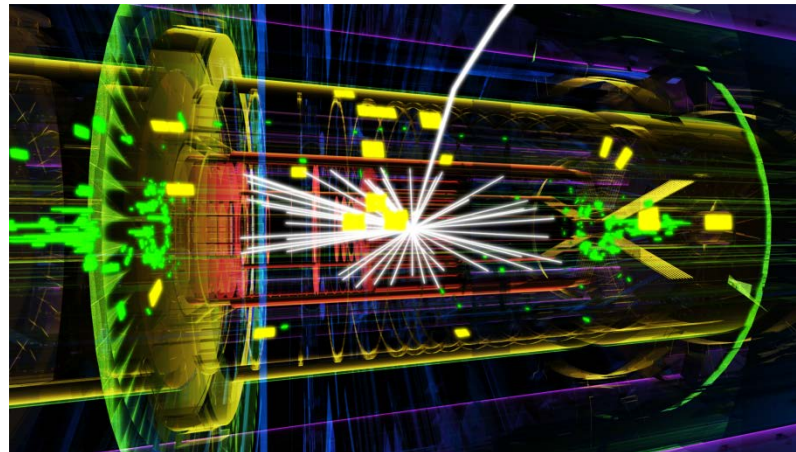


Une Brève Histoire des Particules : de l'Atomisme au LHC en passant par ACO

2016

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3)



[@LALOrsay](https://twitter.com/LALOrsay)

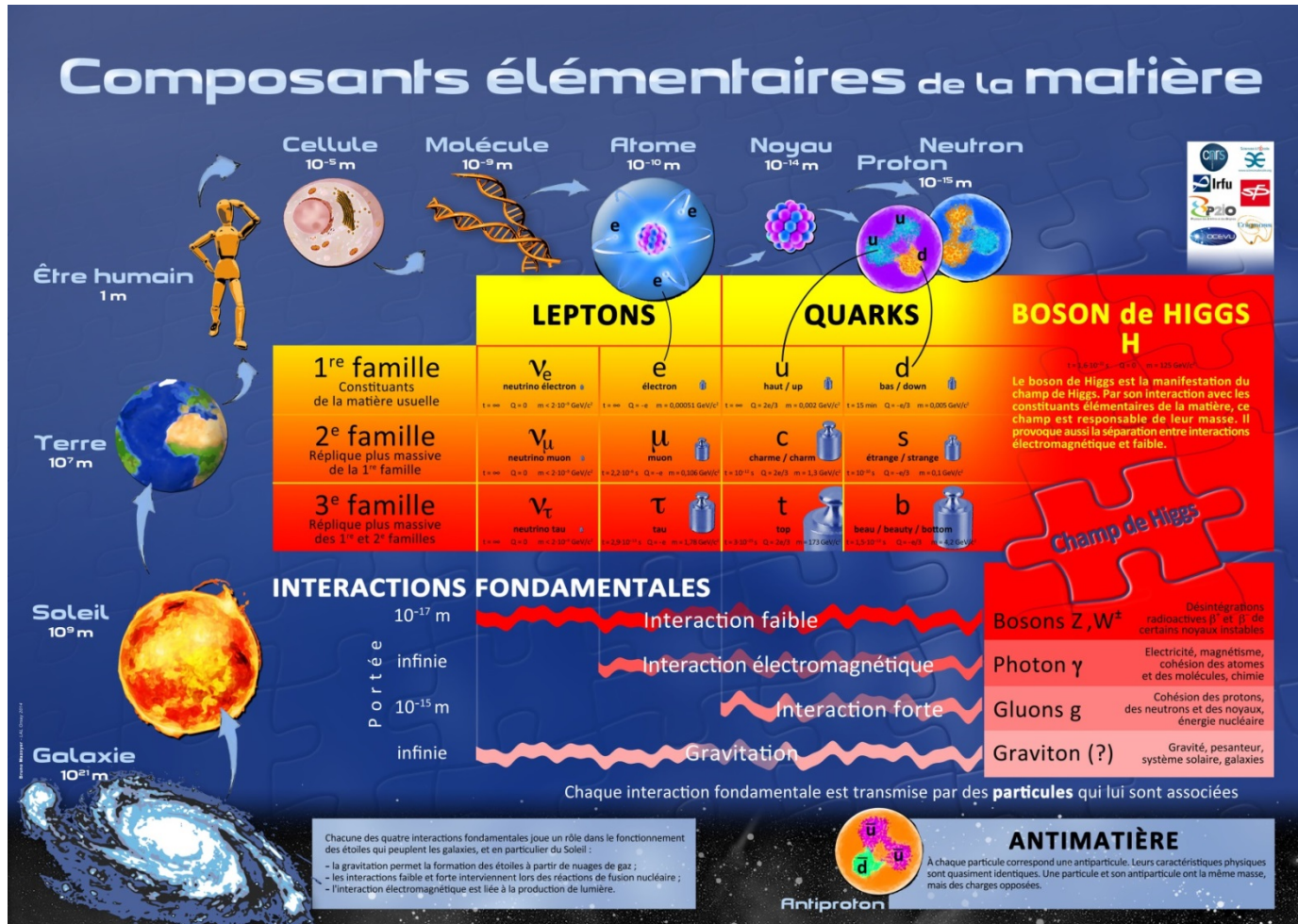


Comprendre le monde,
construire l'avenir®

Le Modèle Standard

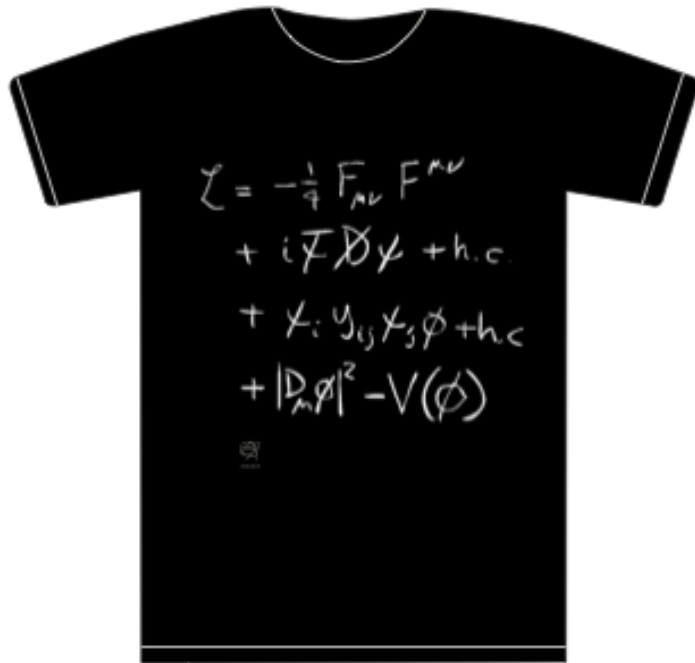
Bilan

- Affiche des composants élémentaires de la matière (mise à jour 2014-2015)
- Ressource pédagogique pour le secondaire et le supérieur
- Site internet associé : <http://www.particuleselementaires.fr> (en construction ...)



Vu sous l'angle des Mathématiques ...

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

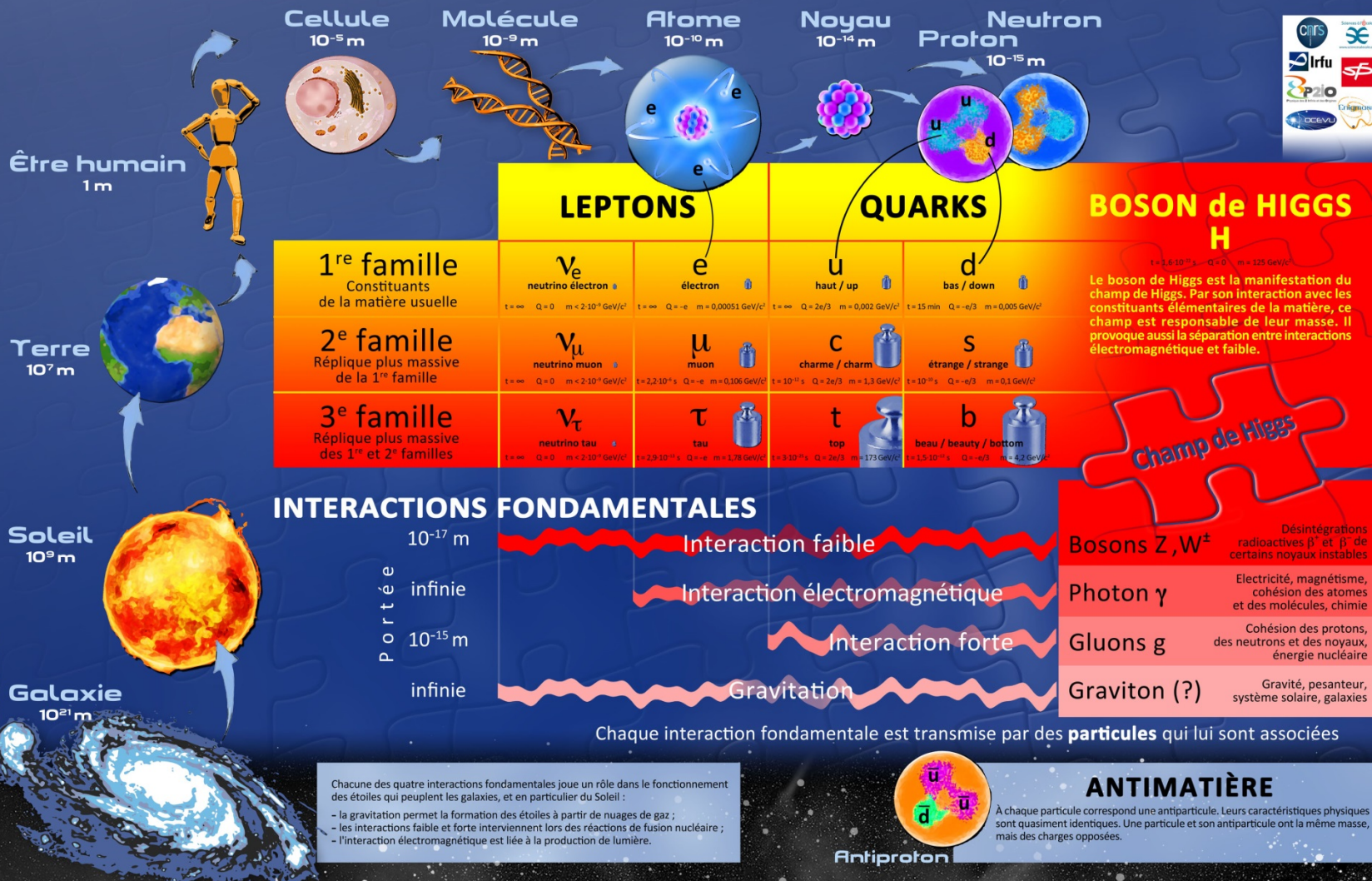


$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2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

**La Science ne se fait
pas en un jour ...**

Retour vers le futur ...


Composants élémentaires de la matière




Situation au tout début du XX^e siècle

Composants élémentaires de la matière

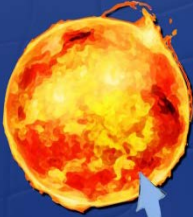
Être humain
1 m



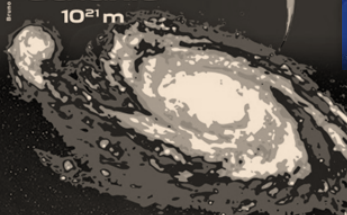
Terre
10⁷ m




Soleil
10⁹ m




Galaxie
10²¹ m



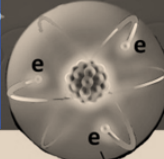
Cellule 10⁻⁵ m




Molécule 10⁻⁹ m



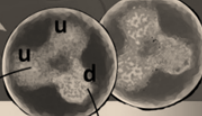
Atome 10⁻¹⁰ m




Noyau 10⁻¹⁴ m



Neutron Proton 10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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 style="text-align: center; font-style: italic;">Champ de Higgs</p>
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

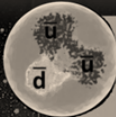
Portée	Interaction	Particule associée
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

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

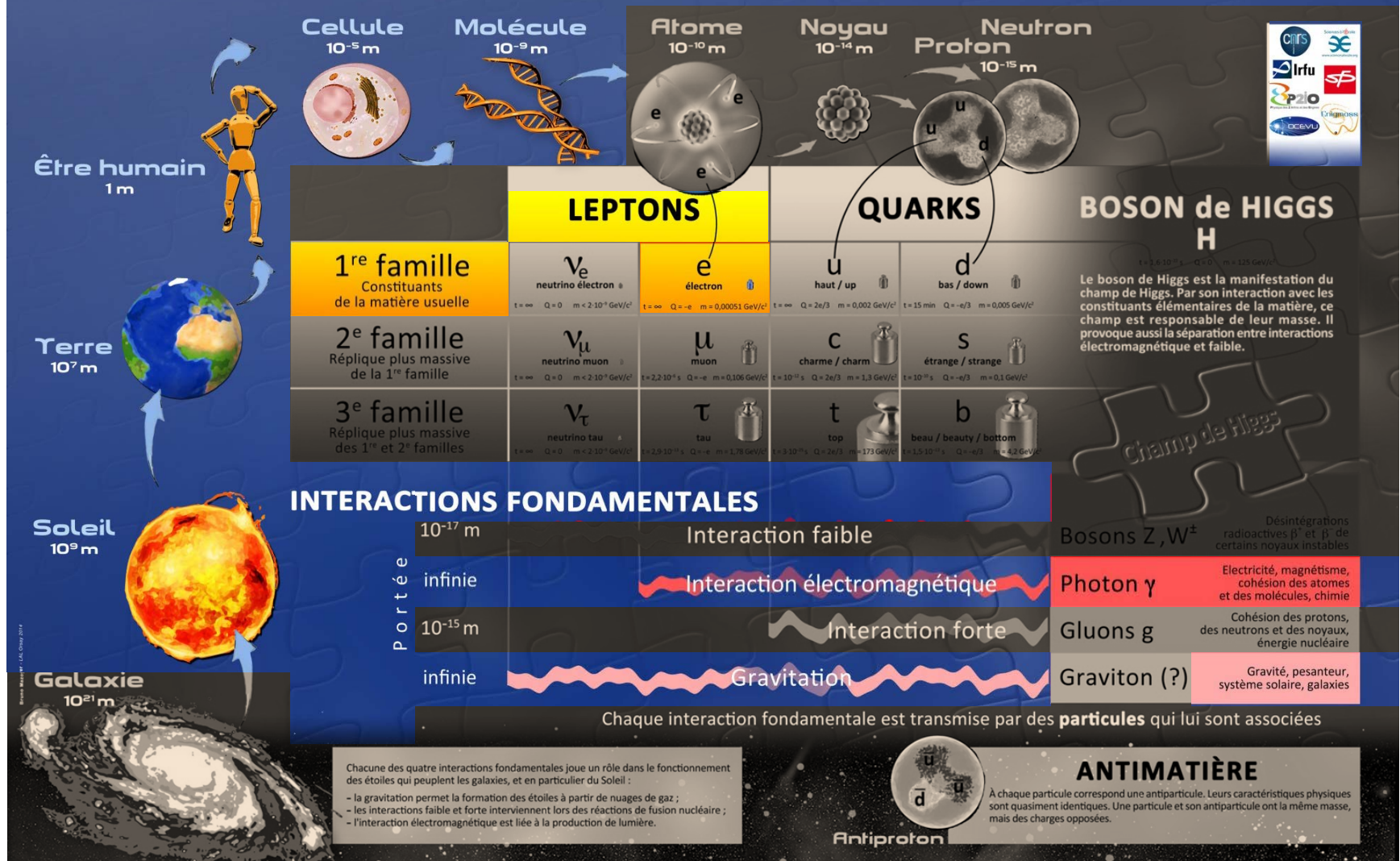


À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton

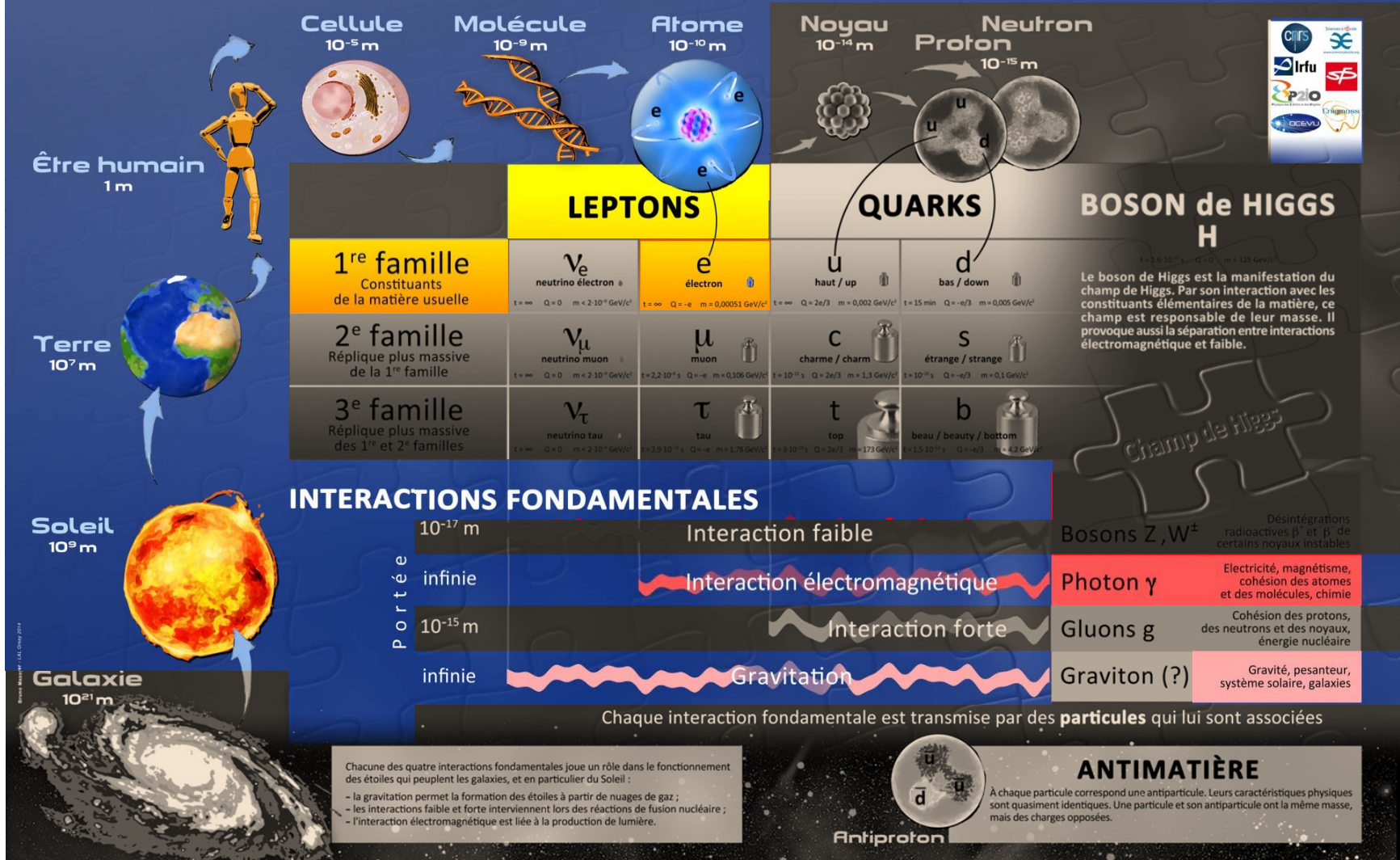
1897 : découverte de l'électron

Composants élémentaires de la matière



1905 : preuve de la réalité des atomes


Composants élémentaires de la matière




1909 : découverte du noyau atomique

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



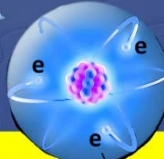
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



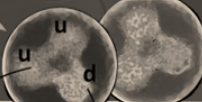
Atome
10⁻¹⁰ m




Noyau
10⁻¹⁴ m



Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Bosons
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

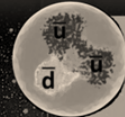
Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

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

Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables

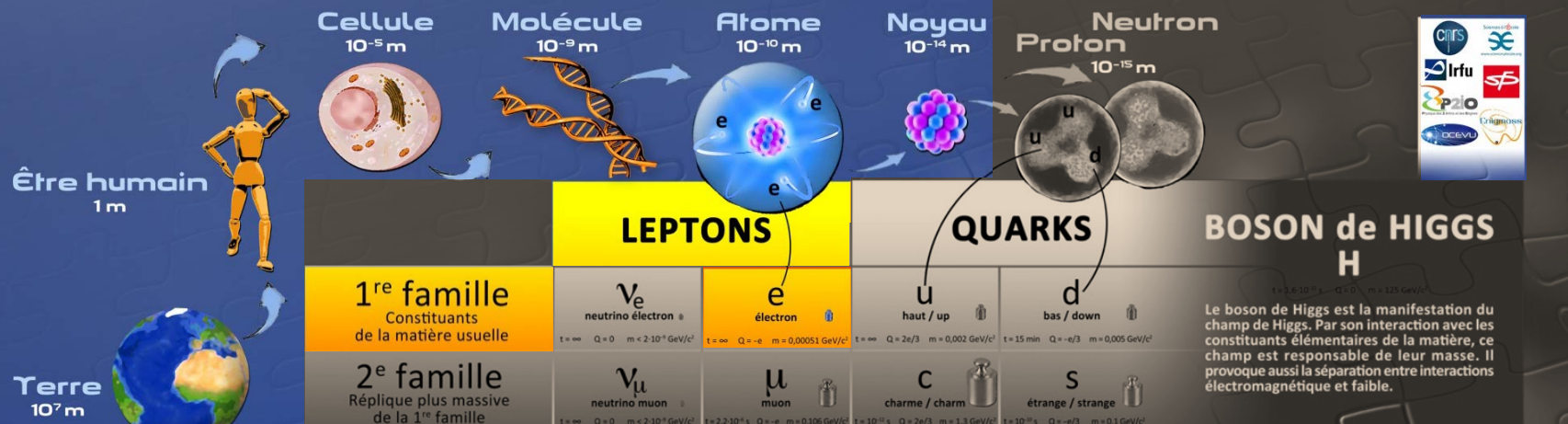
Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie

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

Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

1915 : relativité générale

Composants élémentaires de la matière



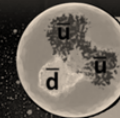
Relativité générale (Einstein 1915) : généralisation de la Loi de la Gravitation Universelle (Newton, 1687)

Portée	Interaction	Particule	Effets
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]	radioactifs β et β^+ de certains noyaux instables
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
infinie	Gravitation	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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

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

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



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.


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

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



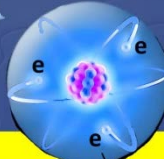
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



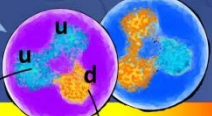
Atome
10⁻¹⁰ m





Noyau
10⁻¹⁴ m



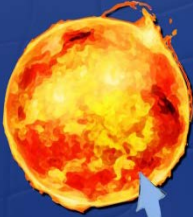
Proton
Neutron
10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Soleil
10⁹ m



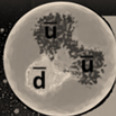
INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie		Interaction électromagnétique	Photon γ
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.



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.


Années 1920 : découverte des (autres) galaxies

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m




Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



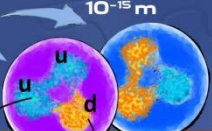
Atome
10⁻¹⁰ m





Noyau
10⁻¹⁴ m



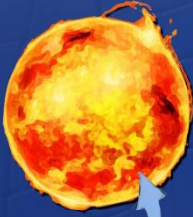
Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m



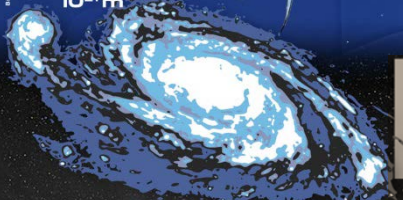


	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	<p>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de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

Soleil
10⁹ m



Galaxie
10²¹ m




		INTERACTIONS FONDAMENTALES		
Portée	10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible		Bosons Z, W [±]
	infinie	Interaction électromagnétique		Photon γ
	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


1932 : découverte de l'antimatière

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



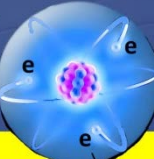
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



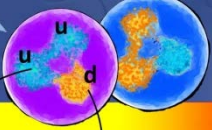
Atome
10⁻¹⁰ m





Noyau
10⁻¹⁴ m




Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m



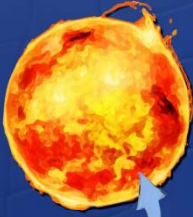


	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	<p>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de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

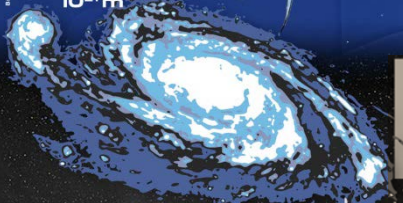
Terre
10⁷ m



Soleil
10⁹ m



Galaxie
10²¹ m




INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Bosons
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
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.



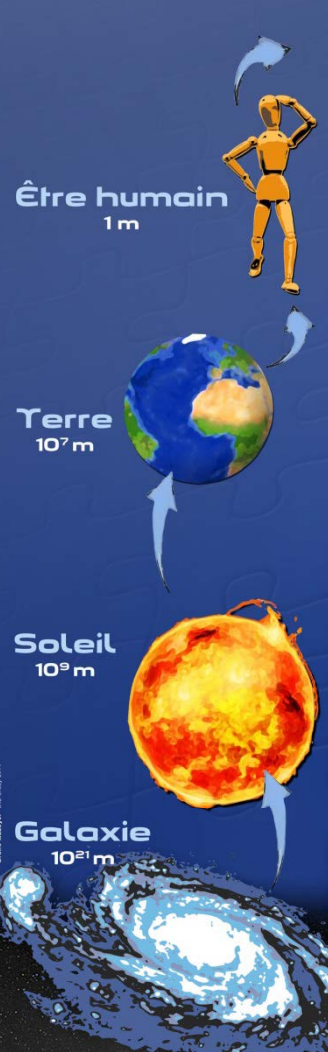
ANTIMATIÈRE

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

1936 : découverte du muon

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Bosons
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
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.

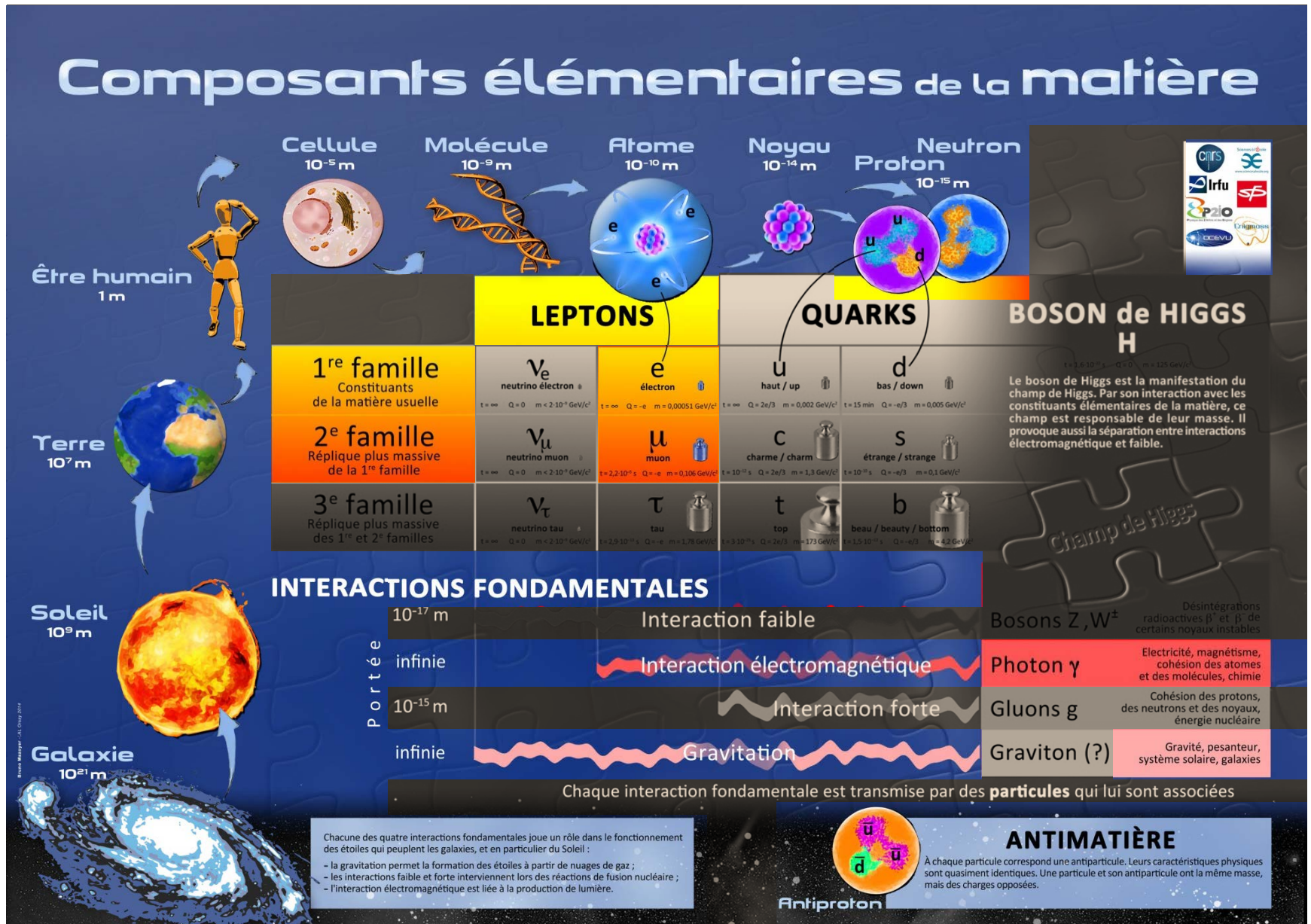


Antiproton

ANTIMATIÈRE

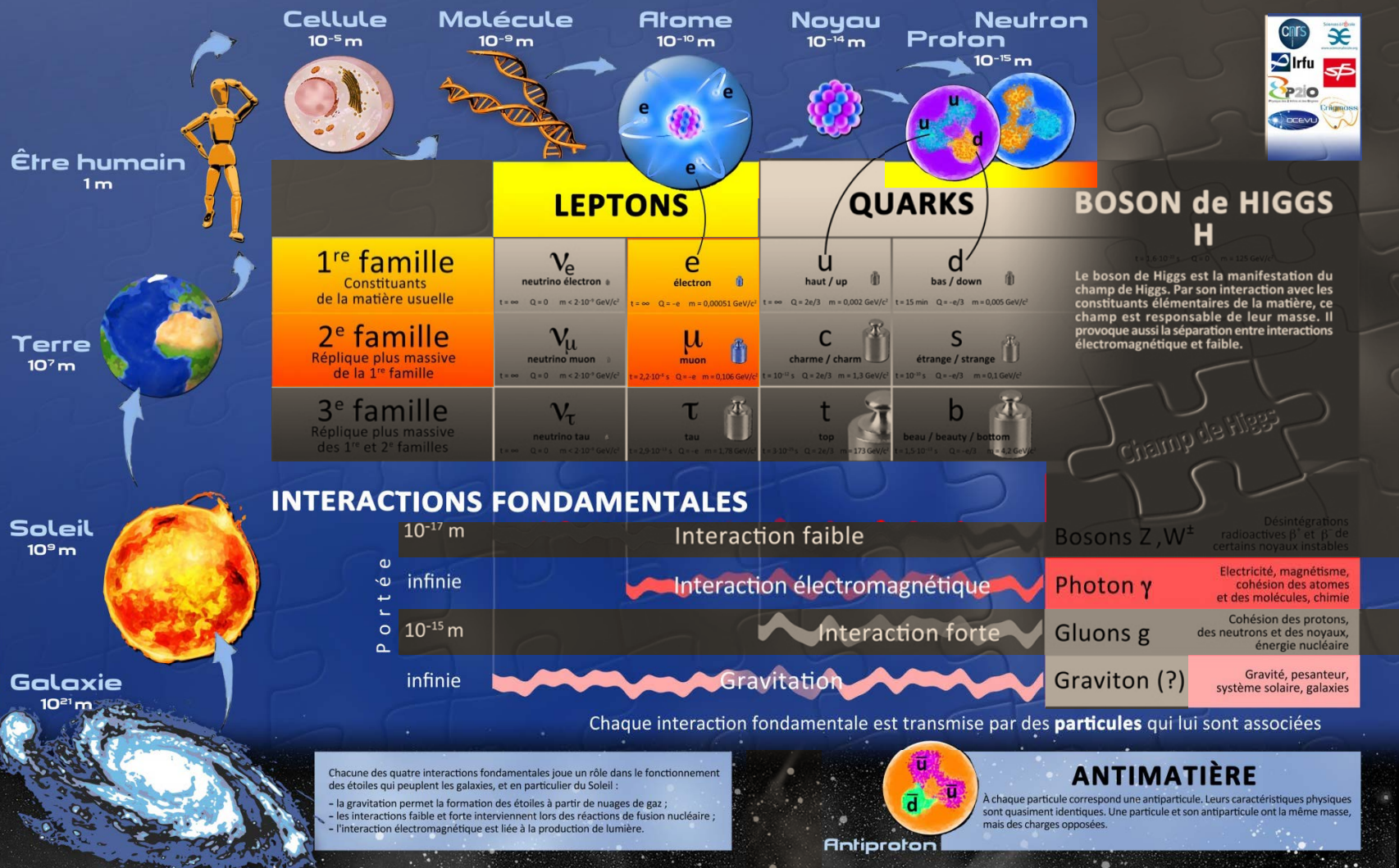
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Années 1930 : réactions nucléaires dans le Soleil



1948 : l'électrodynamique quantique


Composants élémentaires de la matière




~1950 : découverte des particules étranges

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



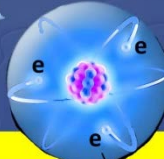
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



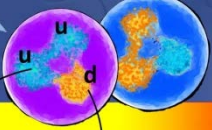
Atome
10⁻¹⁰ m




Noyau
10⁻¹⁴ m



Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

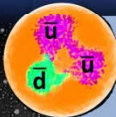
INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Particules associées
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons 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.



Antiproton

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.

Champ de Higgs

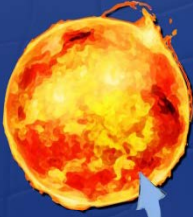
Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables

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


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

Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

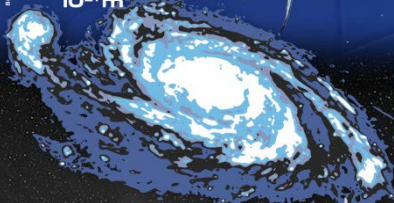
Soleil
10⁹ m



Terre
10⁷ m

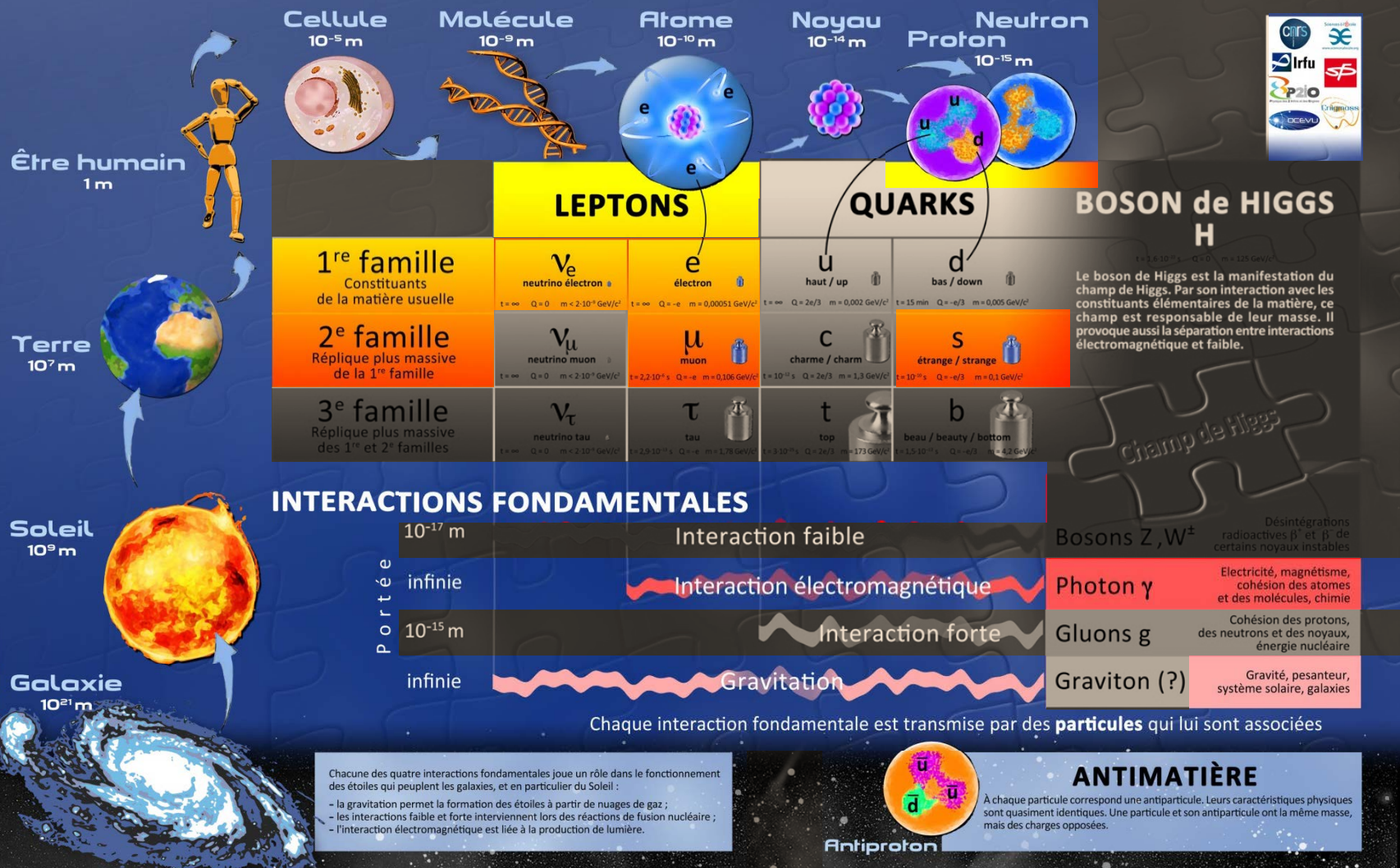


Galaxie
10²¹ m



1956 : découverte du neutrino électron


Composants élémentaires de la matière




1962 : découverte du neutrino muon

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



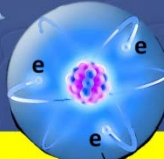
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



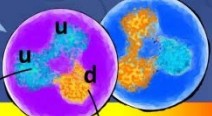
Atome
10⁻¹⁰ m




Noyau
10⁻¹⁴ m



Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron <small>t = ∞ Q = 0 m = 2 · 10⁻³⁶ GeV/c²</small>	e électron <small>t = ∞ Q = -e m = 0,00051 GeV/c²</small>	u haut / up <small>t = ∞ Q = 2e/3 m = 0,002 GeV/c²</small>	d bas / down <small>t = 15 min Q = -e/3 m = 0,005 GeV/c²</small>	<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 style="text-align: center;"><i>Champ de Higgs</i></p>
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon <small>t = ∞ Q = 0 m = 2 · 10⁻³⁶ GeV/c²</small>	μ muon <small>t = 2,2 · 10⁻⁶ s Q = -e m = 0,106 GeV/c²</small>	c charme / charm <small>t = 10⁻¹² s Q = 2e/3 m = 1,3 GeV/c²</small>	s étrange / strange <small>t = 10⁻¹¹ s Q = -e/3 m = 0,1 GeV/c²</small>	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau <small>t = ∞ Q = 0 m = 2 · 10⁻³⁶ GeV/c²</small>	τ tau <small>t = 2,5 · 10⁻¹³ s Q = -e m = 1,78 GeV/c²</small>	t top <small>t = 3 · 10⁻²⁵ s Q = 2e/3 m = 173 GeV/c²</small>	b beau / beauty / bottom <small>t = 1,5 · 10⁻¹² s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c²</small>	

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Bosons
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

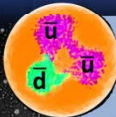
Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

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.

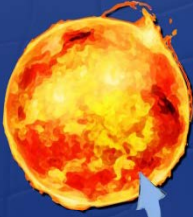
ANTIMATIÈRE

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.

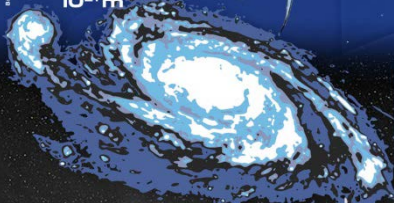


Antiproton

Soleil
10⁹ m

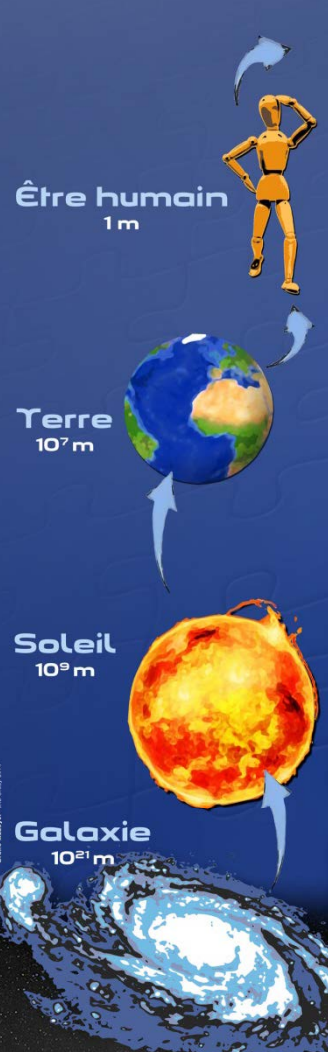


Galaxie
10²¹ m



1968 : découverte de la structure du proton

Composants élémentaires de la matière



	Cellule 10 ⁻⁵ m	Molécule 10 ⁻⁹ m	Atome 10 ⁻¹⁰ m	Noyau 10 ⁻¹⁴ m	Neutron 10 ⁻¹⁵ m	Proton 10 ⁻¹⁵ m
			LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down		
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange		
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ 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.

Champ de Higgs

Bosons Z, W[±]
Désintégrations radioactives β^+ et β^- 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, pesanteur, système solaire, galaxies

INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
	infinie	Interaction électromagnétique
	10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
	infinie	Gravitation

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

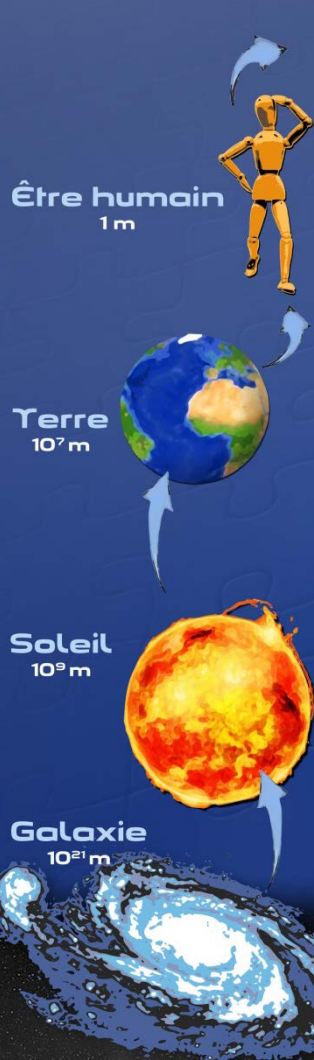
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Antiproton



1974 : découverte du 4^{ème} quark – le charme

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom

BOSON de HIGGS H

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

INTERACTIONS FONDAMENTALES

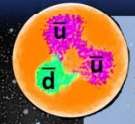
Portée	Interaction
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

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

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

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

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



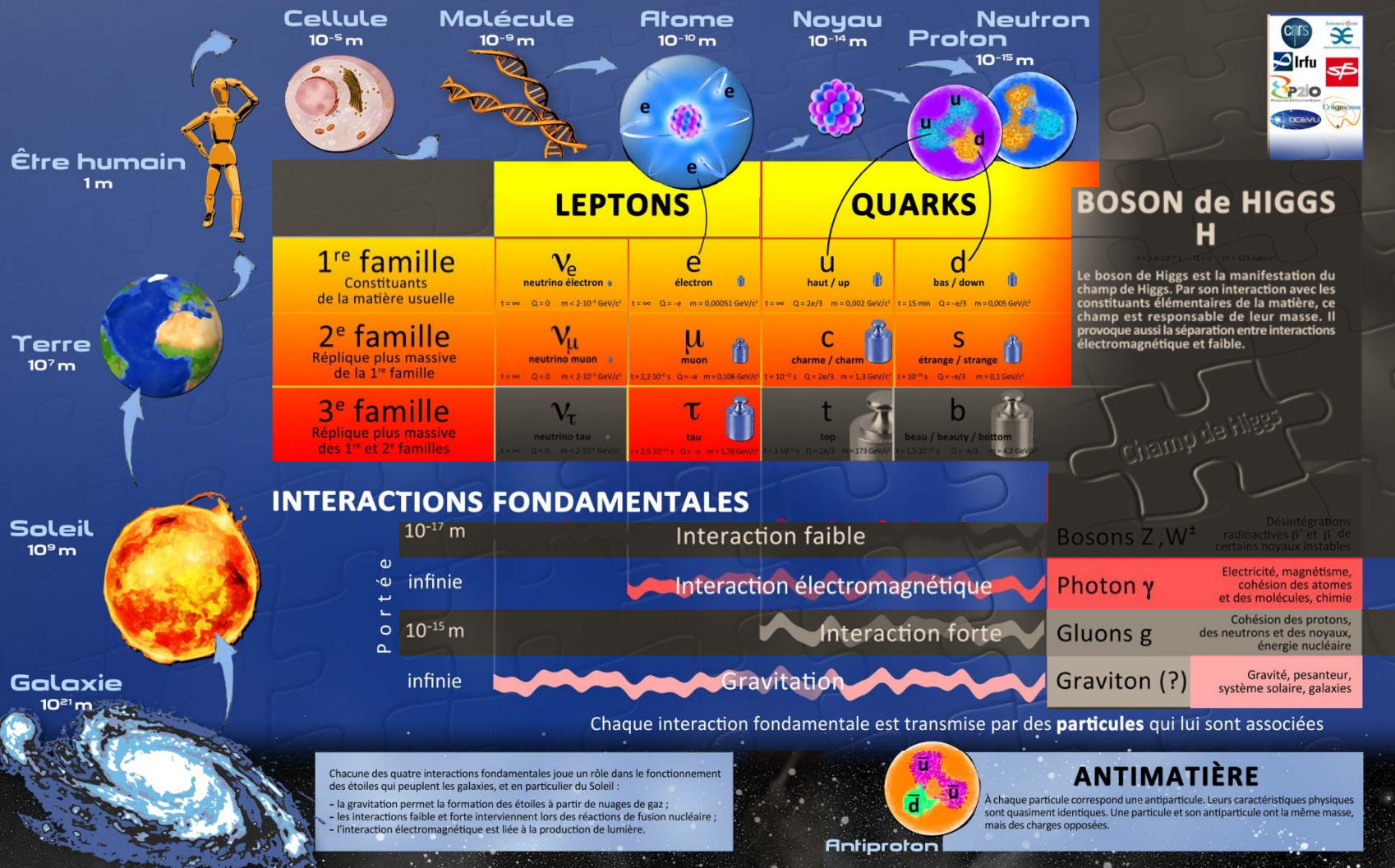
Antiproton

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.

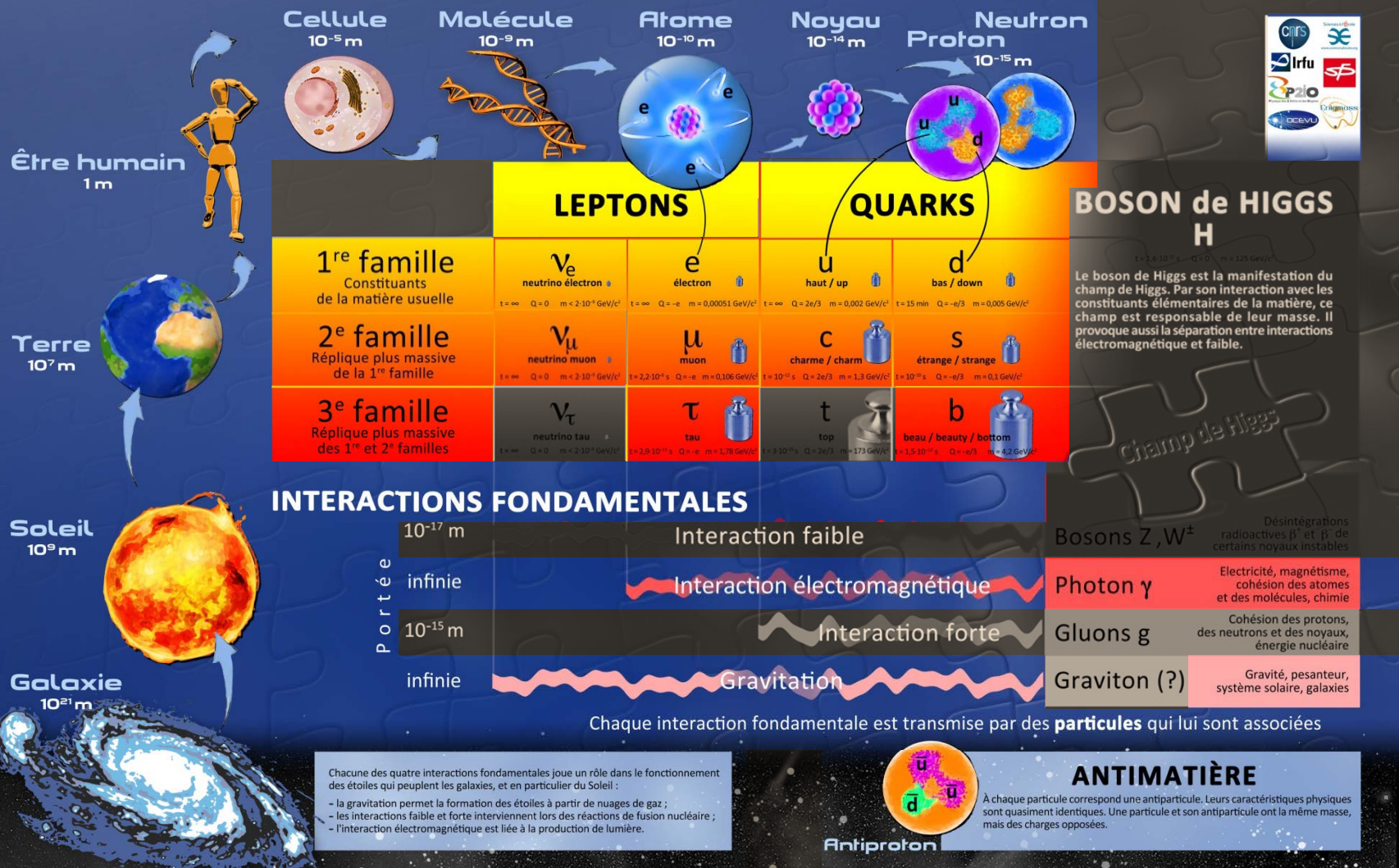
1975-1976 : découverte du lepton tau

Composants élémentaires de la matière



1977 : découverte du 5^{ème} quark – le b


Composants élémentaires de la matière




1979 : découverte des gluons

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m




Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



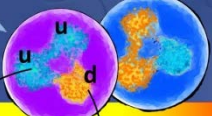
Atome
10⁻¹⁰ m




Noyau
10⁻¹⁴ m



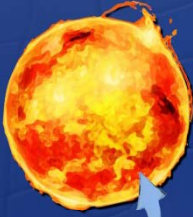
Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m



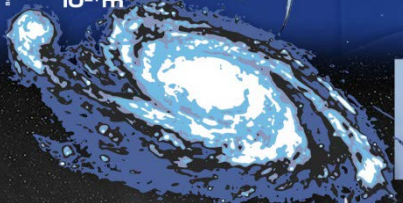


	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	<p>Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de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

Soleil
10⁹ m



Galaxie
10²¹ m



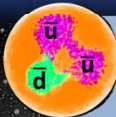
INTERACTIONS FONDAMENTALES

Portée	Interaction	Bosons
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Bosons Z, W [±]
infinie	Interaction électromagnétique	Photon γ
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

1983 : découverte des bosons W et Z

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom

BOSON de HIGGS H

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



INTERACTIONS FONDAMENTALES

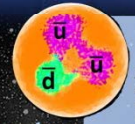
Portée	Interaction
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

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

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

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

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



ANTIMATIÈRE

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

Antiproton

1995 : découverte du 6^{ème} quark – le top

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS	
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ 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	
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

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

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

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

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



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.


2000 : découverte du neutrino tau

Composants élémentaires de la matière


Être humain
1 m



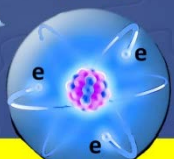
Cellule
10⁻⁵ m




Molécule
10⁻⁹ m



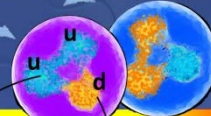
Atome
10⁻¹⁰ m





Noyau
10⁻¹⁴ m




Neutron
Proton
10⁻¹⁵ m





	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_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^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

Soleil
10⁹ m



INTERACTIONS FONDAMENTALES

10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W[±]
Désintégrations radioactives β^+ et β^- 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, 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.



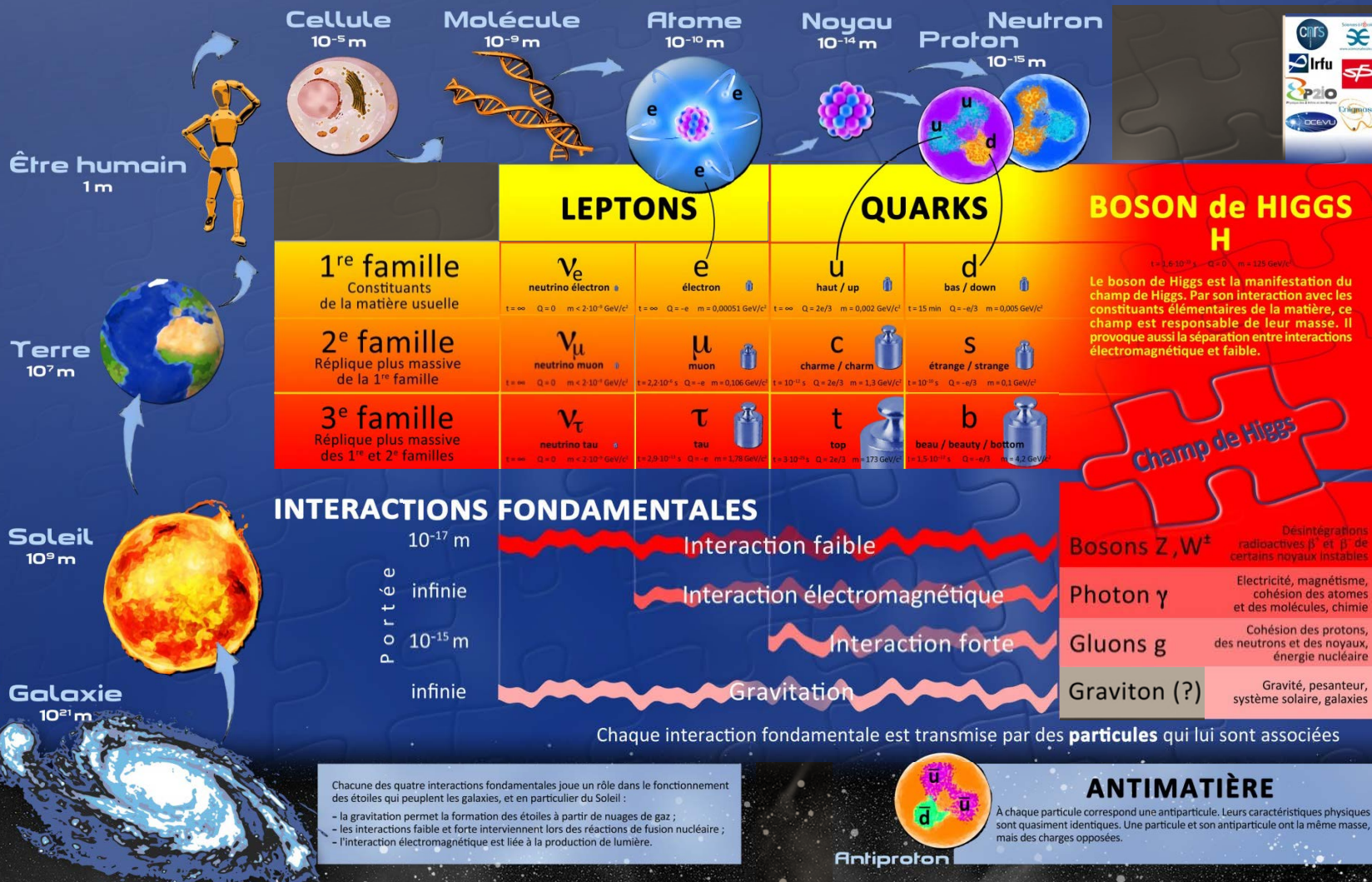
ANTIMATIÈRE

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

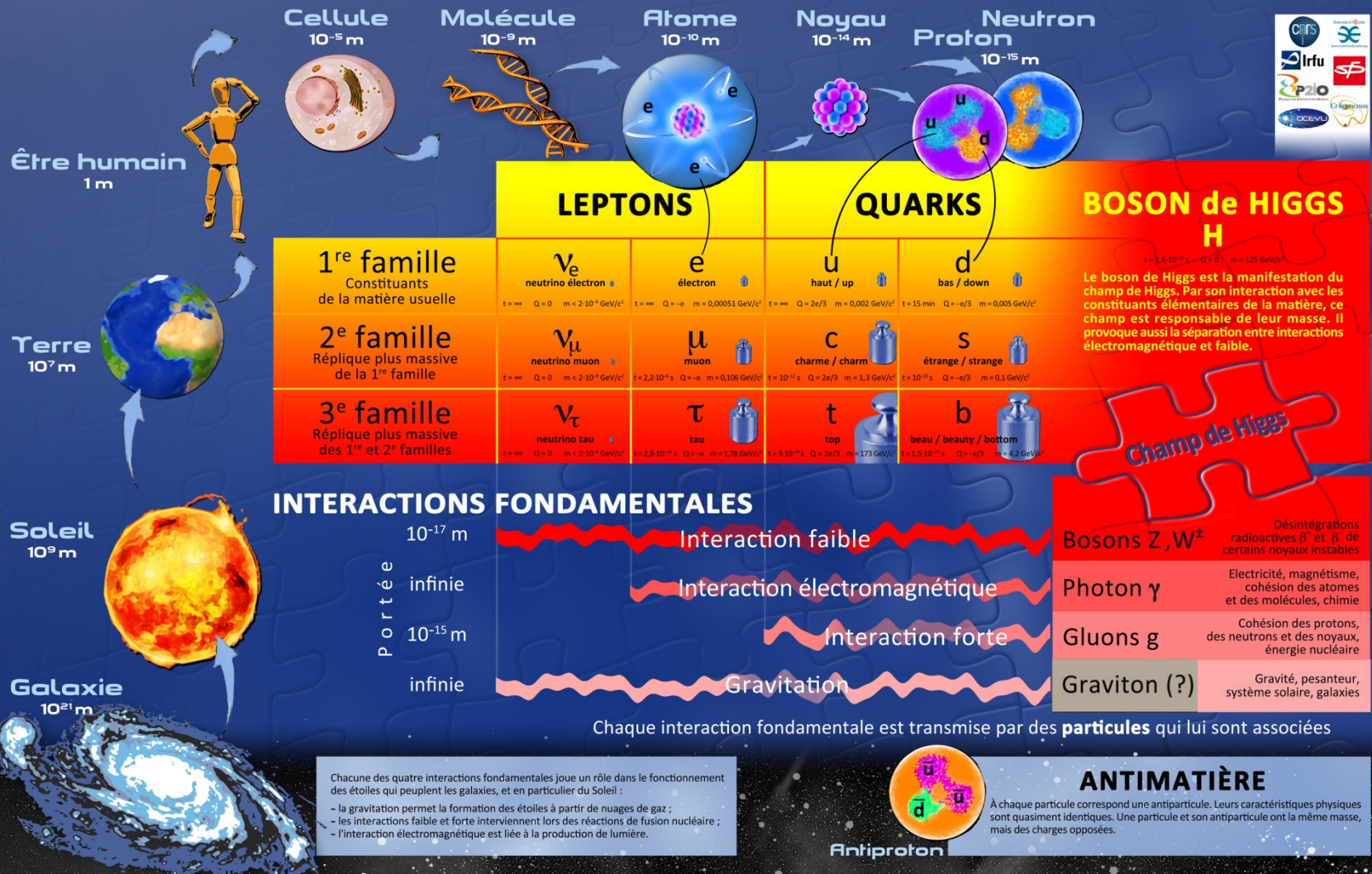
2012 : découverte du boson de Higgs

Composants élémentaires de la matière



La situation en 2016

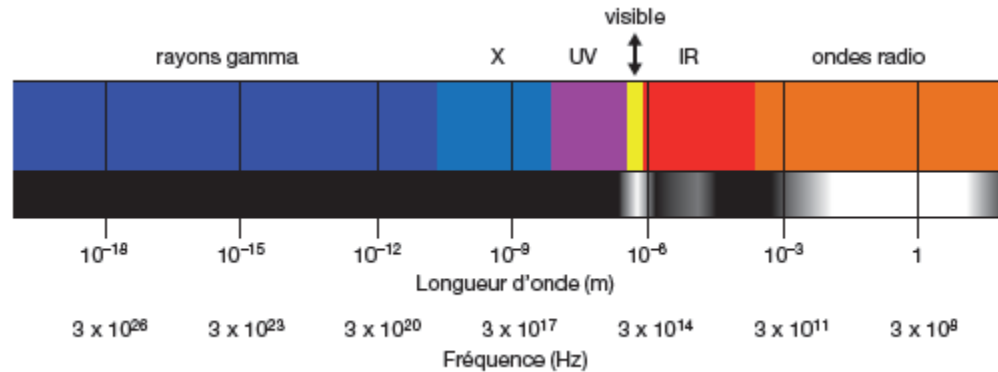
Composants élémentaires de la matière



Accélérateurs, collisionneurs & détecteurs

Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie
→ Exemple des ondes électromagnétiques : énergie $\propto 1 / (\text{longueur d'onde})$



- La plupart des particules sont instables \Rightarrow elles n'existent pas dans la Nature
→ Il faut les produire artificiellement
→ En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité
→ Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée
→ Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

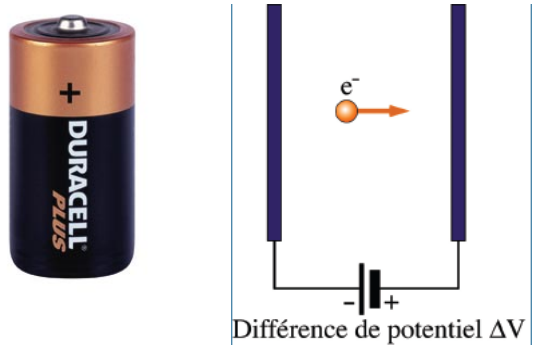
• Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

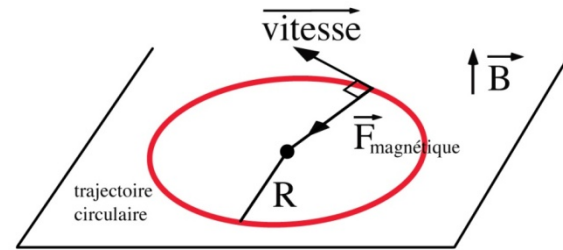
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

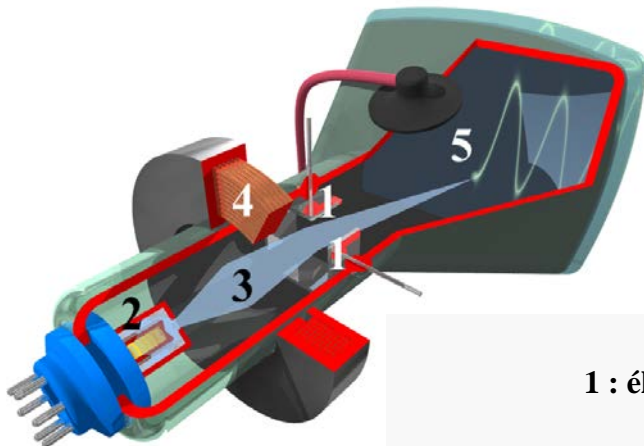
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



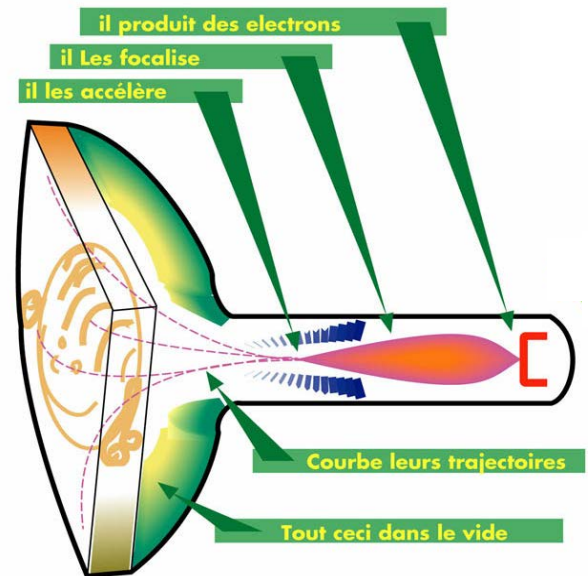
- On les pilote avec des champs magnétiques

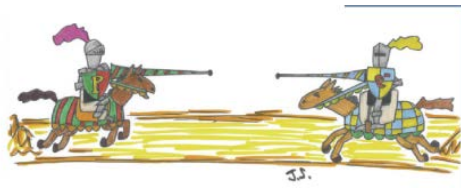


→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

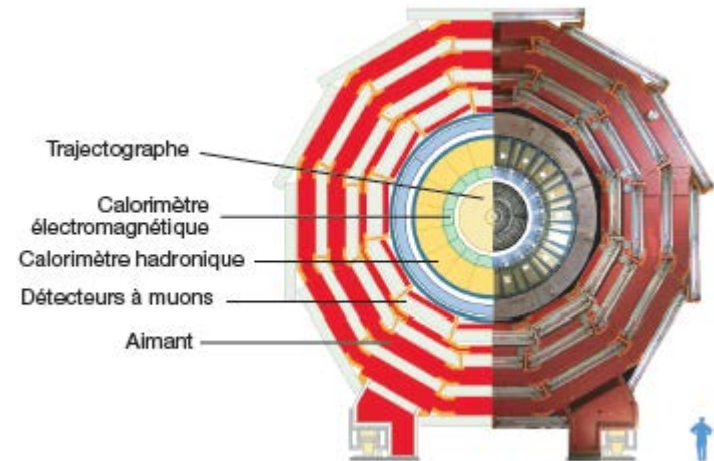
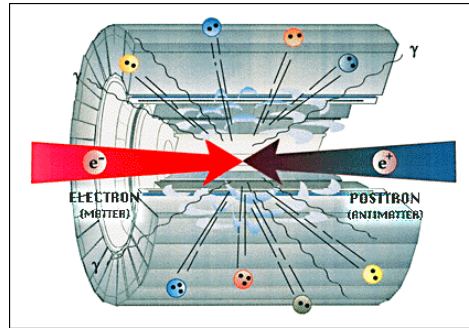
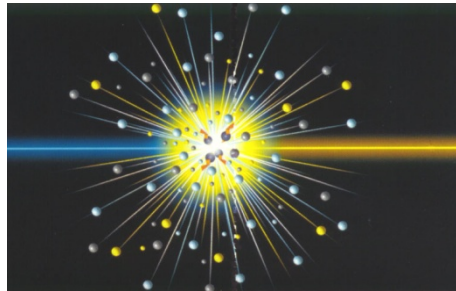
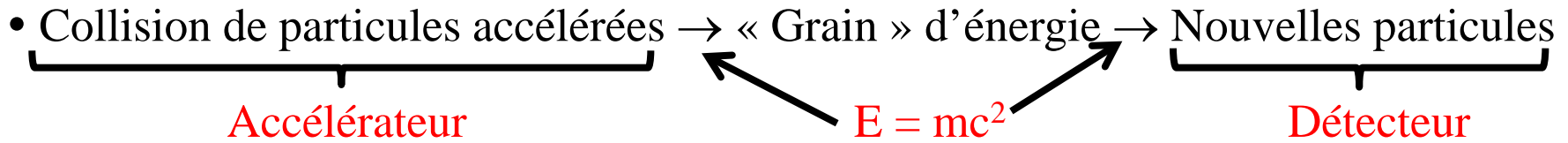
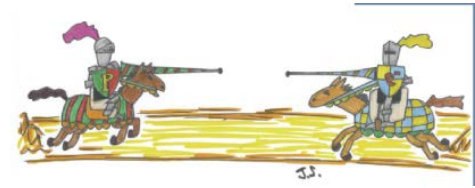


Tube d'oscilloscope
1 : électrodes déviant le faisceau
2 : canon à électrons
3 : faisceaux d'électrons
4 : bobine pour faire converger le faisceau
5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

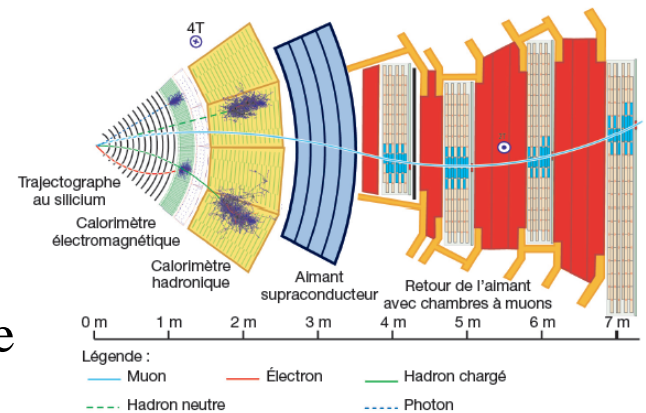




Les collisionneurs



- **Accélération dans des sections droites**
- **Collisions dans des anneaux circulaires**
 - Taille de la machine « réduite »
 - **Particules produisent des collisions à chaque tour**
 - Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible
- **Précision d'horlogerie** au-milieu d'une grosse machine
 - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
 - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)



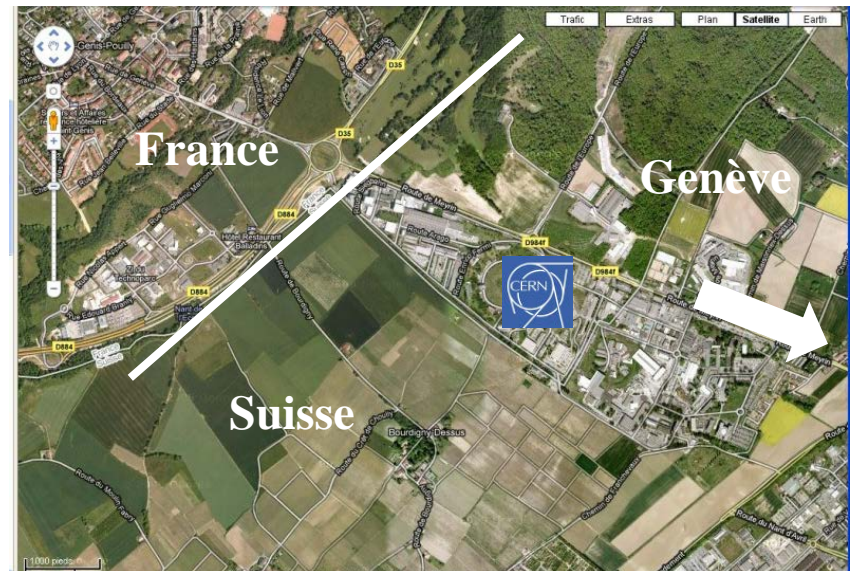
Intermède gourmand ...



Le collisionneur LHC au CERN

Le CERN

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde :**
 - ~ 2500 personnes y sont employées
 - ~ 10000 scientifiques visiteurs chaque année
 - ~ 1000 stagiaires
- Créé le 29 septembre 1954
 - France : un des douze états fondateurs
- 21 états membres
 - + pays « observateurs »
ou « participants »
- Le CERN est situé près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse
- **Le web a été inventé au CERN au début des années 1990 !**



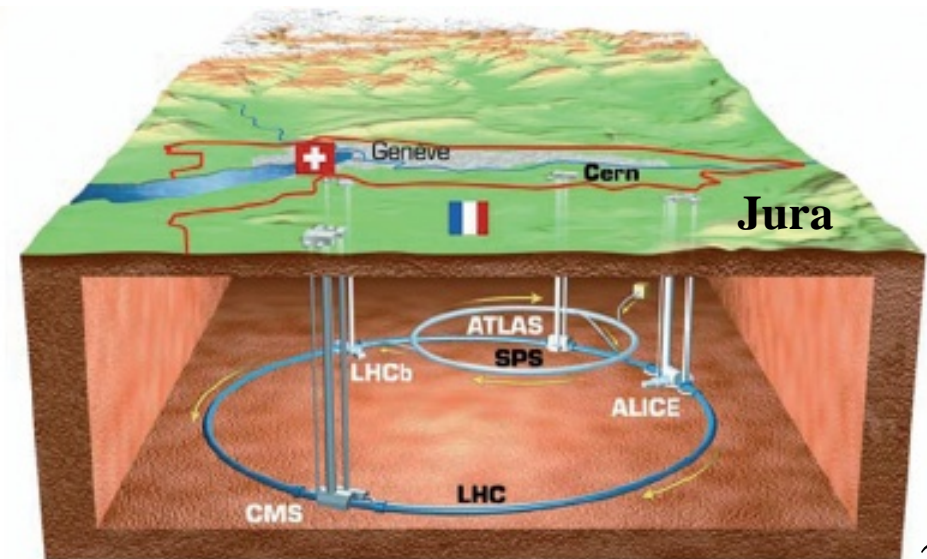


Le LHC

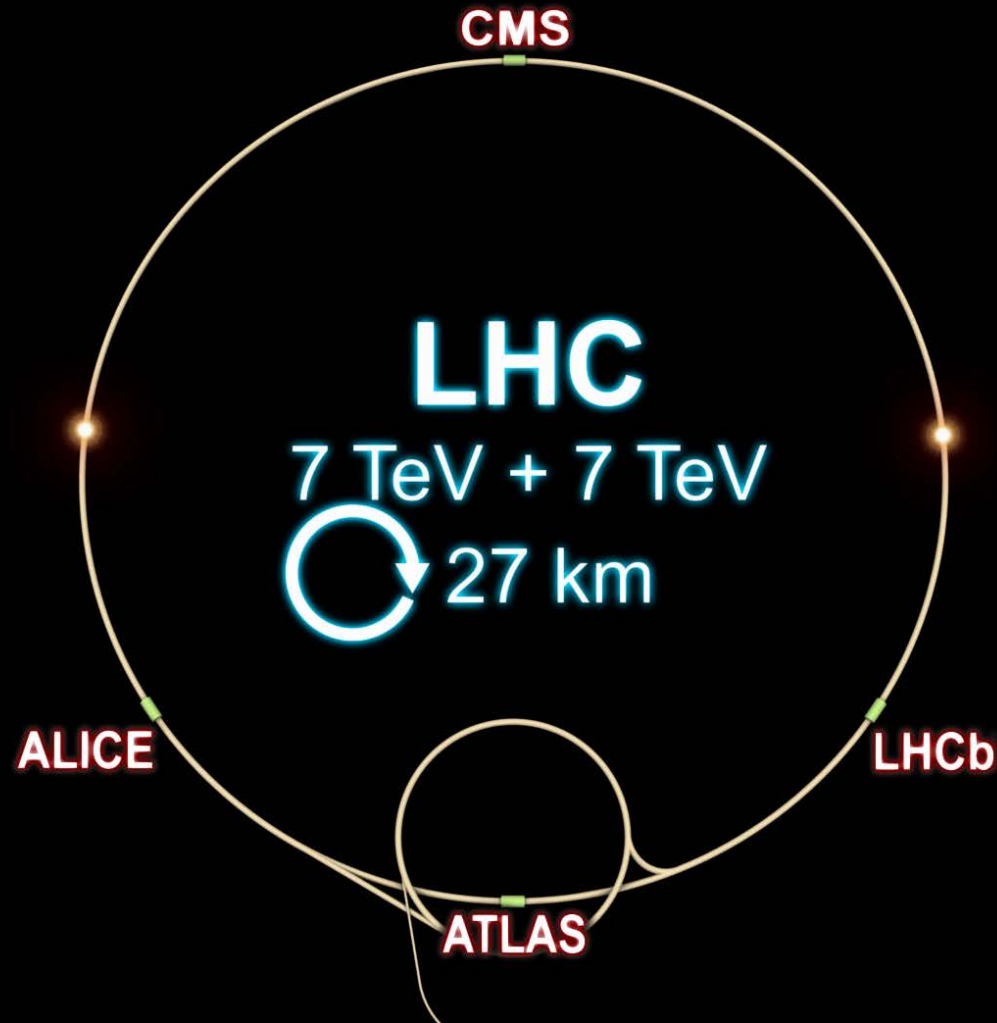


L'ancêtre :
Lawrence
(1930)

- Anneau quasi-circulaire de ~ 27 km de **circonférence** creusé à ~ 100 m **sous terre**
- **2 faisceaux de protons** (ou d'ions Pb selon les périodes) y circulent en sens opposé
- **Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants** (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



Accélération des particules au LHC

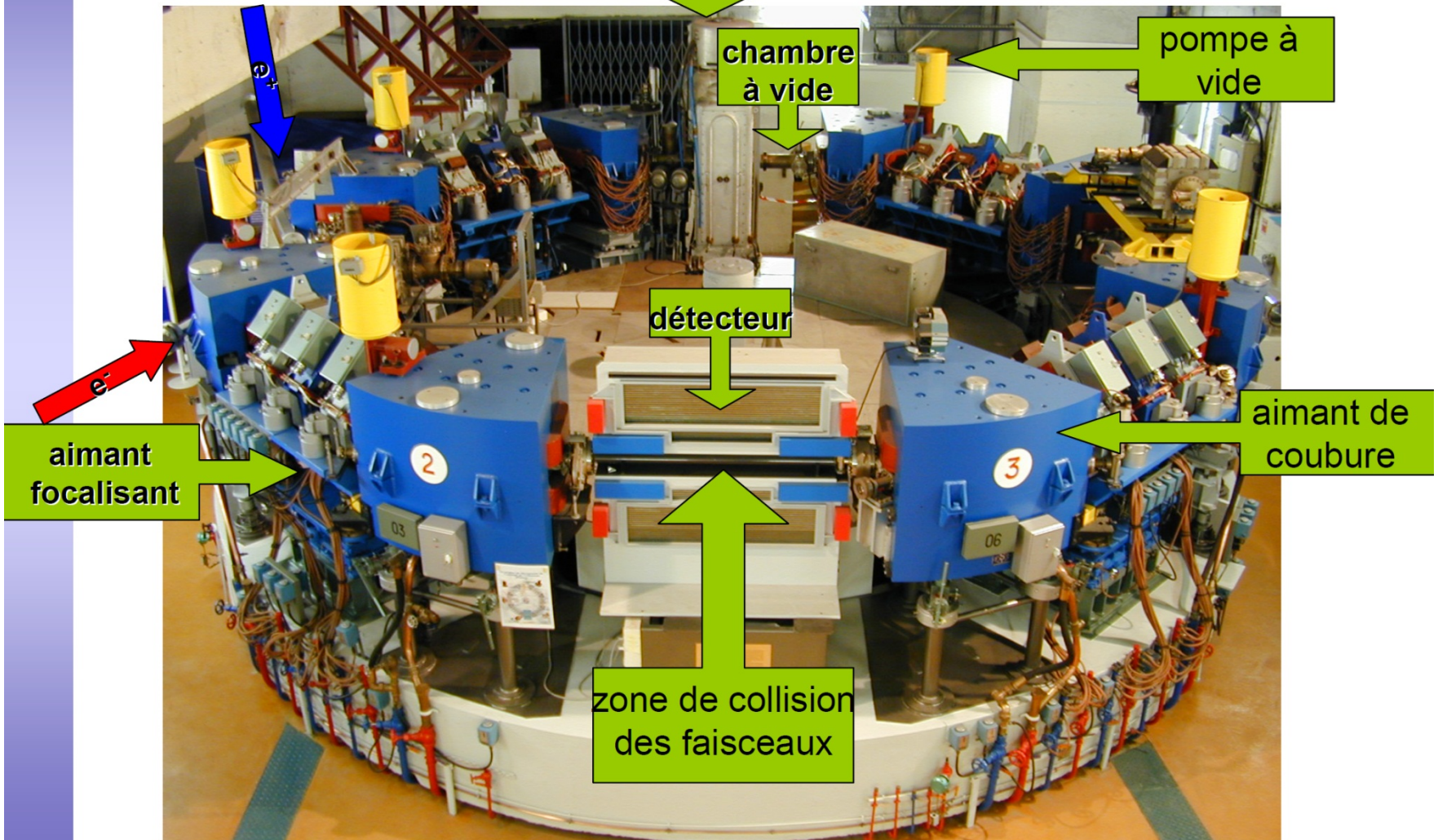


Et ACO dans tout ça ?

ACO

dispositif
d'accélération

(1962-1988)



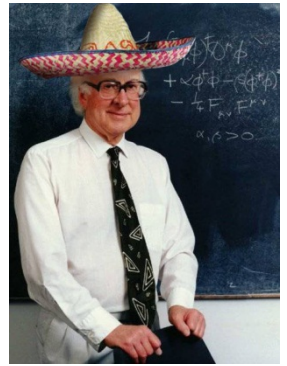
Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
 - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** (\approx Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
 - **Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus**
 - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données : \sim plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
 - Impossible de tout conserver
 - **Tri en temps réel des événements** : **drastique** et très performant
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul** du monde entier
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**



A la recherche du boson de Higgs

Le boson de Higgs



- **Motivation théorique** au départ :
« quelque chose » doit donner leur masse aux particules
- **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 incertitude

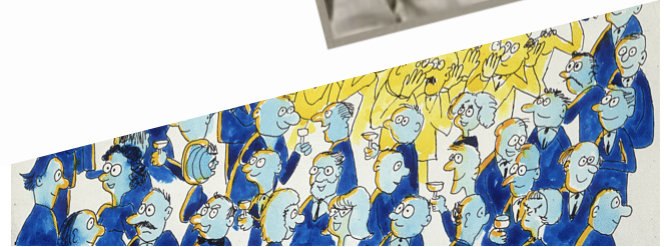
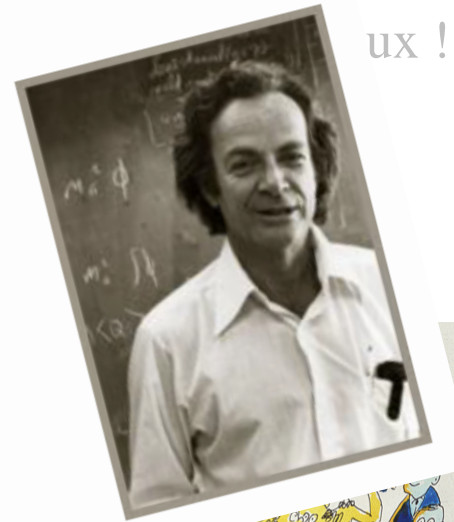
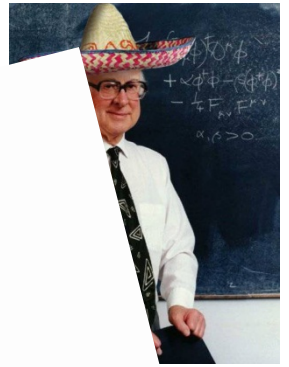
▶ **Do you want to be famous?**
▶ **Do you want to be a king?**
▶ **Do you want more than the nobel prize?**
- Then solve the mass Problem -
R.P. Feynman

- P
pl

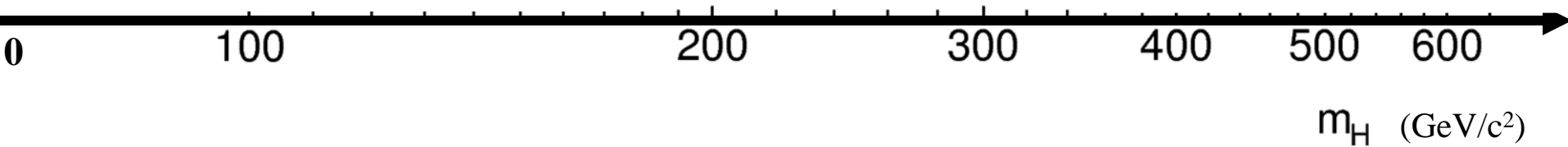
- Pet
il de
→ L

- Problè

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



La chasse au boson de Higgs



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie $\Rightarrow m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

Nota bene : $1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-25} \text{ kg}$ (en gros la masse d'un proton)

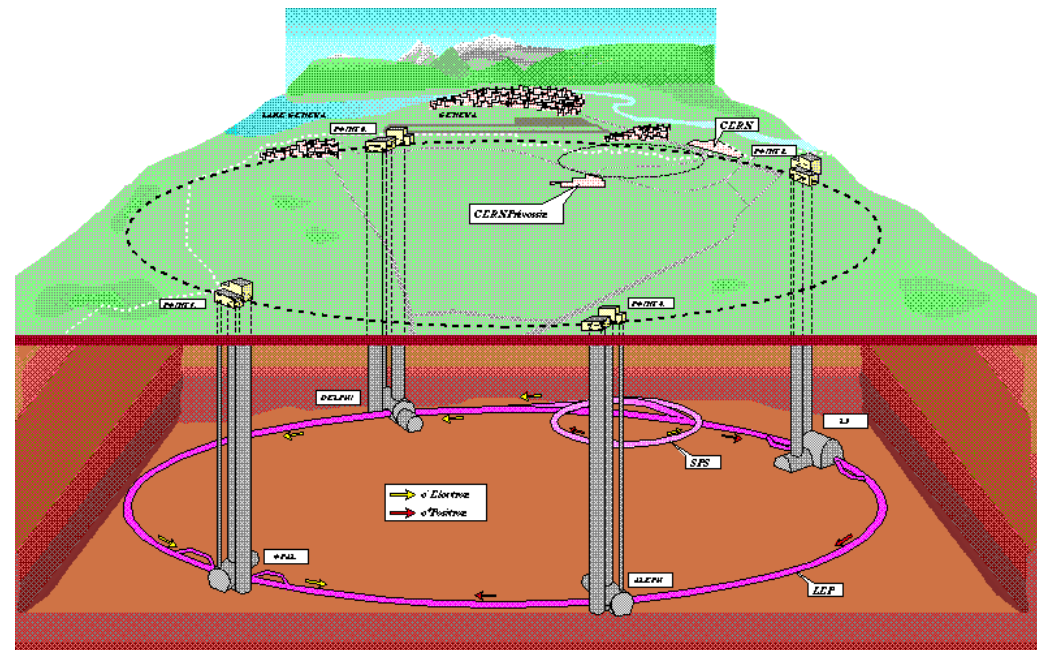
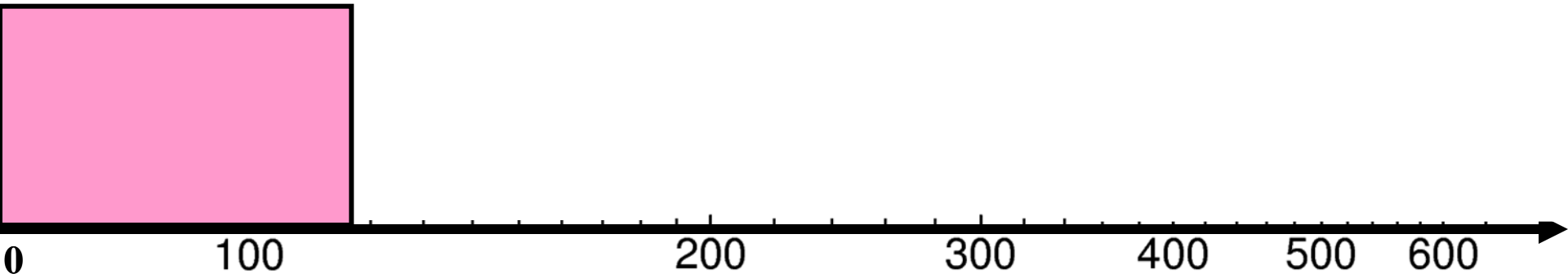
GeV = “Giga [10^9] électron-Volt”

Energie actuelle de collisions au LHC : 8 “Téra [10^{12}] électron-Volt” (**TeV**)

La chasse au boson de Higgs

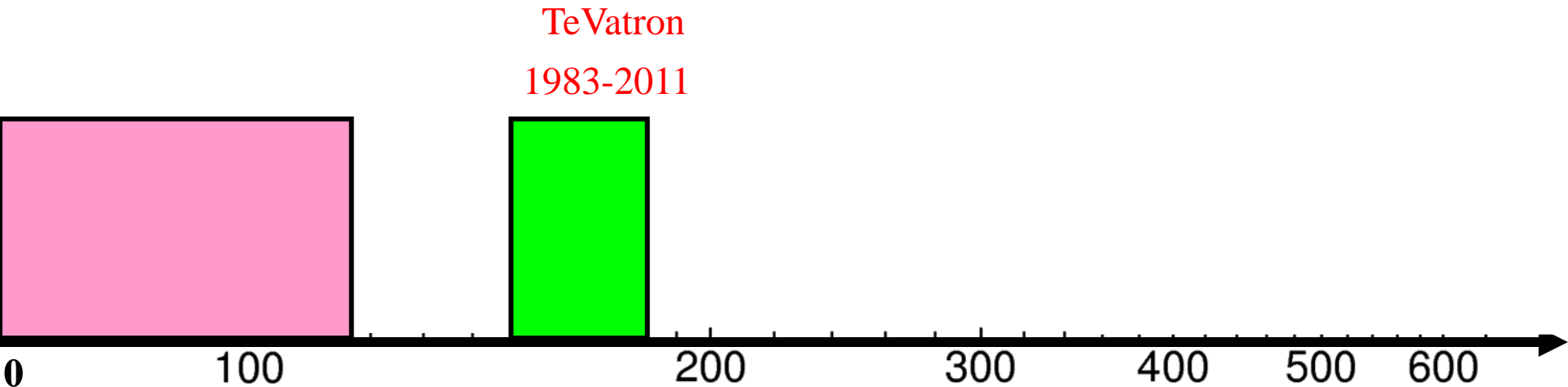
LEP

1989-2000



Le LEP au CERN
(près de Genève)

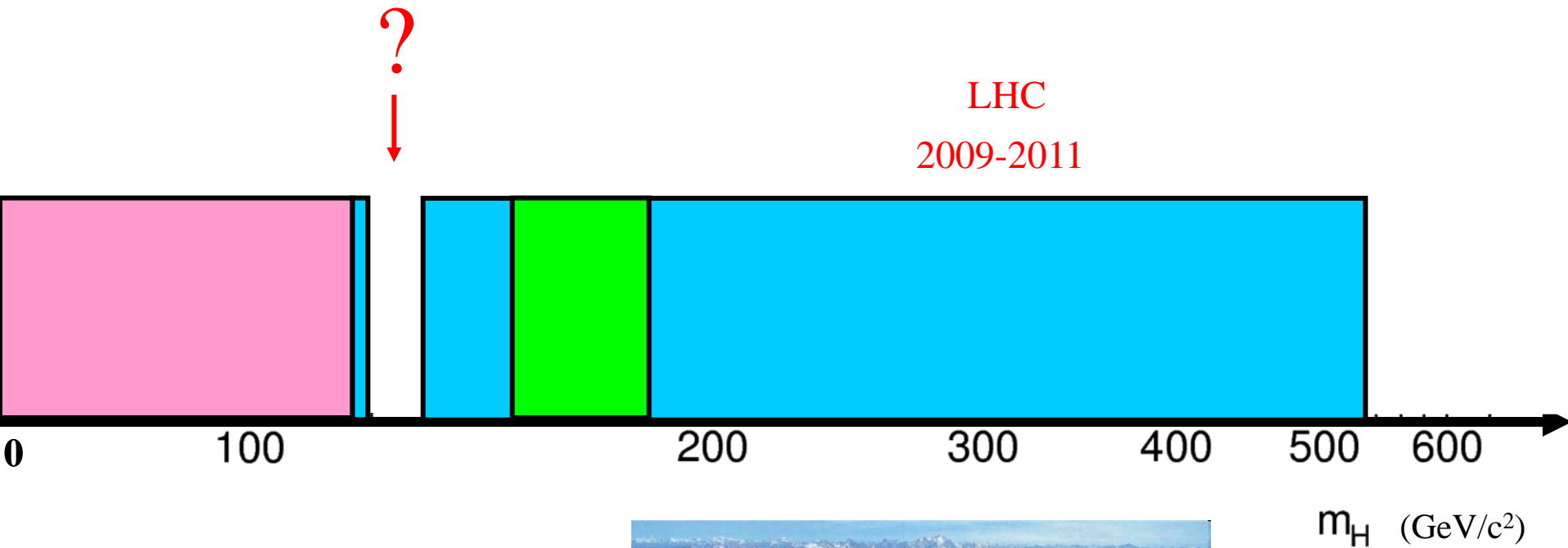
La chasse au boson de Higgs



Le TeVatron
à Fermilab
(près de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



Le LHC au CERN
(près de Genève)



4 juillet 2012

- Présentation des nouveaux résultats des expériences ATLAS et CMS
→ Communiqué de presse : <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR17.12F.html>

« Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu »



- C'est l'accélérateur LHC qui a « offert » cette découverte aux expériences !
- Que montrent les données ?
- Et maintenant ?

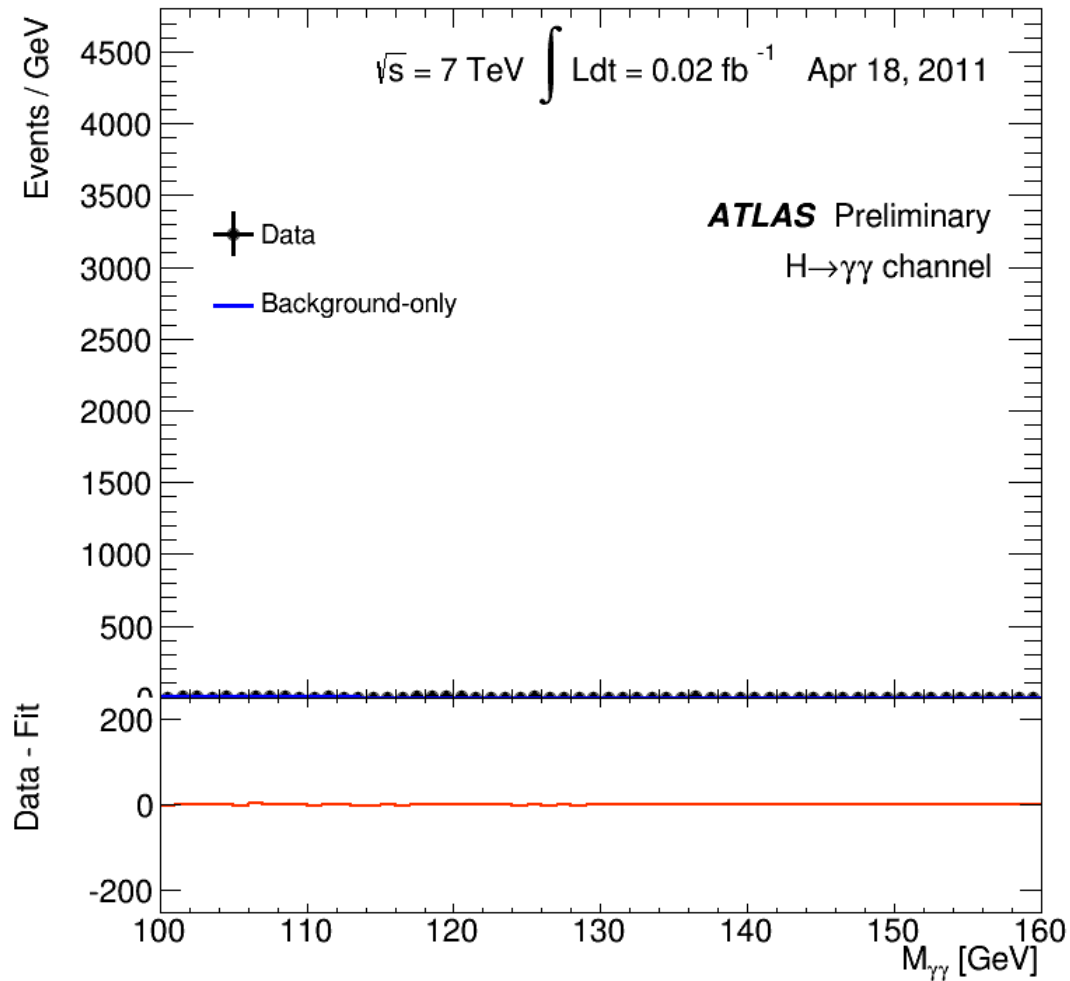
4 Juillet 2012

Libération



La puissance de la statistique à l'œuvre !

- Le **signal** laissé par « un » boson de Higgs sort peu à peu du **bruit de fond** ...



- ... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

2013

- 14 mars : mise à jour pour les « conférences d'hiver » des résultats annoncés en 2012
 - Nouveau communiqué de presse :

<http://press.web.cern.ch/fr/press-releases/2013/03/de-nouveaux-resultats-indiquent-que-la-particule-decouverte-au-cern-est-un>

« De nouveaux résultats indiquent que la
particule découverte au CERN est *un* boson de Higgs »

- 8 octobre : l'aboutissement d'une recherche de 49 ans ...



Le **Prix Nobel de Physique 2013** a été décerné à

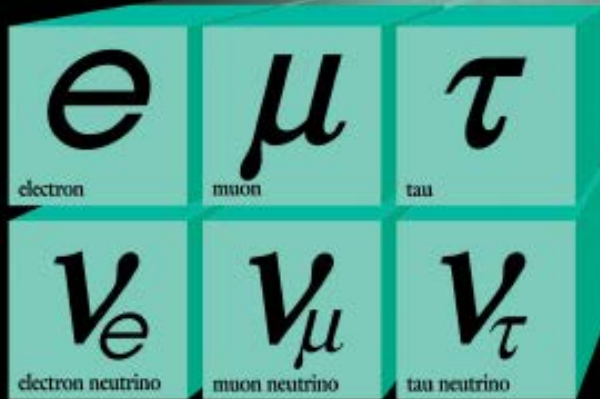
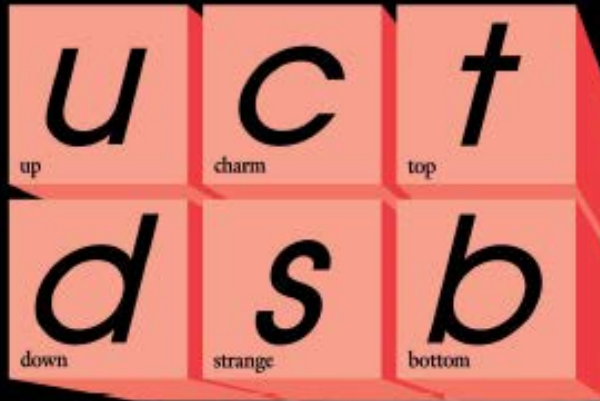
François Englert et Peter Higgs



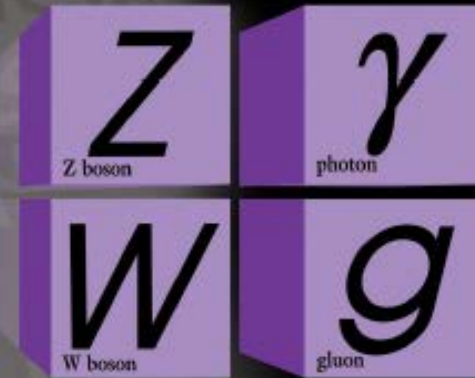
" for the theoretical discovery of a mechanism that
contributes to our understanding of the origin of mass of
subatomic particles, and which recently was confirmed through
the discovery of the predicted fundamental particle, by the
ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider "

Y-a-t-il encore du travail ?

Matière

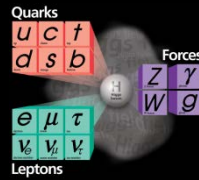


Forces

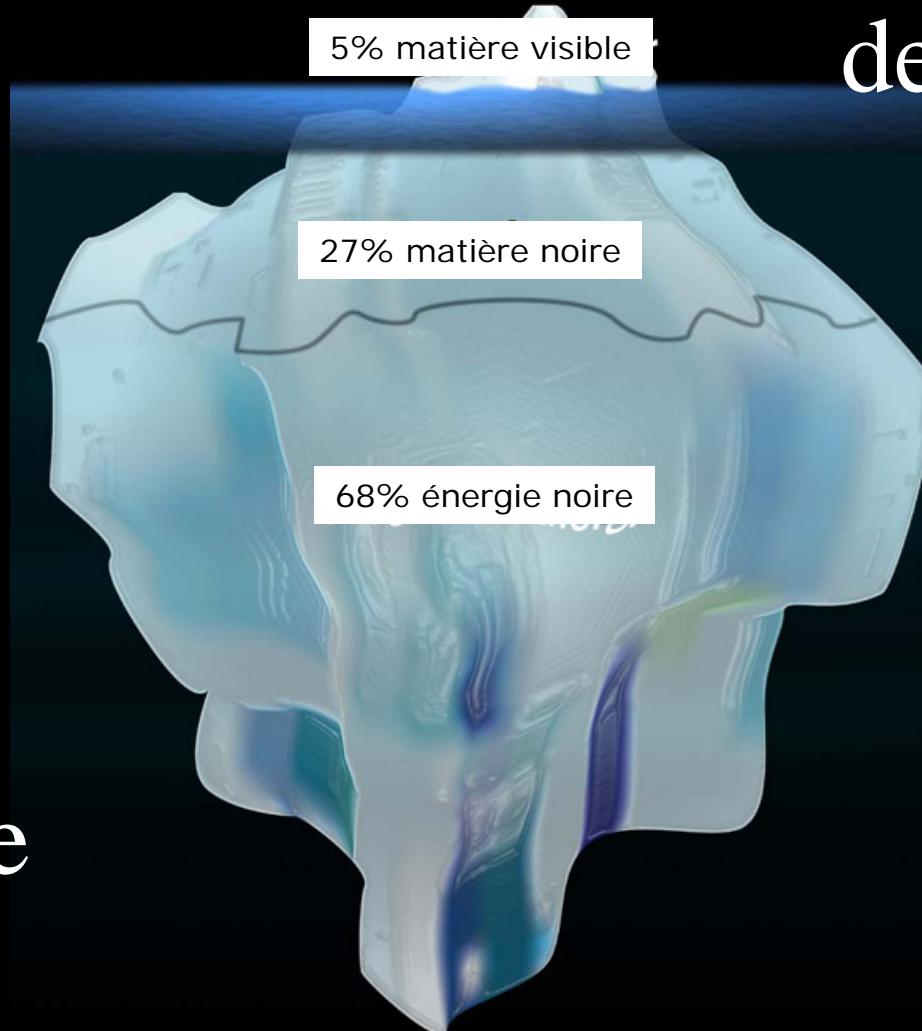


5 % Visible Matter





Le contenu énergétique de l'Univers



Résultats
du satellite
Planck
(2013)

Pour en savoir plus sur le LHC

- Le site **LHC-France**
<http://www.lhc-france.fr>
- Site grand public du **CERN**
<http://public.web.cern.ch/public/welcome-fr.html>
- Sites grand public des **expériences du LHC** :
 - ALICE <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
 - ATLAS <http://atlas.ch/>
 - CMS <http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>
 - LHCb <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>
- Films disponibles gratuitement sur le web :
 - Film “Bottle to Bang” produit et dirigé par Chris Mann (© CERN, 2008)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125472>
 - Film « LHC First Physics » (© CERN video productions, 2010)
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>