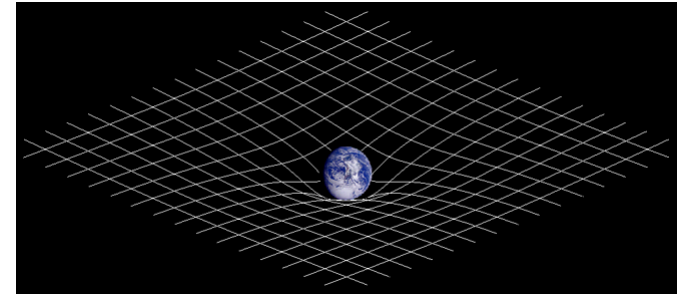
- **Simple** et **élegante**
- Explique les lois de **Kepler**
- Remplace la multitude de sphères nécessaires pour conserver la validité du modèle de **Ptolémée**

Règne sur la mécanique pendant plus de deux siècles

Toujours très utilisée aujourd'hui !

# La Relativité générale


- **Einstein 1915-1917**
  - Grossman, Hilbert
- **Gravitation  $\leftrightarrow$  Courbure de l'espace temps**
- **Courbure de l'espace temps  $\leftrightarrow$  Densité d'énergie**
- **Généralisation** de la théorie de la gravitation universelle de Newton
  - Explication de phénomènes dont la mécanique newtonienne ne rendait pas compte : avance du périhélie de Mercure, etc.
  - Prédiction de nouveaux effets : **expansion de l'Univers**, **trous noirs**, **lentille gravitationnelle**, etc.
- **Jamais mise en échec depuis**
  - A la base du **Modèle Standard cosmologique**
  - **Friedman, Lemaître**




# Découvertes des nucléons : proton (1918) & neutron (1932)

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m



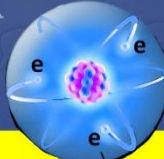
Cellule  
10<sup>-6</sup> m




Molécule  
10<sup>-9</sup> m



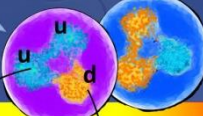
Atome  
10<sup>-10</sup> m




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 <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>e</b> électron <small>t = ∞ Q = -e m = 0,00051 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>u</b> haut / up <small>t = ∞ Q = 2e/3 m = 0,002 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>d</b> bas / down <small>t = 15 min Q = -e/3 m = 0,005 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>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\mu$ muon <small>t = 2,2 · 10<sup>-6</sup> s Q = -e m = 0,106 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>c</b> charme / charm <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = 2e/3 m = 1,3 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>s</b> étrange / strange <small>t = 10<sup>-10</sup> s Q = -e/3 m = 0,1 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>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\tau$ tau <small>t = 2,9 · 10<sup>-13</sup> s Q = -e m = 1,78 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>t</b> top <small>t = 3 · 10<sup>-25</sup> s Q = 2e/3 m = 173 GeV/c<sup>2</sup></small>	<b>b</b> beau / beauty / bottom <small>t = 1,3 · 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c<sup>2</sup></small>

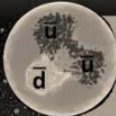
**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

Portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$	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.




**ANTIMATIÈRE**

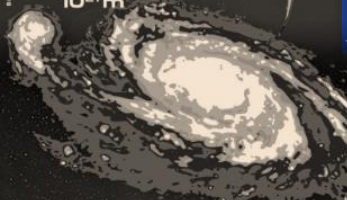
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton


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



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

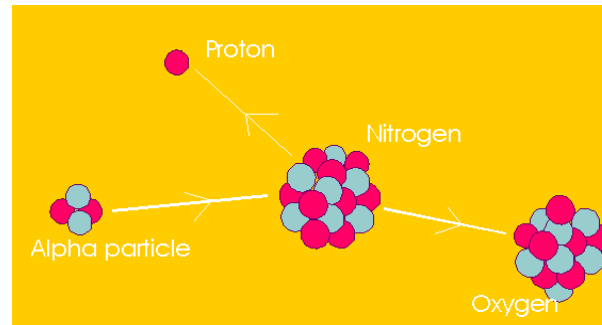
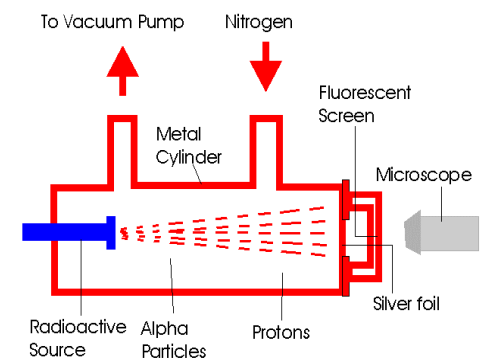


**Terre** 10<sup>7</sup> m



# 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 !**

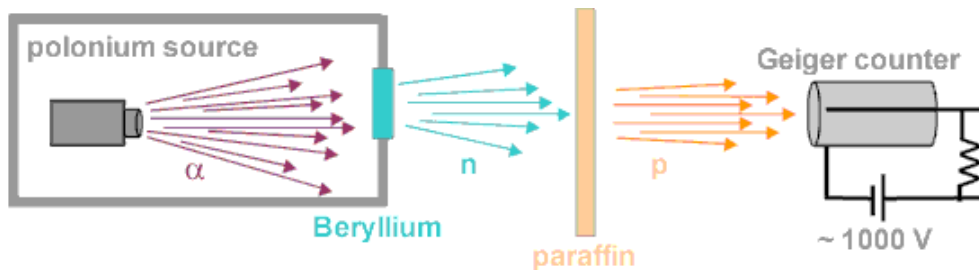


- **Il propose de faire du noyau d'hydrogène une particule élémentaire ...**
- ... baptisée « proton » en l'honneur de **William Prout** qui, en 1815 (!), avait fait l'hypothèse que la masse atomique de chaque élément était un multiple entier de celle de hydrogène, suggérant ainsi que l'atome d'hydrogène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

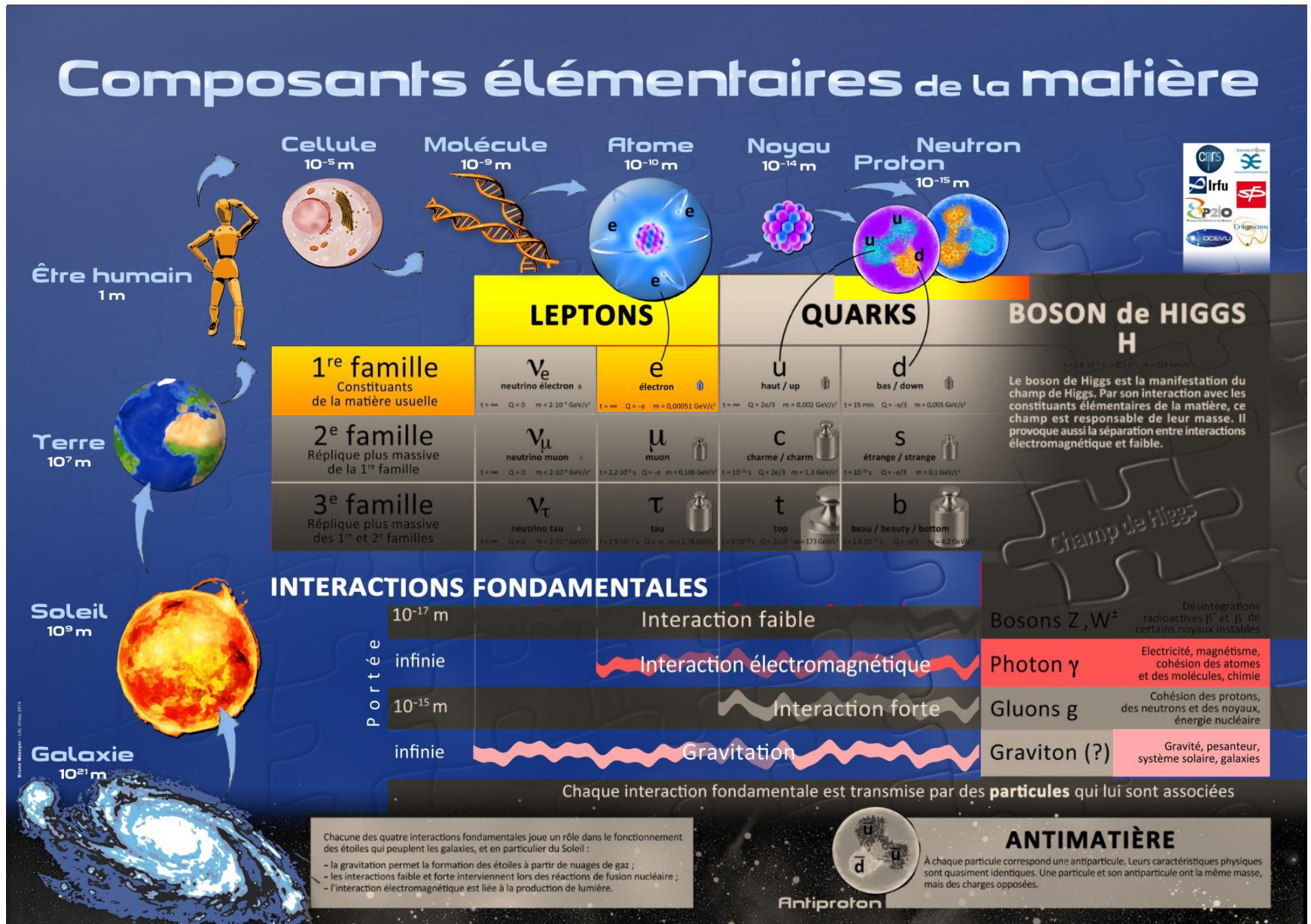


- Phénomène observé d'abord en France par Irène et Frédéric Joliot-Curie  
→ Ils en font une mauvaise interprétation
- James Chadwick réalise une expérience similaire  
et en tire la bonne conclusion qu'il publie en janvier 1932
- Les Joliot-Curie et Chadwick reçoivent des prix Nobel en 1935

Radioactivité  
artificielle

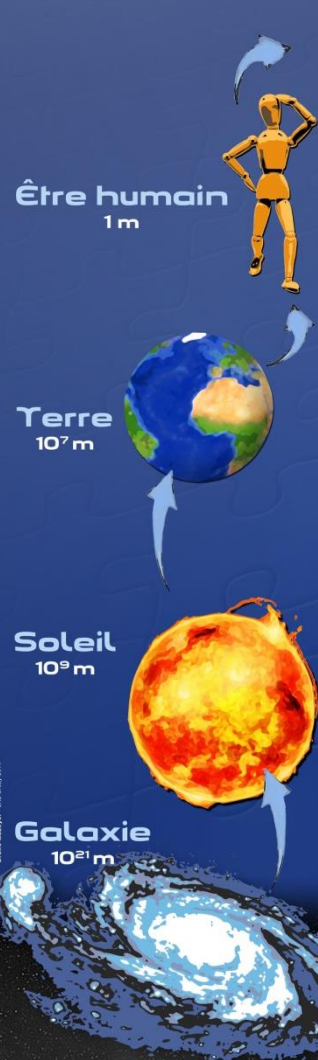
Neutron

# Années 1920 : découverte des (autres) galaxies



# 1932 : découverte de l'antimatière

## 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	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

portée	Interaction	Particule associée	Effets
10 <sup>-17</sup> 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 <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.

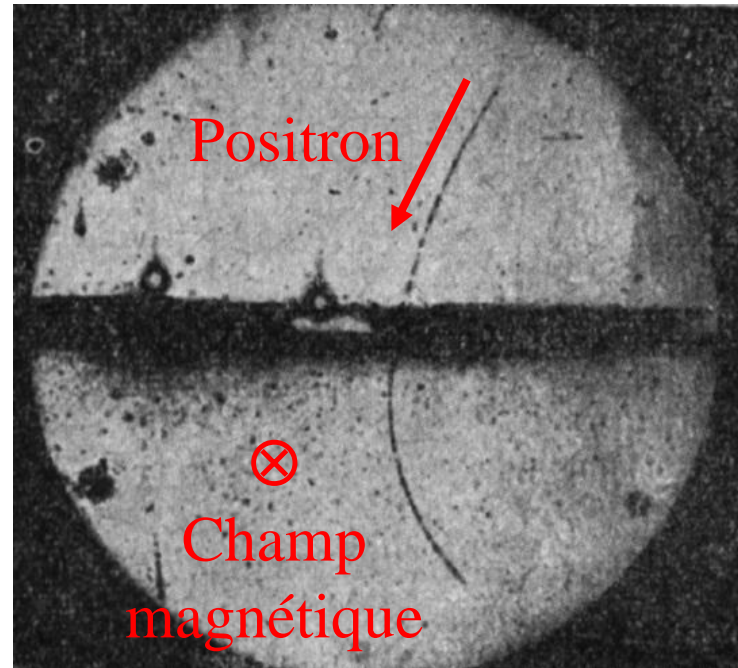
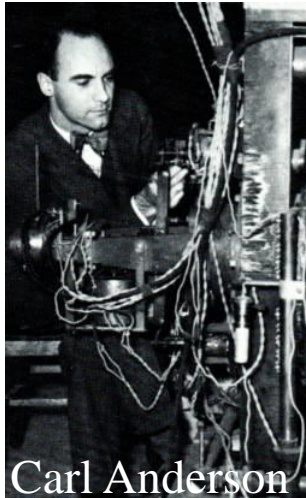


Antiproton

### 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.

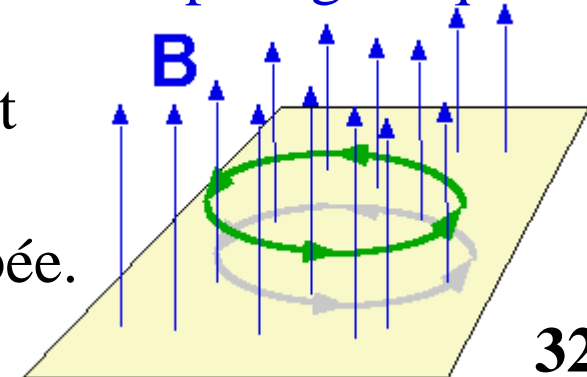
# Découverte du positron (1932)



- 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.







# 1936 : découverte du muon

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m



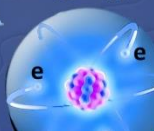
Cellule  
10<sup>-6</sup> m




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	e électron	u haut / up	d bas / down	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		Bosons Z, W <sup>±</sup>	
portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	
	infinie	Interaction électromagnétique	
	10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	
	infinie	Gravitation	
		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

# 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

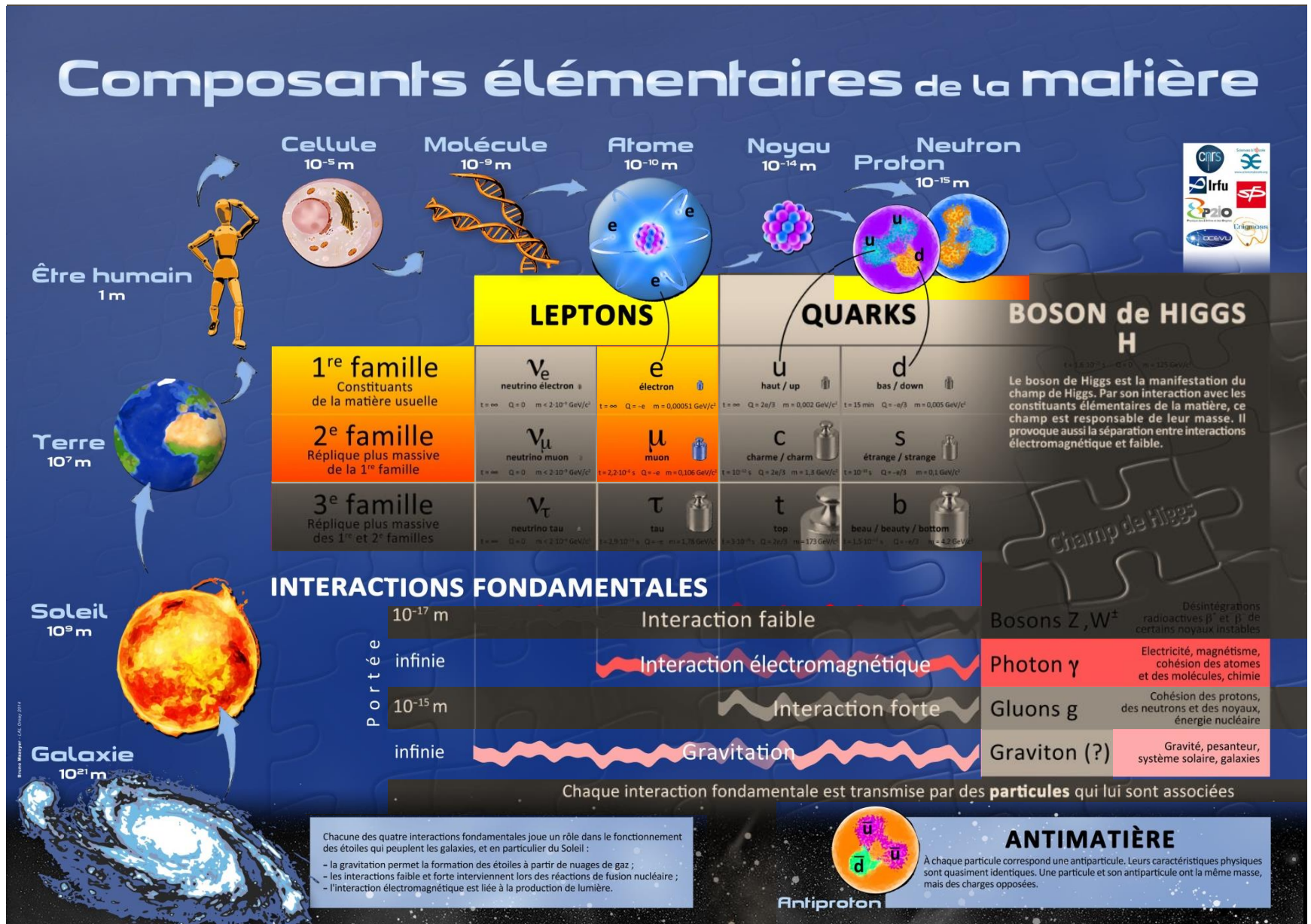
→ On n'attendait pas ce nouveau membre de la famille des particules!



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

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


# Années 1930 : réactions nucléaires dans le Soleil




# 1948 : l'électrodynamique quantique

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m



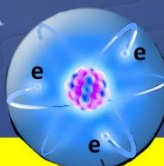
Cellule  
10<sup>-6</sup> m




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

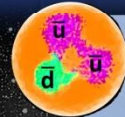
### INTERACTIONS FONDAMENTALES

portée	Interaction	Particule associée
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.



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.


# ~1950 : découverte des particules étranges

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m




Cellule  
10<sup>-6</sup> m




Molécule  
10<sup>-9</sup> m



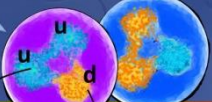
Atome  
10<sup>-10</sup> m





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



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





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	<p>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.</p> 
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	


### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup>
infinie	infinie	Interaction électromagnétique	Photon $\gamma$
10 <sup>-15</sup> m	infinie	Interaction forte	Gluons g
infinie	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.

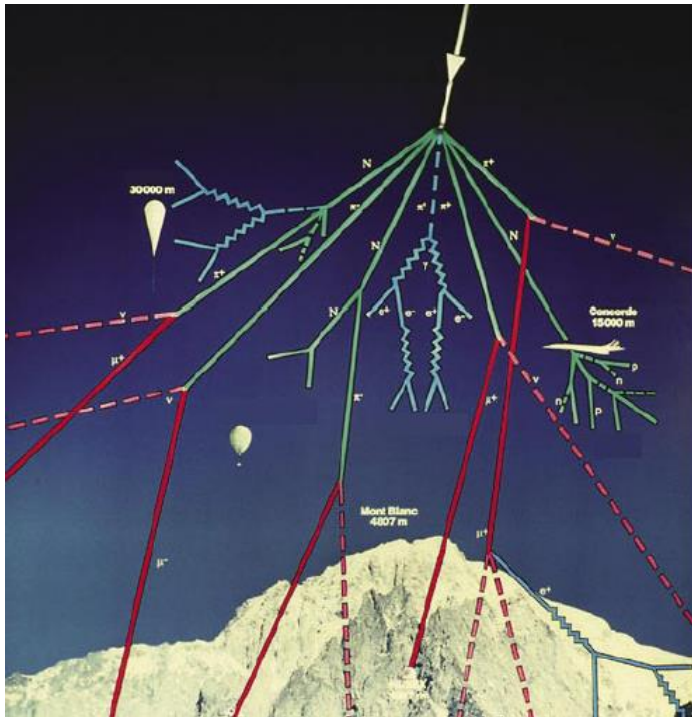
**Antiproton**

# Les rayons cosmiques

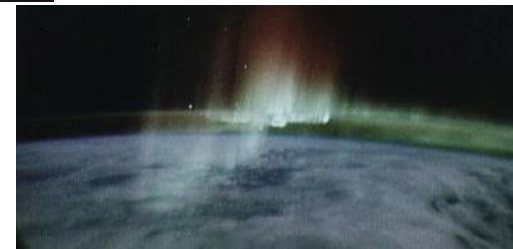
- Des particules énergétiques en provenance de l'espace :  
~90% protons, ~9% noyaux d'Hélium, ~1% électrons...
- Sources: le Soleil, des étoiles particulières, situées dans notre galaxie ou au-delà
- Peuvent être aussi énergétiques qu'une balle de tennis !



Victor Hess

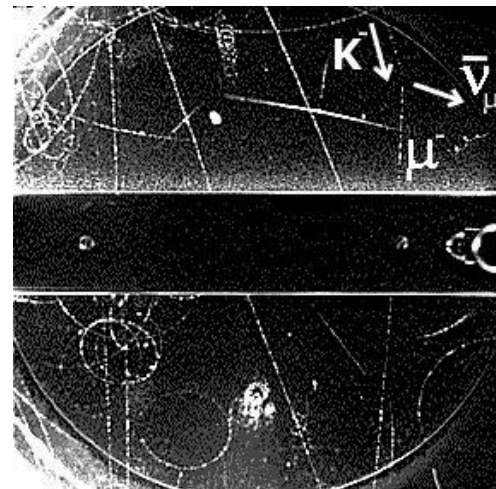
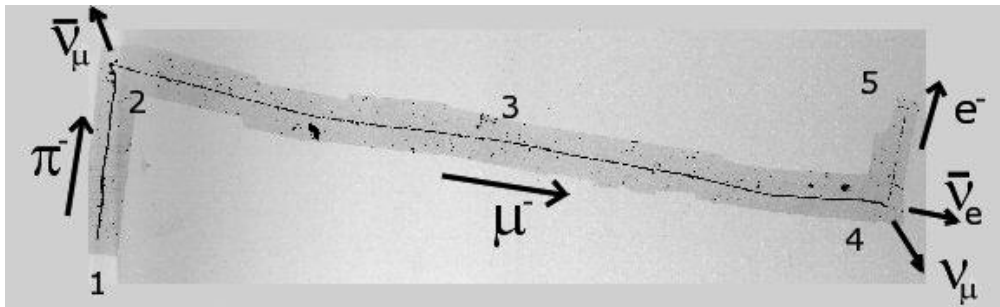
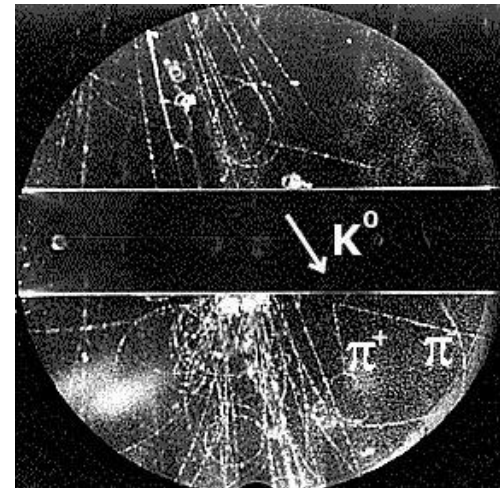


Aurore vue de la navette spatiale



# Les particules « étranges »

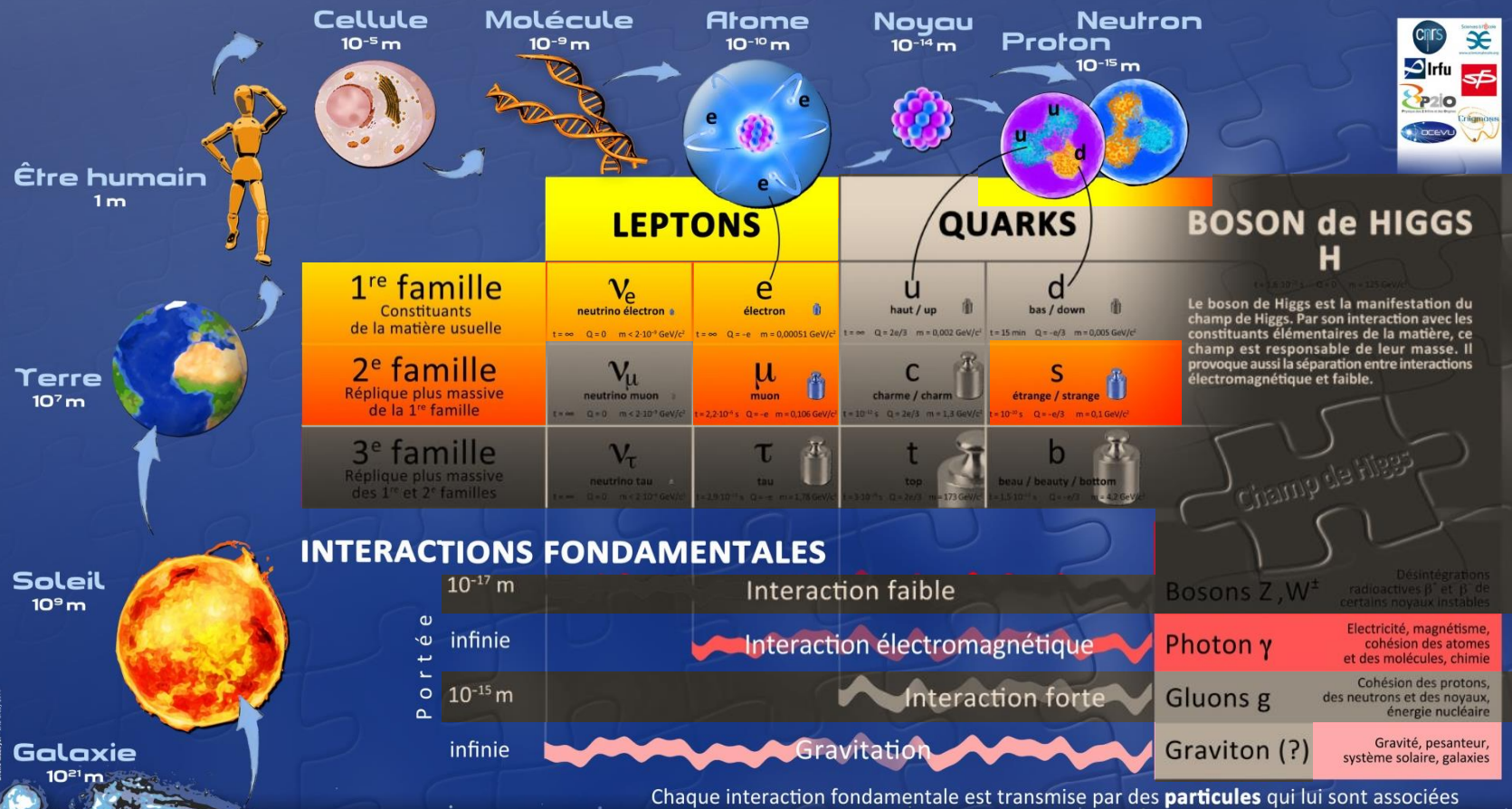
- Dernières grandes découvertes de particules dans les rayons cosmiques
  - Les accélérateurs de particules prennent définitivement le relais dans les années 50
  - Détecteurs : chambres à brouillard + émulsions photographiques
- Découverte du kaon neutre ( $K^0$ )
  - Désintégration produit des « V inversés » caractéristiques
- Les produits de la désintégrations sont des pions chargés ( $\pi^\pm$ ), découverts peu avant, également grâce aux rayons cosmiques



- Découverte des kaons chargés ( $K^+$  et  $K^-$ )

# 1956 : découverte du neutrino électron

## Composants élémentaires de la matière



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**

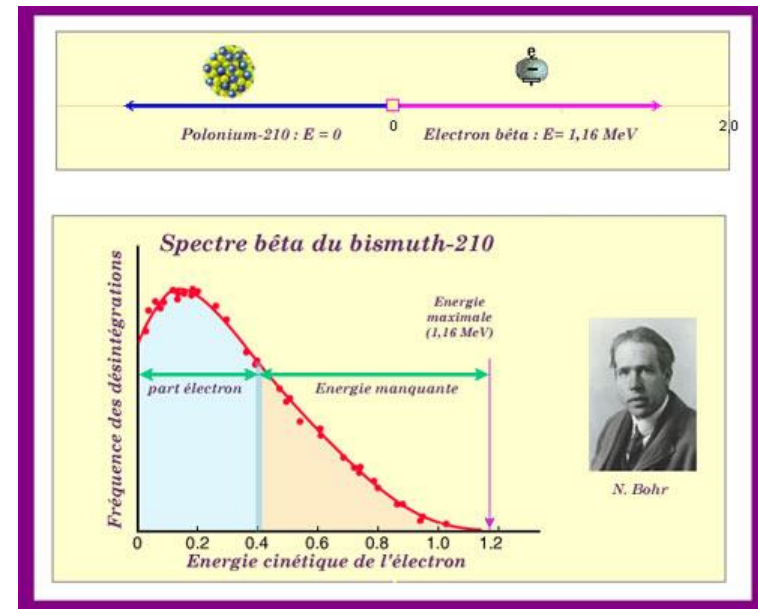
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton



# Les 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
  - Neutrino = « 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.

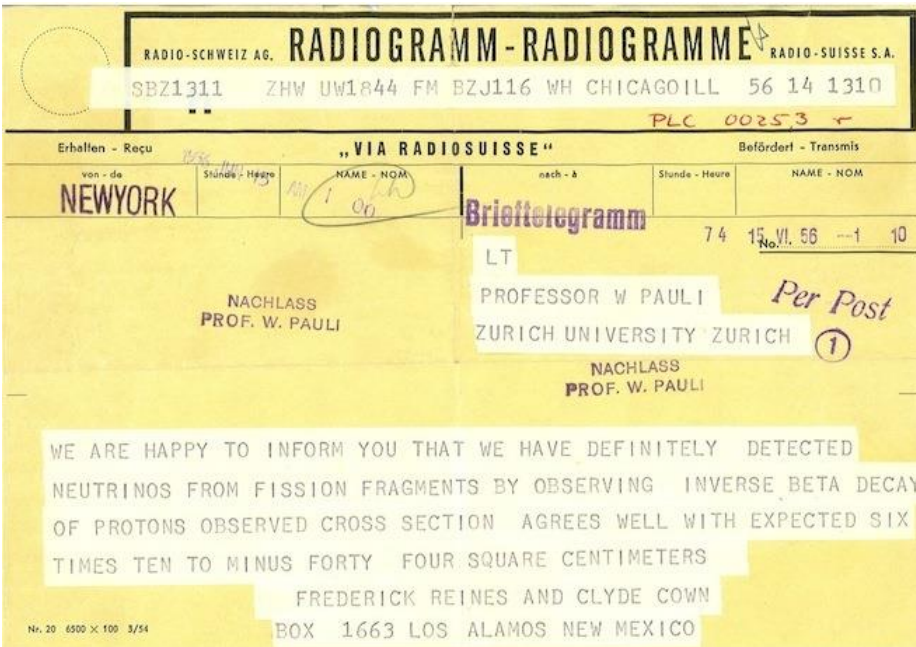
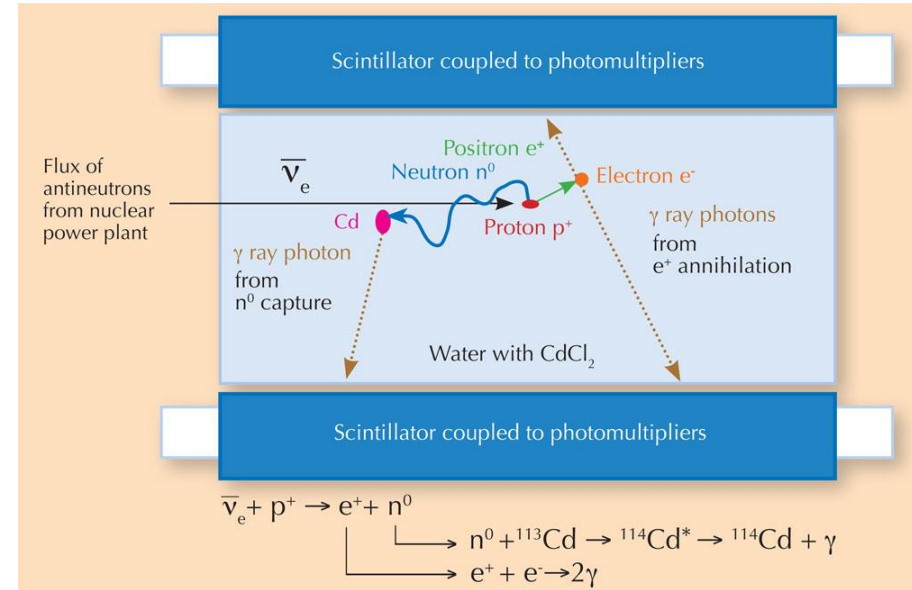
- Ainsi donc, chers Radioactifs, examinez et jugez.- Malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tübingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.- [...]

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)



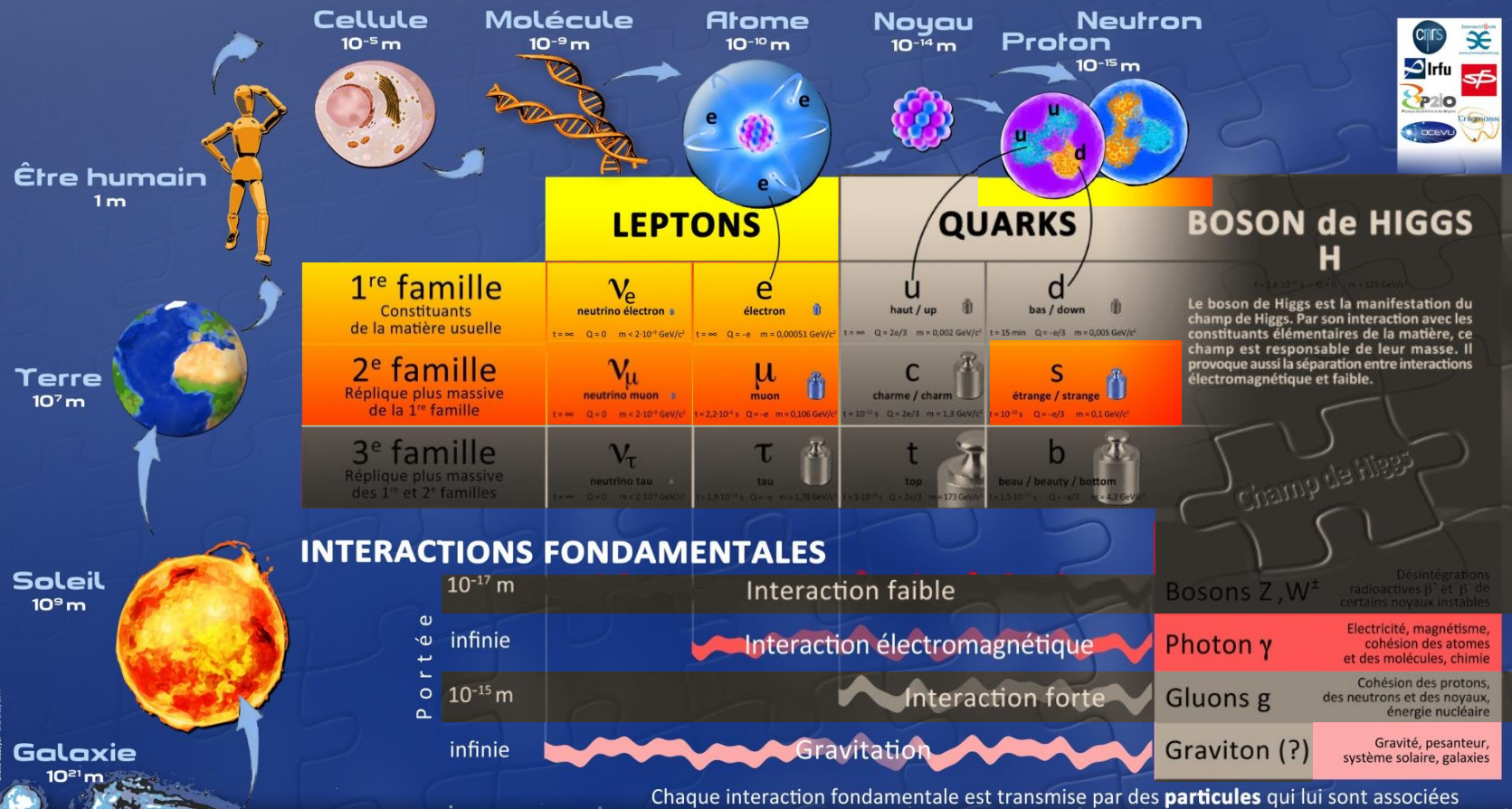
Frederick REINES and Clyde COWAN  
 Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

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

Pauli

# 1962 : découverte du neutrino muon

## Composants élémentaires de la matière



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.

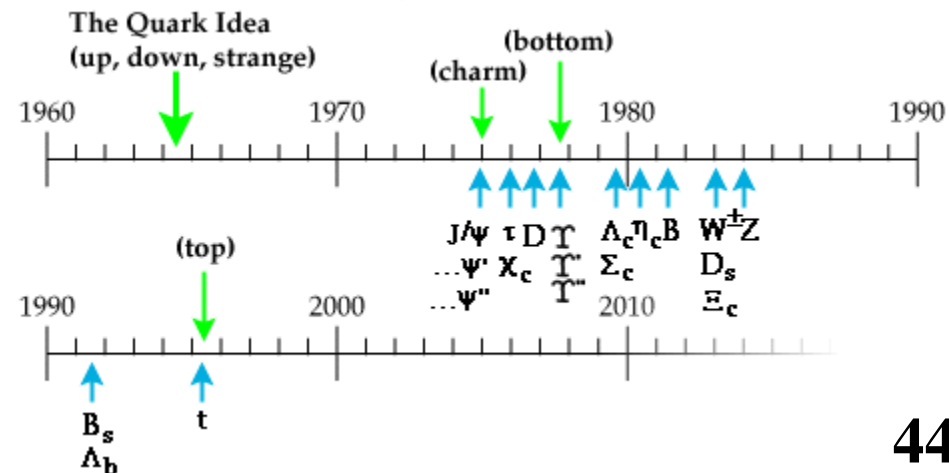
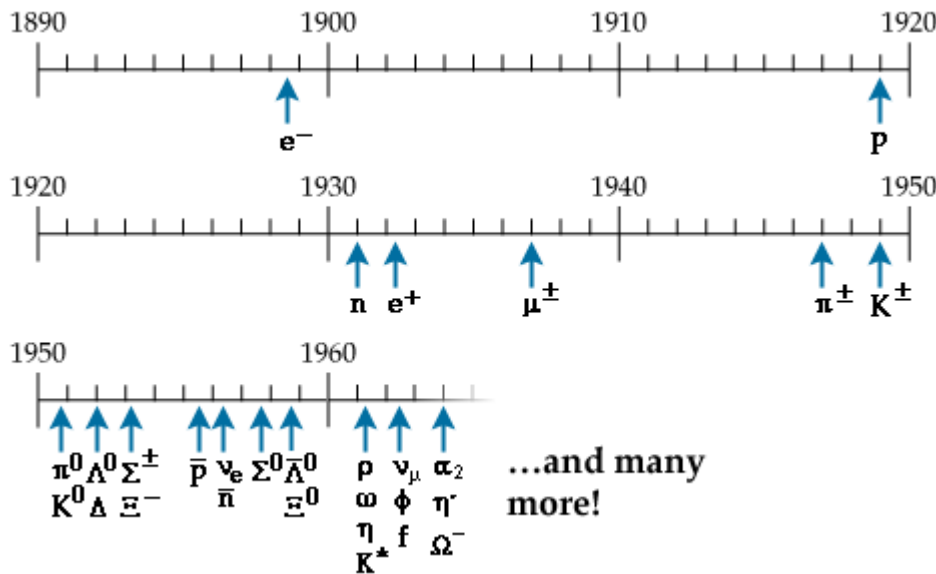
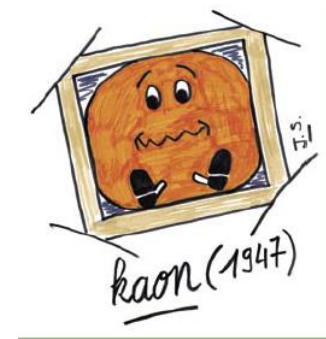


Antiproton

### 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.


# Un vrai « zoo » de particules




# 1968 : découverte de la structure du proton

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m



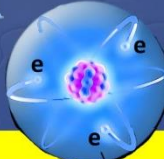
Cellule  
10<sup>-6</sup> m




Molécule  
10<sup>-9</sup> m




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





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




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 <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	e électron <small>t = ∞ Q = -e m = 0,00051 GeV/c<sup>2</sup></small>	u haut / up <small>t = ∞ Q = 2e/3 m = 0,002 GeV/c<sup>2</sup></small>	d bas / down <small>t = 15 min Q = -e/3 m = 0,005 GeV/c<sup>2</sup></small>	<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> 
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\mu$ muon <small>t = 2,2 · 10<sup>-6</sup> s Q = -e m = 0,106 GeV/c<sup>2</sup></small>	c charme / charm <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = 2e/3 m = 1,3 GeV/c<sup>2</sup></small>	s étrange / strange <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 0,1 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>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\tau$ tau <small>t = 2,5 · 10<sup>-13</sup> s Q = -e m = 1,78 GeV/c<sup>2</sup></small>	t top <small>t = 3,2 · 10<sup>-25</sup> s Q = 2e/3 m = 173 GeV/c<sup>2</sup></small>	b beau / beauty / bottom <small>t = 1,5 · 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c<sup>2</sup></small>	

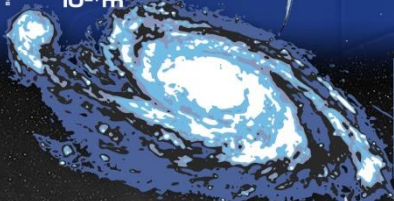
**Terre**  
10<sup>7</sup> m



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



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



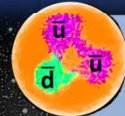
### INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particule associée
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.



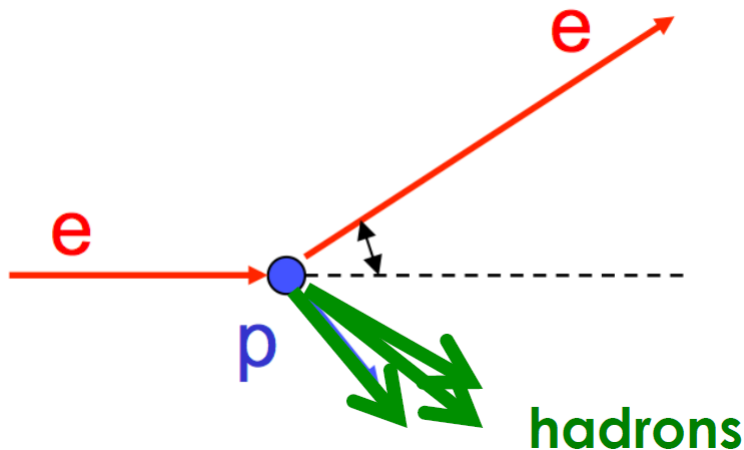
**Antiproton**

### 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

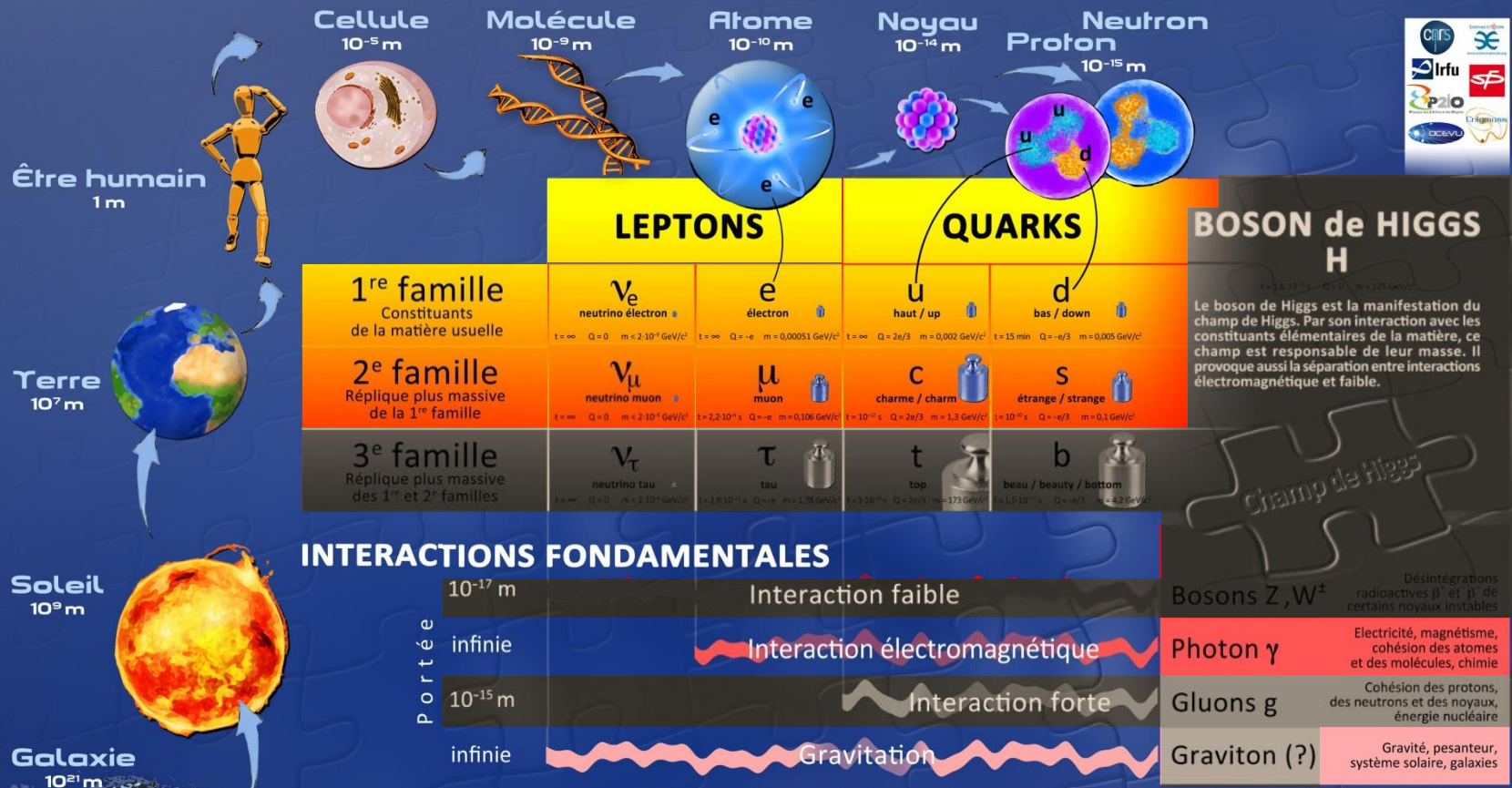
- 1968 à SLAC (Californie) :  
Friedman, Kendall & Taylor
- Expérience « à la Rutherford » :  
diffusion profondément inélastique d'un  
électron très énergétique sur un proton



- 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

# 1974 : découverte du 4<sup>ème</sup> quark – le charme

## Composants élémentaires de la matière



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.



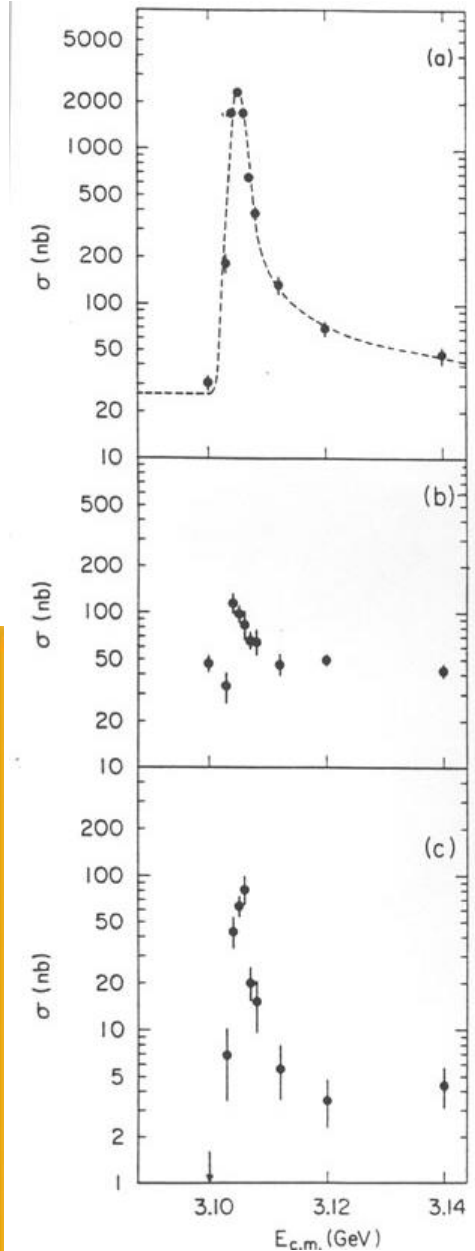
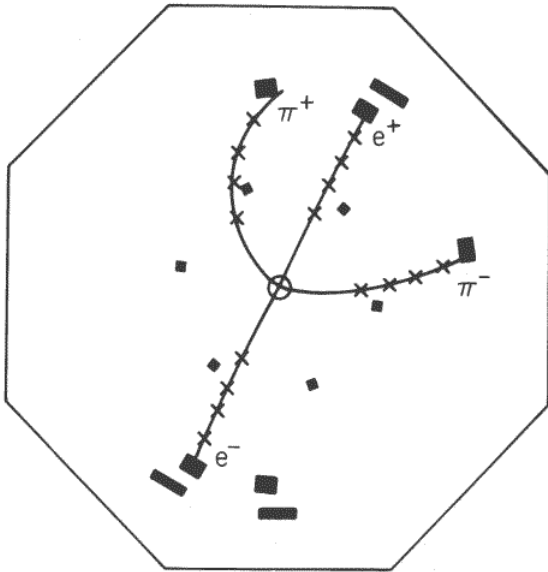
Antiproton

### 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 révolution de novembre

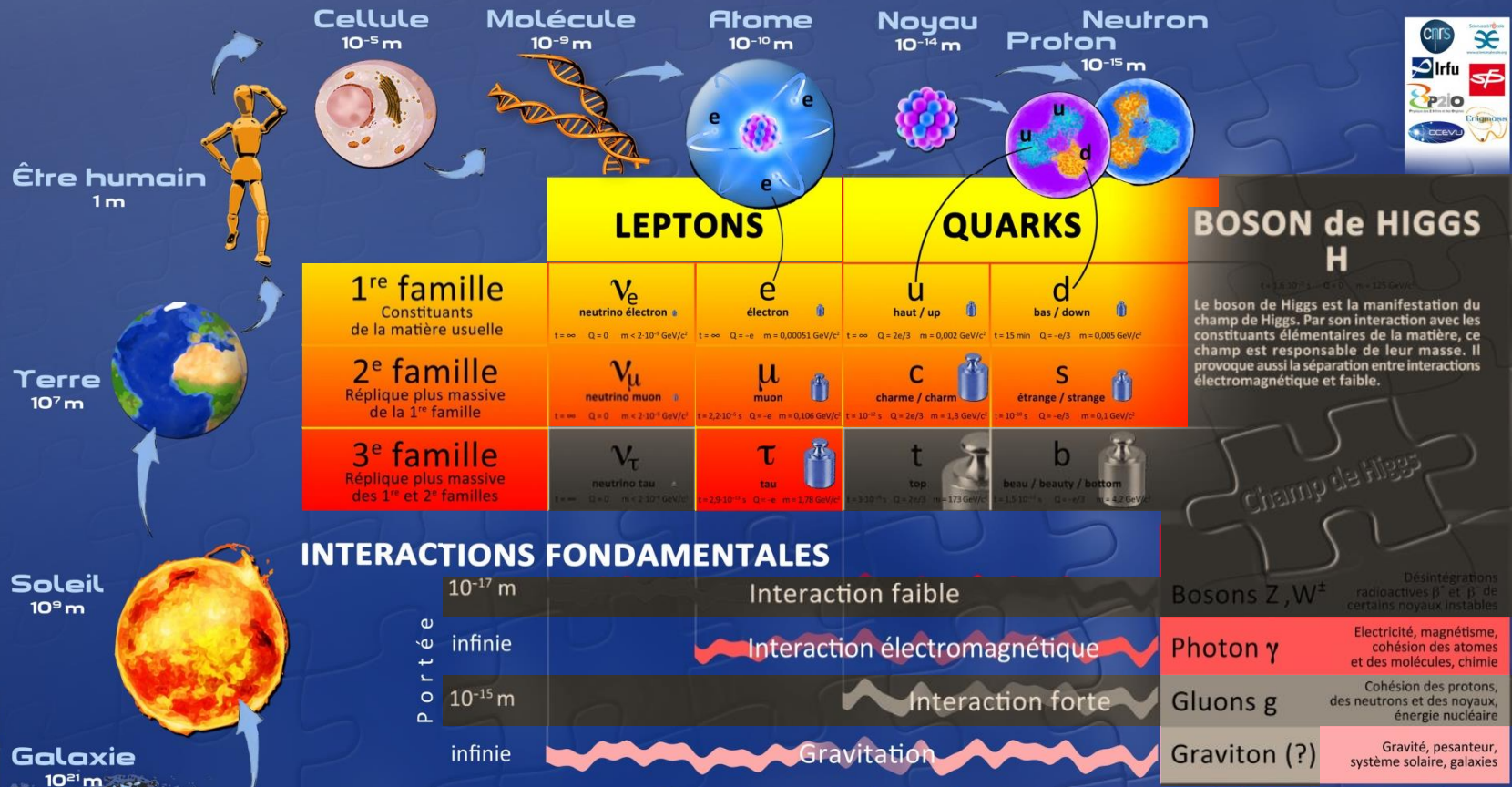
- **Novembre 1974** : découverte simultanée à SLAC (côte ouest des USA) et à Brookhaven (côte est) d'une nouvelle particule : le  $J/\Psi$
- **Etat lié  $c\bar{c}$**  : découverte du 4<sup>ème</sup> quark
  - **Prédit théoriquement quelques années plutôt**  
→ Glashow, Iliopoulos, Maiani (GIM)





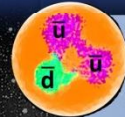
# 1975-1976 : découverte du lepton tau

## Composants élémentaires de la matière



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.

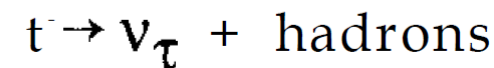
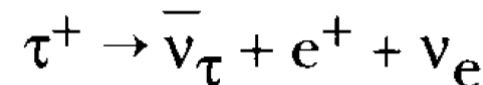
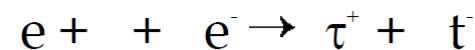
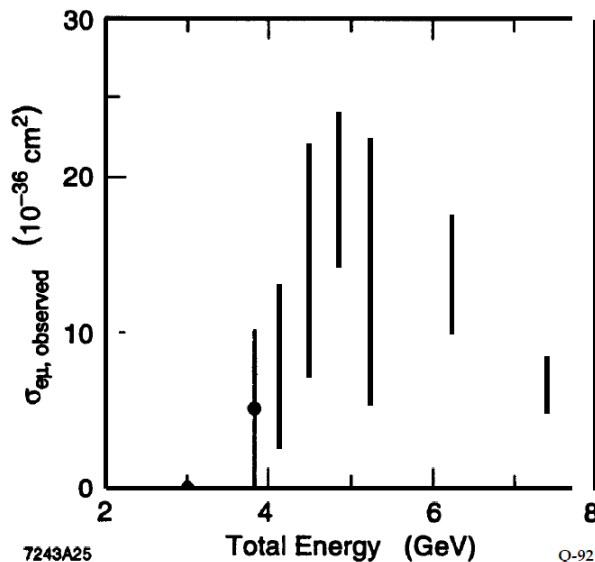
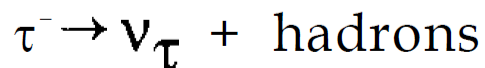
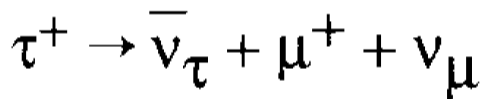
# La 3<sup>ème</sup> famille

- 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 → électron ou muon + hadrons + énergie manquante




# 1977 : découverte du 5<sup>ème</sup> quark – le b

## Composants élémentaires de la matière


Être humain  
1 m




Cellule  
10<sup>-6</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 <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	e électron <small>t = ∞ Q = -e m = 0,00051 GeV/c<sup>2</sup></small>	u haut / up <small>t = ∞ Q = 2e/3 m = 0,002 GeV/c<sup>2</sup></small>	d bas / down <small>t = 15 min Q = -e/3 m = 0,005 GeV/c<sup>2</sup></small>	<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> 
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon <small>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\mu$ muon <small>t = 2,2 · 10<sup>-6</sup> s Q = -e m = 0,106 GeV/c<sup>2</sup></small>	c charme / charm <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = 2e/3 m = 1,3 GeV/c<sup>2</sup></small>	s étrange / strange <small>t = 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 0,1 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>t = ∞ Q = 0 m &lt; 2 · 10<sup>-36</sup> GeV/c<sup>2</sup></small>	$\tau$ tau <small>t = 2,9 · 10<sup>-13</sup> s Q = -e m = 1,78 GeV/c<sup>2</sup></small>	t top <small>t = 3,3 · 10<sup>-25</sup> s Q = 2e/3 m = 173 GeV/c<sup>2</sup></small>	b beau / beauty / bottom <small>t = 1,5 · 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c<sup>2</sup></small>	

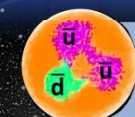
  

INTERACTIONS FONDAMENTALES			
Portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	Bosons Z, W <sup>±</sup> <small>Désintégrations radioactives β<sup>+</sup> et β<sup>-</sup> de certains noyaux instables</small>
	infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ <small>Electricité, magnétisme, cohésion des atomes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

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.

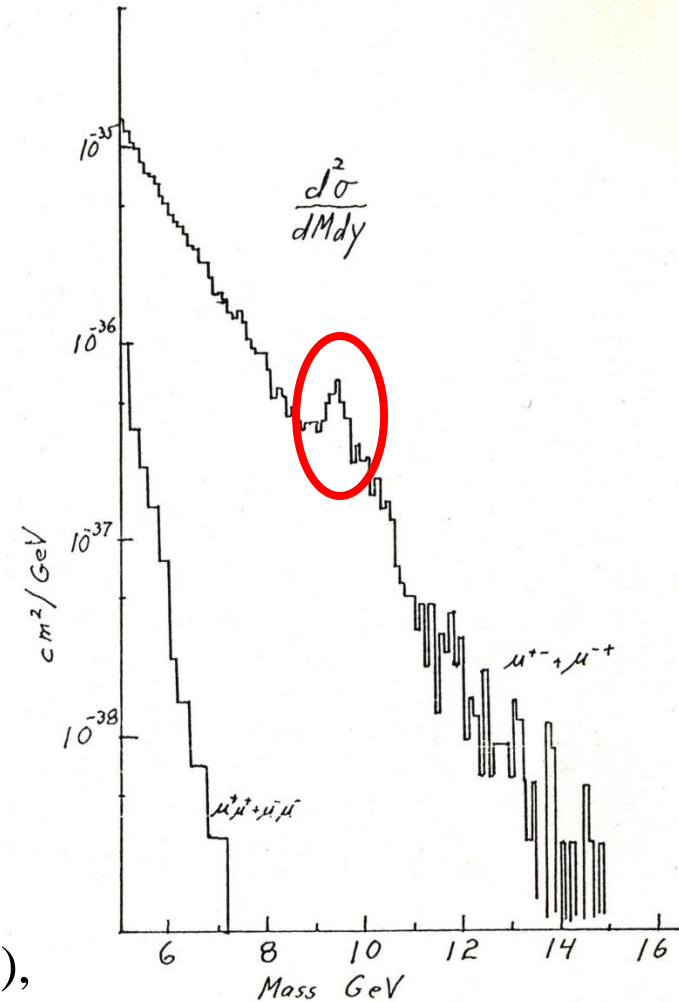
Antiproton

# 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



# 1979 : découverte des gluons

## Composants élémentaires de la matière

**Étre humain** 1 m

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

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

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

**Cellule** 10<sup>-6</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

**LEPTONS**

**QUARKS**

**BOSON de HIGGS H**

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

**2<sup>e</sup> famille**  
Réplique plus massive de la 1<sup>re</sup> famille

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

**INTERACTIONS FONDAMENTALES**

portée

10<sup>-17</sup> m

infinie

10<sup>-15</sup> m

infinie

Interaction faible

Interaction électromagnétique

Interaction forte

Gravitation

Bosons Z, W<sup>±</sup>

Photon  $\gamma$

Gluons g

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

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

Désintégrations radioactives  $\beta^+$  et  $\beta^-$  de certains noyaux instables

Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

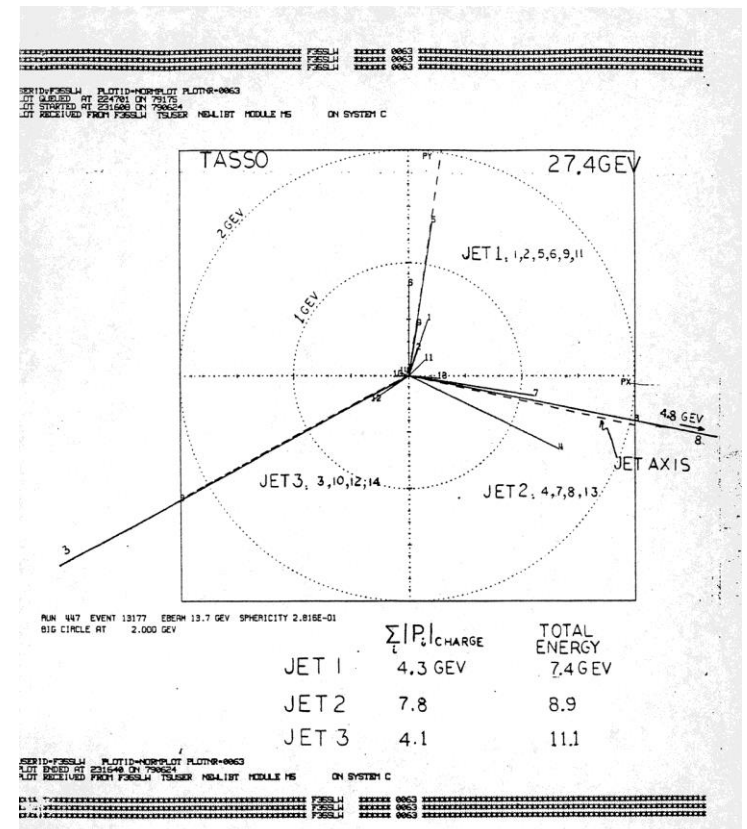
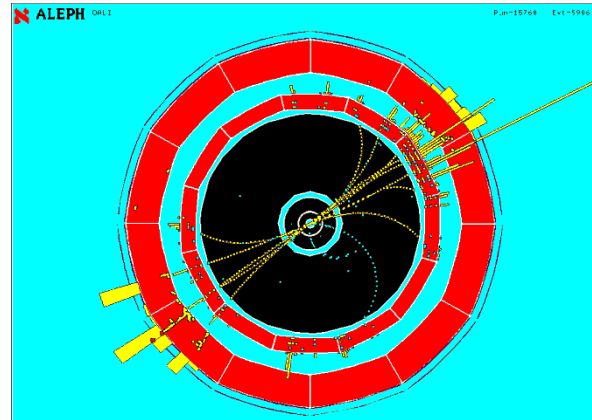
Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire

Gravité, pesantueur, système solaire, galaxies

Logo: CNRS, Lfdu, Pzlo, SF, Origines, Acedevu

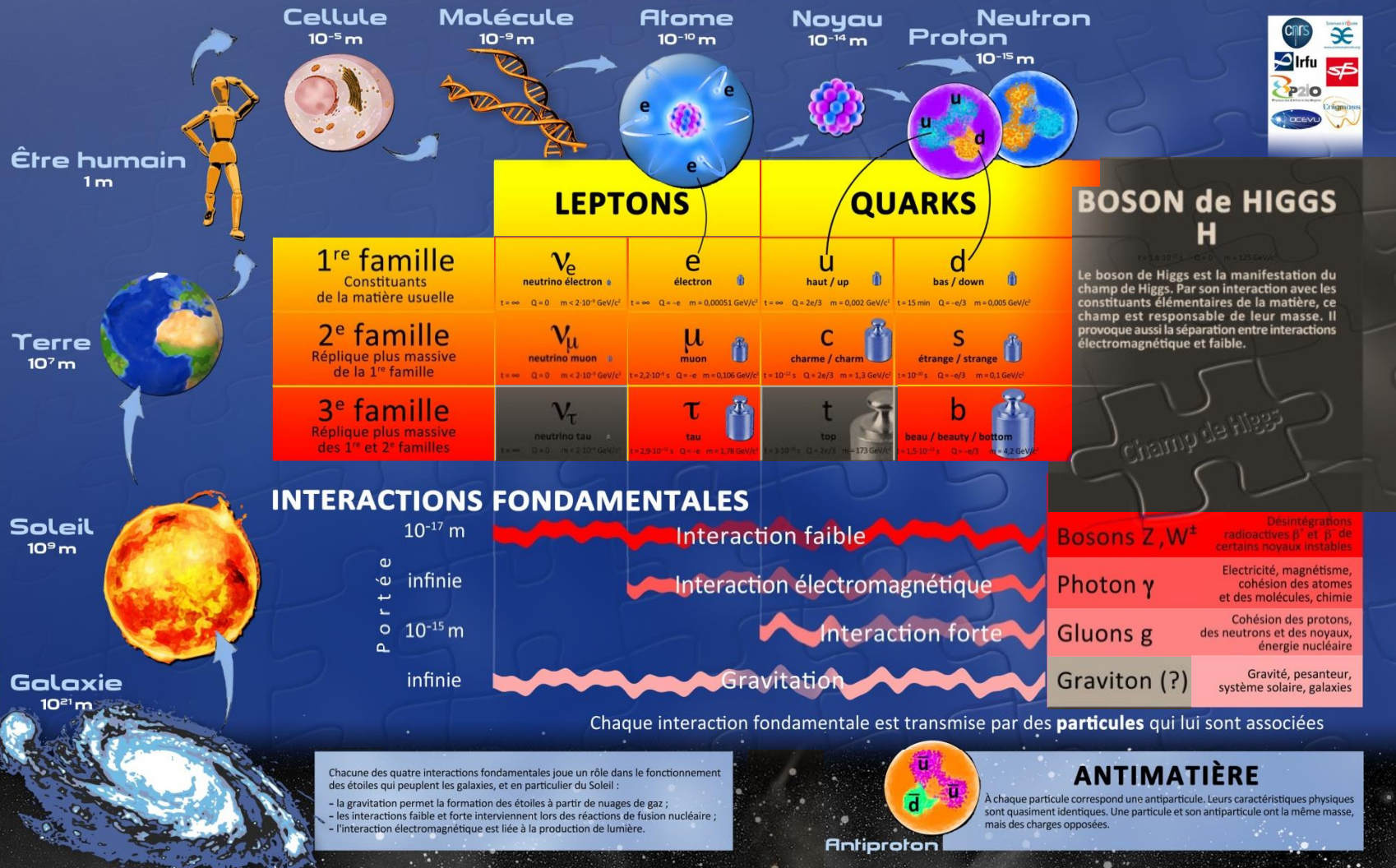
# Interaction forte et « jets »

- 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



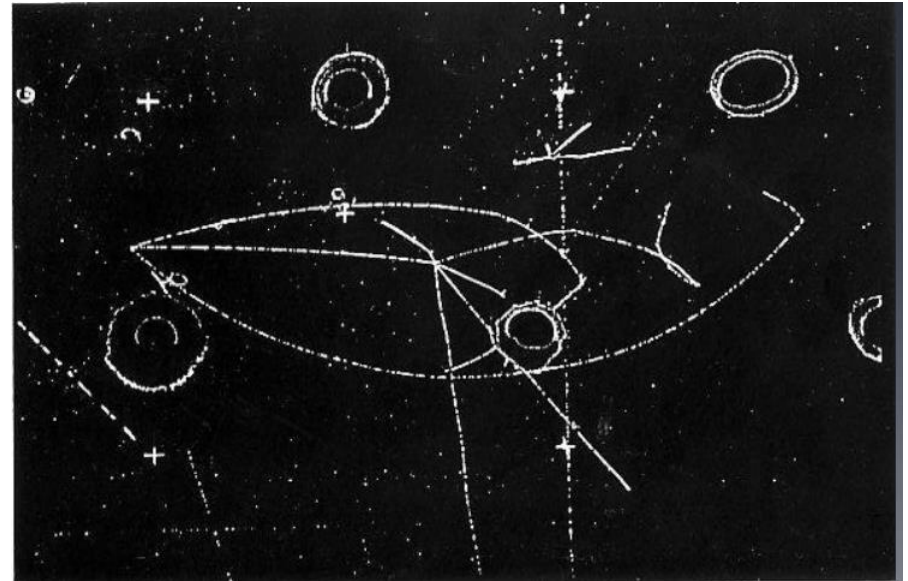
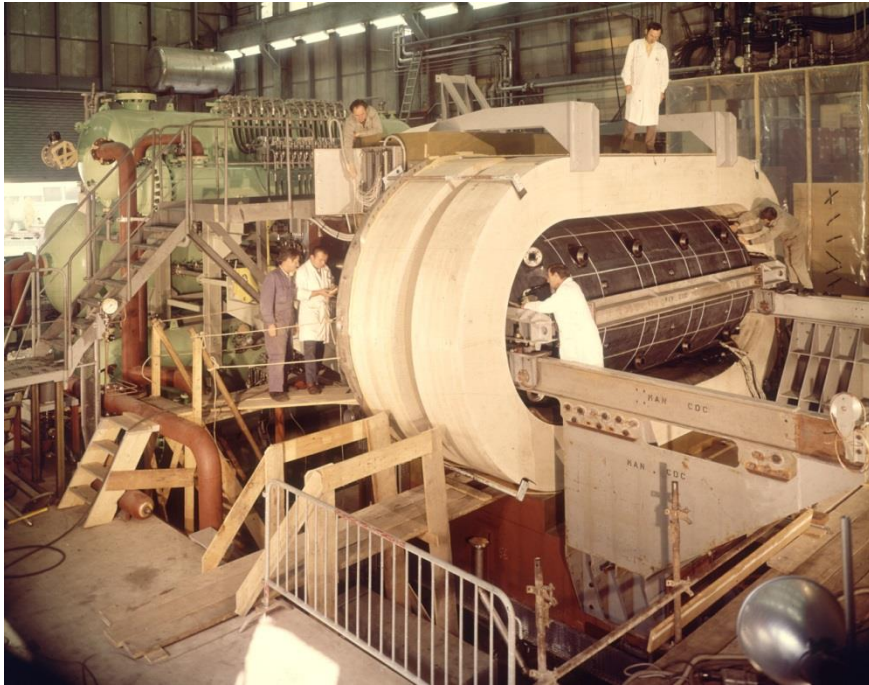
# 1983 : découverte des bosons W et Z

## Composants élémentaires de la matière



# L'unification électrofaible

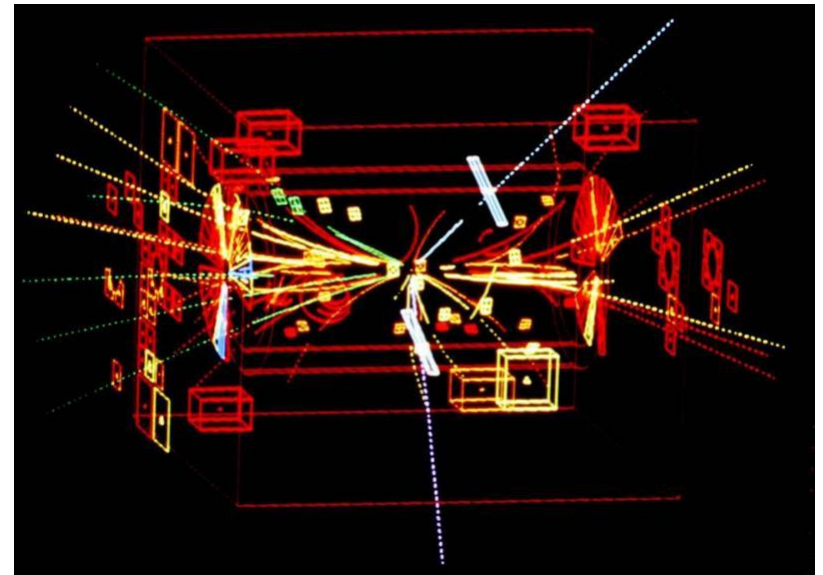
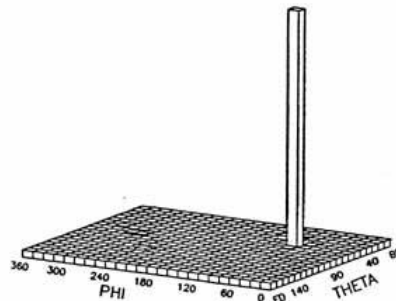
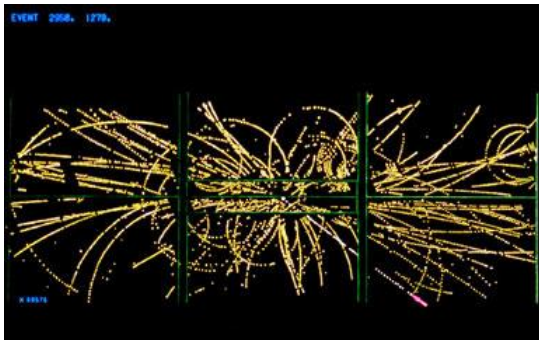
- 1973 : la grande chambre à bulles du CERN Gargamelle trouve trois clichés (sur plus d'un million) montrant un nouveau phénomène, « les courants neutres » c'est-à-dire la diffusion élastique d'un neutrino sur un électron ou un nucléon.
  - Signe la présence d'un boson médiateur neutre, le Z, justement 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

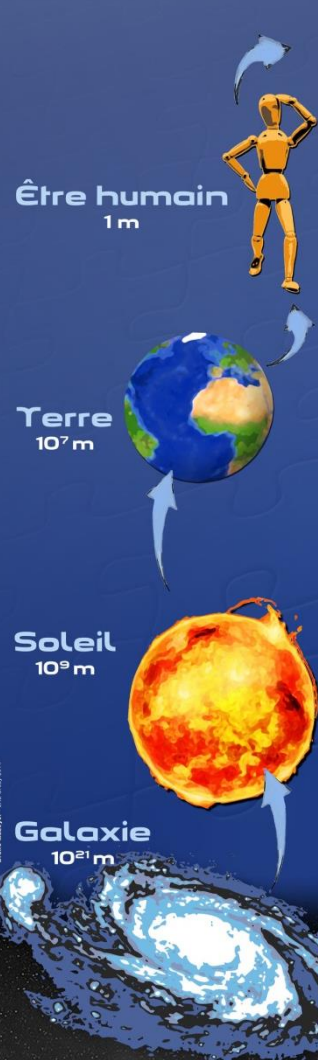
- Dernière étape : produire ces bosons électrofaibles ( $W^\pm$  et  $Z^0$ ), dont on sait qu'ils doivent être lourds – près de 100 fois la masse du proton
- Au CERN : transformation du « Synchrotron à protons » SpS en collisionneur proton-antiproton, le Sp $\bar{p}$ S – Carlo Rubbia et Simon Van der Meer
- 1983 : les expériences UA1 et UA2 annoncent les découvertes du W et du Z



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

# 1995 : découverte du 6<sup>ème</sup> quark – le top

## Composants élémentaires de la matière

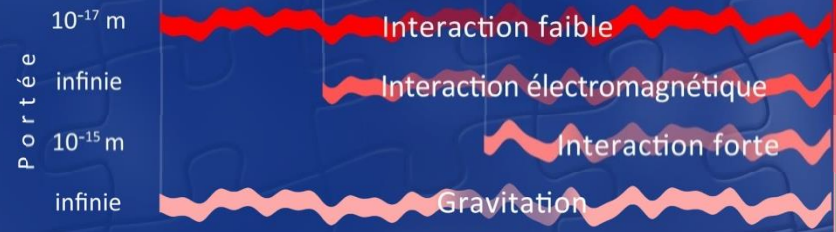


	LEPTONS		QUARKS	
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charme / charm	$s$ étrange / strange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



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, 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.



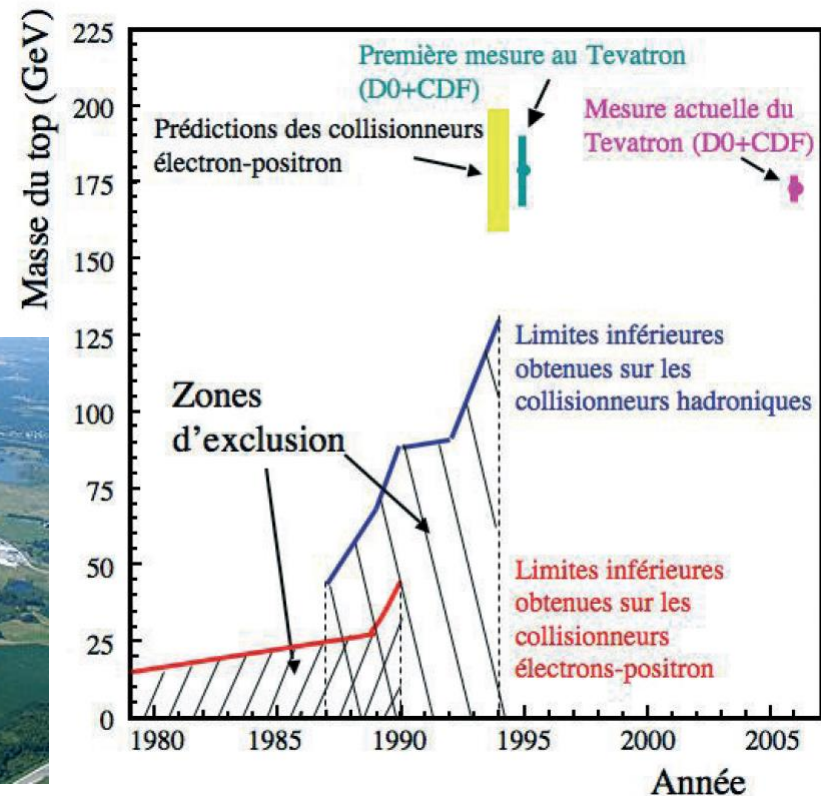
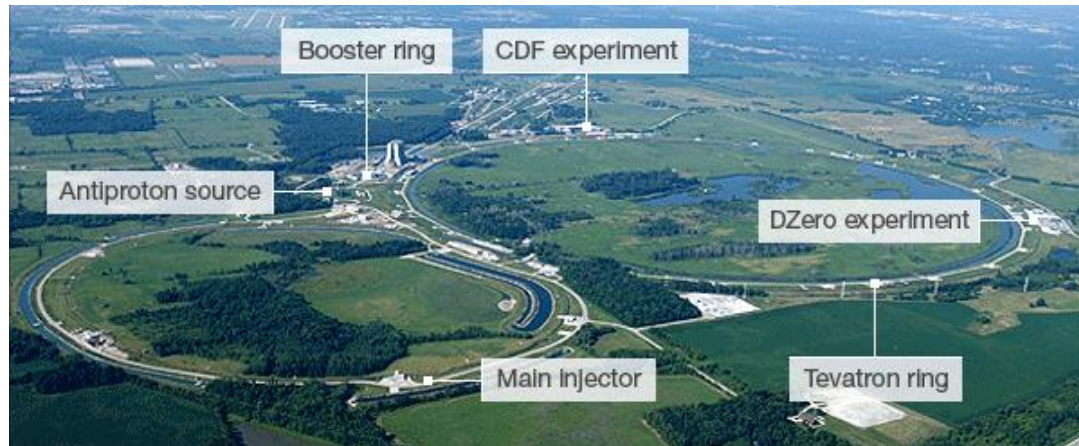
Antiproton

### 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.

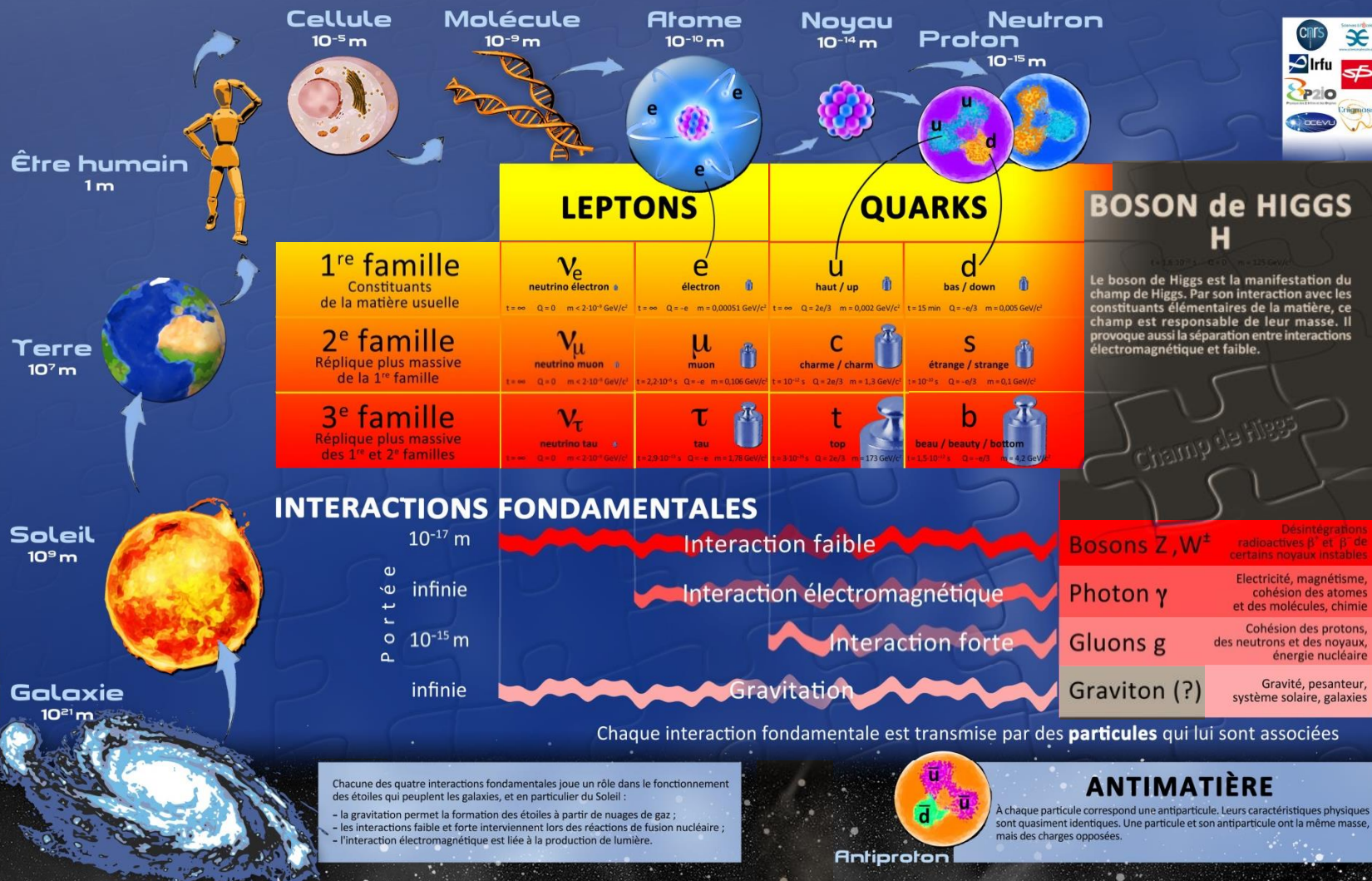
# Le quark top

- 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



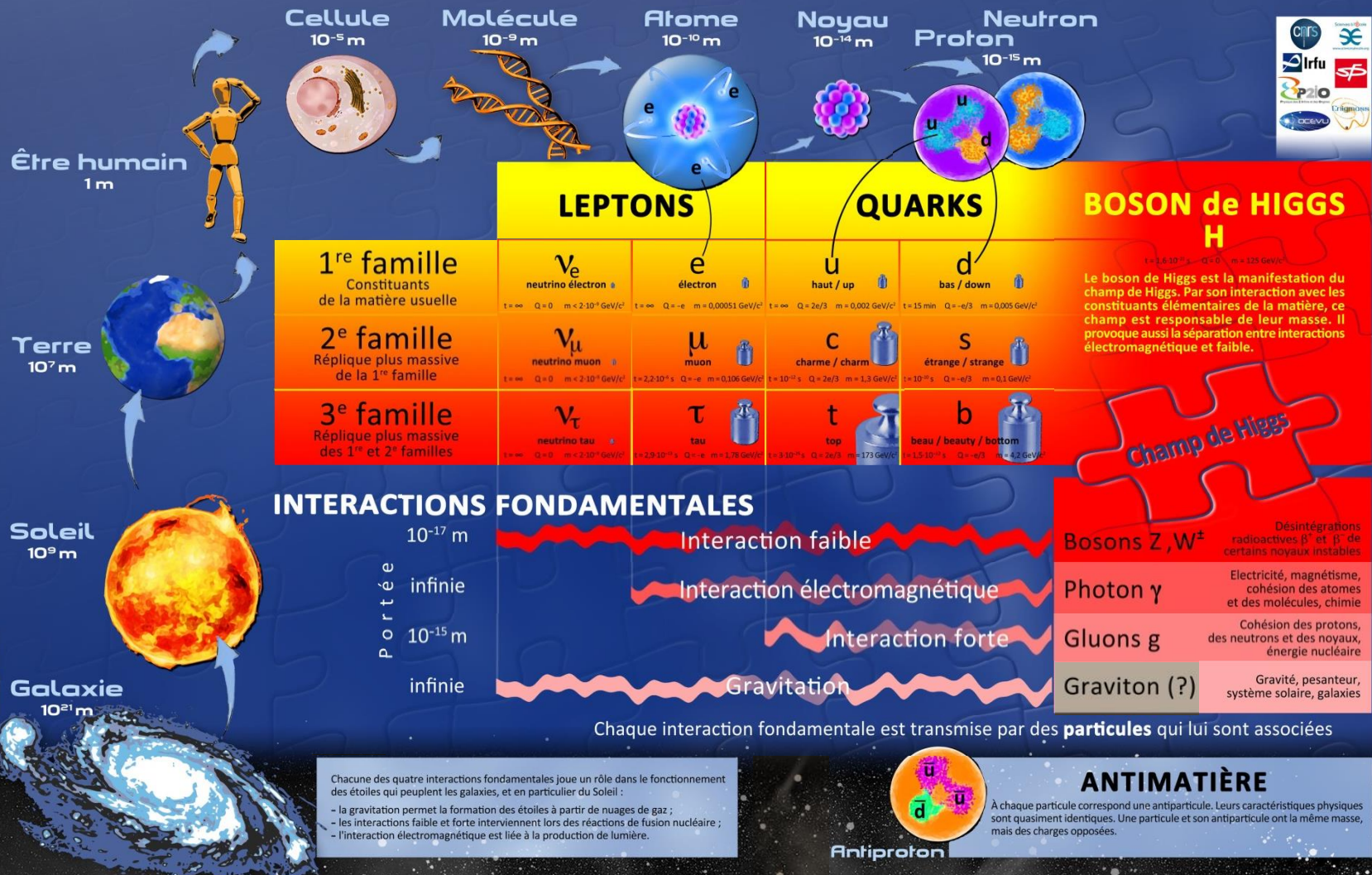
# 2000 : découverte du neutrino tau

## Composants élémentaires de la matière

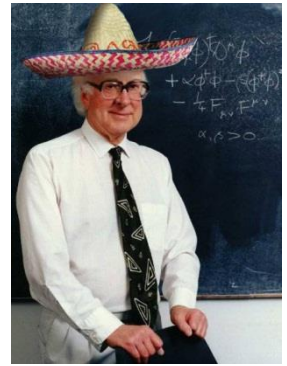


# 2012 : découverte du boson de Higgs

## Composants élémentaires de la matière



# 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 innovation

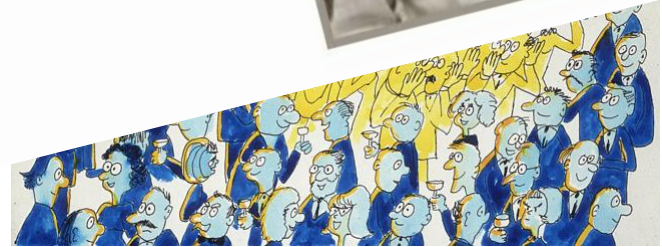
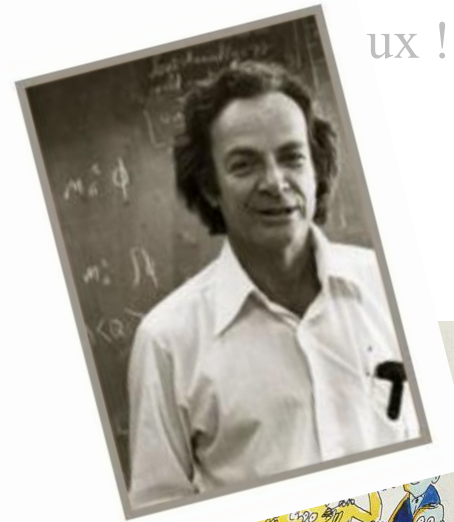
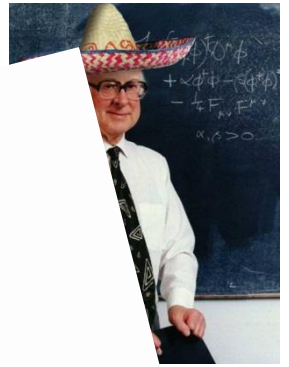
► Do you want to be famous?  
► Do you want to be a king?  
► Do you want more than the nobel prize?  
- Then solve the mass Problem -  
R.P. Feynman

- P  
pl

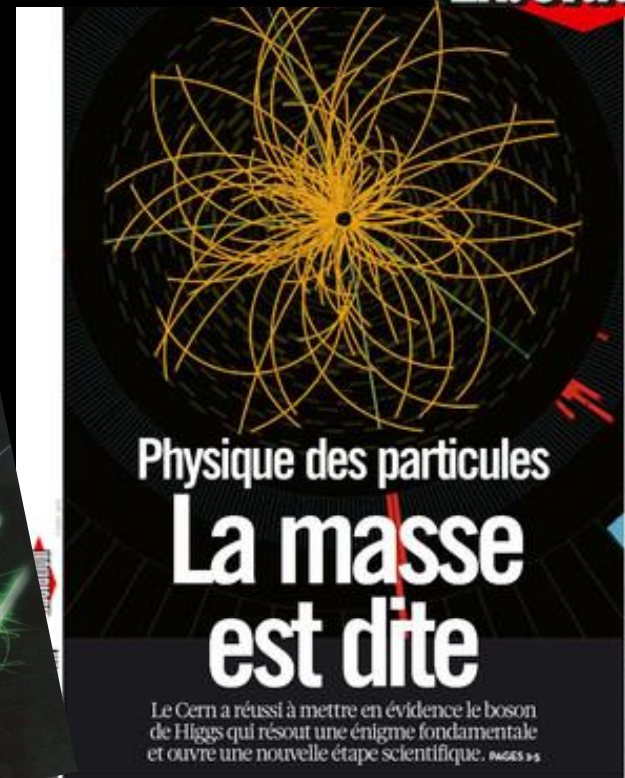
- Pet  
il de  
→ L

- Problè

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



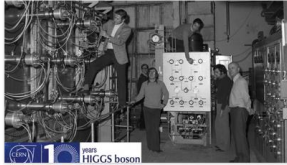
# 4 Juillet 2012 au CERN





# 2012-2022

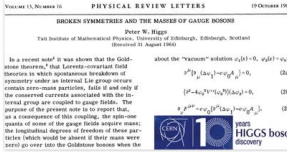
- [https://home.cern/fr/news?title=Higgs10&topic=All&type=All&audience=All&tid\\_3=&date\\_from=&date\\_to=](https://home.cern/fr/news?title=Higgs10&topic=All&type=All&audience=All&tid_3=&date_from=&date_to=)



## Higgs10 : le boson de Higgs dans les années 1970

À mesure que les différentes avancées des années 1970 venaient consolider le Modèle standard, le champ de Brout-Englert-Higgs et le boson associé sont apparus comme le modèle théorique le plus prometteur pour expliquer l'origine de la masse

News | Physics | 10 mai, 2022



## Higgs10 : Un boson est né

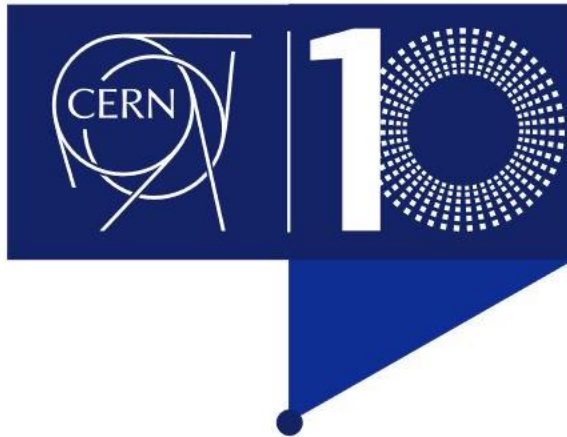
News | Physics | 28 avril, 2022



## Higgs10 - Inscrivez la date dans vos agendas !

Le 4 juillet 2012, les expériences ATLAS et CMS ont annoncé la découverte du boson de Higgs. Dix ans plus tard, nous célébrons cette découverte et souhaitons un brillant avenir à la recherche sur le boson de Higgs

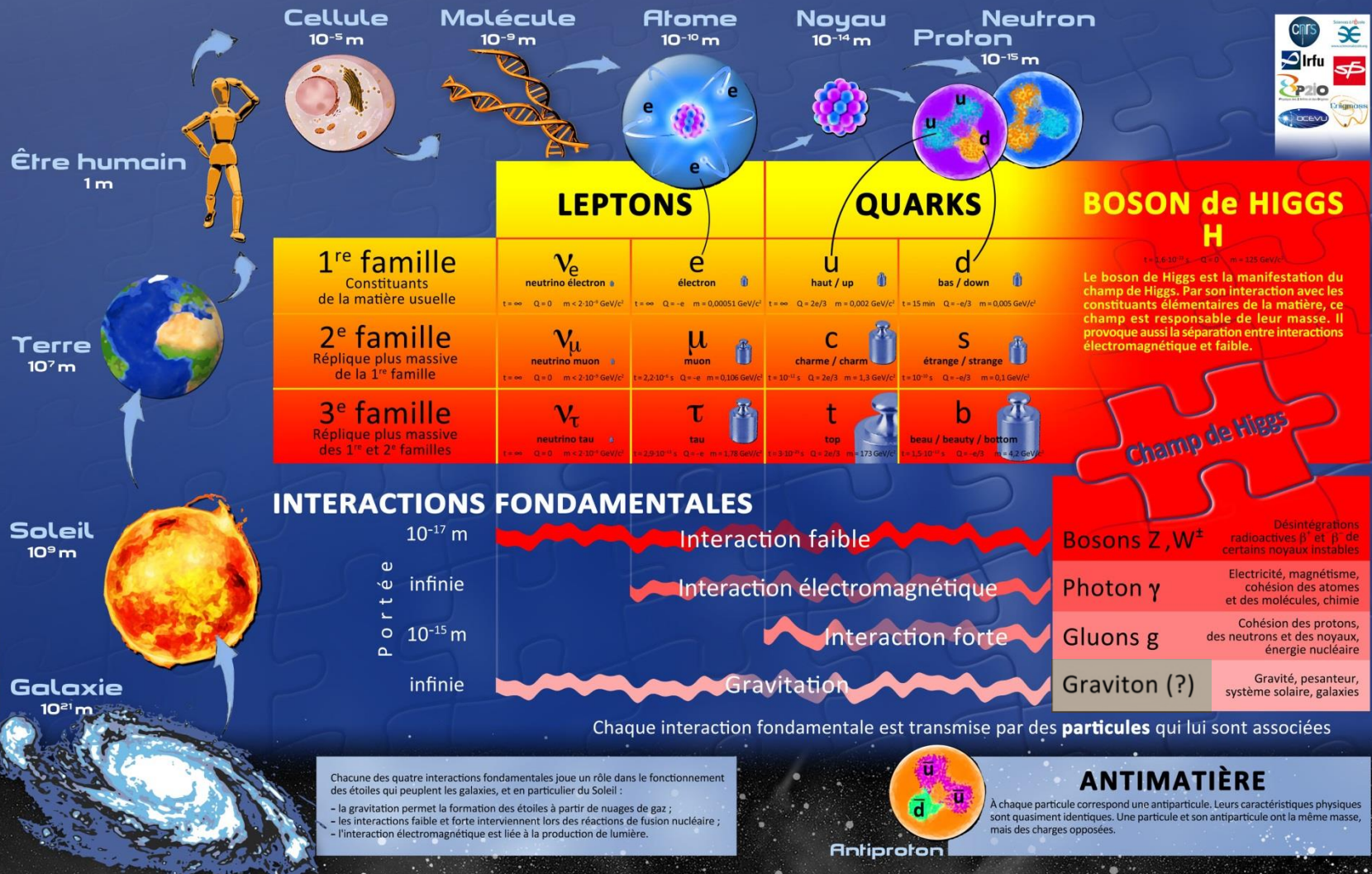
News | AT CERN | 06 avril, 2022



years  
**HIGGS** boson  
discovery

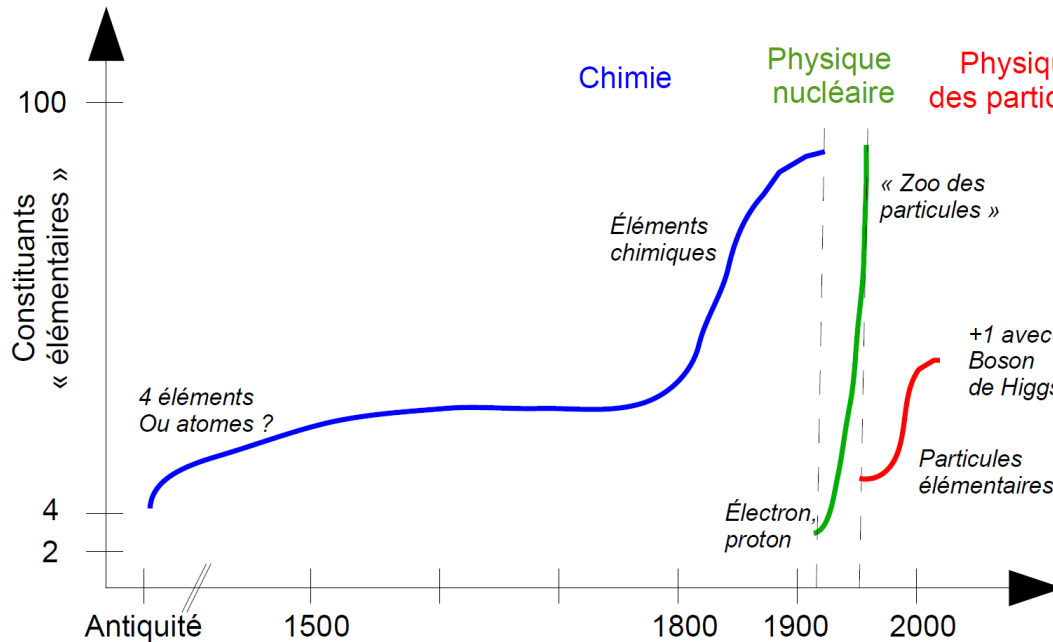
# Situation actuelle (mai 2022)

## Composants élémentaires de la matière



# En résumé

- Les **particules élémentaires** sont des **découvertes récentes** : 1897-2012
- **Série en cours** grâce au **collisionneur LHC du CERN**



© Sébastien Descotes-Genon

