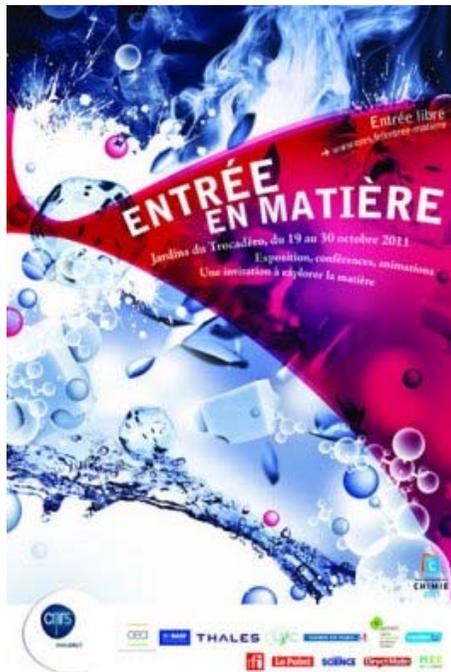
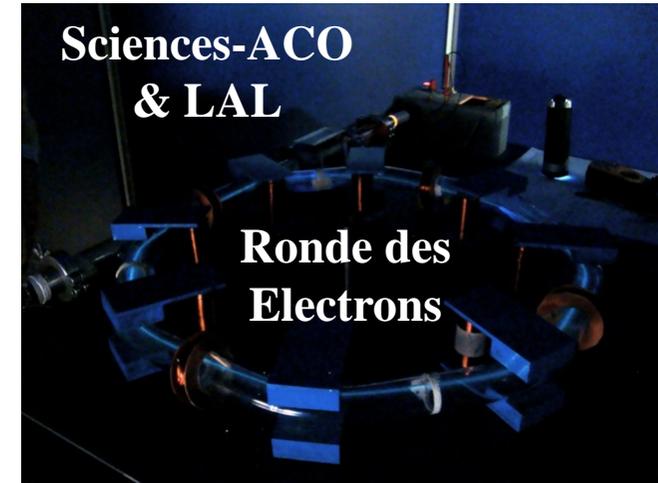


Une Brève Histoire des Particules

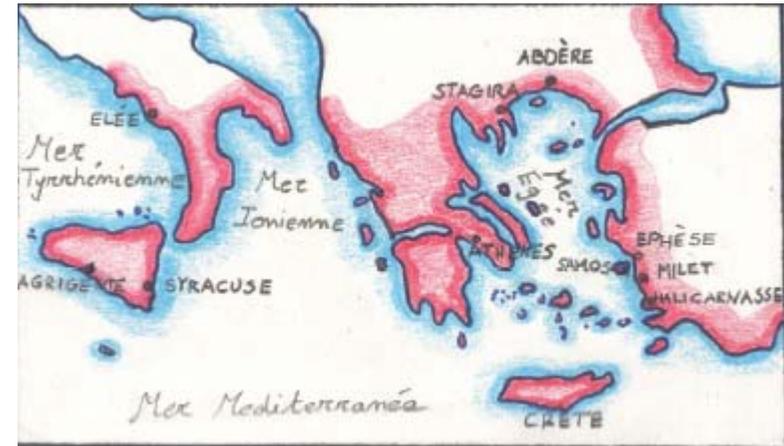
Exposition CNRS
« Entrée en Matière »
30 octobre 2011



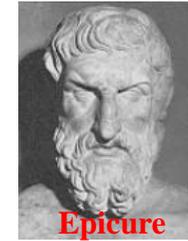
Nicolas Arnaud
Laboratoire de
l'Accélérateur Linéaire
(IN2P3/CNRS et
Université Paris Sud)

Un zeste de philosophie antique

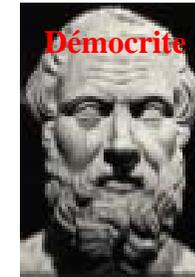
- L'**atome** : un concept vieux de 2500 ans
- **Une question naturelle** :
« De quoi est fait le monde ? »
- **Des réponses surnaturelles** : des créatures extraordinaires (dieux, titans, esprits...) créent, modèlent et ordonnent l'Univers entier
- Tout change à partir du VI^{ème} siècle avant J-C
→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



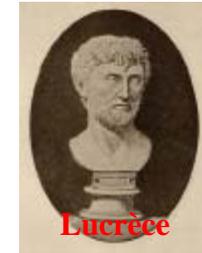
L'Atomisme



Epicure



Démocrite



Lucrèce

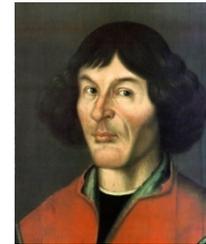
- « **Atoma** » signifie « **indivisible** » en Grec
 - ⇒ Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
 - ⇒ Autour il y a le vide (infini) dans lequel les atomes peuvent se déplacer, se grouper or se disperser
- **Les êtres vivants et les choses sont créés par des assemblages d'atomes**
- Il y a de **nombreux types d'atomes différents**
- Toutes les sensations (chaud, froid, amer, sucré, salé...) peuvent être expliquées par les différents types d'atomes et leurs assemblages
- Les atomes les plus légers forment l'âme
- A la mort, les atomes se séparent et sont relâchés dans le vide.
Comme ils sont éternels, ils peuvent à nouveau se rassembler plus tard pour former de nouvelles structures/ de nouveaux univers
- Après des siècles de controverses philosophiques (pour/contre les atomes), cette conception de la Nature **disparaît pour un millénaire** quand le **Christianisme** devient la religion dominante de l'empire romain.

Intermède : la Gravité

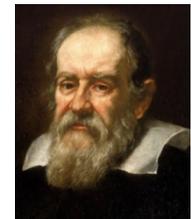
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II^{ème} siècle de notre ère) de **Ptolémée**
 - La Terre est au centre
 - Tous les ‘astres voyageurs’ orbitent autour d’elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)



- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)
 - L’église catholique l’oblige à abjurer « l’erreur » de **Copernic**



- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques
 - Il construit **3** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l’observation



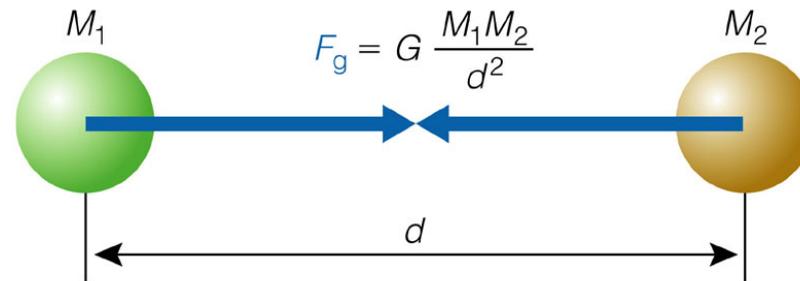


Le génie de Newton



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

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



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

Règne sur la mécanique
Pendant plus de deux siècles

Toujours très utilisée aujourd'hui !

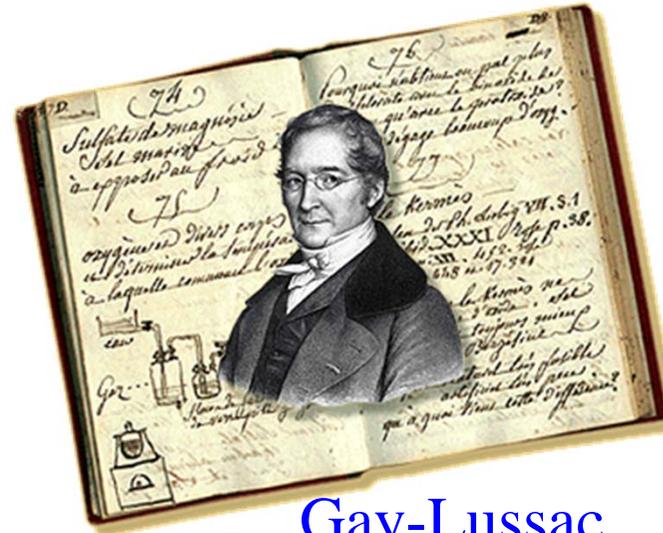
Les premiers chimistes



Boyle



Lavoisier



Gay-Lussac



Cavendish

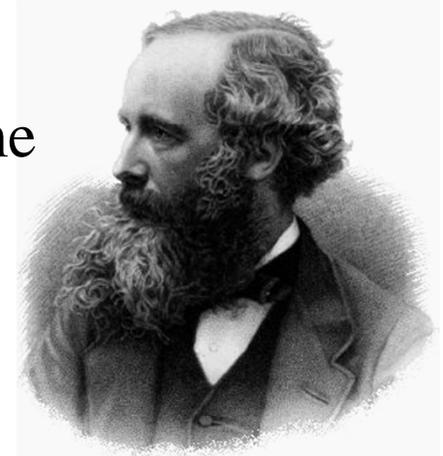


Dalton

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

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** »

Découverte de la radioactivité



Röntgen (1895)
Rayons X



Becquerel (1896)
Radioactivité naturelle



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

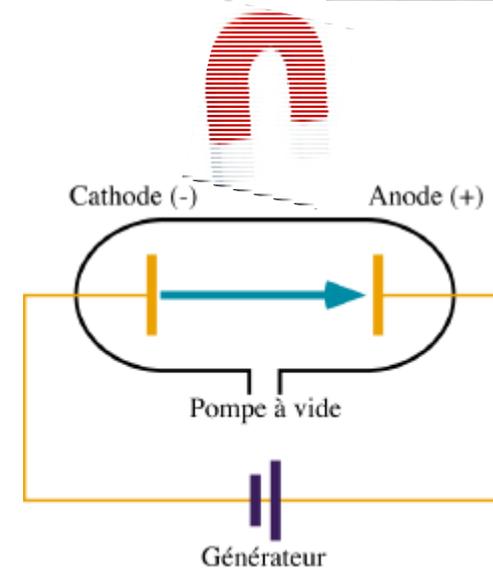
La radioactivité est une émission spontanée de radiation
(= d'énergie) par un objet : carbone-14, uranium ...

Ces découvertes auront un impact essentiel [sur la science du XX^{ème} siècle
sur le monde entier

La découverte de l'électron



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



Les atomes existent-ils vraiment ?

Robert Brown (1827)



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

Quelle est son origine ?

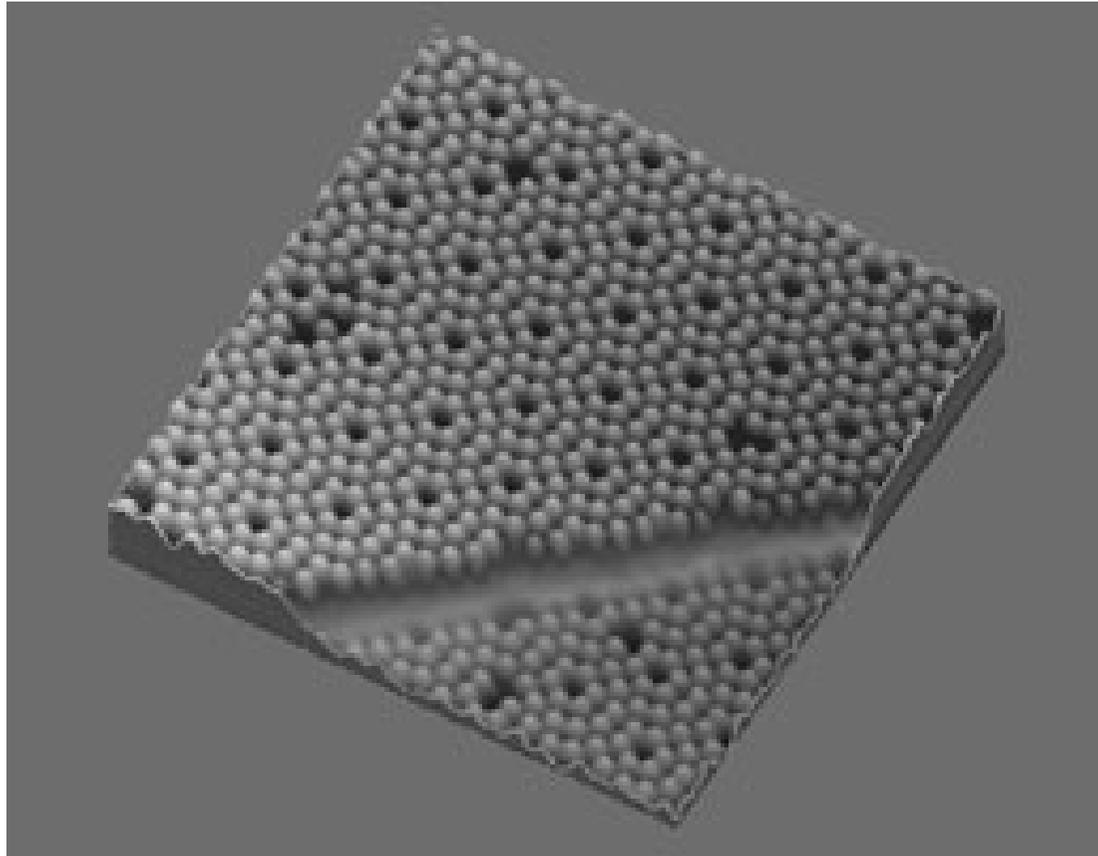
1905 (« annus mirabilis »)

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

Il y a à peine un siècle !



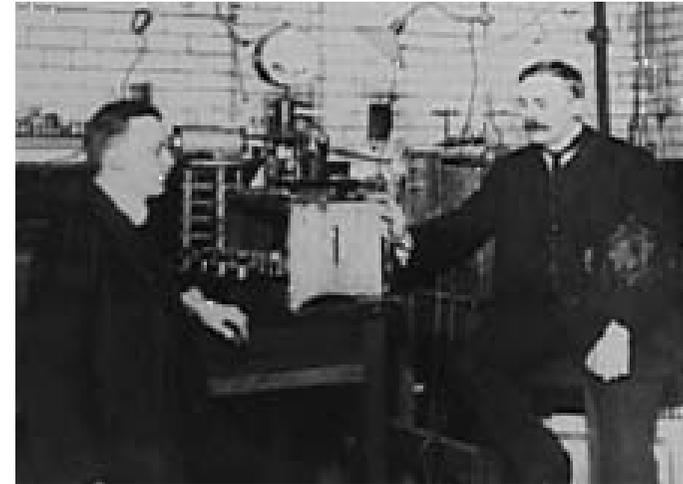
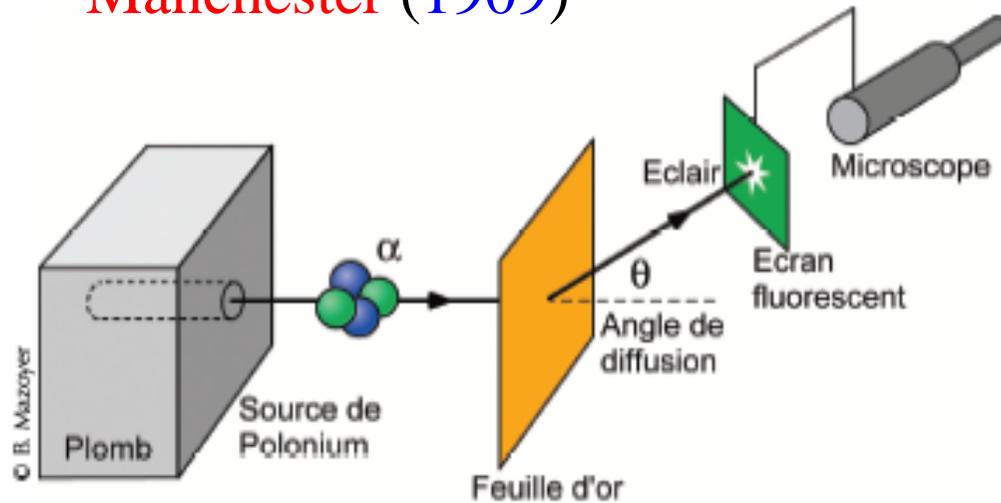
Oui ils existent !



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

Les Atomes sont presque vides

Manchester (1909)

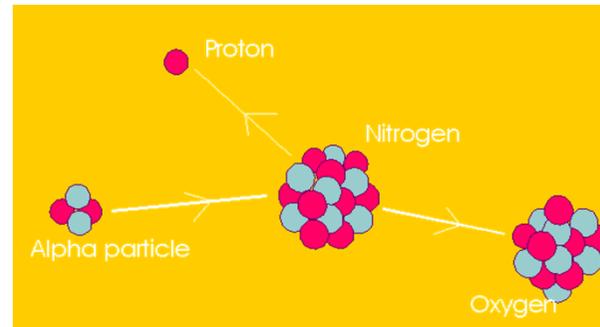
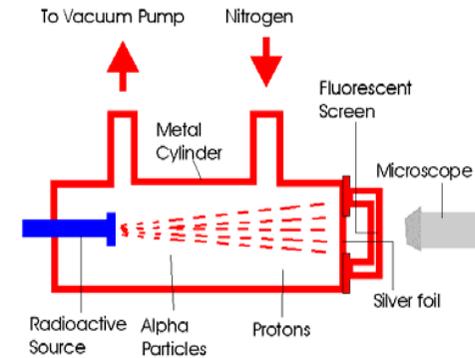


Geiger & Rutherford

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

Découverte du proton

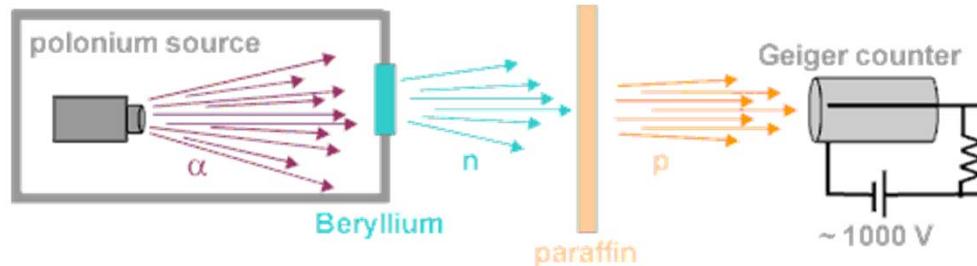
- Ernest Rutherford (1918)
- Diffusion de particules α sur du diazote
 - Rutherford observe la trace de noyaux d'hydrogène
 - Il prouve que cet hydrogène provient nécessairement du diazote
 - **L'azote doit donc contenir le noyau d'hydrogène !**



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

Découverte du neutron

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



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

Radioactivité
artificielle

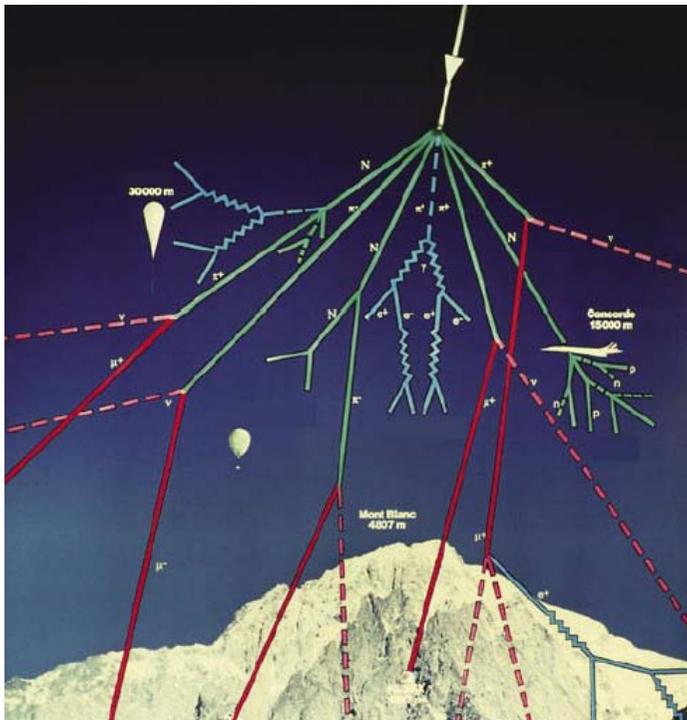
Neutron

Les Rayons cosmiques

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



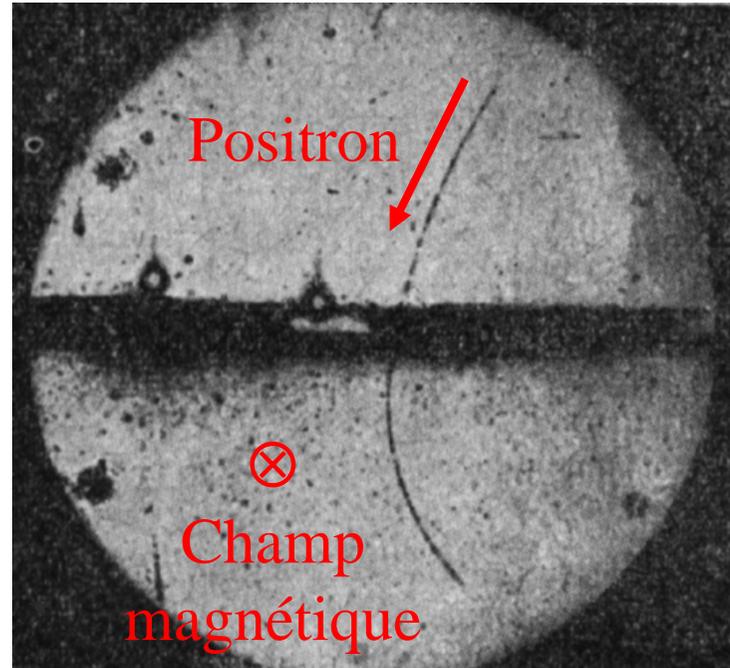
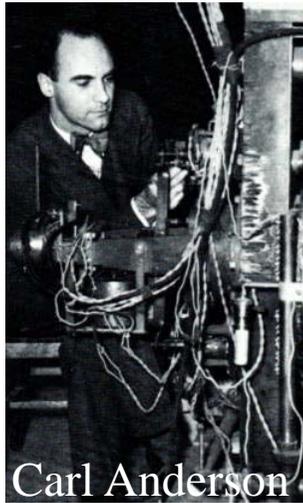
Victor Hess



Aurore vue de la navette spatiale



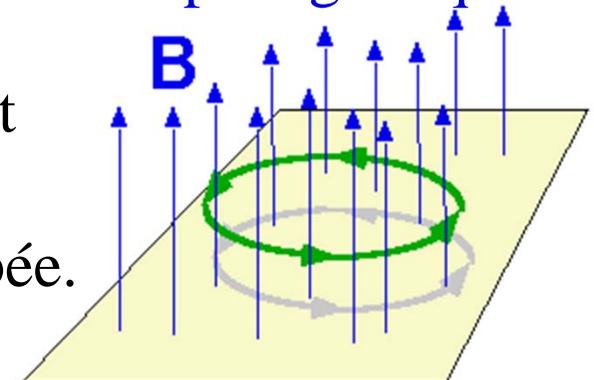
Découverte du positron (1932)



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

Mouvement d'une particule dans un champ magnétique

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



Découverte du muon

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

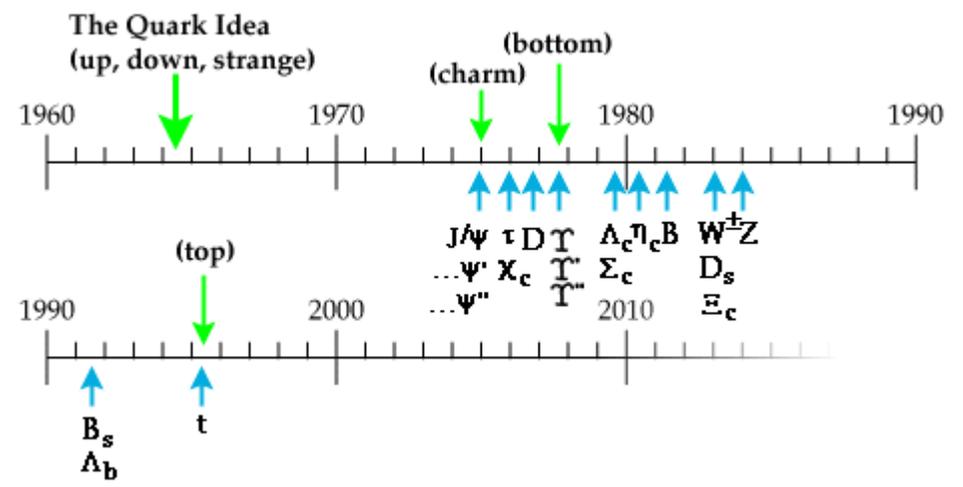
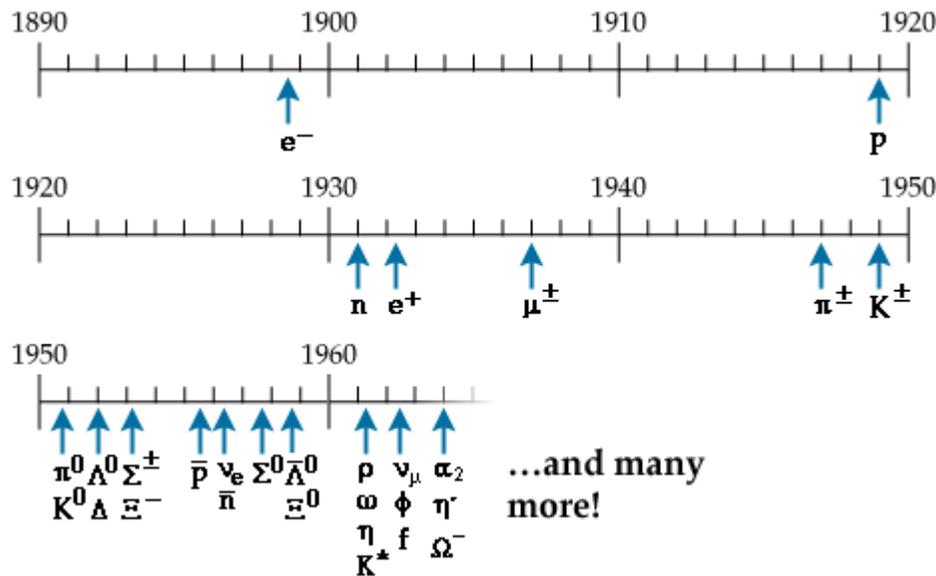
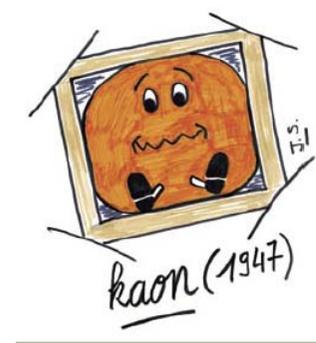
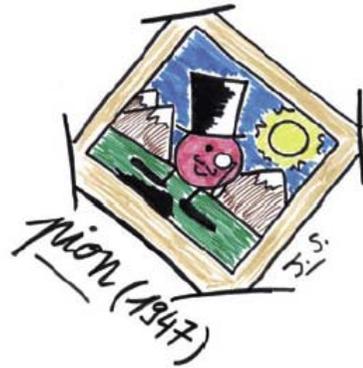
→ On n'attendait pas ce nouveau membre de la famille des particules!

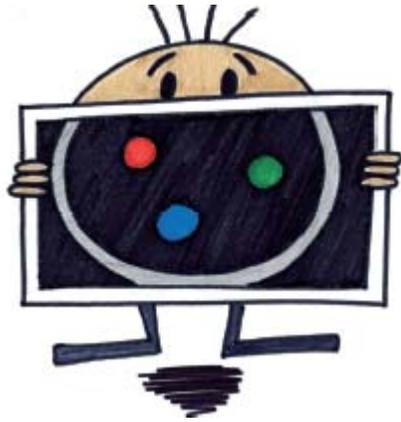


I. Rabi, Prix Nobel de Physique 1944

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

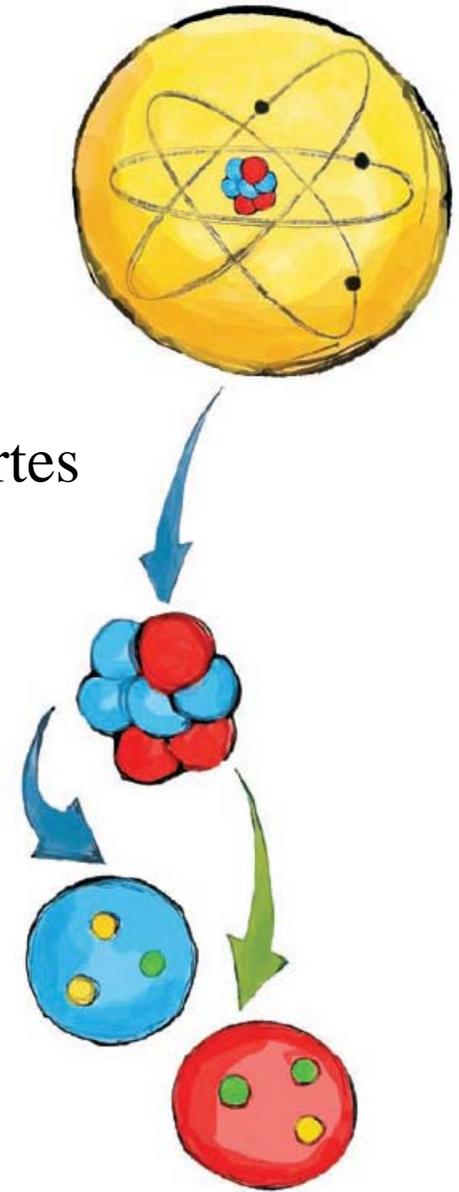
Un vrai « zoo » de particules



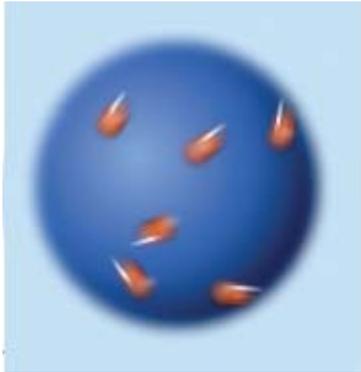


Les quarks

- 1930-1960: des centaines de particules sont découvertes
→ d'où viennent-elles ?
- Nouvelle théorie : **la plupart de ces particules sont faites de quarks**
→ ex : les protons et les neutrons
- L'interaction forte les maintient dans les nucléons et explique la cohésion des noyaux
- **Il n'y a que 6 quarks différents**
→ La situation est de nouveau « simple » !



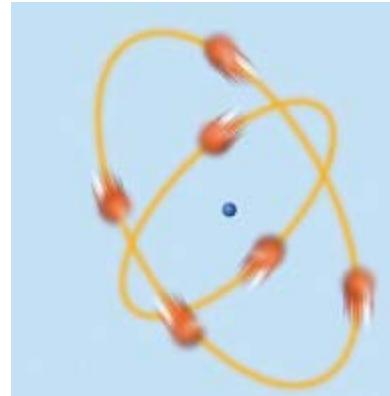
A quoi ressemble un atome ?



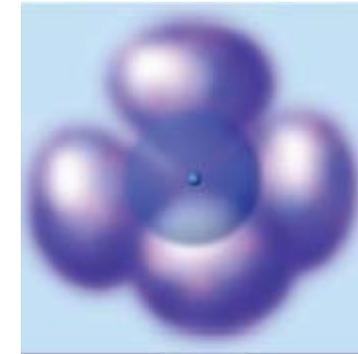
Thomson (1903)
Modèle du
« Plum-Pudding »



Rutherford (1909)



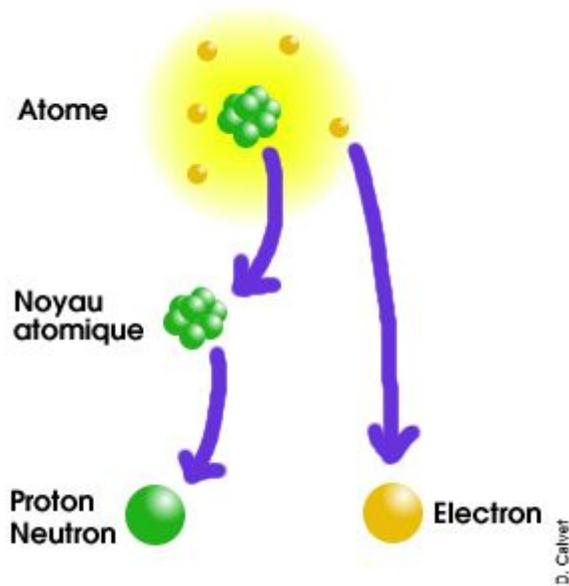
Bohr (1913)



Atome « moderne »

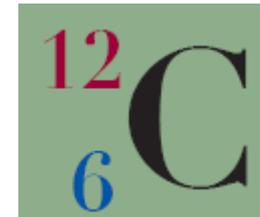
- Les électrons se trouvent sur différents niveaux d'énergie
- Ce sont plutôt des « nuages » que des particules ponctuelles
→ Leur évolution est gouvernée par des probabilités

De quoi est fait un atome ?



- **D'un noyau :**
 - ✓ **proton**, charge +1
 - ✓ **neutron**, charge 0
- **D'un nuage électronique**
 - **électron**, charge -1
 - les atomes sont neutres!

- A: nombre de masse
- Z: nombre de charge



⇒ On peut briser les atomes en morceaux !

⇒ On sait également briser les **protons** et les **neutrons**

⇒ L'**électron** semble ne pas avoir de **structure interne**

L'Affiche des composants élémentaires de la matière

- <http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/index.html> (2005)
→ Diffusion dans tous les lycées

Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
e électron 0,511 MeV	μ muon 105,7 MeV	τ tauon 1,777 MeV
ν_e neutrino électronique 0 MeV	ν_μ neutrino muonique 0 MeV	ν_τ neutrino tauique 0 MeV

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
u quark up 2,3 MeV	c quark charm 1,32 GeV	t quark top 173,1 GeV
d quark down 4,2 MeV	s quark strange 95 MeV	b quark bottom 4,18 GeV

À chaque particule correspond une antiparticule au même spin et à l'énergie. Le charge électrique d'une antiparticule est l'opposée de la particule correspondante.

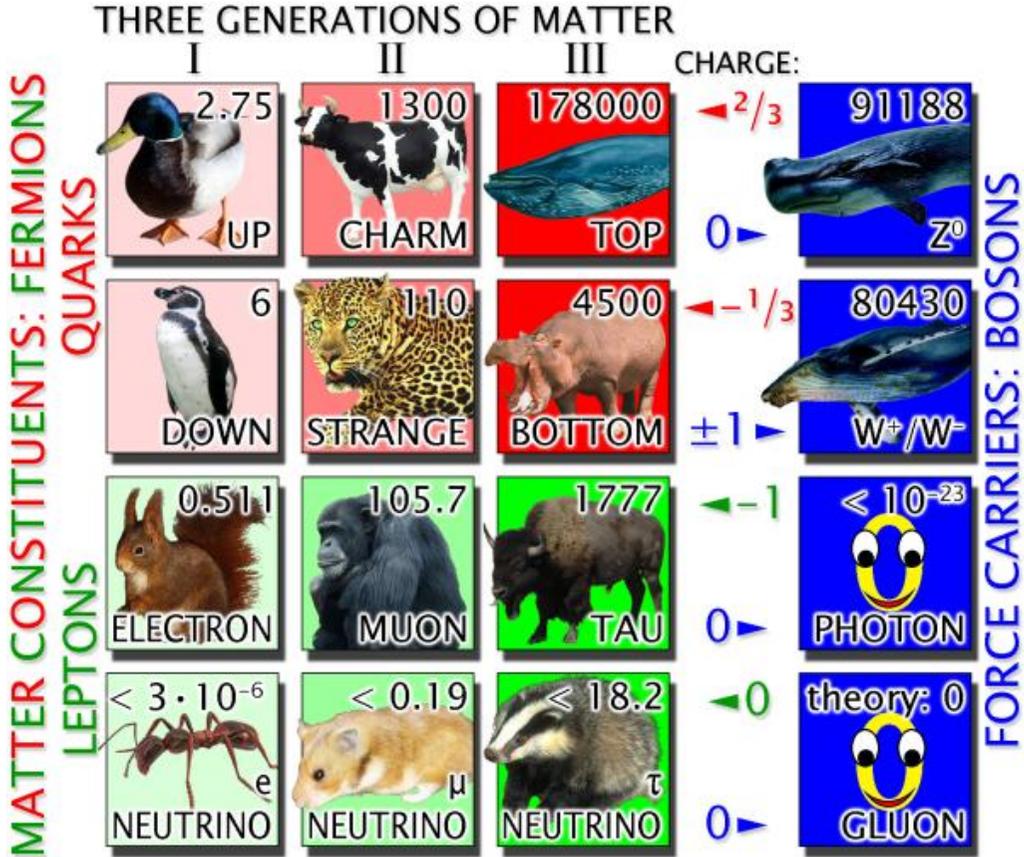
Les 4 forces fondamentales sont véhiculées par des particules associées qui sont les médiateurs de ces forces.

- Interaction de faible portée due à la gravitation
- Interaction de portée moyenne due à l'interaction électromagnétique
- Interaction de portée courte due à l'interaction forte
- Propagation des bosons associée à l'interaction forte

Les 4 forces de la physique classique sont présentes dans le monde qui nous entoure. Les interactions de gravitation et de l'interaction forte sont les plus importantes de la physique moderne.

Il reste encore bien des mystères ...

- L'origine des masses des particules

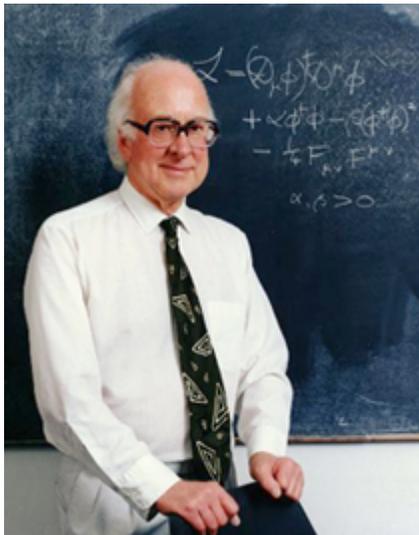


ALL MASSES IN MEV;
ANIMAL MASSES
SCALE WITH
PARTICLE MASSES

The Standard Model
fundamental particle zoo

Il reste encore bien des mystères ...

- Certaines particules « manquent à l'appel »
 - La théorie actuelle (le **Modèle Standard**) explique très bien les observations actuelles
 - Sa cohérence interne requiert des particules supplémentaires ...
... qui n'ont pas encore été découvertes !
- Le **Boson de Higgs**, les **particules supersymétriques**, etc.



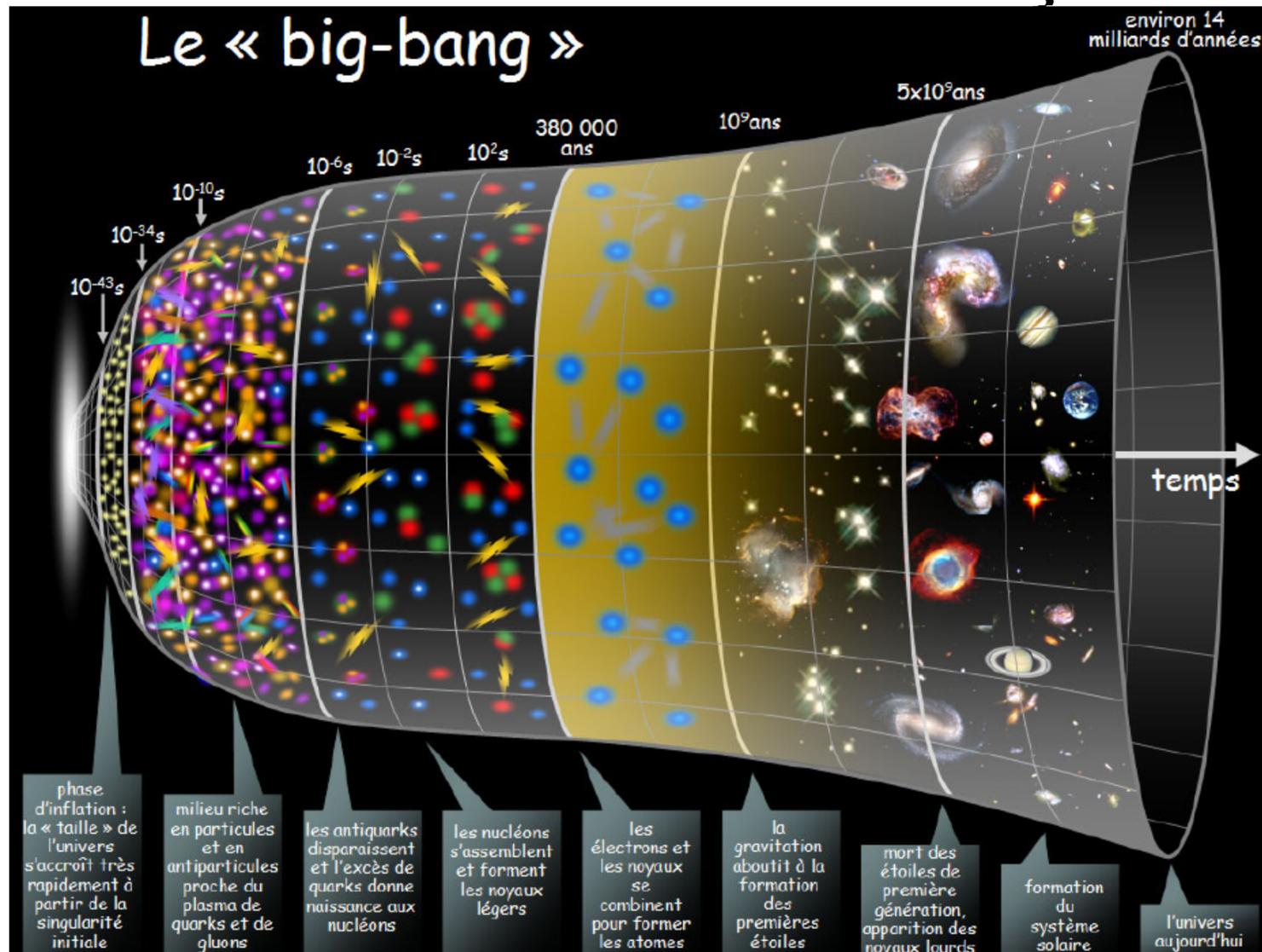
Peter Higgs

Les Pères du 'Modèle Standard'



Sheldon Glashow, Abdus Salam, and Steven Weinberg sharing the Nobel Prize, 1979

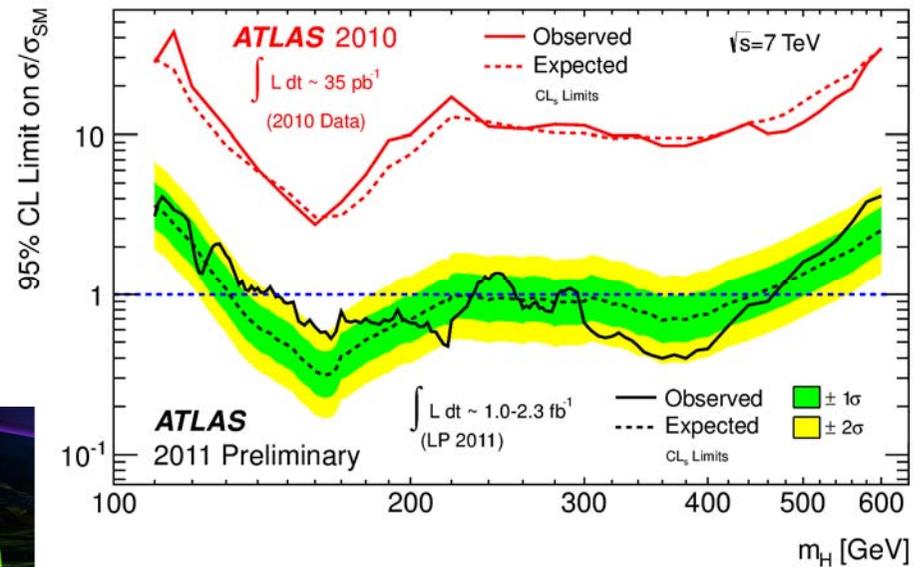
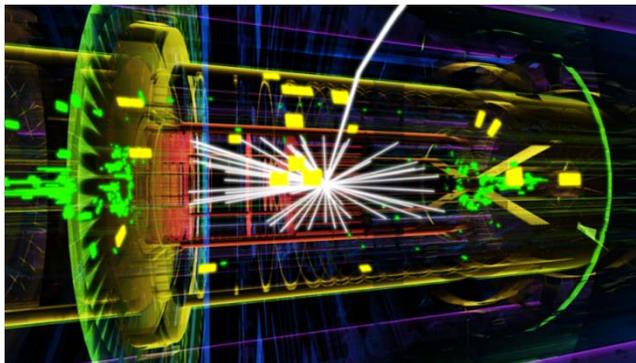
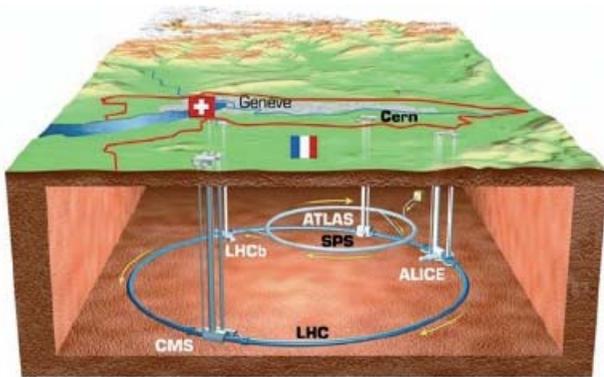
Et l'Univers dans tout ça ?



**La matière connue ne représente que 5% du contenu de l'Univers
Le reste, « matière noire » et « énergie noire », est mystérieux**

Conclusions

- L'histoire des particules est déjà longue et riche en rebondissements
- De nombreuses étapes sont à venir
- L'épisode actuel est en cours de tournage, en particulier au LHC



Pour en savoir plus

- Les **transparents présentés aujourd'hui** sont disponibles sur la page web <http://indico2.lal.in2p3.fr/indico/conferenceDisplay.py?confId=1620>
- Des pages web de l'**IN2P3-CNRS**
http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulycee/introduction.htm
http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulycee/media/ecole2infinis.pdf
- L'**affiche des composants élémentaires** de la matière
<http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/index.html>
- La revue de vulgarisation « **Élémentaire** »
<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>
- Le « **Passeport pour les 2 Infinis** »
<http://www.passeport2i.fr/>
- Le site **LHC-France**
<http://www.lhc-france.fr/>



