

# Visite CPGE du lycée de l'Essouriau



03 septembre 2015



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



# Sommaire

- Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)
- Le Modèle Standard de la Physique des particules
- Questions ouvertes
- Les accélérateurs de particules
- Le collisionneur LHC au CERN
- A la recherche du boson de Higgs

# **Le Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire**

# Présentation générale

- **L**aboratoire de l'**A**ccélérateur **L**inéaire (**LAL**) : <http://www.lal.in2p3.fr>
  - Fondé en **1956**
- Situé sur le campus de **l'Université Paris-Sud** entre Orsay et Bures sur Yvette
- **Nom historique** : le grand accélérateur linéaire du LAL a cessé ses activités fin 2003  
Des accélérateurs plus petits sont en fonctionnement ou en construction : PHIL,  
ThomX



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





# Présentation générale

- Le LAL est une **unité mixte de l'IN2P3/CNRS et de l'Université Paris Sud**
- **CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique  
→ Un très grand organisme public de recherche :  
~30 000 personnes, budget de 3,3 milliards d'€
- **IN2P3** : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules  
→ Dix instituts (structures regroupant plusieurs disciplines proches) au CNRS  
→ L'IN2P3, créé en 1971, est l'un des trois instituts **nationaux** du CNRS
- **Unité mixte** : le LAL rassemble des **chercheurs CNRS** et des **enseignants-chercheurs** qui dépendent de l'Université Paris-Sud et enseignent sur le campus



# Le domaine de recherche du LAL

- Au LAL, on étudie les **constituants de la matière** : les **particules élémentaires**
  - Combien sont-elles ?
  - Quelles sont leurs propriétés ?
  - Quelles sont les forces qui les gouvernent ?

+ accélérateurs de particules

- Ce monde, « **l'infiniment petit** », a des liens étroits avec celui de « **l'infiniment grand** », c'est-à-dire l'étude de l'Univers.

- Au LAL des groupes s'intéressent également à la composition de l'Univers et à son histoire, du Big-bang jusqu'à nos jours.
  - **Cosmologie**

- On observe aussi des particules en provenance de l'espace
  - **Astroparticules**

- Ces études demandent d'importantes ressources techniques & informatiques

## Composants élémentaires de la matière

Ètre humain 1m  
Terre 10<sup>7</sup>m  
Soleil 10<sup>8</sup>m  
Galaxie 10<sup>21</sup>m

Cellule 10<sup>-5</sup>m  
Molécule 10<sup>-8</sup>m  
Atome 10<sup>-10</sup>m  
Noyau 10<sup>-14</sup>m  
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 électronique	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 / charm	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 bas / 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	Gluons g
infinie	Gravitation	Graviton (?)

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

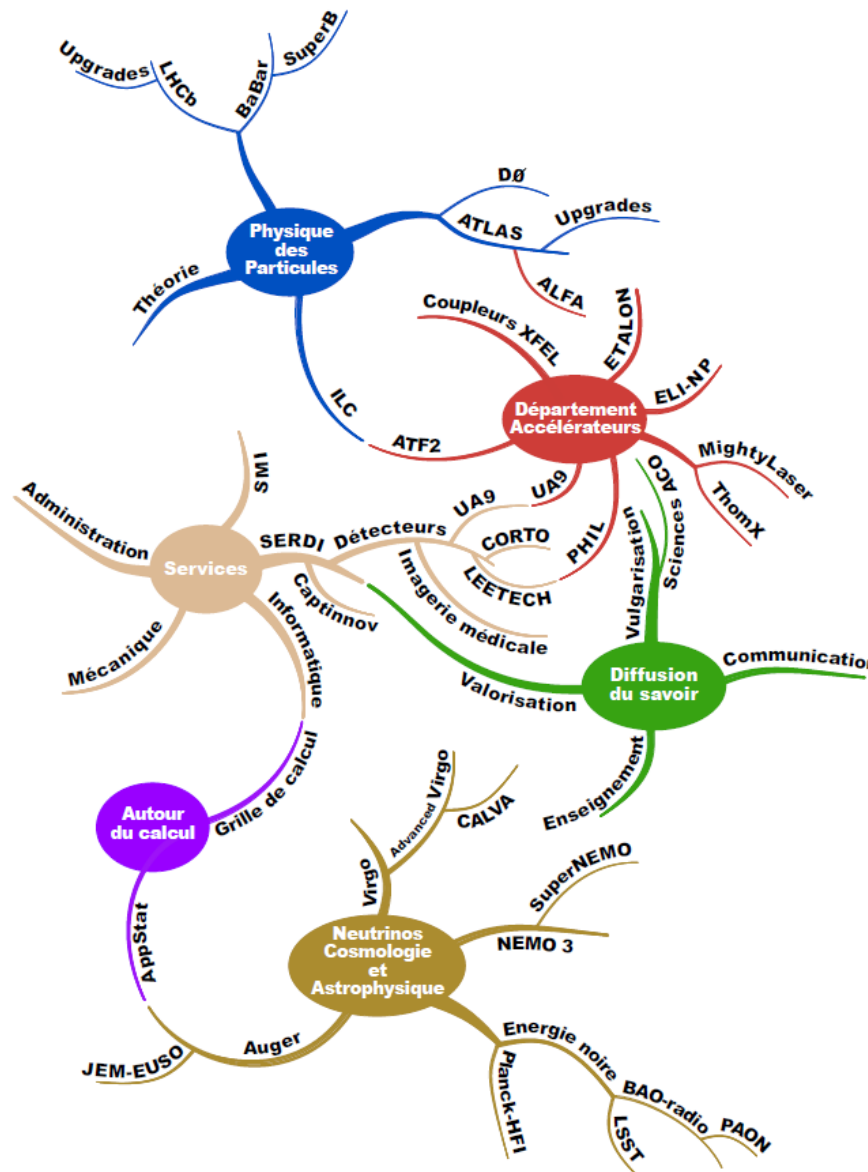
Chaque des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui propulsent les galaxies, et en particulier du Soleil :  
 - la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;  
 - les interactions faible et forte interviennent lors des réactions 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 projets au LAL

- Une trentaine au total
- Collaborations internationales
- Projets locaux
- Développements technologiques, activités R&D
- Contrats industriels, valorisation
- Diffusion du savoir



Synergies

Transmission, acquisition de connaissances

Vision sur le long terme



# Le LAL en chiffres (données 2015)

## Laboratoire fondé en 1956

47 Chercheurs CNRS

11 Enseignants-Chercheurs

**118 Chercheurs**

32 Thésards

15 Post-doctorants

13 Chercheurs émérites

**Personnel**

25 langues parlées

50 Ingénieurs de Recherche

**300 Agents**

26 Ingénieurs d'Études

66 Techniciens

**182 ITA**

200 Formations

29 Assistants Ingénieurs

suivies par an

11 CDD

16 000 m<sup>2</sup> de surface au total,

6 000 m<sup>2</sup> de halls, ateliers et salles blanches,

3 plate-formes technologiques

Auditorium de 250 places

Photoinjecteur à 6 MeV

2 000 Commandes

**Moyens**

Budget annuel 8,5 M€

et 3 100 Factures traitées par an

Chiffre d'affaire magasins : 200 k€

Soutien de base du CNRS 1,4 M€

Marchés industriels 1,4 M€

4 000 processeurs informatiques, 1 PB de stockage

Une bibliothèque riche d'environ 12 000 titres : 8 200 ouvrages,

2 100 thèses et habilitations, 1 500 rapports

35 Séminaires organisés

150 Interventions en conférence

280 Publications

**Une année de recherche au LAL**

1 700 Missions en France et à l'étranger

1,1 M€ d'indemnités de déplacement par an

10 Thèses et 2 HDR

5 Conférences, écoles ou journées thématiques

1 Département Accélérateur

14 Groupes de physique

1 Pôle interlaboratoires  
de microélectronique

**Organisation**

30 Projets scientifiques

1 Service administratif

4 Services techniques

1 salle informatique mutualisée "Virtual Data"

600 Scolaires et visiteurs accueillis

Le musée Sciences ACO

80 Stages de Licence et Master par an

**Transmission du savoir**

1 Salle dédiée à l'enseignement informatique

Plus de 40 agents impliqués dans l'enseignement

Revue Élémentaire

Salle de Musée

Passport pour les deux infinis

# Enseignement & étudiants

- Démarrage de ~10 thèses en moyenne chaque année  
→ ~30 étudiants de thèse au laboratoire
- ~190 mois de stage / an
  - Majoritairement (mais pas seulement) à partir du niveau L3  
→ L3, M1, M2, grandes écoles
  - De plus en plus de stagiaires étrangers (UE et hors UE)
- Stages d'une semaine « en entreprise » : 3<sup>ème</sup> et lycée
- Candidatures spontanées bienvenues : [comm@lal.in2p3.fr](mailto:comm@lal.in2p3.fr)
  - Envoyer CV + lettre de motivation :
- Enseignement à tous les niveaux universitaires (L, M, D) et dans les grandes écoles
  - Plus de 40 agents du laboratoire impliqués
- Responsabilités d'administration et de filières
- Installations technologiques ↔ plateformes pédagogiques
- Liens structurants avec plusieurs pays : Grèce et Europe de l'Est



# Les métiers du LAL

- Le LAL est un **gros laboratoire** à l'échelle du CNRS : ~ 300 personnes  
→ **Grande diversité des métiers**
- Le LAL est un **laboratoire constructeur**  
→ **De très nombreux métiers techniques dans des domaines très divers**
- En particulier : **électronique & instrumentation, mécanique, informatique, technologie & physique des accélérateurs**
- **Plusieurs catégories de personnel**
  - **Chercheurs** (CNRS ou universitaires)
  - **Ingénieurs**
  - **Techniciens**
  - **Administratifs**

} **Personnel ITA**
- **Plusieurs statuts**
  - **Stagiaires**
  - **Etudiants en thèse** (« thésards »)
  - **Contrats à durée déterminée** : postdoctorats, etc.
  - **Fonctionnaires**
- **Recrutements sur concours**, **internes** ou **externes**

# Cursus pour les métiers de la recherche

Concours national Chercheurs  
~ 300 postes/an pour le CNRS

Salaire mensuel  
début - fin

Post-Doc > 1 an

Thèse  
3 ans

Ecole  
Ingénieur  
3 ans

Magistère  
3 ans

Master  
2 ans

IUT / BTS  
2 ans

Prépa  
2 ans

License  
3 ans

Bac

Lycée  
3 ans

Thèse + Post-Doc  
Chercheur CR / DR

30 ans  
2100-3800 €  
3050-6110 €  
Thèse : 1900 €

Ecole d'ingénieur / Thèse  
Ingénieur de Recherche

23-28 ans  
1900-4460 €

M2 / Ecole d'ingénieur  
Ingénieur d'étude

23 ans  
1710-3600 €

DUT / BTS / L3  
Assistant Ingénieur

20 ans  
1570-2800 €

BAC  
Technicien

18 ans  
1450-2380 €

BEP fin de 1ere  
Assistant Technique

17 ans  
1490-2140 €

Concours nationaux par grade et BAP  
~ 100 postes/an pour le CNRS

BAPs

Sciences  
du vivant

Chimie  
Matériaux

Sciences  
ingénieur  
Instruments

Sciences  
humaines  
sociales

Informatiqu  
e  
Calcul  
scientifique

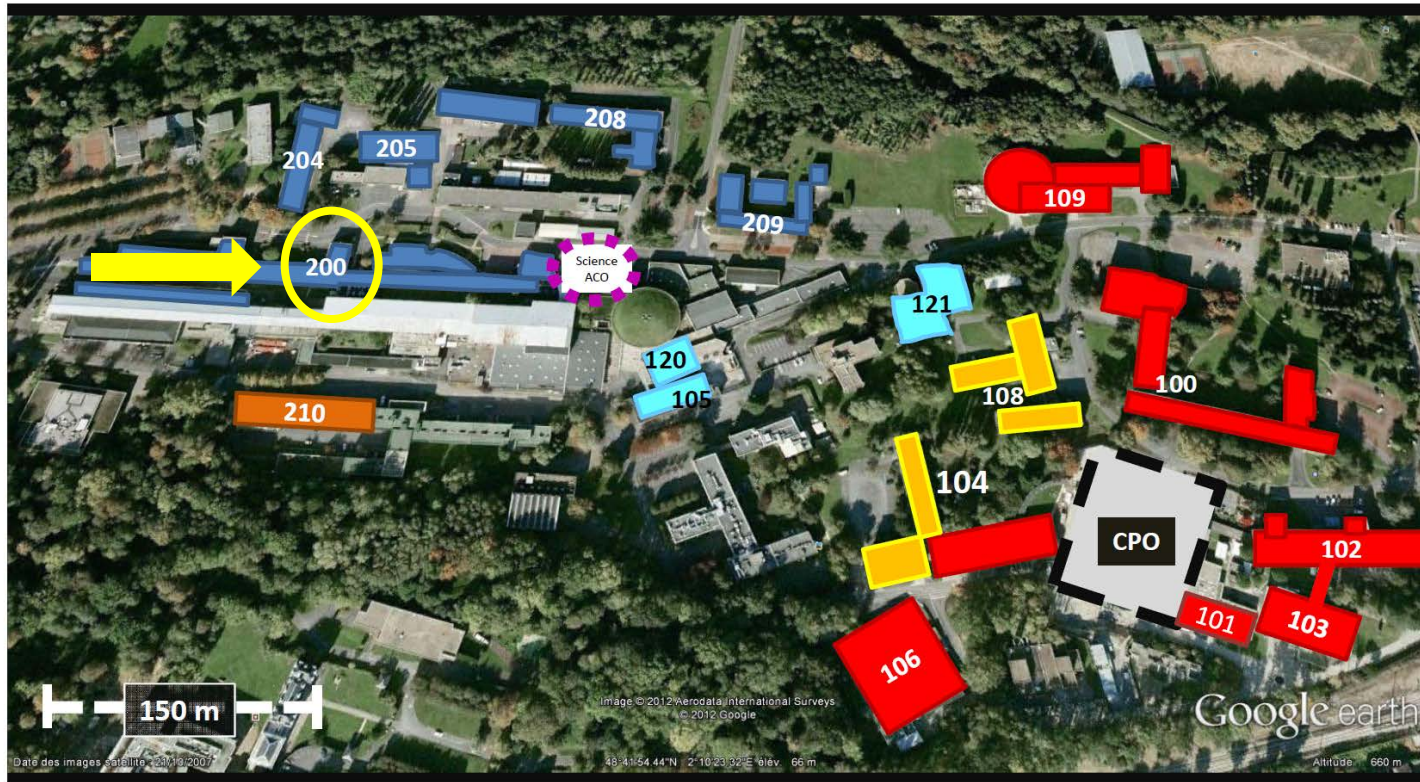
Documentation  
Culture  
Communicatio  
n

Patrimoine  
Logistique  
Restauration

Gestion  
Pilotage

# Un territoire riche en centres de recherche

- La vallée du campus de l'Université Paris Sud



Particules Cosmologie Astrophysique Origines Nucléaire Santé Théorie...

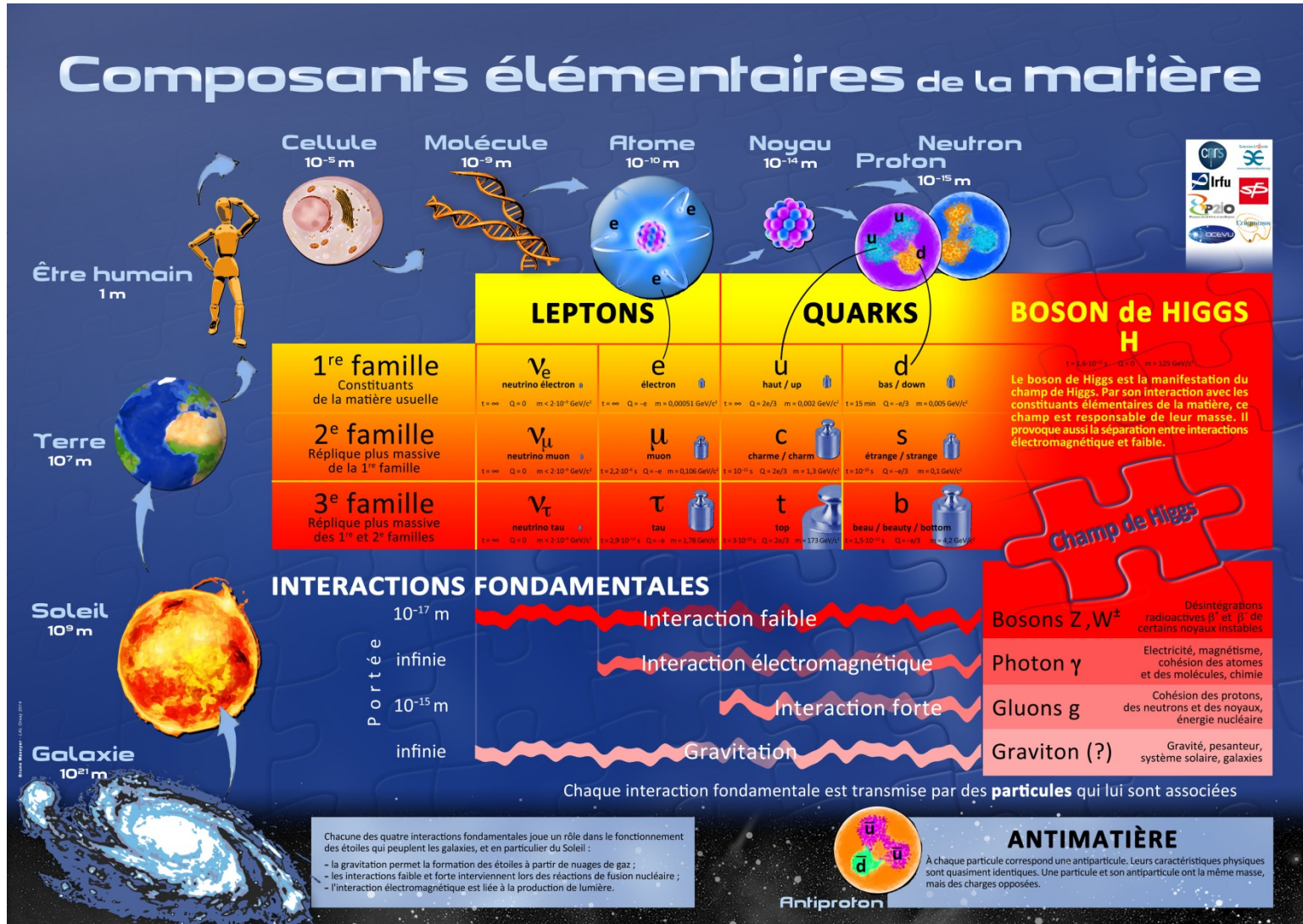
- Mais aussi : le CEA Saclay (Irfu), l'Ecole Polytechnique (LLR), les Universités Pierre & Marie Curie et Paris Diderot (LPNHE, APC), l'Observatoire de Paris-Meudon, etc.

# **Le Modèle Standard de la Physique des Particules**



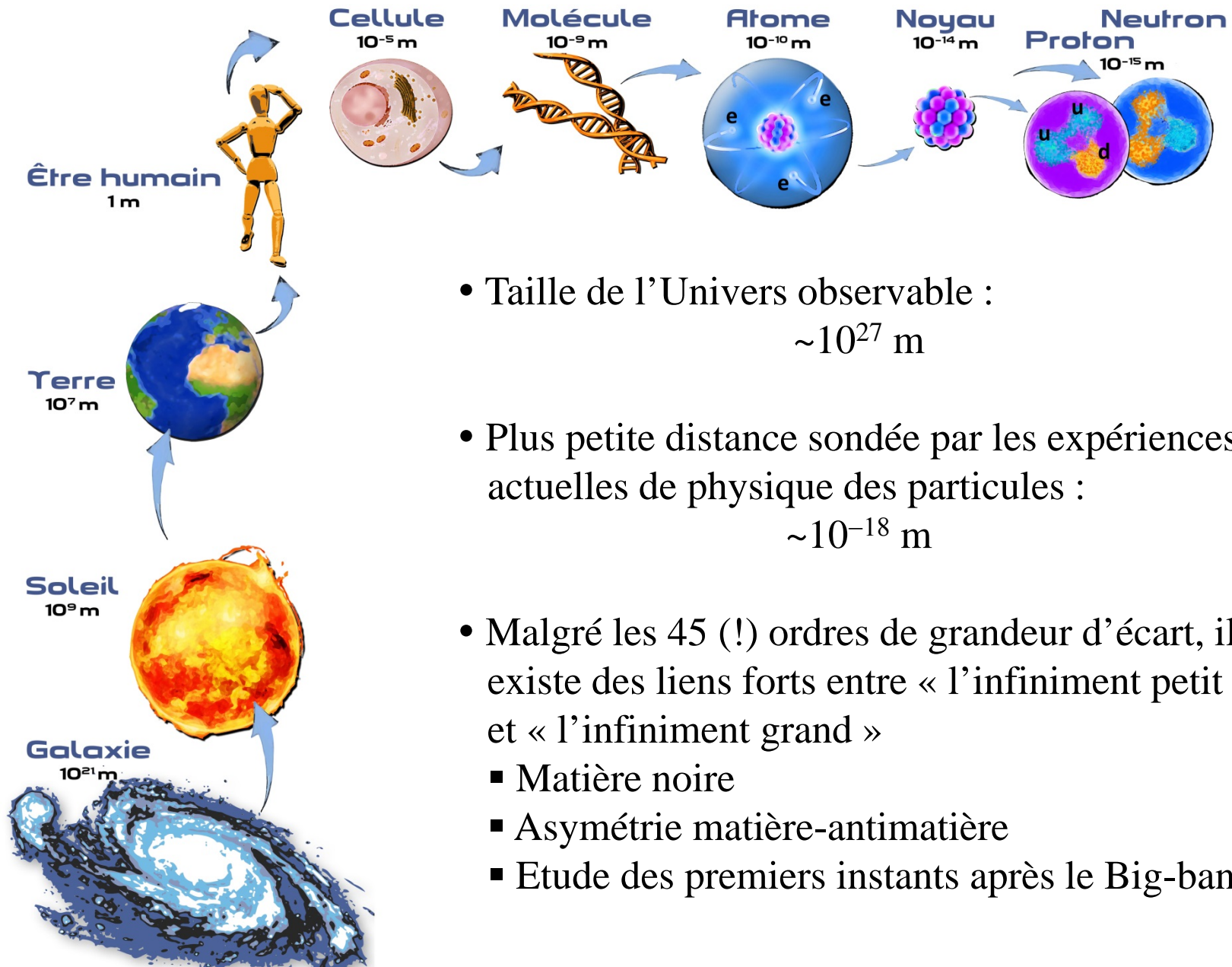
# Les composants élémentaires de la matière

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





# Echelle des distances



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

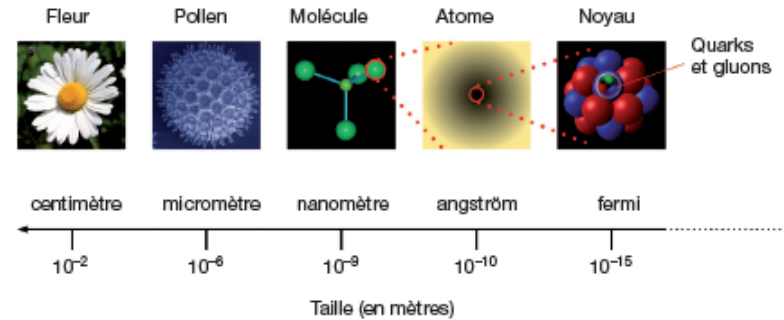
# Mécanique quantique et relativité

- **Grandes énergies ↔ petites distances**

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

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

- Accélérateur ~ « microscope géant » [LHC]



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

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

- de masse :  $eV/c^2$

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

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

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

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

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

- Exemple : le spin, entier pour les bosons, demi-entiers pour les fermions

[particules de matière]

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

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

# 12 particules élémentaires : des fermions

## Composants élémentaires de la matière

Être humain  
1 m

Cellule  
10<sup>-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> <p><small>t = 3,2 · 10<sup>-25</sup> s Q = 0 m = 125 GeV/c<sup>2</sup></small></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>-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>	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>	

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

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

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

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

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

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

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

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

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

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

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.



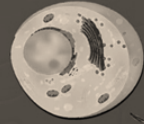
# Particules réparties en 3 familles de 4

## Composants élémentaires de la matière

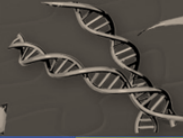
Être humain  
1 m



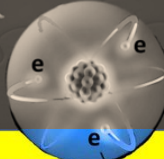
Cellule  
10<sup>-6</sup> m



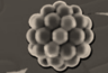
Molécule  
10<sup>-9</sup> m



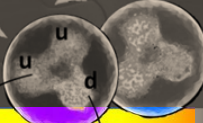
Atome  
10<sup>-10</sup> m




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 <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> <p style="text-align: center; font-size: small;">t = 3 · 10<sup>-25</sup> s Q = 0 m = 125 GeV/c<sup>2</sup></p>
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 = 2,9 · 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 = 3,5 · 10<sup>-12</sup> s Q = -e/3 m = 4,2 GeV/c<sup>2</sup></small>	

### INTERACTIONS FONDAMENTALES

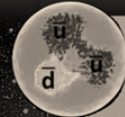
portée	10 <sup>-17</sup> m	Interaction faible	
	infinie	Interaction électromagnétique	
	10 <sup>-15</sup> m	Interaction forte	
	infinie	Gravitation	

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

# Même structure pour les trois familles

## Composants élémentaires de la matière

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



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

Être humain  
1 m

Terre  
10<sup>7</sup> m

Soleil  
10<sup>9</sup> m

Galaxie  
10<sup>21</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	

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

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

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

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

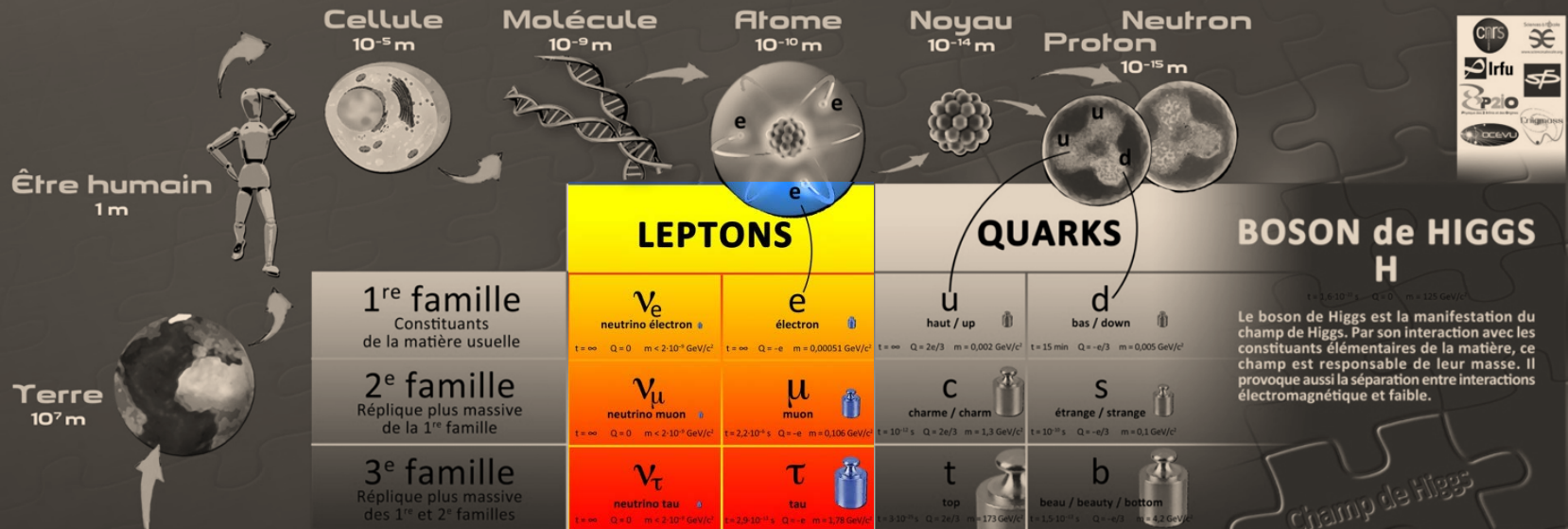
mais des charges opposées.

Antiproton

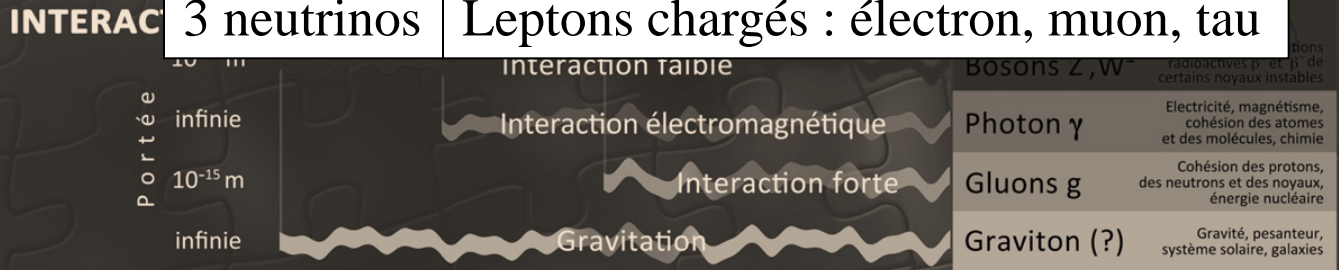


# Leptons

## Composants élémentaires de la matière



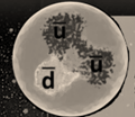
3 neutrinos    Leptons chargés : électron, muon, tau



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

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

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



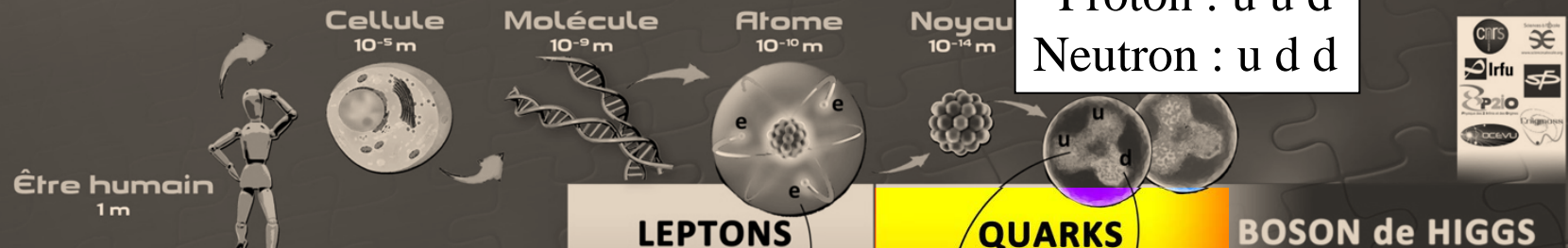
Antiproton

### ANTIMATIÈRE

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

# Quarks

## Composants élémentaires de la matière



Quarks : constituants des hadrons  
 Mésons : paire quark-antiquark  
 Baryon : triplet de quarks  
 Tétraquarks, pentaquarks, etc. : permis par la théorie, observés récemment

LEPTONS	QUARKS		BOSON de HIGGS H
e électron $Q = -e$ $m = 0,00051 \text{ GeV}/c^2$	u haut / up $Q = 2e/3$ $m = 0,002 \text{ GeV}/c^2$	d bas / down $Q = -e/3$ $m = 0,005 \text{ GeV}/c^2$	
$\mu$ muon $10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106 \text{ GeV}/c^2$	c charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3 \text{ GeV}/c^2$	s étrange / strange $t = 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1 \text{ GeV}/c^2$	
$\tau$ tau $10^{-11}$ s $Q = -e$ $m = 1,78 \text{ GeV}/c^2$	t top $t = 3,10^{-16}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173 \text{ GeV}/c^2$	b beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2 \text{ GeV}/c^2$	

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

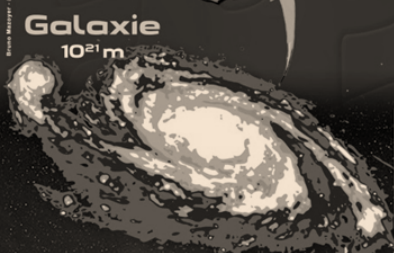
Six quarks  
 u, c, t : charge  $+2e/3$   
 d, s, b : charge  $-e/3$

Désintégrations 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, pesantueur, système solaire, galaxies



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

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

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



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

## Composants élémentaires de la matière



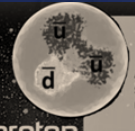
	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est 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 $\gamma$	
		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.



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.

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

## 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
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon			
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau			

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

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

Bosons Z, W<sup>±</sup>

Photon  $\gamma$

Gluons g

Graviton (?)

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

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

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

Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

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

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

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

**Relativité générale**

« Infiniment grand »

RE

caractéristiques physiques

rticule ont la même masse,

RE

caractéristiques physiques

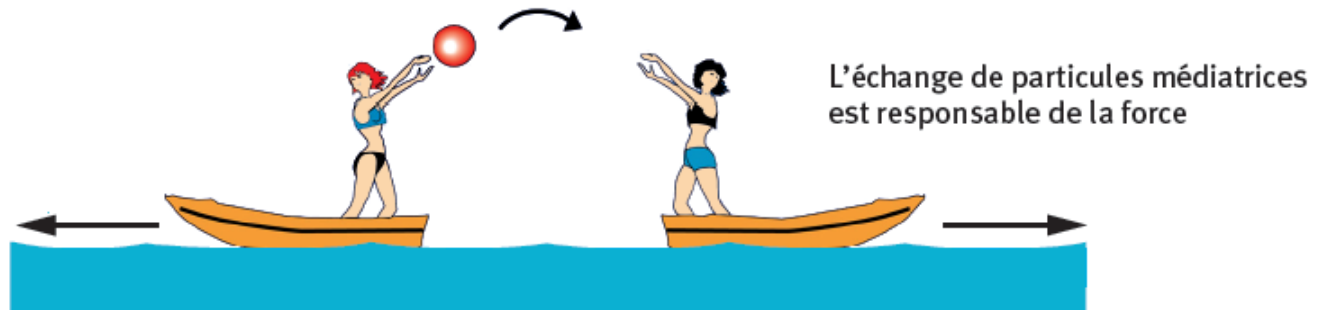
rticule ont la même masse,

# Interactions fondamentales

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

## Les forces fondamentales

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



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



# L'interaction électromagnétique

## Composants élémentaires de la matière

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

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

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

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

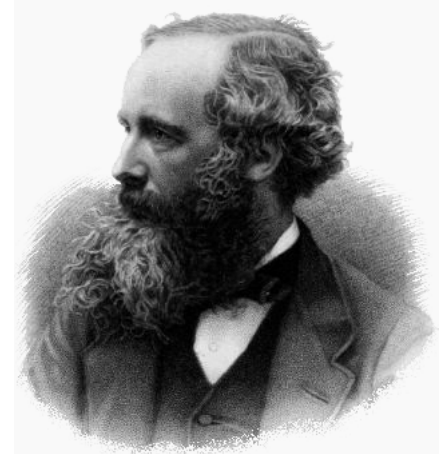
**Terre**  
10<sup>7</sup> m

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

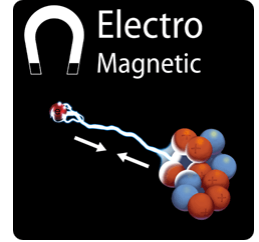
**Galaxie**  
10<sup>21</sup> m

# L'électromagnétisme

- **James Clerk Maxwell** (1864) : « La convergence des résultats semblent montrer que lumière et magnétisme sont deux facettes d'une même substance et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois de l'électromagnétisme »
- **L'électricité et le magnétisme sont un seul et même phénomène dont les manifestations sont différentes**
- Les champs se propagent dans l'espace, sous forme d'ondes, et à la vitesse de la lumière, constante.
- Fondations de la **physique moderne**, de **l'ingénierie électrique**, de **l'astronomie**, des **communications radio**, de **la télévision...**
- **Einstein** parlant des travaux de **Maxwell** : « [Ce sont] les plus profonds et les plus fertiles en physique depuis l'époque de **Newton** »



# L'électromagnétisme

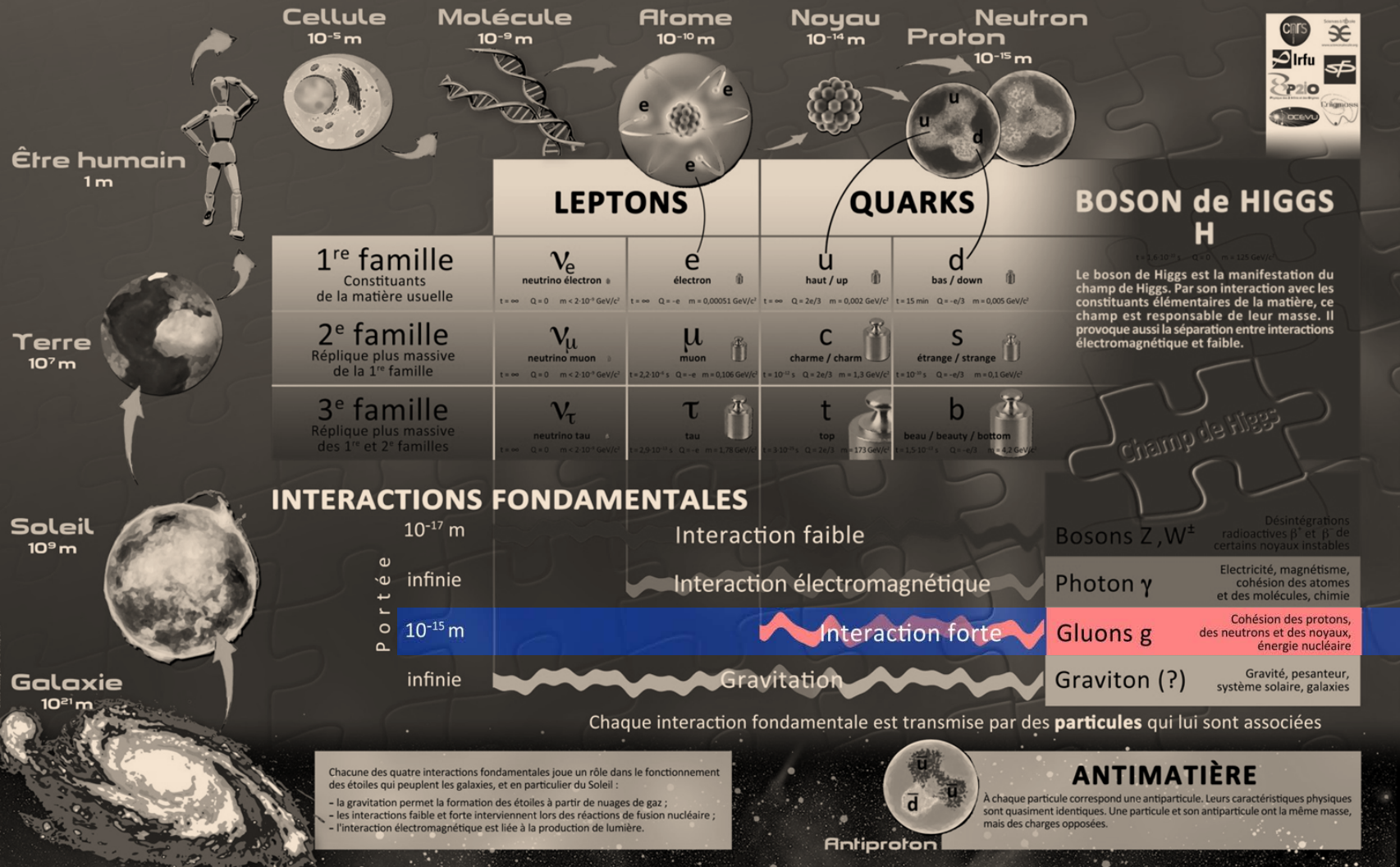


- **Electrostatique**
- **Magnétisme** – dû au mouvement des charges électriques
- **Particule médiatrice** : le **photon** de **masse nulle**
- **Force répulsive** ou **attractive** selon que les charges sont ou non de même signe  
→ Bien que sa portée soit en principe infinie – force  $\propto 1 /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



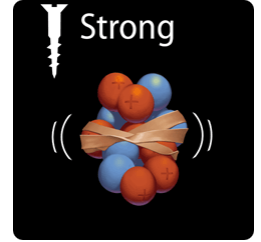
# L'interaction forte

## Composants élémentaires de la matière

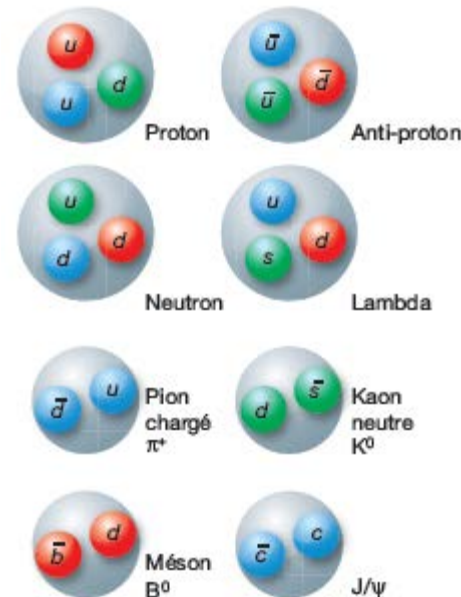




# L'interaction forte

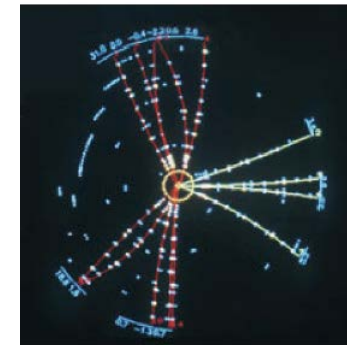
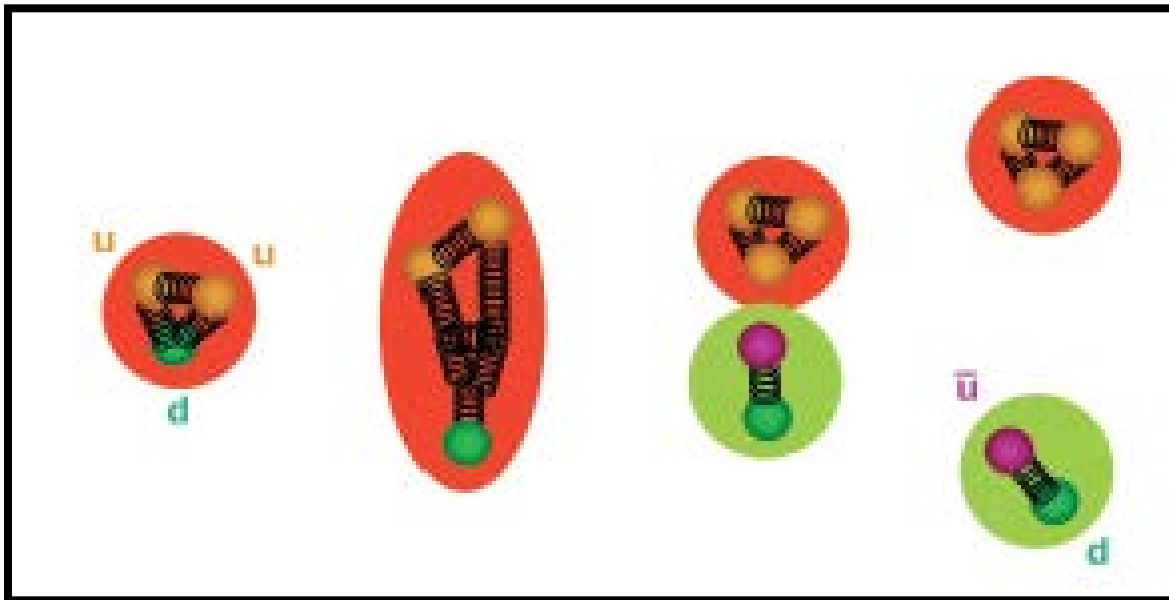


- **Nécessaire pour expliquer la cohésion des noyaux**
  - 2 protons séparés par la taille du noyau ressentent une force électromagnétique répulsive  $10^{10}$  fois supérieure à celle qui lie l'électron et le proton de l'atome d'H
- **Portée très limitée : à peine quelques diamètres de noyaux**
  -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



# L'interaction forte

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

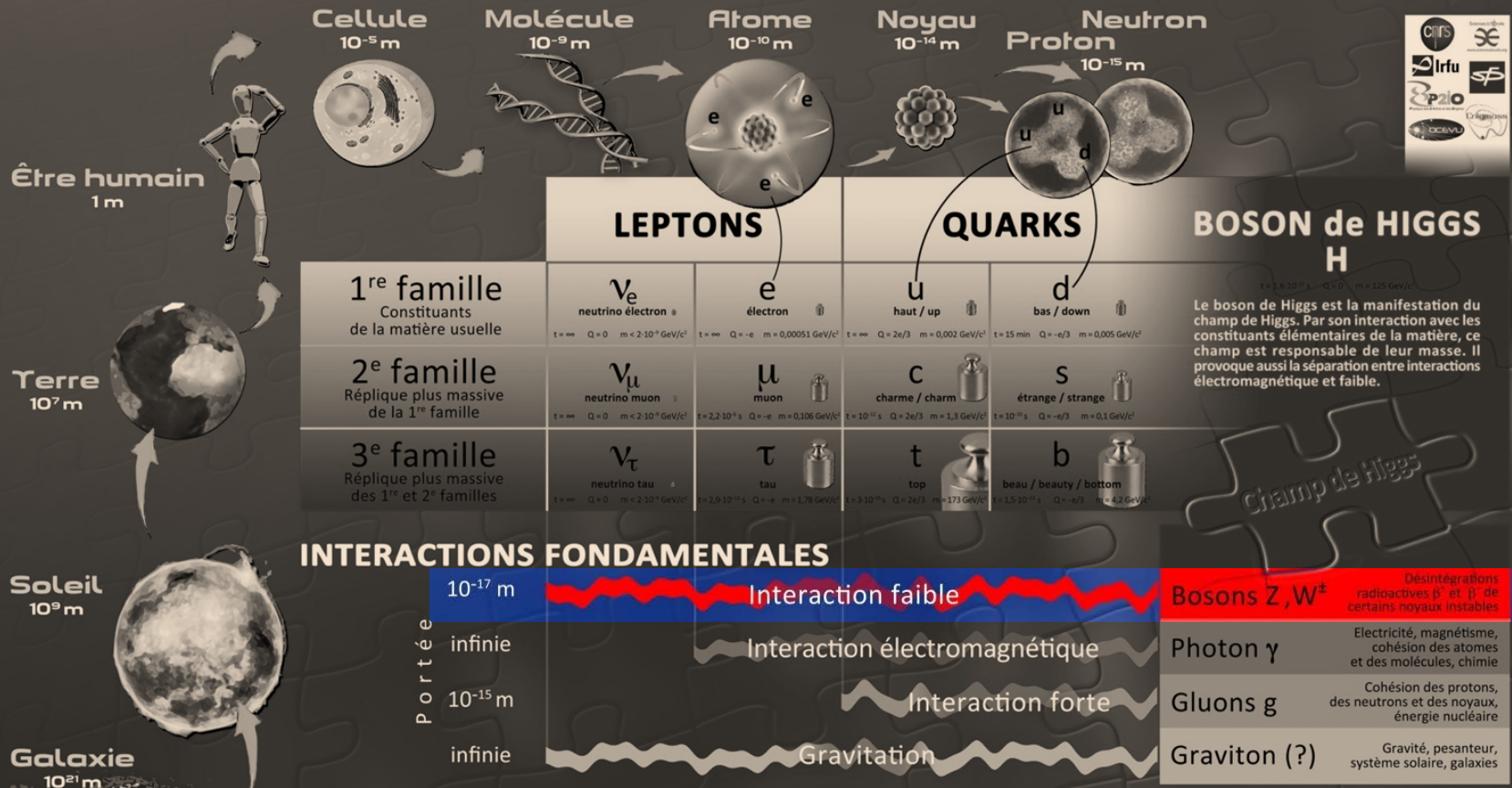


Voici ce qui se passe quand on essaye d'arracher un quark à une particule  
→ Les « gluons » portent bien leur nom !

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

# L'interaction faible

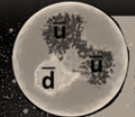
## Composants élémentaires de la matière



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

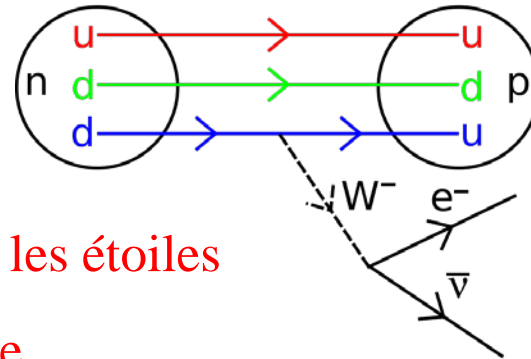
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# L'interaction faible



- Explique la radioactivité bêta ( $\beta$ )

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



- Gouverne les réactions thermonucléaires dans les étoiles

- Portée encore plus faible que l'interaction forte

- A peine quelques centièmes de la taille du nucléon

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

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

→ Interaction presque ponctuelle

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

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

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

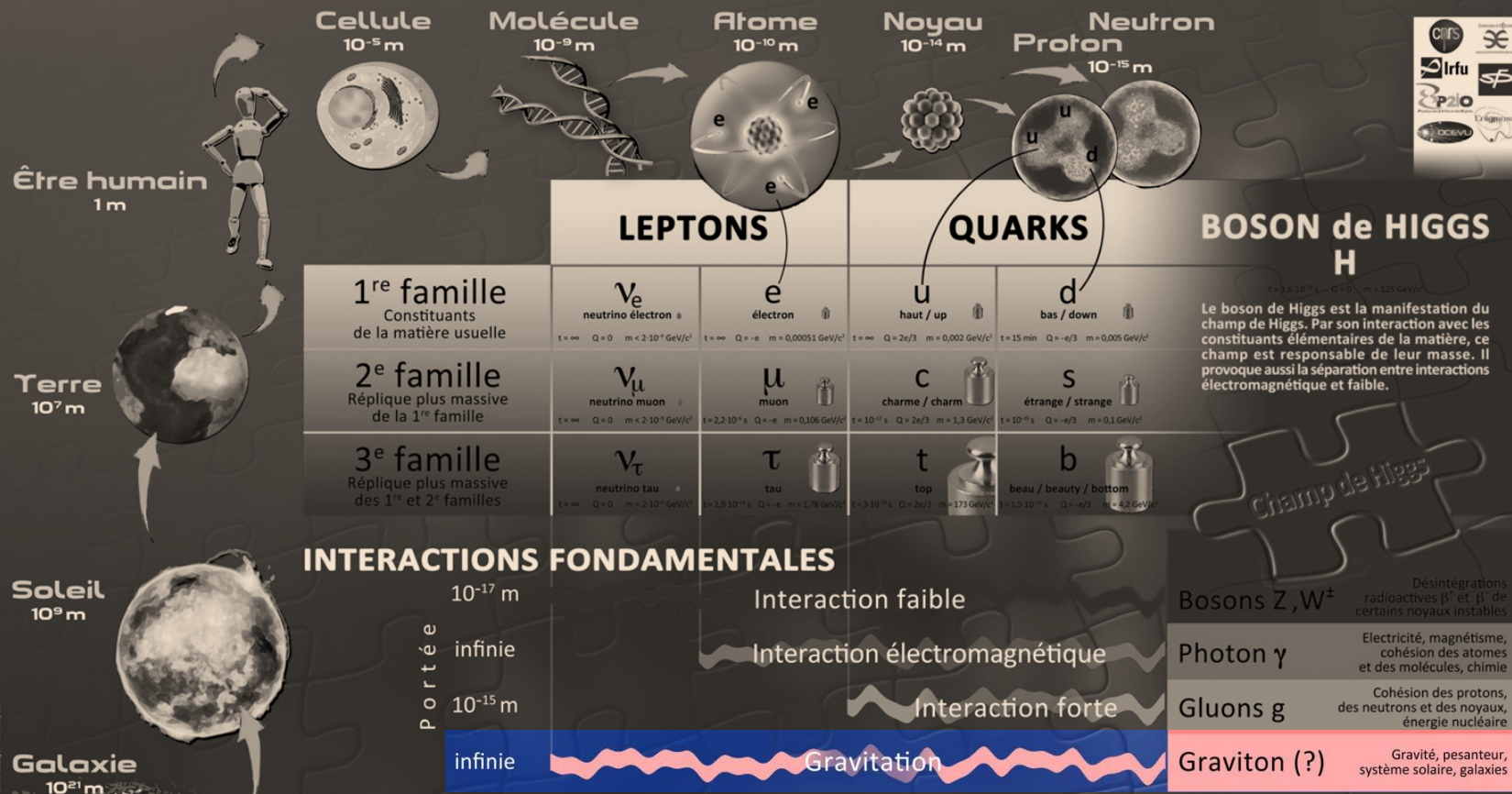
- L'interaction faible est aujourd'hui unifiée à haute énergie avec l'interaction électromagnétique

→ Voir plus loin



# La gravitation

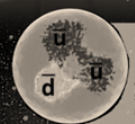
## Composants élémentaires de la matière



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 gravitation



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

# Le champ (boson) de Higgs

## Composants élémentaires de la matière

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

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

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

	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

$m = 125 \text{ GeV}/c^2$

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

Champ de Higgs

**INTERACT**

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 (?)

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

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

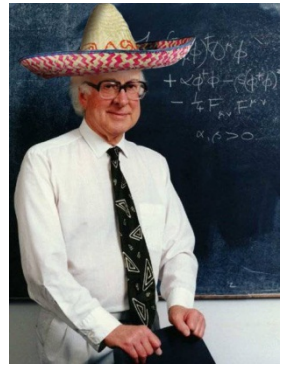
Soleil  
10<sup>9</sup> m

Terre  
10<sup>7</sup> m

Galaxie  
10<sup>21</sup> m



# 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 incertitude

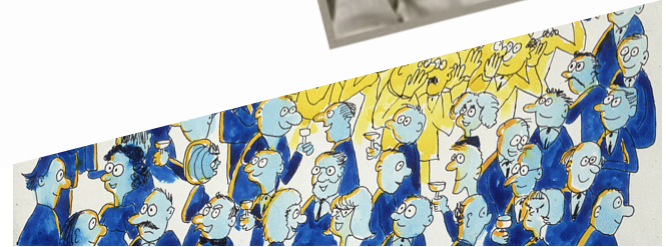
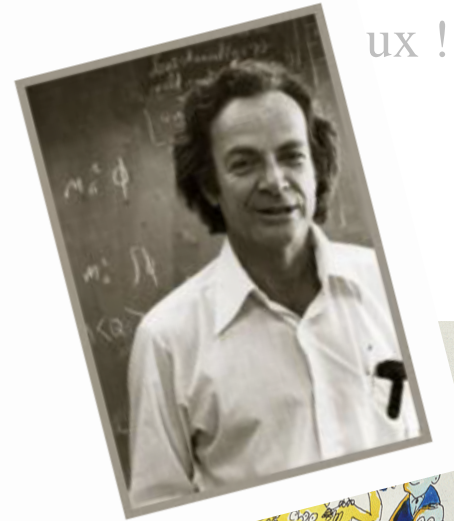
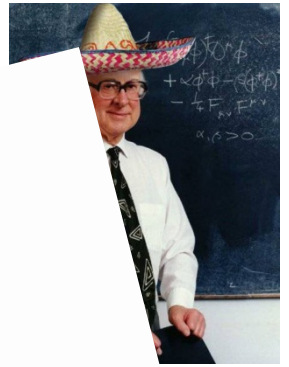
▶ **Do you want to be famous?**  
▶ **Do you want to be a king?**  
▶ **Do you want more than the nobel prize?**  
**- Then solve the mass Problem -**  
**R.P. Feynman**

- P  
pl

- Pet  
il de  
→ L

- Problè

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



# Brisure spontanée de symétrie

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

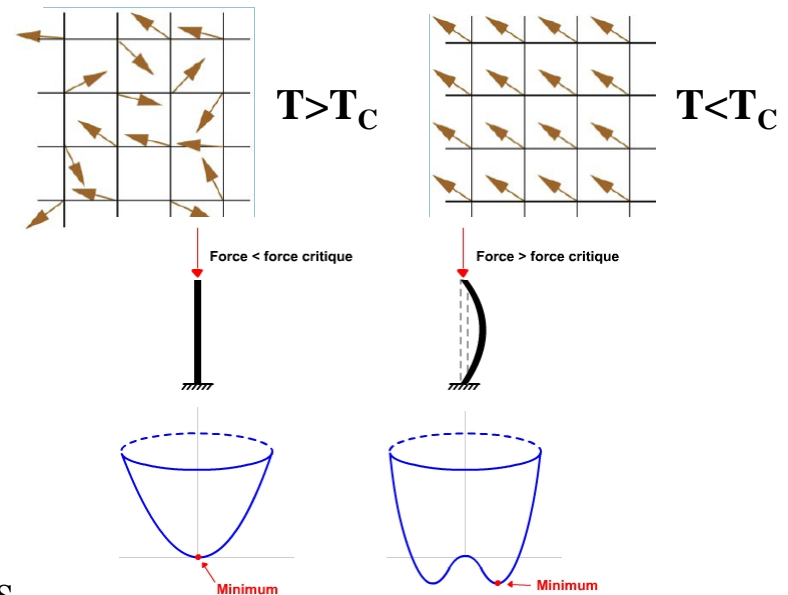
- Les interactions – et donc les équations – respectent une symétrie mais la solution des équations la brise

- **Exemples de brisure spontanée de symétrie**

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

- **Mécanisme de Higgs**

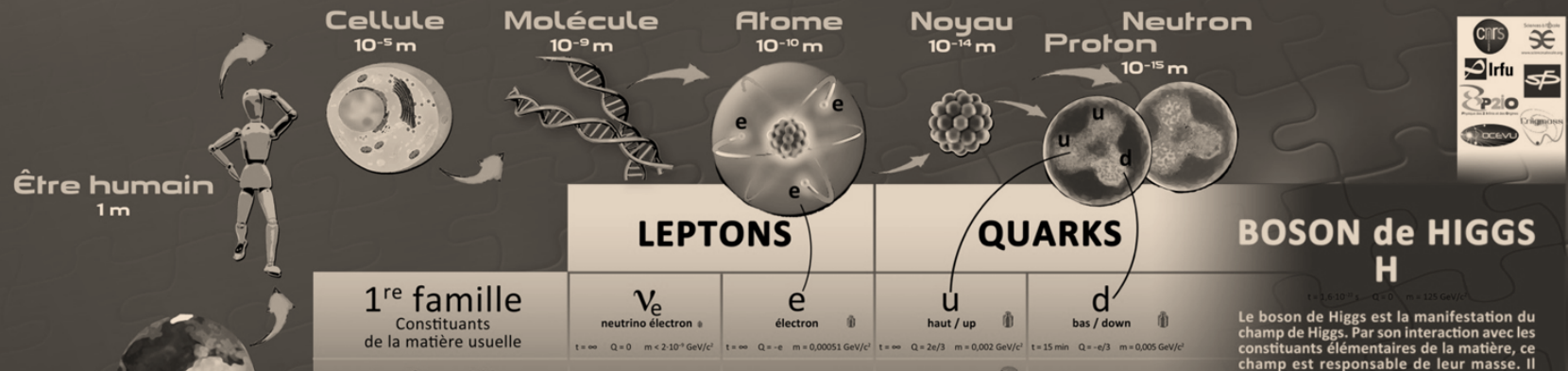
- Degrés de liberté supplémentaires introduits « à la main » dans la théorie : champ de Higgs
- Permet de **résoudre deux problèmes**
  - **Théorie électrofaible** devient renormalisable
  - **Les particules** acquièrent une masse par interaction avec le champ de Higgs
- **Au moins une nouvelle particule: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





# Matière et antimatière

## Composants élémentaires de la matière



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

Particule / antiparticule :

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

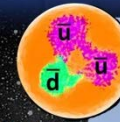
Nombres quantiques opposés (ex : charge électrique)

Exemple : électron / positron

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.



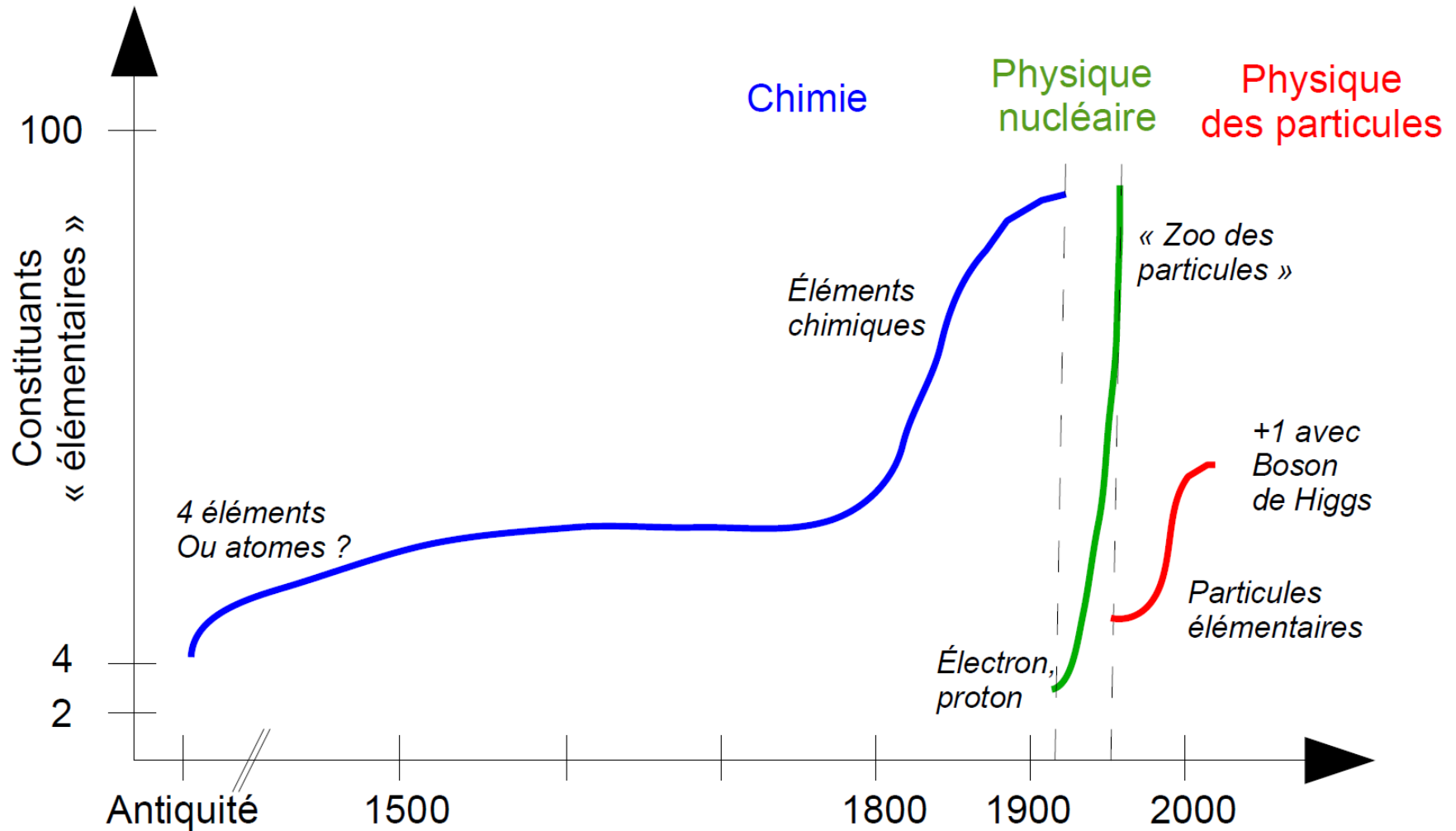
Antiproton

### 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.

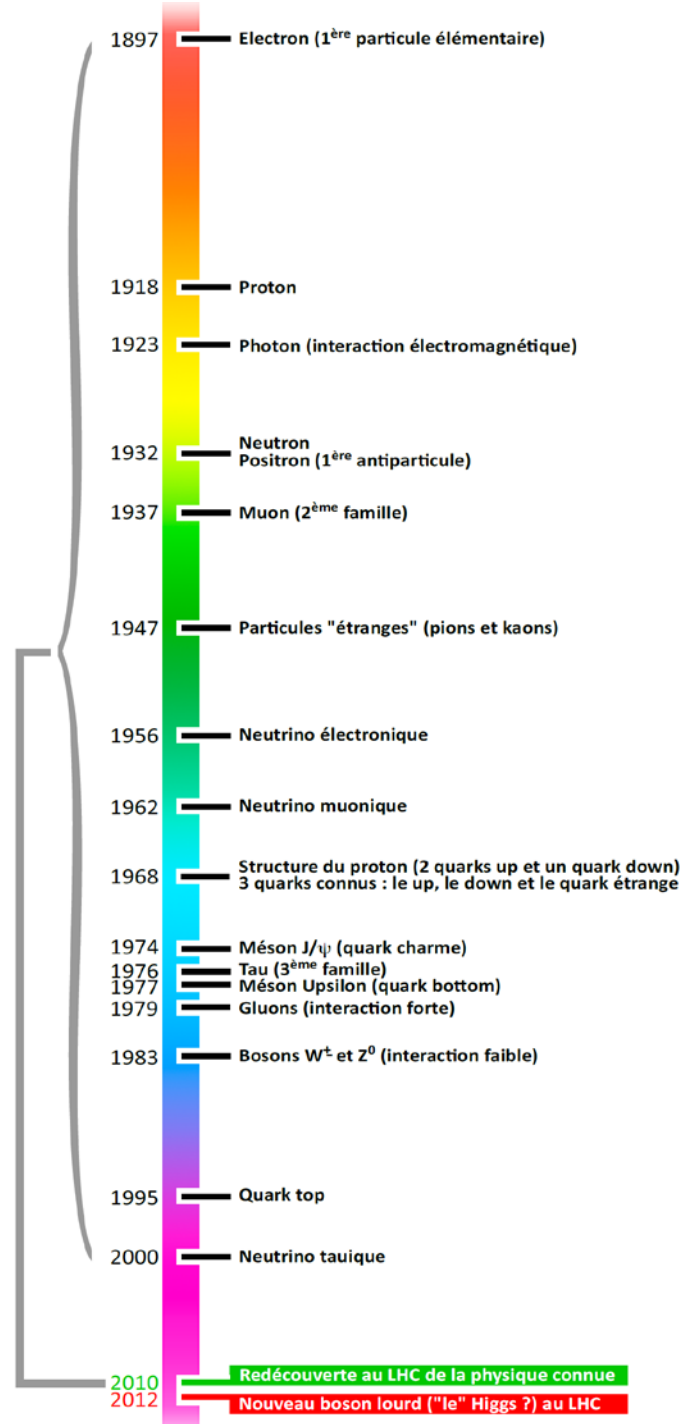
# A la bourse des particules « élémentaires »

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



# Une Chronologie

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

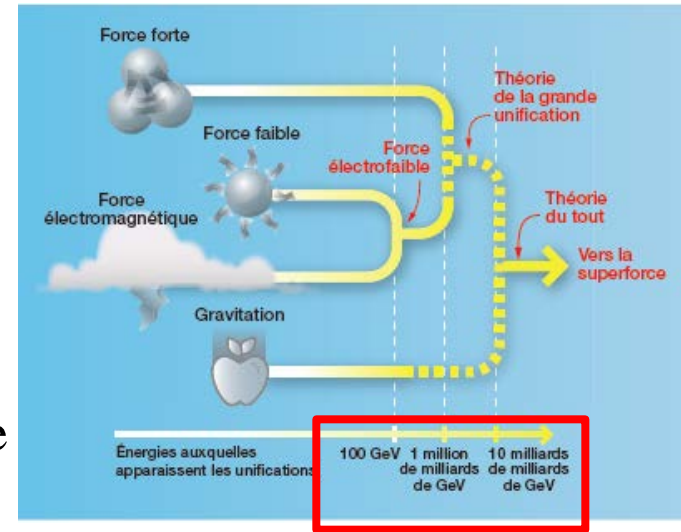


# Questions ouvertes

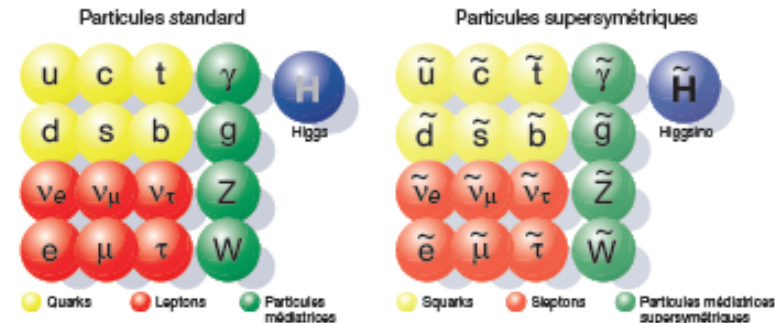
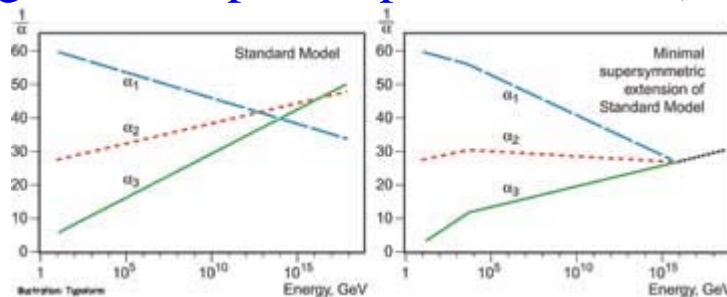


# Unification des forces

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



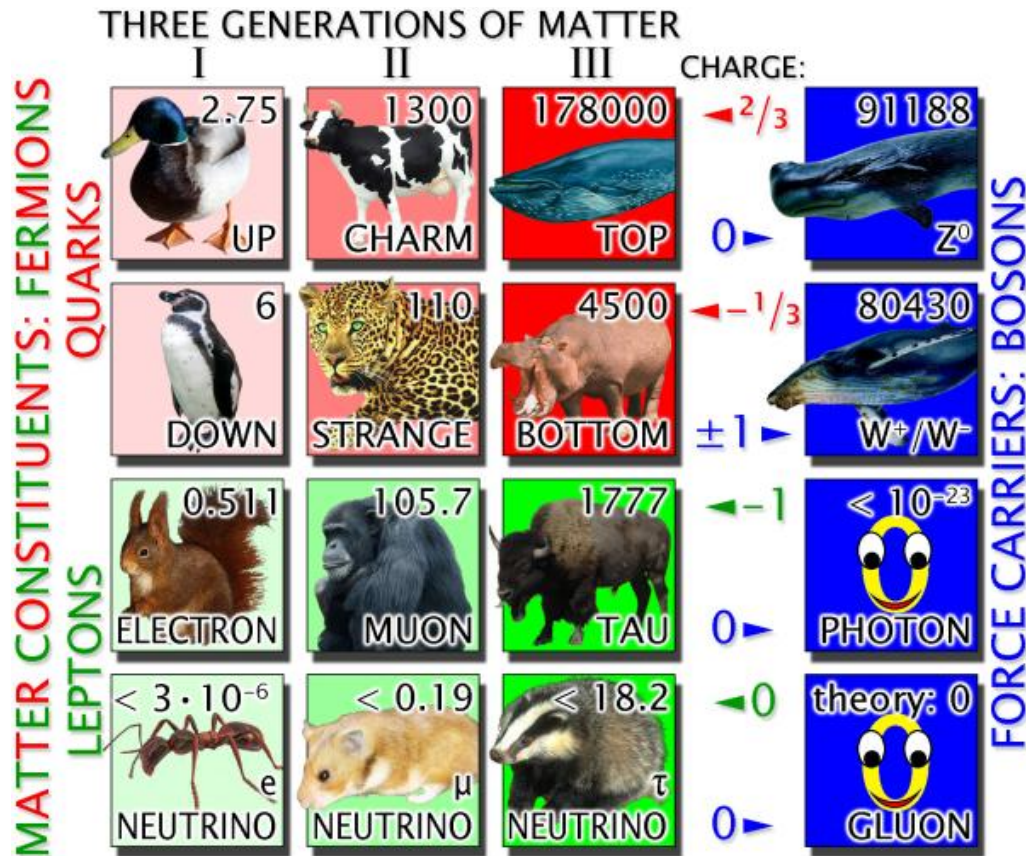
- Les unifications suivantes auraient lieu à des **échelles d'énergie extrêmes**
  - Très difficile de tester des théories unifiées
  - **Désintégration du proton pas observée** ( $\tau > 10^{32}$  années)



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

# La diversité des masses des particules élémentaires

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

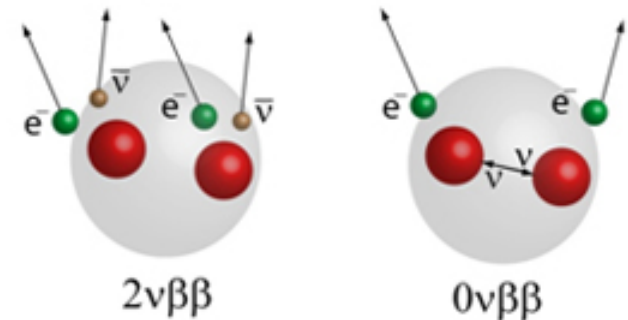
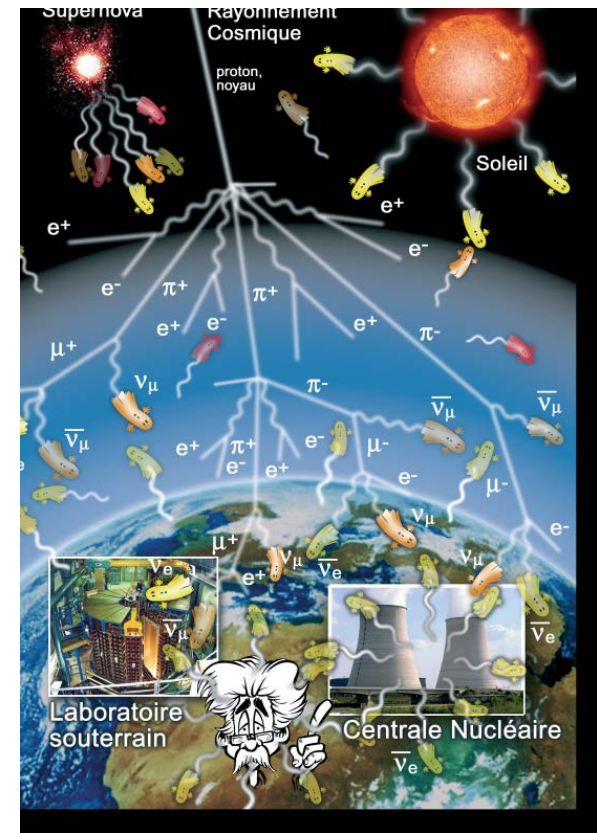


ALL MASSES IN MEV;  
ANIMAL MASSES  
SCALE WITH  
PARTICLE MASSES

The Standard Model  
fundamental particle zoo

# Les neutrinos

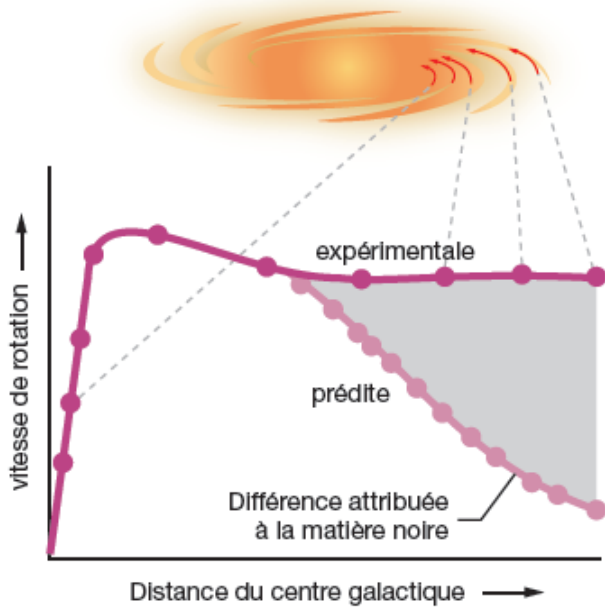
- D'où vient la masse des neutrinos ?
- Particules « inventées » en 1930 par Pauli
- Finalement découvertes en 1956 (Reines & Cowan)
- Elles baignent l'Univers mais interagissent très peu avec la matière  $\Rightarrow$  presque indétectables
- Sans masse pour le Modèle Standard
  - En contradiction avec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



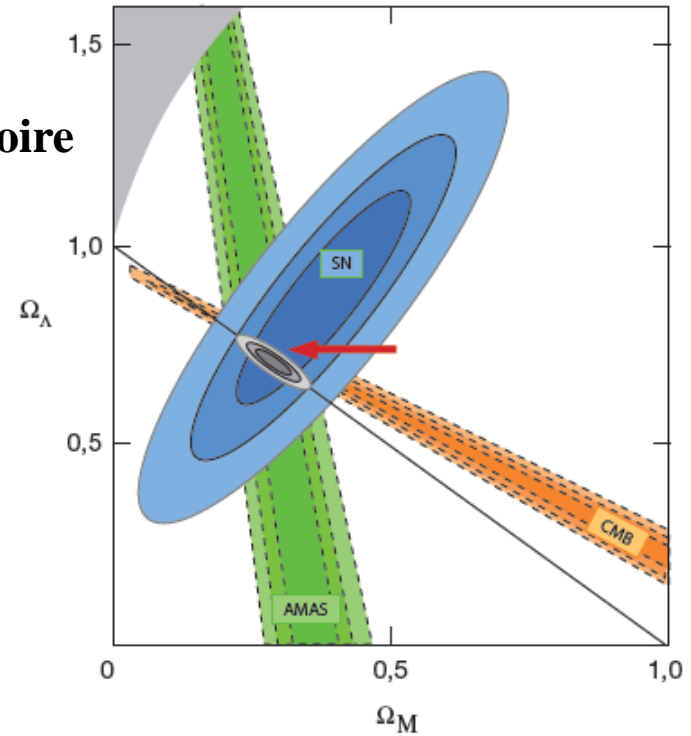


# Matière noire & énergie noire

- **Origine et constitution inconnues**

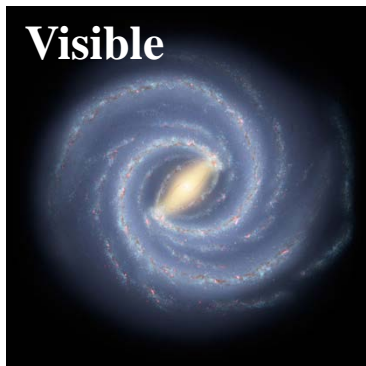


**Énergie noire**  
~ 70%

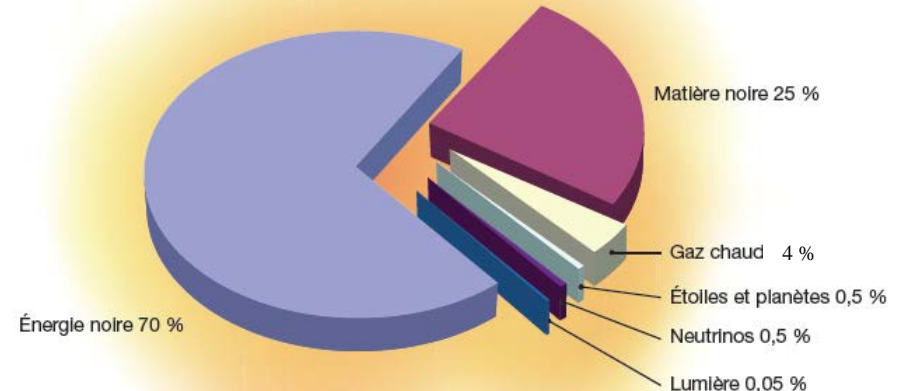


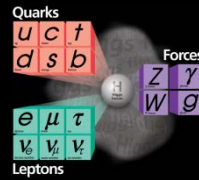
**Matière**  
~ 30%

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

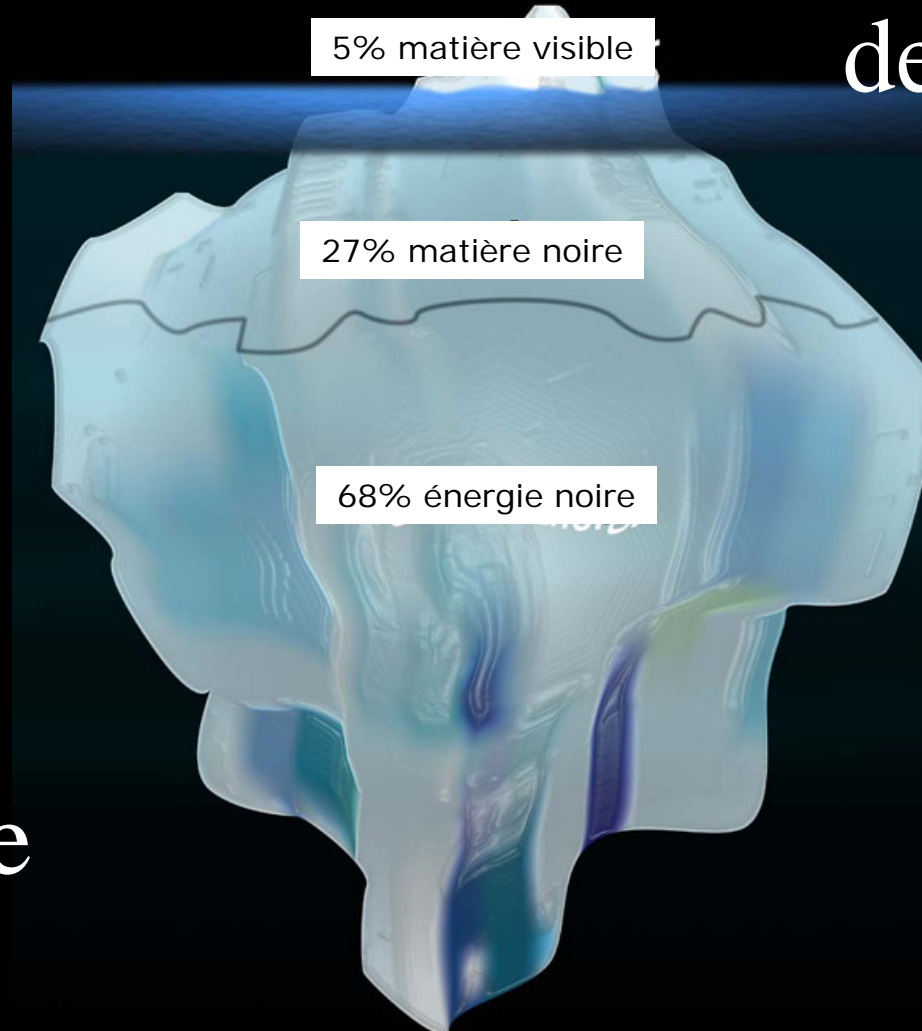


Représentations de la Voie lactée





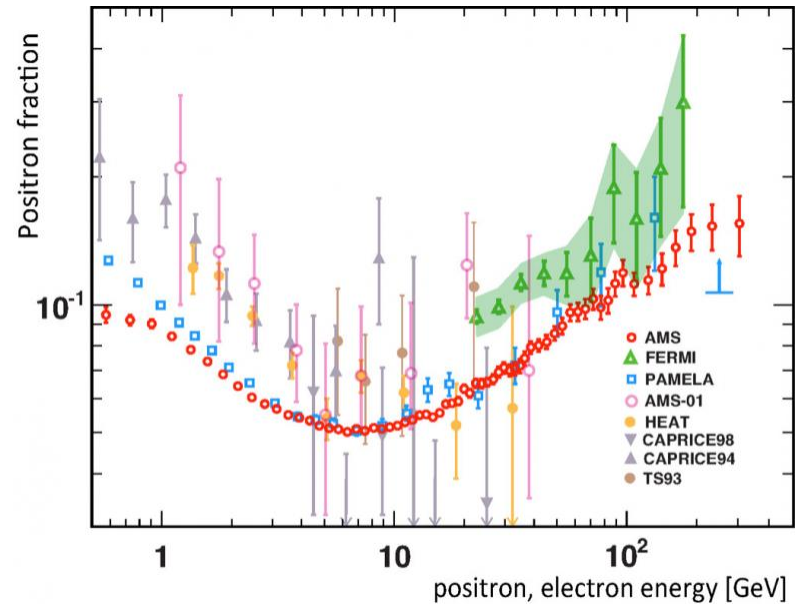
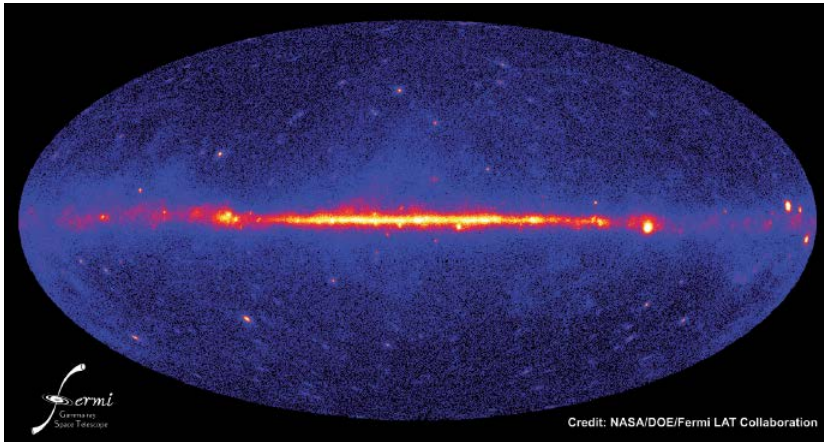
# Le contenu énergétique de l'Univers



Résultats  
du satellite  
Planck  
(2013)

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

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



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

# L'inflation a-t-elle existé ?

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



# **Accélérateurs de particules**

# L'électron-volt et ses multiples

## L'électron-volt

L'électron-volt (noté eV) est l'énergie acquise par une particule de charge élémentaire soumise à une différence de potentiel de 1 volt. C'est une unité très petite ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule) mais dont les multiples sont bien adaptés à l'infiniment petit.

1 000 eV : 1 kiloélectron-volt (symbole keV)

1 000 keV : 1 mégaélectron-volt (MeV)

1 000 MeV : 1 gigaélectron-volt (GeV)

1 000 GeV : 1 téraélectron-volt (TeV)

CNRS-IN2P3 / Bruno Mazoyer - LAL Orsay

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ )	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

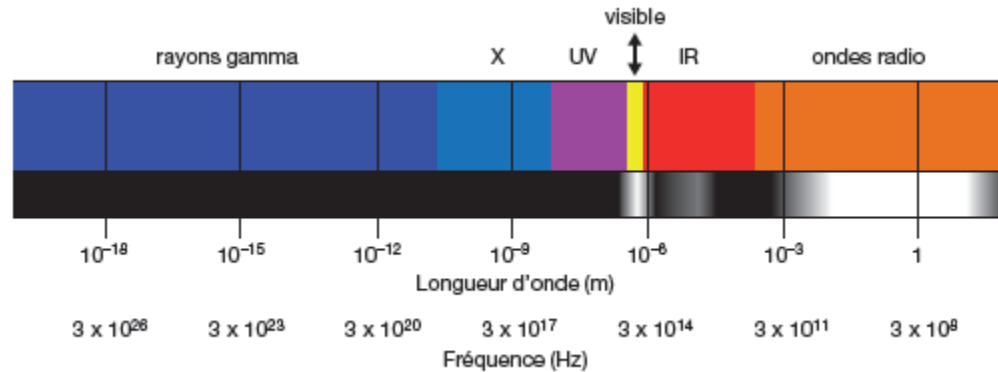
© Sébastien Descotes-Genon

**Unités naturelles:** Cte de Planck  $\hbar =$  vitesse de la lumière  $c = 1$ :

$$\implies 1 \text{ eV} = 1 / (0.2 \mu\text{m}) = 10^{-36} \text{ kg} = 1 / (0.7 \text{ fs})$$

# 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

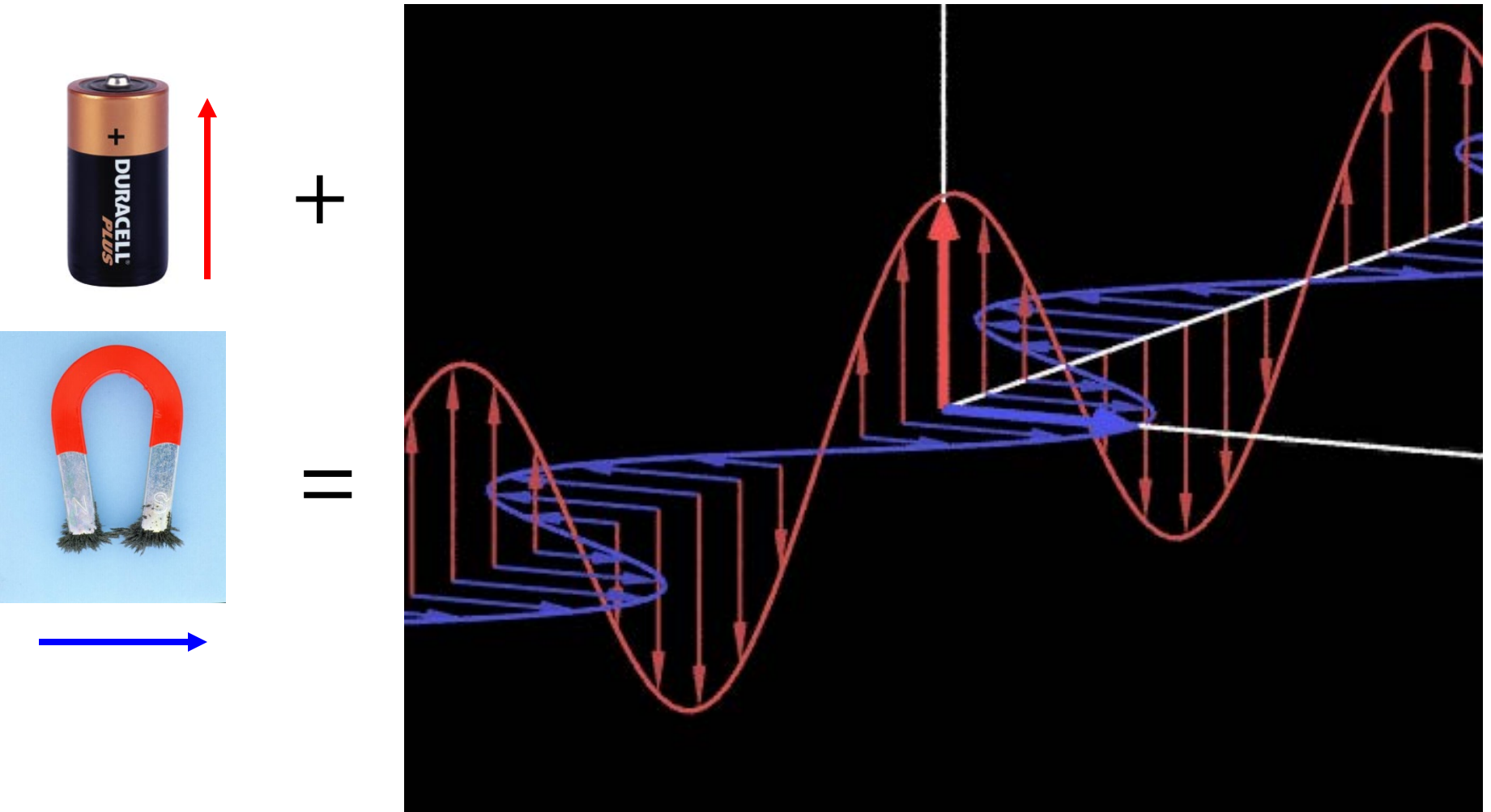
## • Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

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



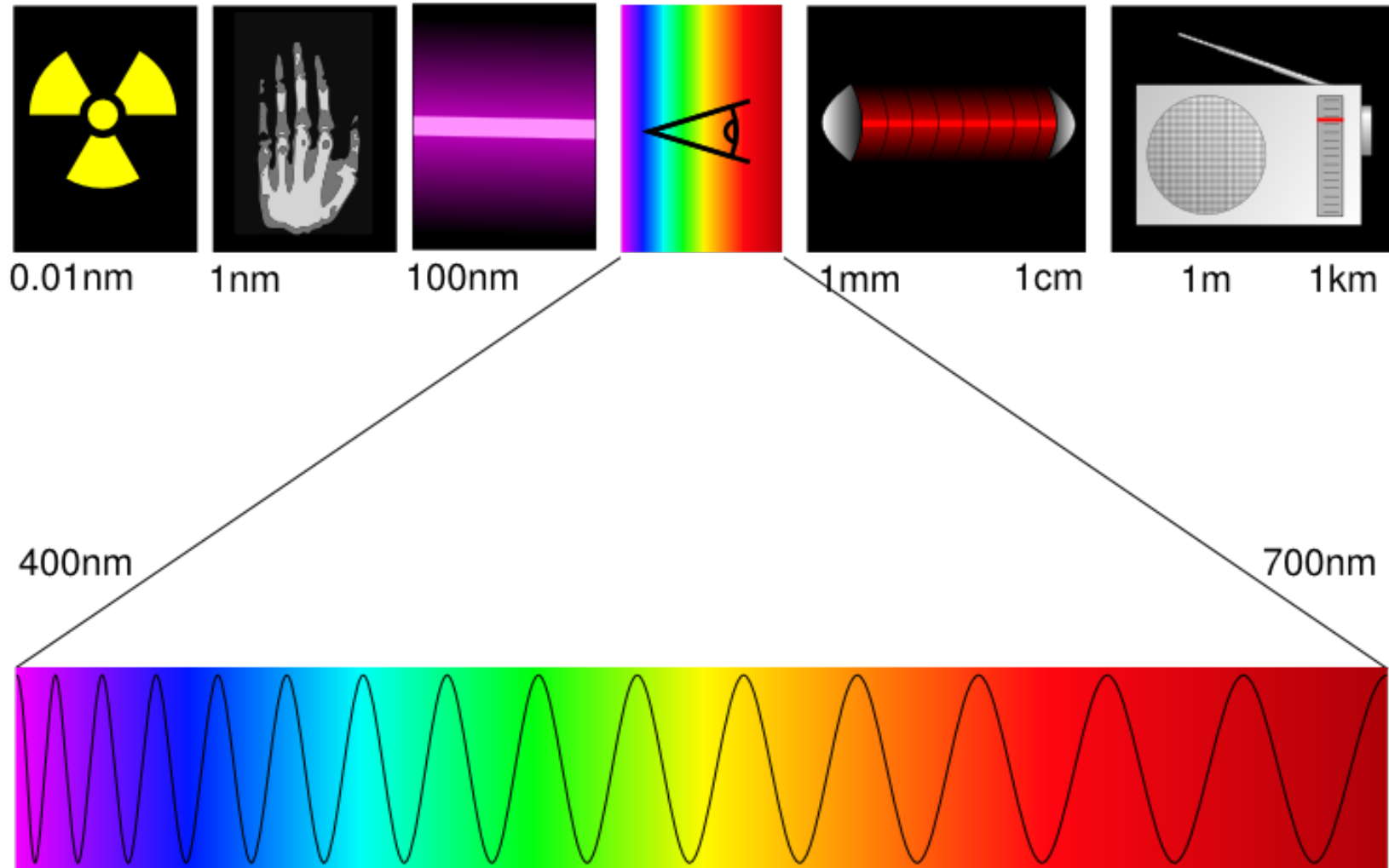
# Ondes électromagnétiques



- Champ électrique
- Champ magnétique

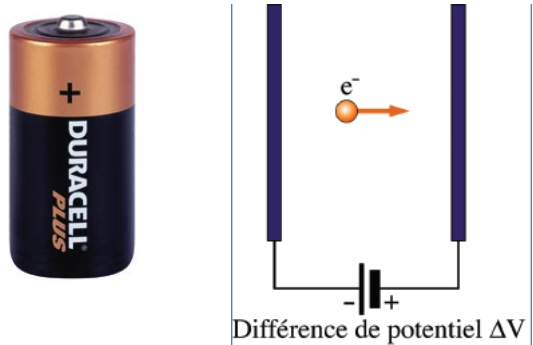
# Spectre électromagnétique

- Des rayons gamma énergétiques aux ondes radio

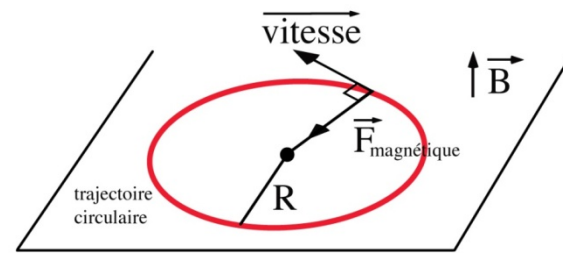


# Les accélérateurs de particules

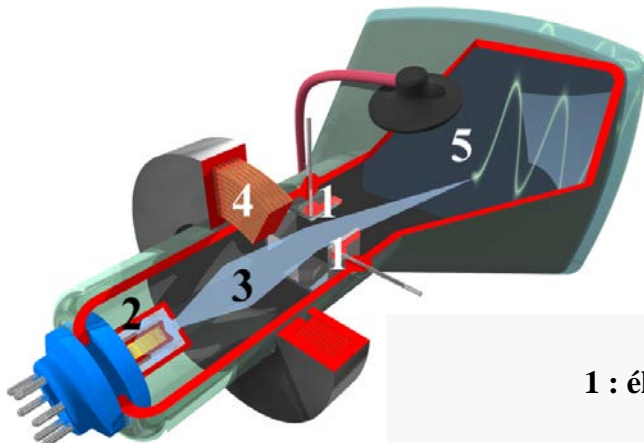
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



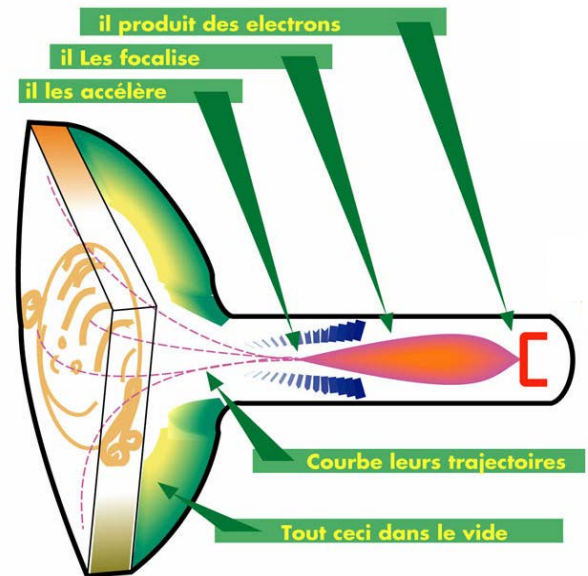
- On les pilote avec des champs magnétiques



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

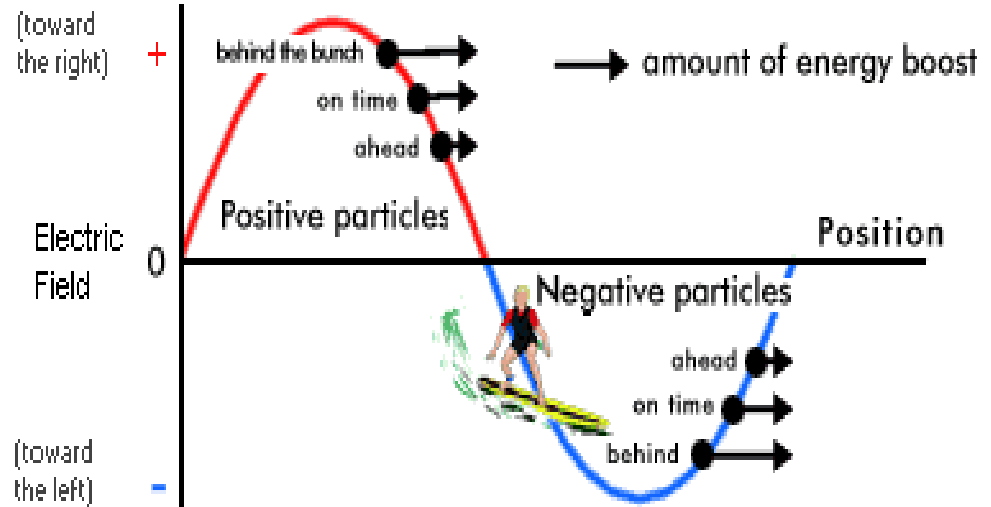
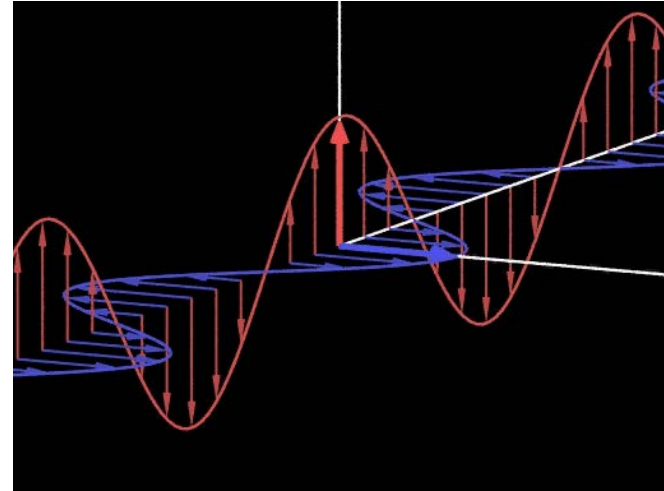


**Tube d'oscilloscope**  
1 : électrodes dévient le faisceau  
2 : canon à électrons  
3 : faisceaux d'électrons  
4 : bobine pour faire converger le faisceau  
5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore



# Accélération de particules chargées

- Les particules « surfent » sur une onde électromagnétique de très haute fréquence (~400 MHz)

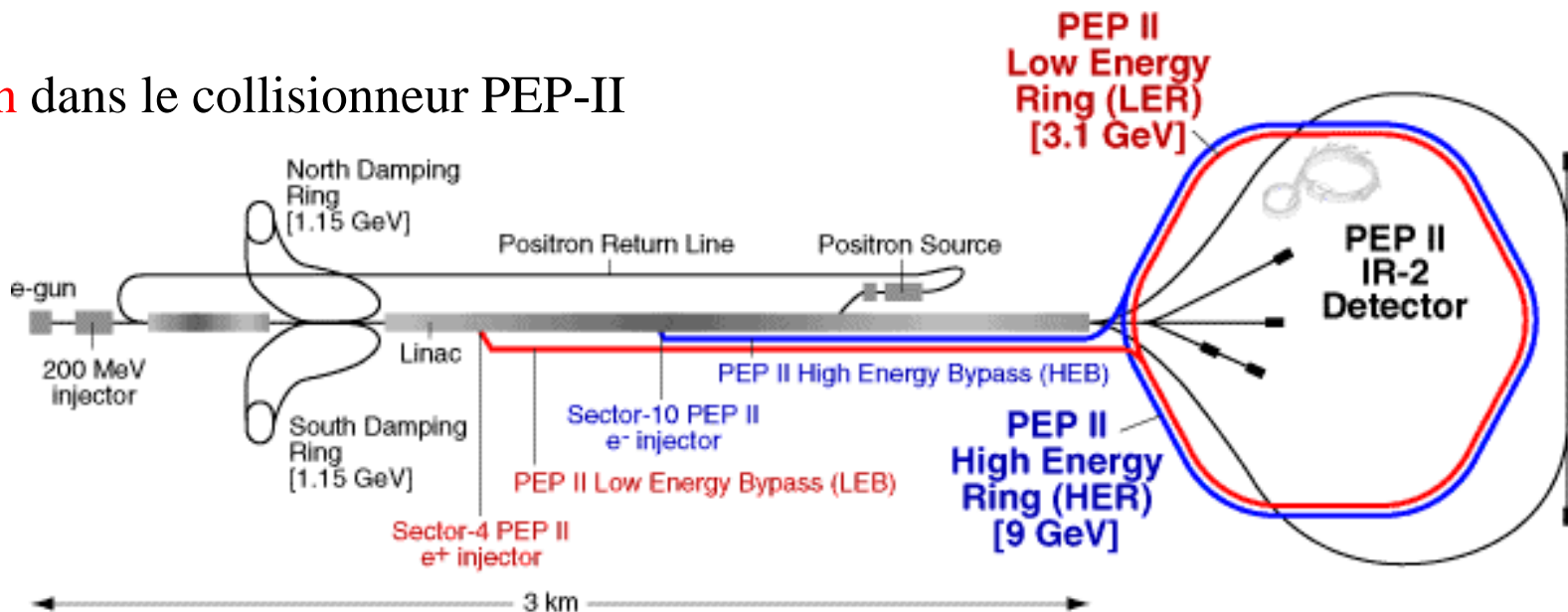


L'accélérateur linéaire de SLAC  
(Californie) : 2 miles (3,2 km) de long



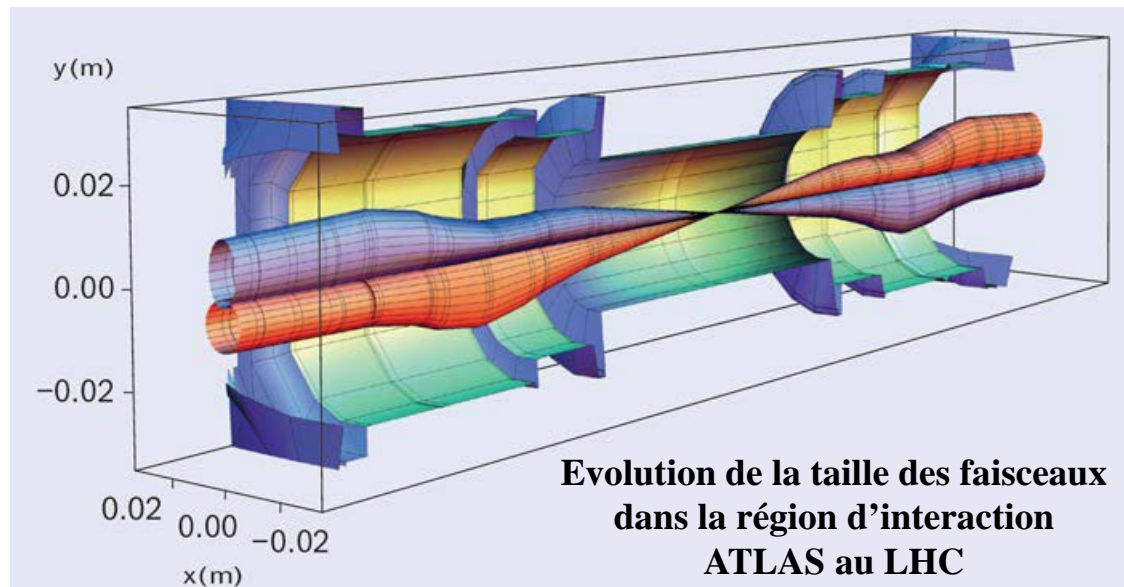
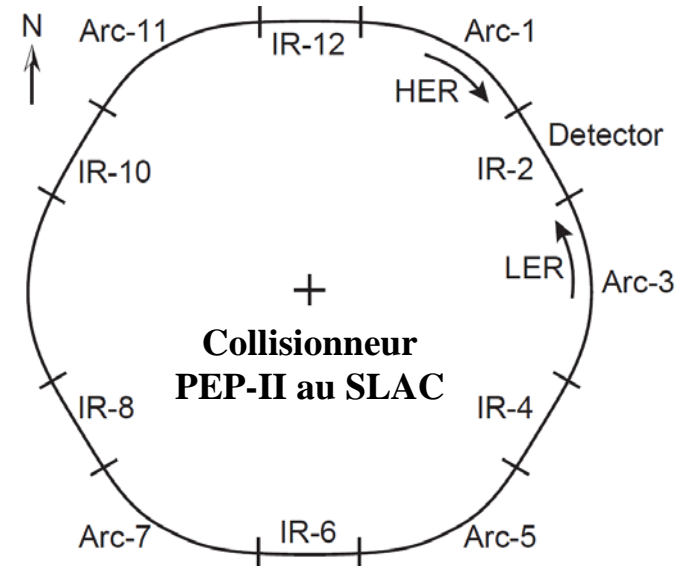
# Un exemple d'accélérateur linéaire (SLAC)

- **Electrons** produits par chauffage d'une cathode
- **Positrons** produits par collision d'un faisceau d'électrons de 20 GeV sur une cible fixe
- Mise en **paquets** des deux faisceaux, injection dans le LINAC, puis **mise en forme** dans des « anneaux d'amortissement »
- **Accélération** par onde électromagnétique très haute fréquence
  - Les particules quittent le LINAC une fois leur énergie nominale atteinte
- **Injection** dans le collisionneur PEP-II

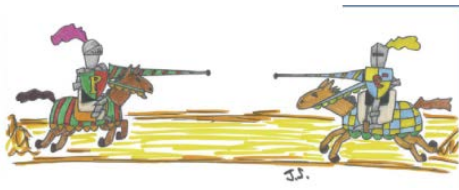


# Pilotage des particules chargées

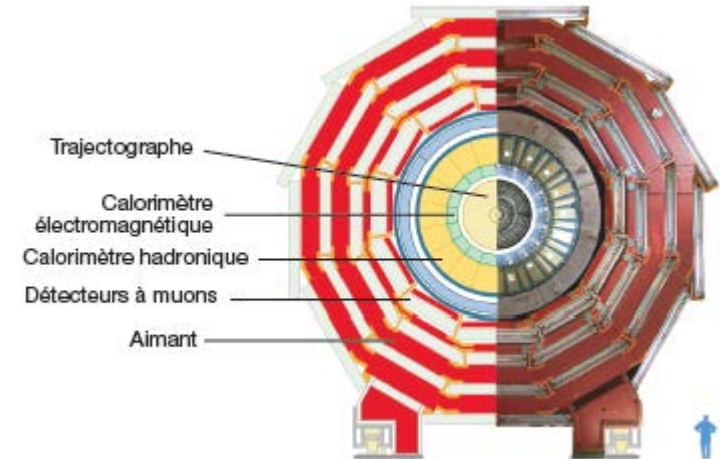
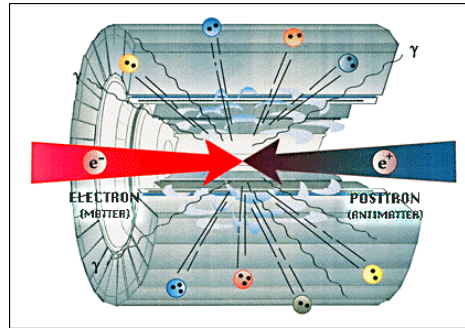
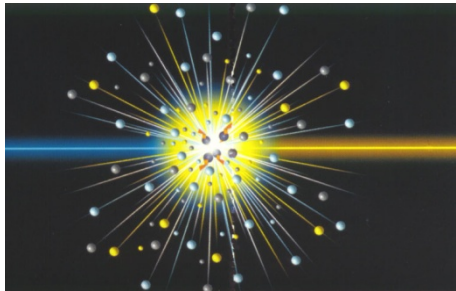
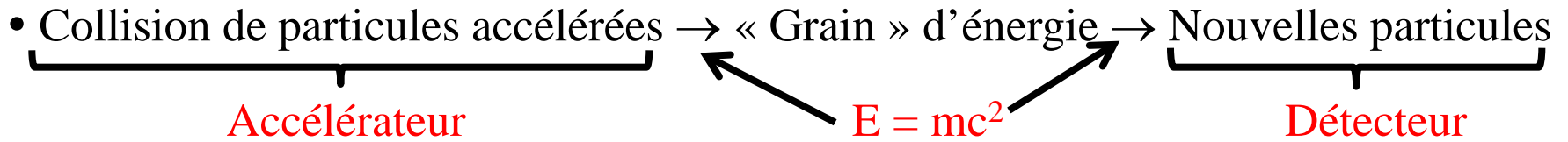
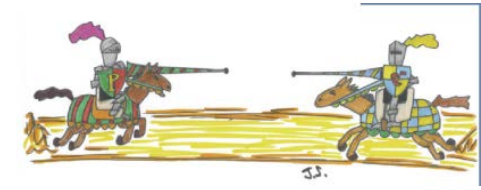
- Dipôles pour courber les trajectoires des particules
  - Maintien sur une orbite (quasi-)circulaire
    - Alternance de sections droites (accélération) et d'arcs de cercle (lumière synchrotron)
- Actions sur la forme du faisceau :
  - Quadrupoles, sextupoles, etc.
    - Taille transverse (minimale au point de collision)
- Taille transverse du faisceau
  - $\sigma^2 \propto \varepsilon \times \beta$
  - **Emittance**  $\varepsilon$ 
    - « Qualité du faisceau »
  - **Fonction d'amplitude**  $\beta$ 
    - Configuration des aimants



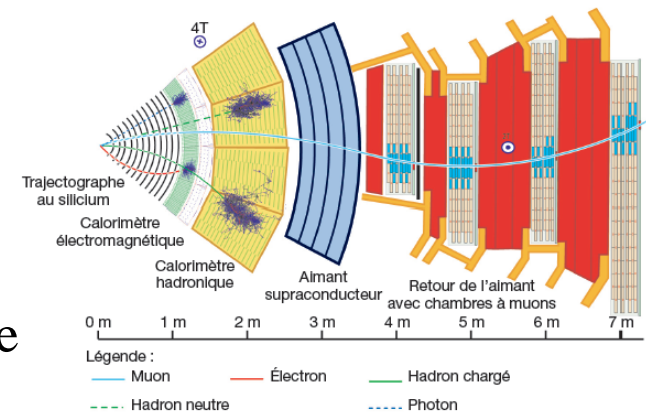
Evolution de la taille des faisceaux dans la région d'interaction ATLAS au LHC



# 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 ...





# Sections efficaces et luminosité

- Formule fondamentale :  $R = \sigma \mathcal{L}$ 
    - $R$  : taux d'occurrence d'une réaction [Hz]
    - $\sigma$  : section efficace du phénomène [ $\text{cm}^2$ ]
    - $\mathcal{L}$  : luminosité [ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
- Caractéristique fondamentale de l'accélérateur

- Unité plus « usuelle » : le barn (b)

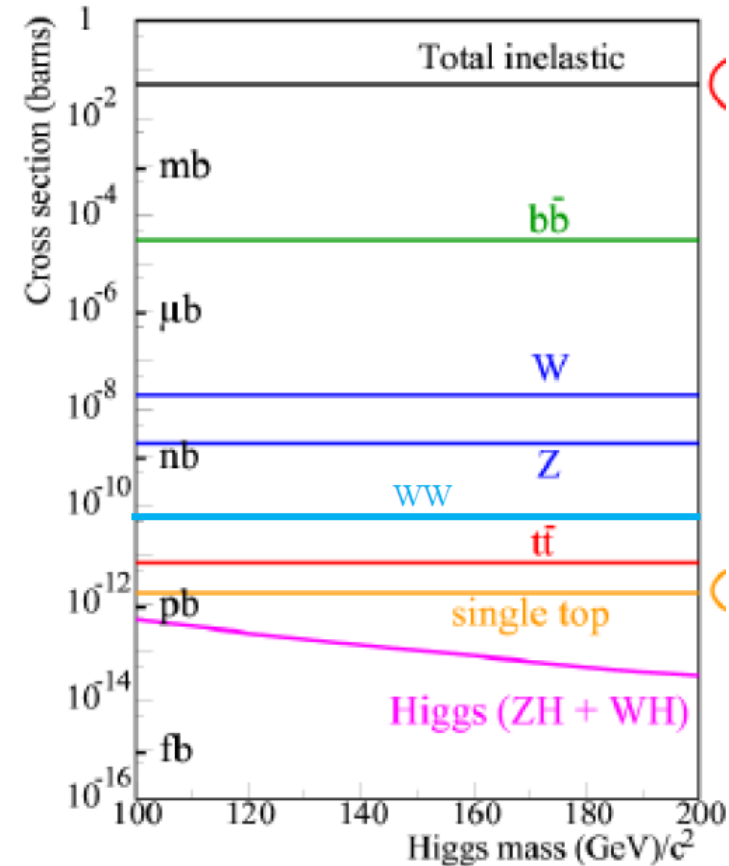
- 1 barn =  $10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- mb,  $\mu\text{b}$ , nb, pb, fb

- On exprime la luminosité en  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  mais la luminosité intégrée en « {m,  $\mu$ , n, p, f}b inverse »

- Prise de données :  $\sim 10^7 \text{ s / an}$
- Attention : plus le préfixe est « petit », plus la luminosité intégrée est élevée :  $1 \text{ fb}^{-1} = 1000 \text{ pb}^{-1}$

- Expression simplifiée de la luminosité

- $f$  : fréquence de croisement
- $n_1$  et  $n_2$  : nombres de particules par paquet
- $\sigma_x \sigma_y$  : taille transverse des paquets – profil gaussien



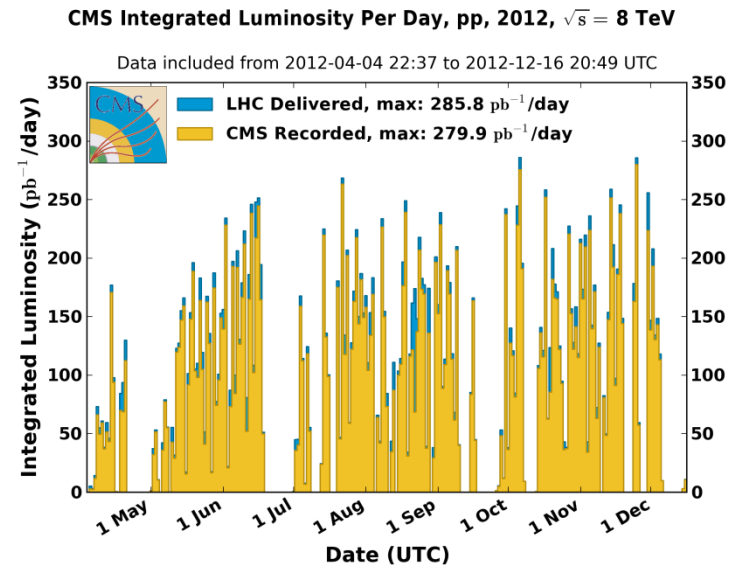
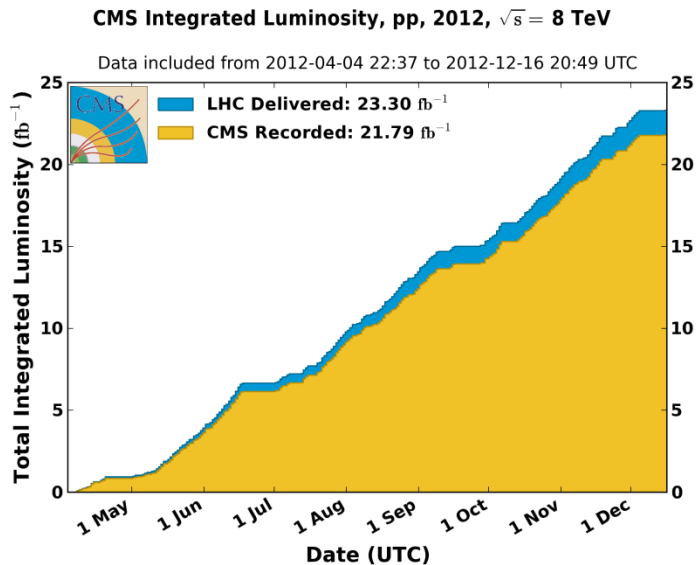
Ulrich Heintz - Moriond QCD

$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

# Exemple de performances d'un « couple » accélérateur-détecteur : LHC-CMS en 2012

- Evolution de la luminosité intégrée en fonction du temps

- Comparaison des luminosités délivrée par l'accélérateur et enregistrées par le détecteur

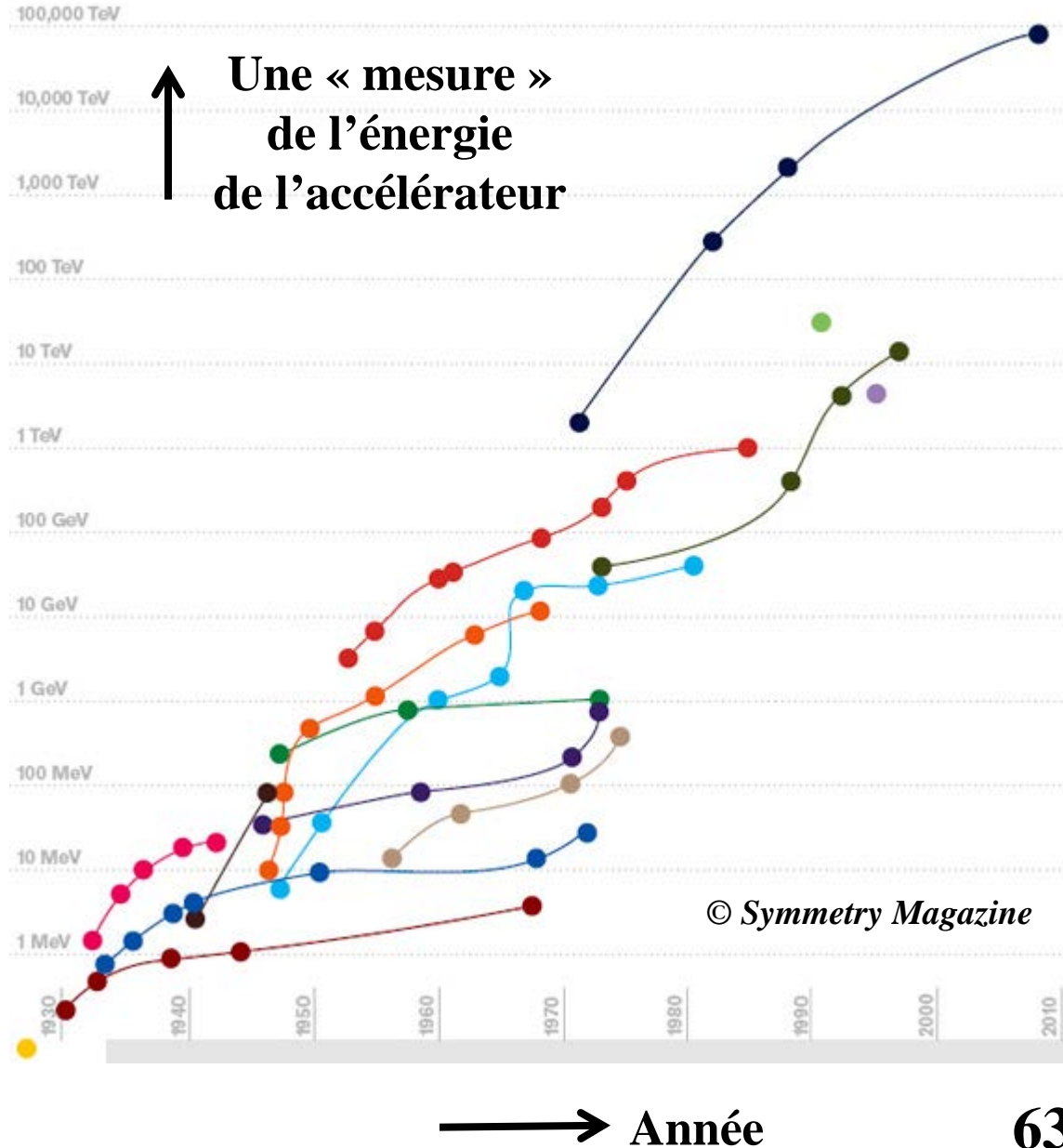
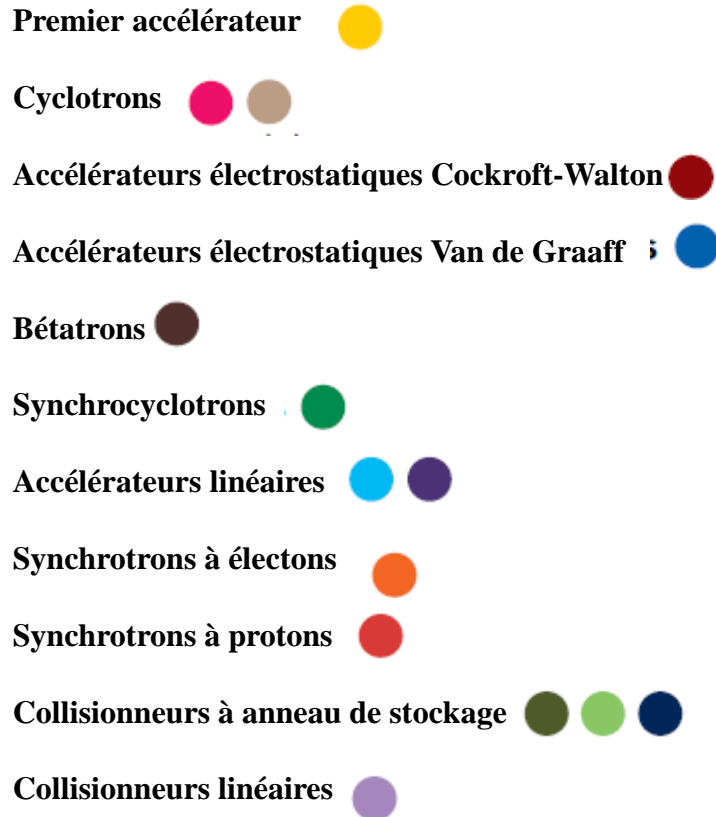


$$L_{\text{intégrée}} = 50 \text{ fb}^{-1} \left( \frac{L_{\text{instantanée}}}{5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}} \right) \left( \frac{\text{Temps de prise de données}}{10^7 \text{ s}} \right)$$

Année calendaire  $\approx 3,16 \times 10^7$  s ; « cycle utile » du LHC en 2012 : 36,5%

# Progrès des accélérateurs

- Diagramme de Livingston



# Progrès des accélérateurs

## First accelerator ●

Most accelerators in operation today, including thousands of machines used for treating the surfaces of materials, apply the same principle of resonance acceleration that Norwegian engineer Rolf Widerøe explored when he built the world's first accelerator in Aachen, Germany in 1928. His linear accelerator, or linac, powered by an alternating voltage, propelled potassium ions through an 88-cm-long glass tube, achieving an energy gain equivalent to twice the peak voltage he used. This proof of principle opened the door to a vast new field of research and many types of accelerators.

## Cyclotrons ●●

More than 350 cyclotrons around the world produce radioactive isotopes for medical applications, such as PET scans. Inspired by Widerøe's success, Ernest Lawrence and his student M. Stanley Livingston built the first of these circular accelerators, about four inches in diameter, and operated it in 1931 in Berkeley. **(A)** The cyclotron's magnetic field forces particles to travel in spirals. On each turn, the particles cross an electric field, which accelerates them to higher energy.

## Cockcroft-Walton electrostatic accelerators ●

In 1932, John Cockcroft and Ernest Walton became the first scientists to split the atomic nucleus with artificially accelerated particles when they aimed a proton beam from a new type of accelerator at the nuclei of lithium atoms. Physicists still use Cockcroft-Walton accelerators to deliver strong, steady streams of low-energy protons. The machines can turn alternating currents into electrostatic fields corresponding to more than one million volts.

## Van de Graaff electrostatic accelerators ●

Scientists used this type of accelerator for several decades in physics and biomedical research. Commercial companies now build modern versions of this machine. Invented at Princeton University in the 1930s, the accelerator generates a high voltage by charging a large sphere through a moving belt. In the early 1950s, the Massachusetts Institute of Technology donated its Van de Graaff machine to the Museum of Science in Boston, where visitors can still see it in action.

## Betatron ●

In 1940, Donald Kerst at the University of Illinois modified the design of the cyclotron to accelerate particles to higher energy. The betatron's large magnet provides a variable field and keeps particles on a circular orbit inside a beam pipe, a major step forward in accelerator technology. In 1957, Dr. O. Arthur Stenon opened in Wisconsin the first private medical center to treat cancer patients with a betatron. Because of cost and size limitations, demand for betatrons started to fall in the 1970s.

## Synchrocyclotrons ●

For many years physicists struggled to build accelerators that work for both low- and high-speed particles. The problem is that slow particles gain energy and speed when traveling through an electric field while particles traveling close to the speed of light gain energy while barely speeding up at all, a phenomenon explained by the theory of special relativity. This creates a timing problem in accelerators with electric fields that alternate at constant frequency. The synchrocyclotron, invented in the 1940s but no longer built today, solved the problem by introducing an electric field with variable frequency, paving the way for even better accelerators.

## Linear accelerators ●●

Physicists built the first modern linear accelerators after World War II, using microwave technology developed for radar. Today, thousands of hospitals use linacs for radiotherapy in cancer treatment. **(B)** Linacs use radio-frequency waves to create electric fields inside cylindrical cavities. Luis Alvarez built the first standing-wave linac to accelerate protons at the University of California, Berkeley, in 1946. William Hansen and his team at Stanford University constructed the first traveling-wave linac to accelerate electrons in 1947. High-energy accelerators often rely on a standing-wave linac to give heavy particles an initial boost before injecting them into the circular machines that accelerate them to high energy.

## Electron synchrotrons ●

The operation of the first electron synchrotron in the United States, at General Electric in 1946, led to the discovery of synchrotron radiation, the light emitted by charged, high-energy particles traveling in a circle. Today, more than 50 synchrotrons, known as lightsources, **(C)** produce intense beams of light for research in material science, chemistry, molecular biology, and other fields. By injecting particles into a synchrotron at close to the speed of light, scientists can operate its alternating electric field at an almost constant frequency. An adjustable magnetic field guarantees that the particles stay on a fixed circular path, so beams can circulate for long periods of time.

## Proton synchrotrons ●

Because protons are about 2000 times heavier than electrons, they must be accelerated to higher energies, and hence over longer distances, to attain relativistic speeds. The discovery in the 1950s of strong beam focusing, which controls the size of a particle beam through a series of magnets, allowed the construction of large, circular proton accelerators for nuclear and high-energy research, starting at Brookhaven National Laboratory and the European laboratory CERN. Hospitals have begun to use proton synchrotrons for cancer treatment.

## Storage ring colliders ●●●

Particle colliders have led to the discoveries of many subatomic building blocks and the forces that govern their behavior. Storage ring colliders are based on synchrotron technology. They accelerate two beams of particles in opposite directions and circulate them for hours. Every time the beams cross, a few particles collide. In the 1960s, scientists built the first electron-positron collider at Frascati, Italy, followed by machines in the United States and Russia. Today, colliders at KEK, Fermilab, Brookhaven—and, soon, CERN **(D)**—smash electrons, positrons, protons, antiprotons, and ions into each other. Scientists now are developing the technology for a proposed muon collider.

## Linear colliders ●

The Stanford Linear Accelerator Center started operating the world's first linear particle collider in 1989. Today, a worldwide collaboration of scientists is advancing plans for the proposed International Linear Collider, which would use superconducting radio-frequency (RF) cavities to accelerate electrons and positrons to much higher energy than achieved at SLAC. A collaboration based at CERN is developing a new linac concept, the Compact Linear Collider.

**Text:** Kurt Riesselmann

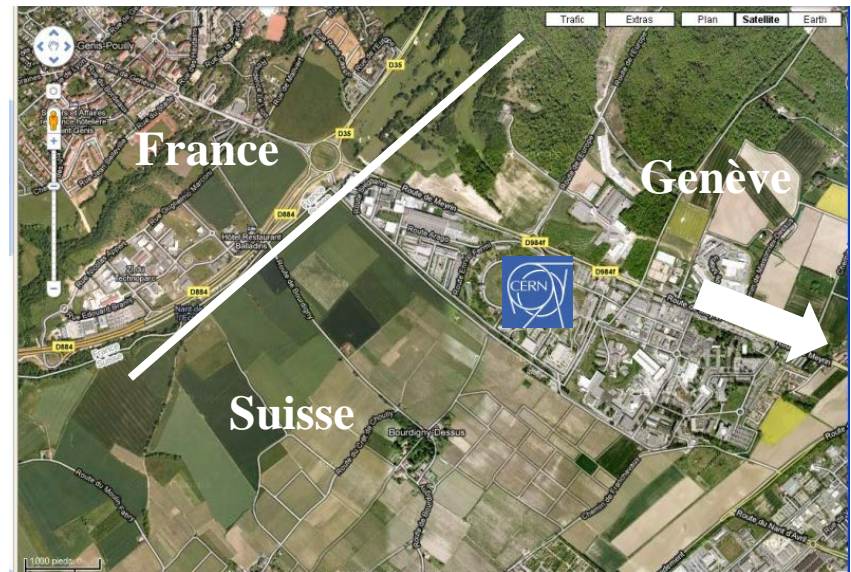
**Image:** Adapted from the 2001 Snowmass Accelerator R&D Report



# **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 !**

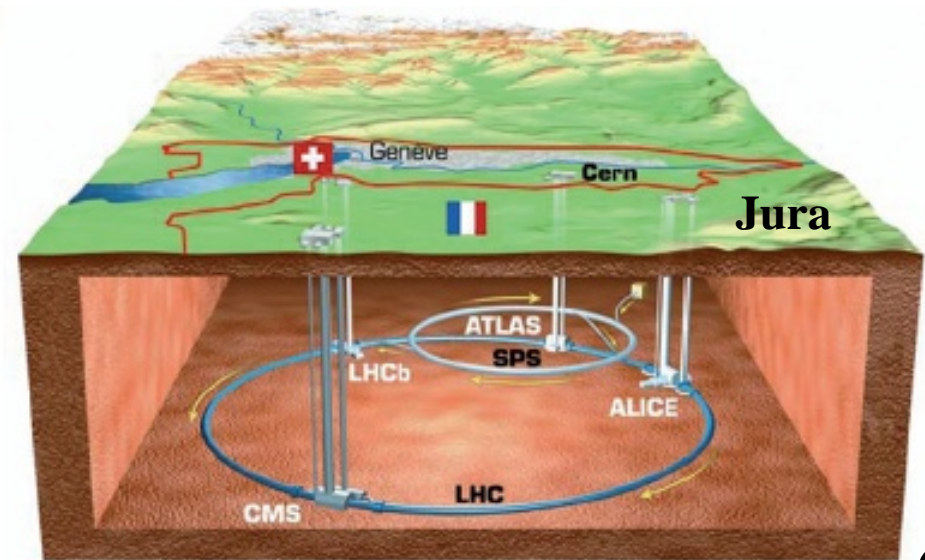


# Le LHC



L'ancêtre :  
Lawrence  
(1930)

- Anneau quasi-circulaire de  $\sim 27$  km de **circonférence** creusé à  $\sim 100$  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



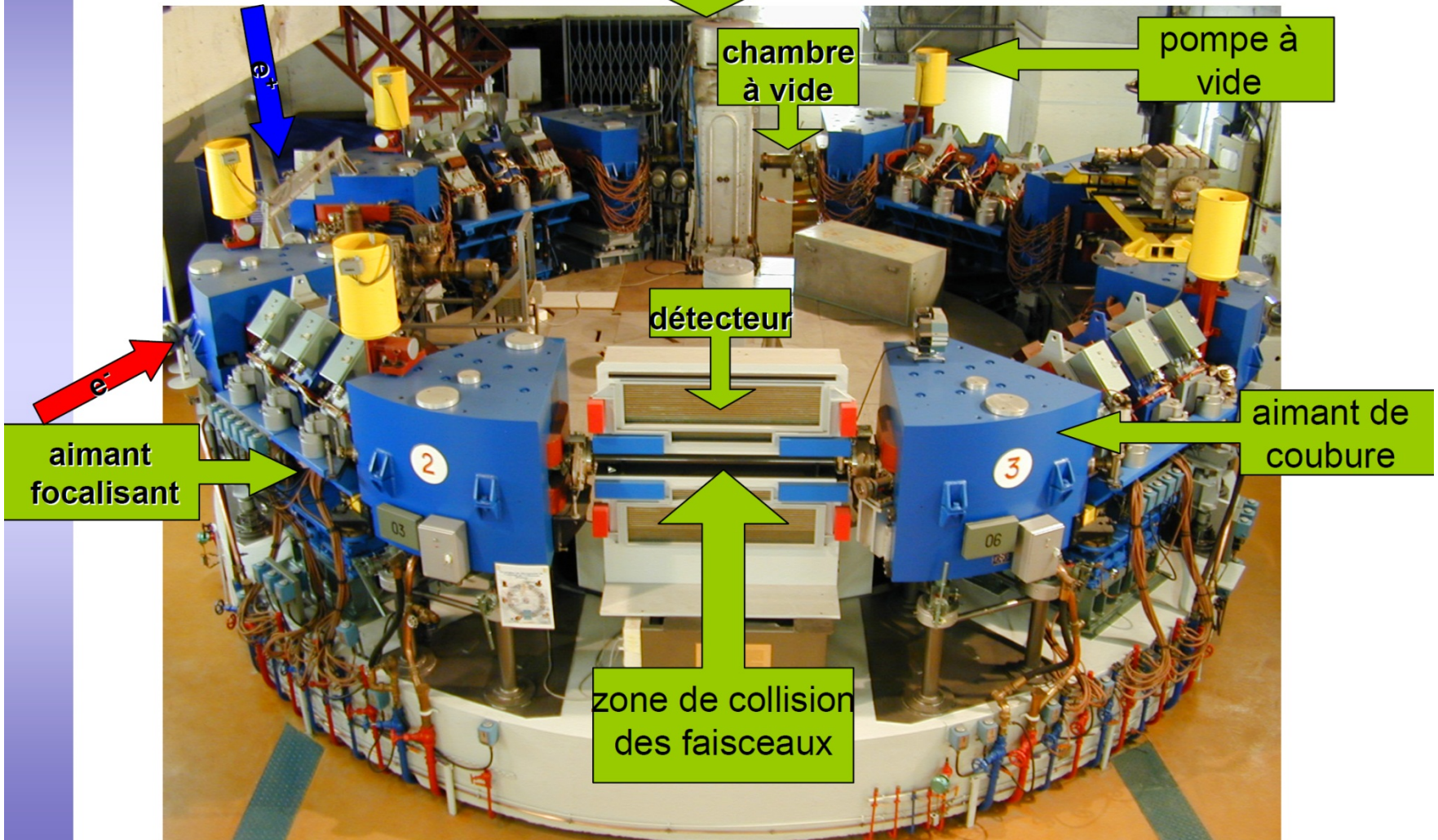


# Et ACO dans tout ça ?

**ACO**

dispositif  
d'accélération

**(1962-1988)**





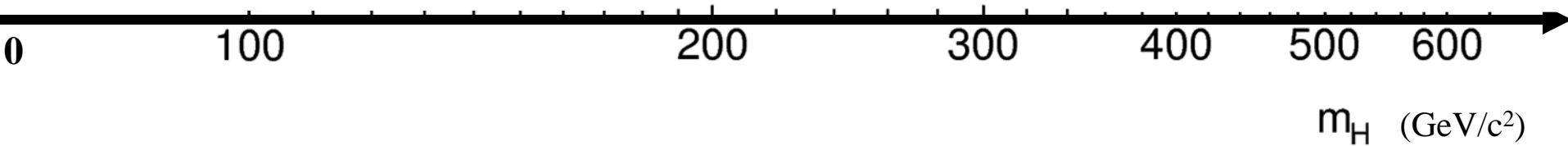
# Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **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**

# 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)

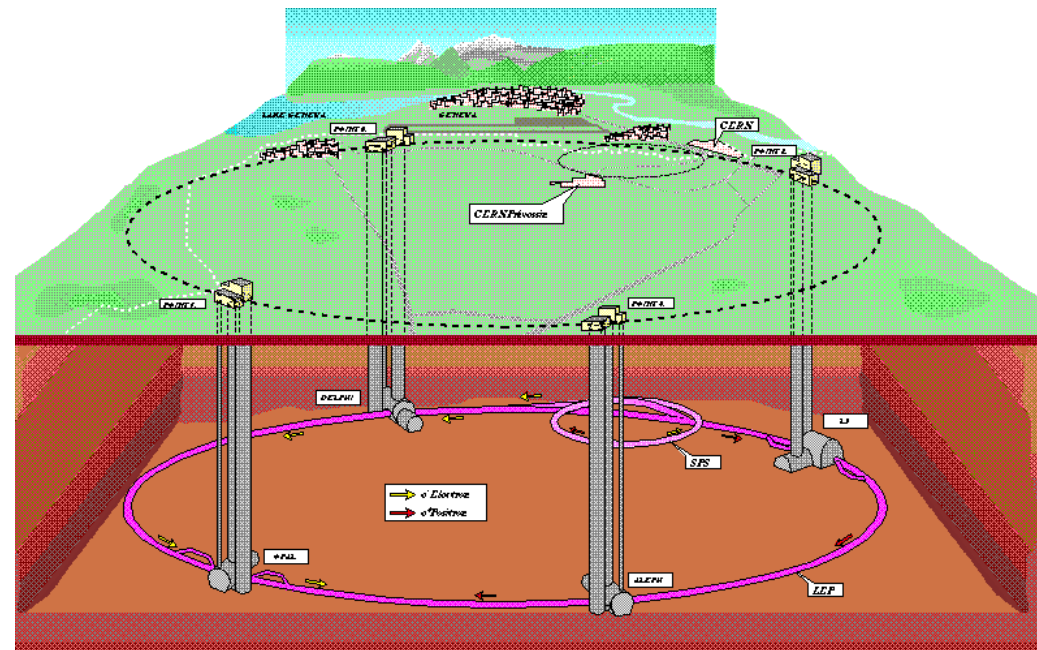
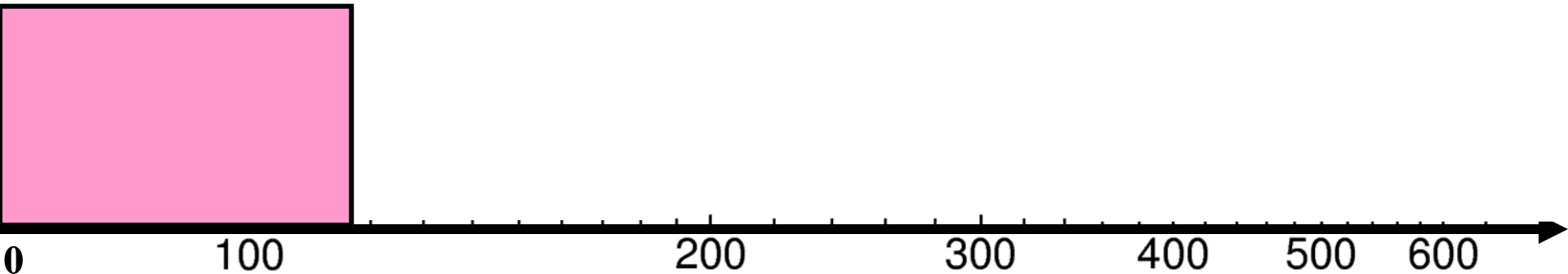
**GeV** = “Giga [ $10^9$ ] électron-Volt”

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

# La chasse au boson de Higgs

LEP

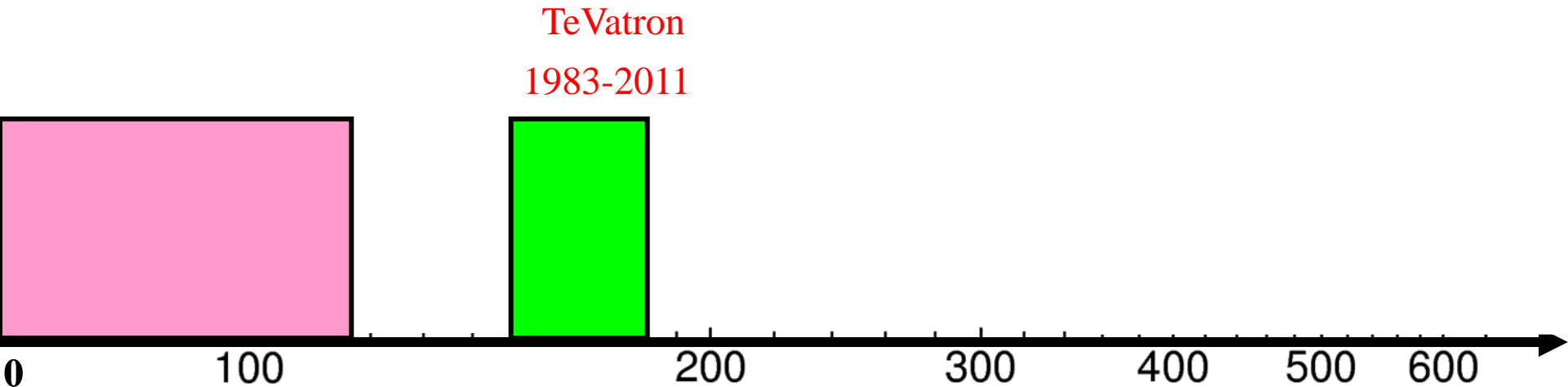
1989-2000



Le LEP au CERN  
(près de Genève)



# La chasse au boson de Higgs

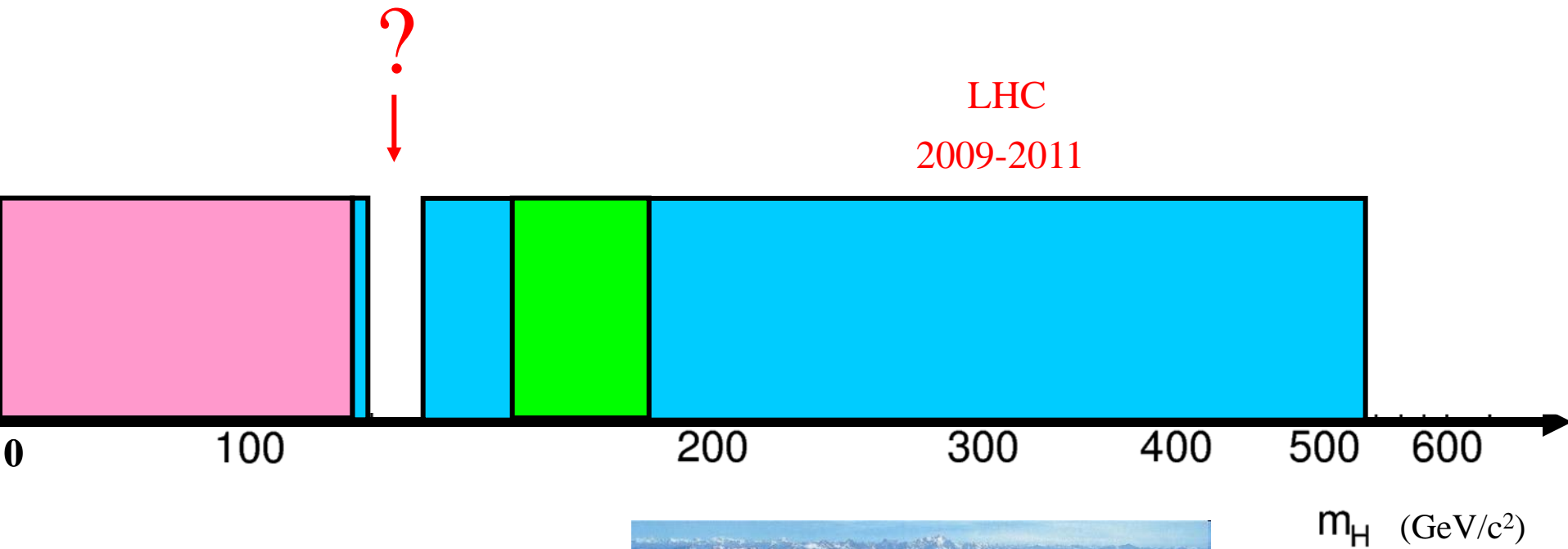


Le TeVatron  
à Fermilab  
(près de Chicago)



$m_H$  (GeV/c<sup>2</sup>)

# 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

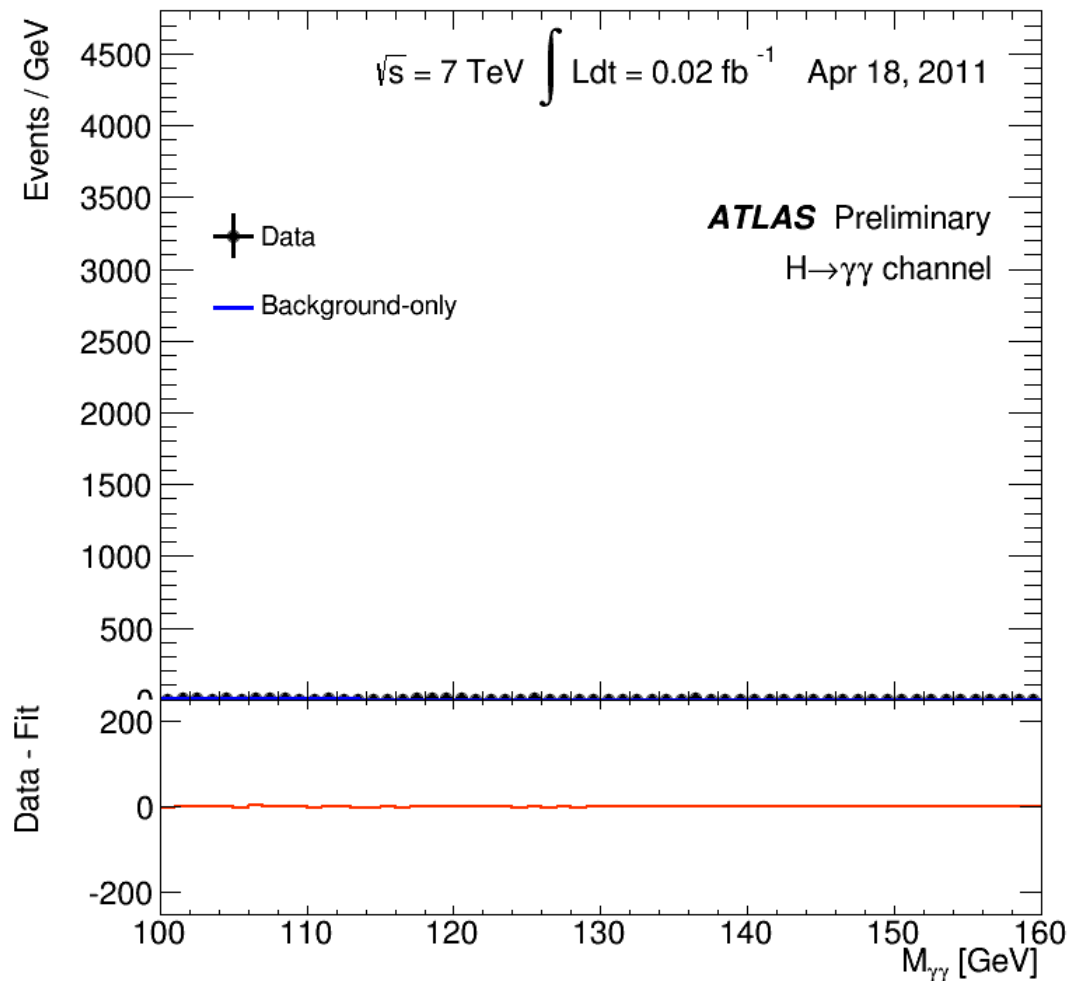
# Libération





# 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 "

