

# Le modèle standard de la physique des particules

1. Historique
2. Physique des hautes énergies
3. La matière
4. Les interactions fondamentales
5. Le boson de Higgs

Stéphane Perriès  
IPN Lyon  
22/03/2016

# CERN 4 juillet 2012

**Spécial  
Festival d'Avignon**  
La 66<sup>e</sup> fête du théâtre  
démarré le 7 juillet  
Supplément

# Le Monde

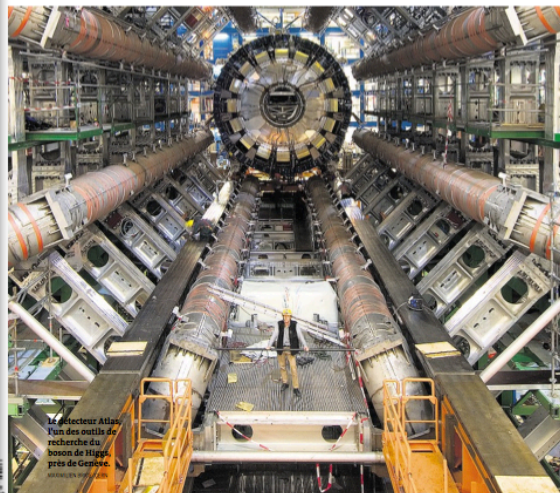
**Le Monde  
des livres**  
Les coups de cœur  
de la rédaction  
Supplément

Jeudi 5 juillet 2012 • 68<sup>e</sup> année • N° 20981 • 1,60 € • France métropolitaine • www.lemonde.fr

Fondateur: Hubert Beuve-Méry - Directeur: Erik Izraelovitch

## Science : la matière dévoilée

- Le boson de Higgs, particule manquante pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert
- Les physiciens du CERN de Genève ont prouvé son existence à 99,9999 %



Le directeur Alan  
Liderj, l'un des outils de  
recherche du  
boson de Higgs,  
près de Genève.

C'est dans cette cathédrale souterraine de béton et d'acier, le LHC (Large Hadron Collider), situé près de Genève, que les physiciens ont trouvé leur graal, la seule particule élémentaire à n'avoir jamais été observée, celle qui valide la théorie scientifique sur la constitu-

tion de la matière, celle que les savants cherchent depuis 1964, le boson de Higgs. Mercredi 4 juillet, les chercheurs du CERN ont annoncé devant 400 physiciens survoltés - et l'Ecosais Peter Higgs lui-même - avoir trouvé le fameux boson avec une certitude de 99,9999 %.

Il aura fallu 4 milliards d'euros d'investissements et des années d'observation de particules lancées à un milliard de km/h dans un anneau géant enterré entre France et Suisse pour parvenir à écrire cette nouvelle page des sciences. ■ Pages 2-3

## IMPÔTS CE QUI VA CHANGER

### 7,2 milliards de plus dès 2012

**COLLECTIF BUDGÉTAIRE** Entretien avec Jérôme Cahuzac, ministre délégué au budget, sur le détail des mesures qui toucheront les ménages et les entreprises. Page 8

### Réforme fiscale à l'automne

**BUDGET** Pour tenir les engagements de réduction des déficits publics, Jean-Marc Ayrault (photo) laisse les décisions les plus lourdes sur les recettes et les dépenses pour le budget 2013. Pages 8 à 11



## ALGÉRIE L'INDÉPENDANCE

### Une fête sans panache

**CÉRÉMONIE** Des spectacles, des colloques, mais pas de défilé militaire. L'anniversaire de l'indépendance cache mal les désillusions d'une partie de la jeunesse. P. 4

### La souffrance, mais pas de haine

**RÉCONCILIATION** Elle a perdu son père, soldat français, en 1958. Il a perdu son père, combattant civil algérien, en 1959. Hélène et Mohamed racontent. Enquête p. 19



### Ces livres qui explorent l'histoire

**ÉDITION** Témoignages inédits et travaux de jeunes historiens : plusieurs nouveautés enrichissent la bibliothèque franco-algérienne. Le Monde des livres

### A nos lecteurs

En raison d'un risque de non-parution des journaux jeudi 5 juillet, avec un jour d'avance sur le supplément « Le Monde des livres ». Nous prions nos lec-

Le Monde  
Jeudi 5 juillet 2012

## L'ÉVÉNEMENT

### le boson de Higgs avec 99,9999 % de certitude

en 1964, vient d'être détectée grâce à des collisions phénoménales réalisées dans le grand accélérateur du CERN

# Libération



## Les derniers feux des pharaons

Au musée Jacquemart-André, à Paris, une exposition passionnante s'attarde sur la période tardive de l'antiquité égyptienne, souvent oubliée.

PAGES 74-75

## Suicides chez France Télécom : l'ancien patron mis en examen

Didier Lombard, qui dirigeait l'opérateur téléphonique lors de la vague de suicides ayant touché l'entreprise en 2008 et 2009, est visé par une enquête de la justice pour harcèlement moral.

PAGE 14

## A nos lecteurs

En raison d'un mouvement de grève dans les imprimeries, ce numéro de Libération n'est disponible que sous sa forme électronique. Toutes nos excuses à nos lecteurs.

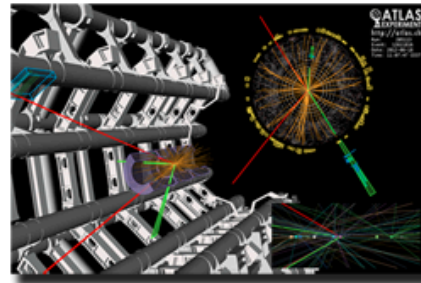
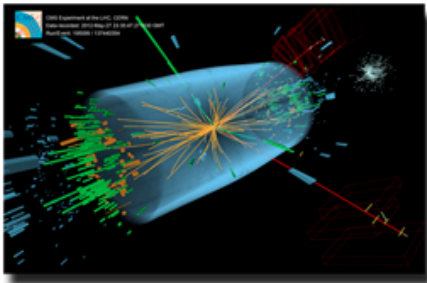
## Physique des particules La masse est dite

Le Cern a réussi à mettre en évidence le boson de Higgs qui résout une énigme fondamentale et ouvre une nouvelle étape scientifique. PAGES 2-5

# Prix nobel de physique 2013

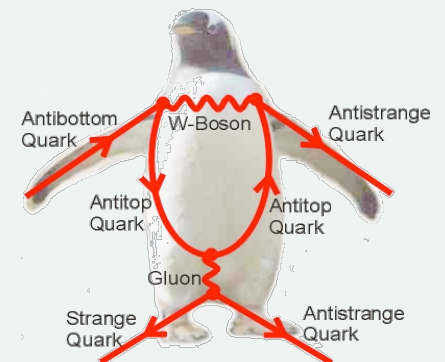
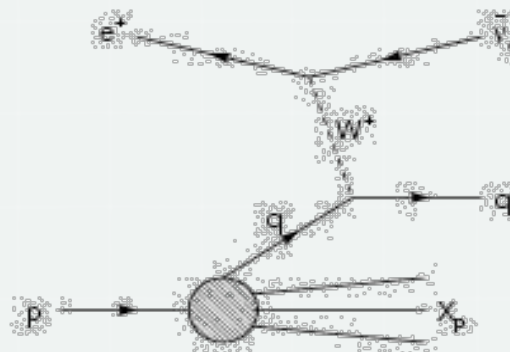
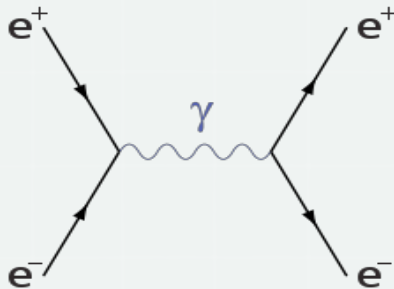


*"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

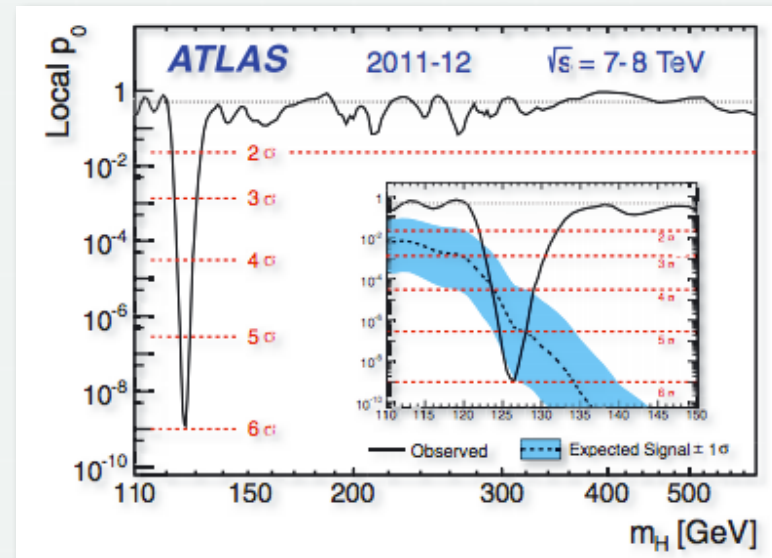
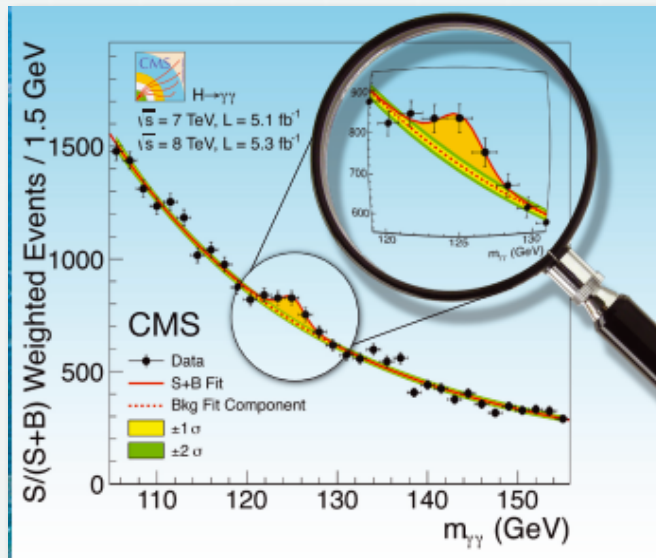


# Point de vue théorique

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - eQ_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$



# Point de vue expérimental



# Physique des particules

- Etude des constituants (élémentaires) de la matière
- Etude interactions (forces) qui s'exercent entre ces constituants
- Discipline qui a vu le jour il y environ 1 siècle avec l'avènement de la théorie de la relativité restreinte (Einstein 1905) et de la mécanique quantique (Planck) → Théorie quantique des champs
- Expérimentalement deux grandes périodes :
  - Utilisation des rayons cosmiques → 1930-1960
  - Production de particules avec des accélérateurs 1960 → aujourd'hui
- Succession de découvertes expérimentales et prédictions/avancement théorique

# **1- Historique: La quête des constituants élémentaires de la matière**

# L'antiquité



eau  
état liquide



air  
état gazeux



terre  
état solide

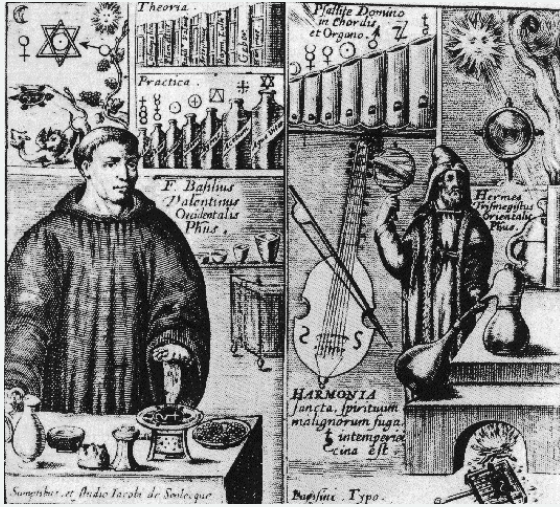


feu  
chaleur

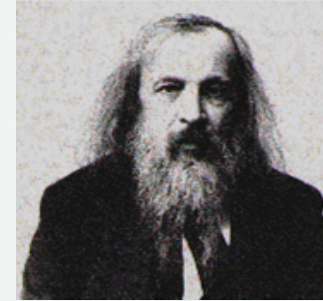
L'intuition de Démocrite (400 av JC) : « Toute chose est faite de petits grains incassables et de vide : ATOMOS »  
capables de se combiner entre eux pour expliquer la diversité des substances que l'on rencontre dans la nature



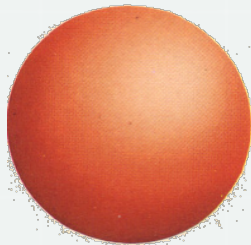
**Moyen-âge :** Les alchimistes  
 éléments de contrôle  
 (sel, soufre, mercure) et métaux



**XIX siècle :** Mendeleïev classe les  
 éléments, chaque élément à son type  
 d'atome



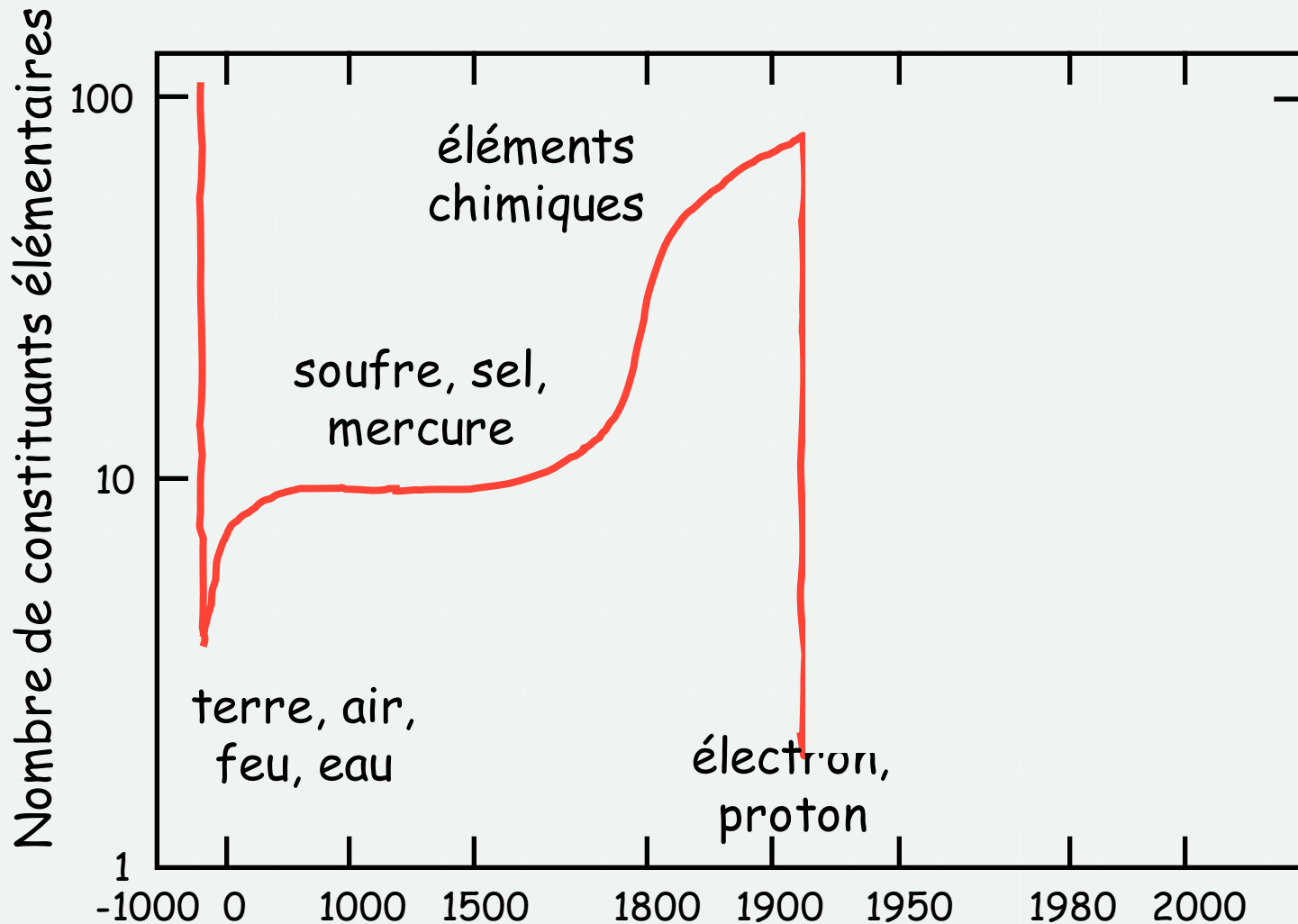
**XVIII siècle :** Les chimistes (Boyle, Cavendish,  
 Lavoisier) et la renaissance de l'hypothèse  
 atomique (Dalton): l'eau, l'air, le sel sont  
 composites.



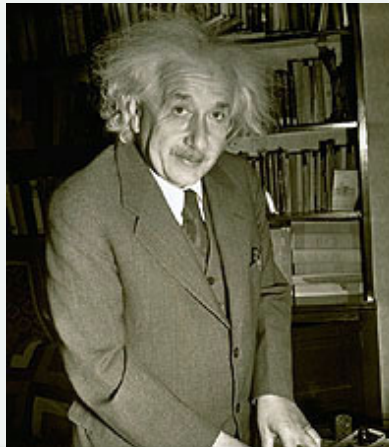
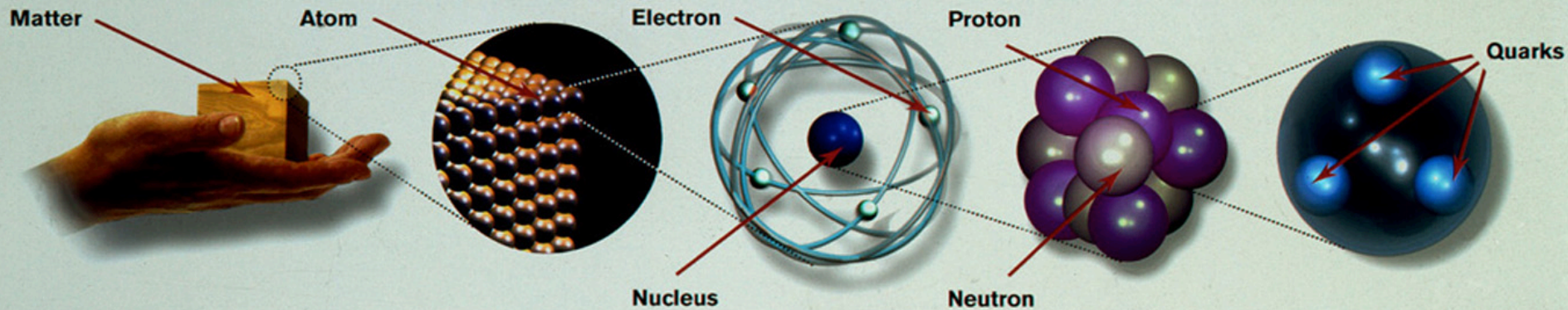
La « boule de billard »  
 de Dalton, 1803

Etat physique du corps simple(25°C, 1 atm)		SOLIDE				LIQUIDE				GAZEUX				SYNTHESE					
* Lanthanides		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
# Actinides		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				
1																18			
1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										

# La quête des constituants élémentaires



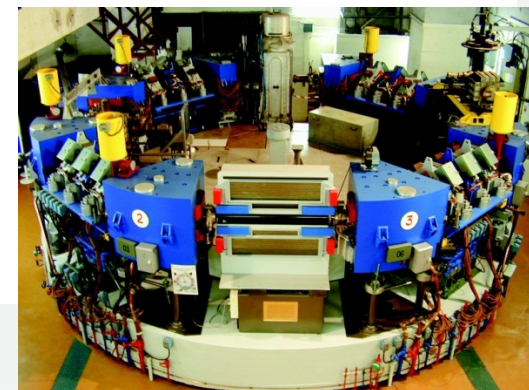
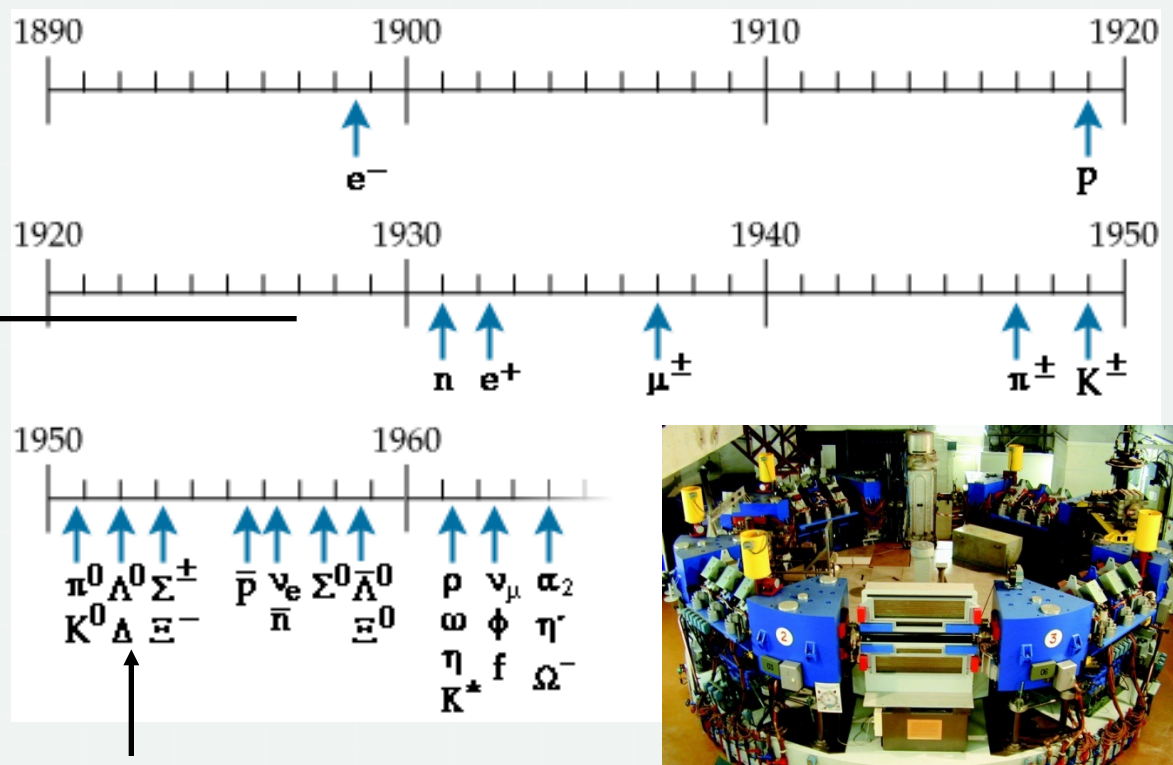
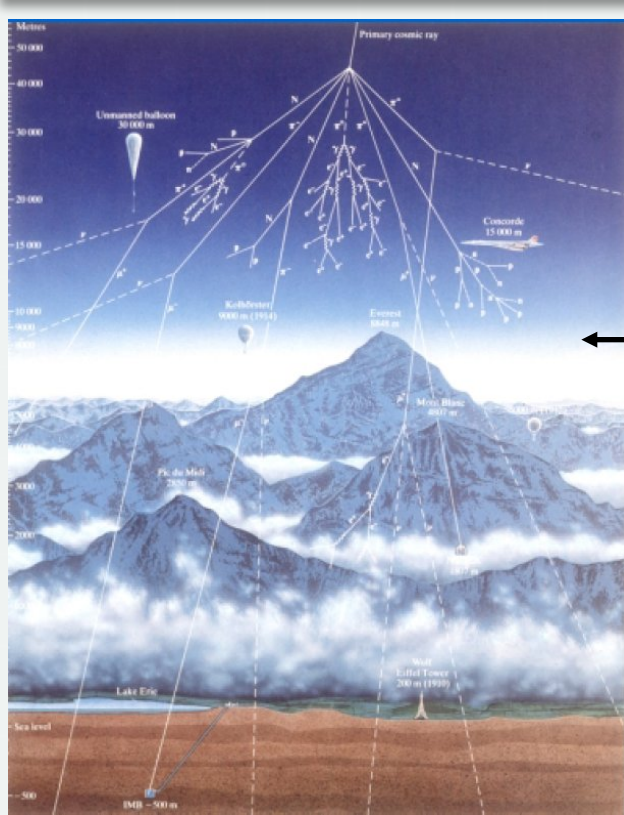
# Le XX<sup>ème</sup> siècle



Depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle :  
23 prix Nobel pour la physique des particules

XX siècle: La physique moderne devient mathématique : mécanique quantique et mécanique relativiste...  
constituants ultimes ?

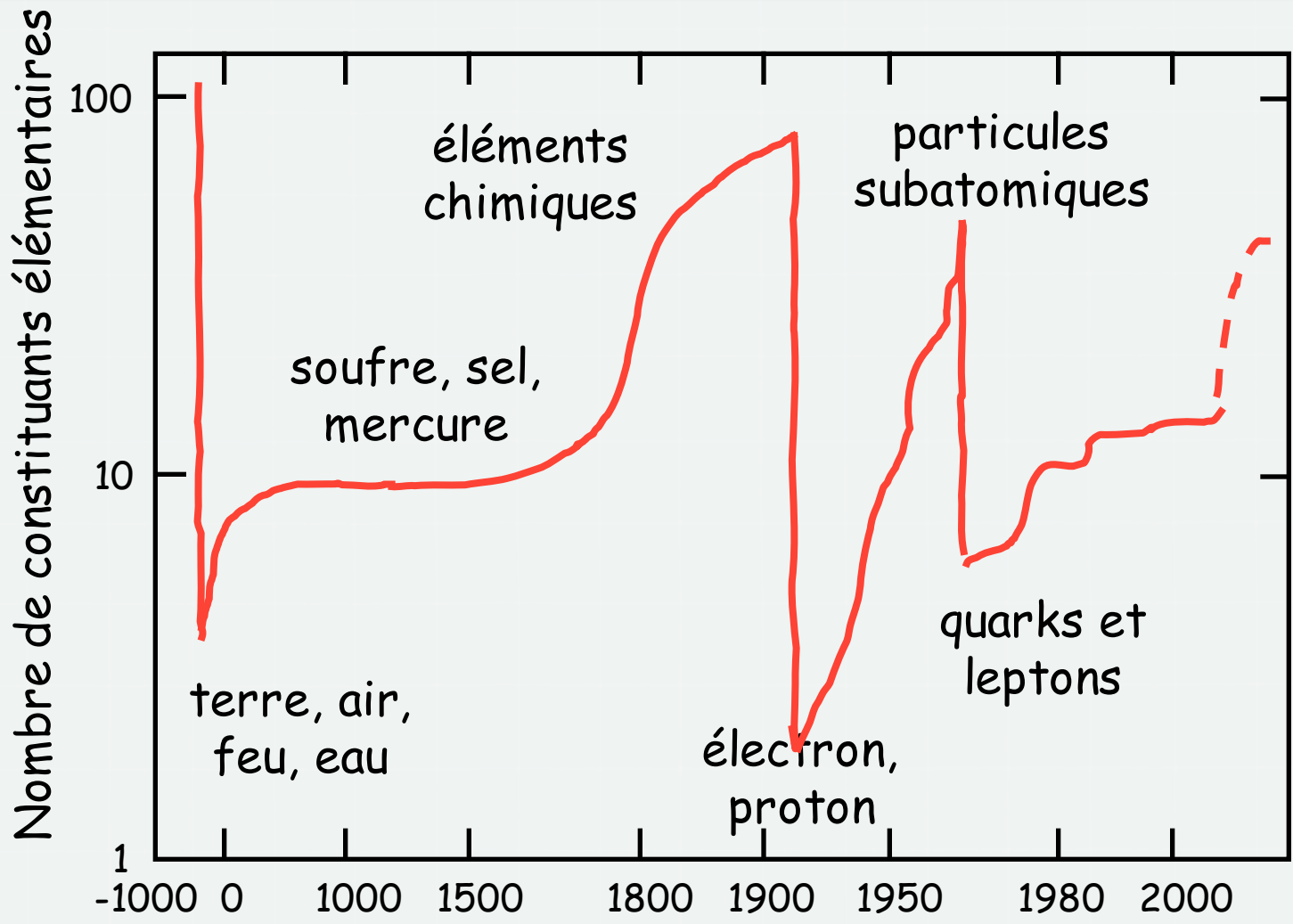
# Trop de nouvelles particules...



Avec l'arrivée des accélérateurs (années ~1950) on trouve beaucoup (trop) de nouvelles particules . On est revenu à Mendeleïev.

**Il doit y avoir des symétries/propriétés permettant de décrire ensemble ces particules ou une sous structure? (modèle des quarks fin des ~1960)**

# La quête des constituants élémentaires



# Lois fondamentales de la physique < 1900

Lois de la gravité : Newton (1687)

Electromagnétisme de Maxwell (1872)

Lois de thermodynamique : Carnot, Kelvin (~1850)

*« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien **deux petits problèmes** : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance... »*

Lord Kelvin, 1900, british association for the advancement of science

**Michelson → théorie de la relativité restreinte Einstein (1905)**

**Corps noir → Mécanique quantique Planck (1900)**

# Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- 🌐 Sonder la matière à petite échelle

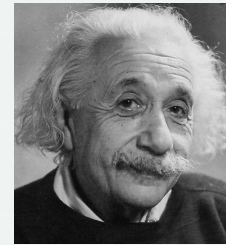
$$E \propto 1/\lambda$$



Dualité  
onde-corpuscule  
Louis De Broglie

- 🌐 Créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = mc^2$$



Relativité restreinte  
Albert Einstein

- 🌐 Etudier les très hautes températures

$$E = kT$$



Physique statistique  
Ludwig Boltzmann

# Physique des hautes énergies

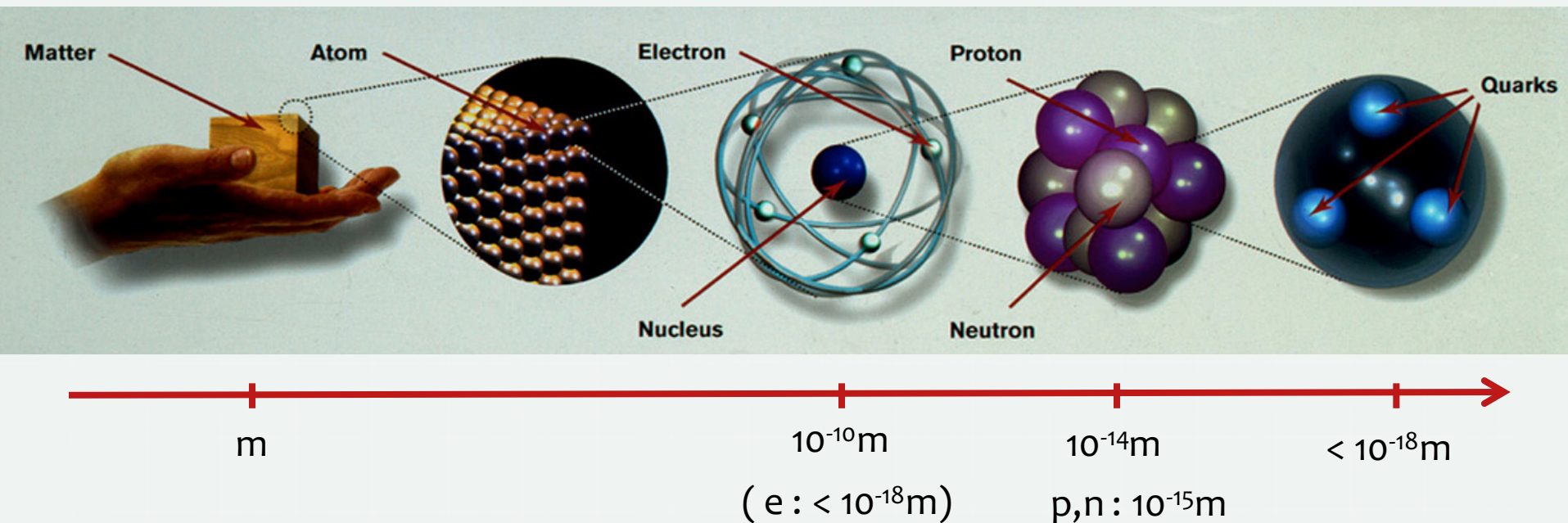
Les hautes énergies permettent de

- 🌐 Sonder la matière à petite échelle

$$E \propto 1/\lambda$$



Dualité  
onde-corpuscule  
Louis De Broglie



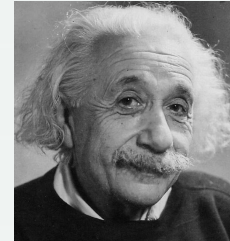


# Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- Créer de nouvelles particules à grande masse

$$E = mc^2$$



Relativité restreinte  
Albert Einstein

Equivalence masse-énergie (1905)

Cette relation n'est valable que pour des objets au repos.

Equation plus générale :  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$  ( $p$  = impulsion)

On peut exprimer une masse en unité d'énergie via  $M=E/c^2$  et l'exprimer en électron-volt.

On utilise les multiples de l'eV : keV, MeV, GeV, TeV, PeV, ...

- Unité naturelle de la physique des particules pour les énergies et les masses : GeV

# Physique des hautes énergies

Les hautes énergies permettent de

- Etudier les très hautes températures

$$E = kT$$

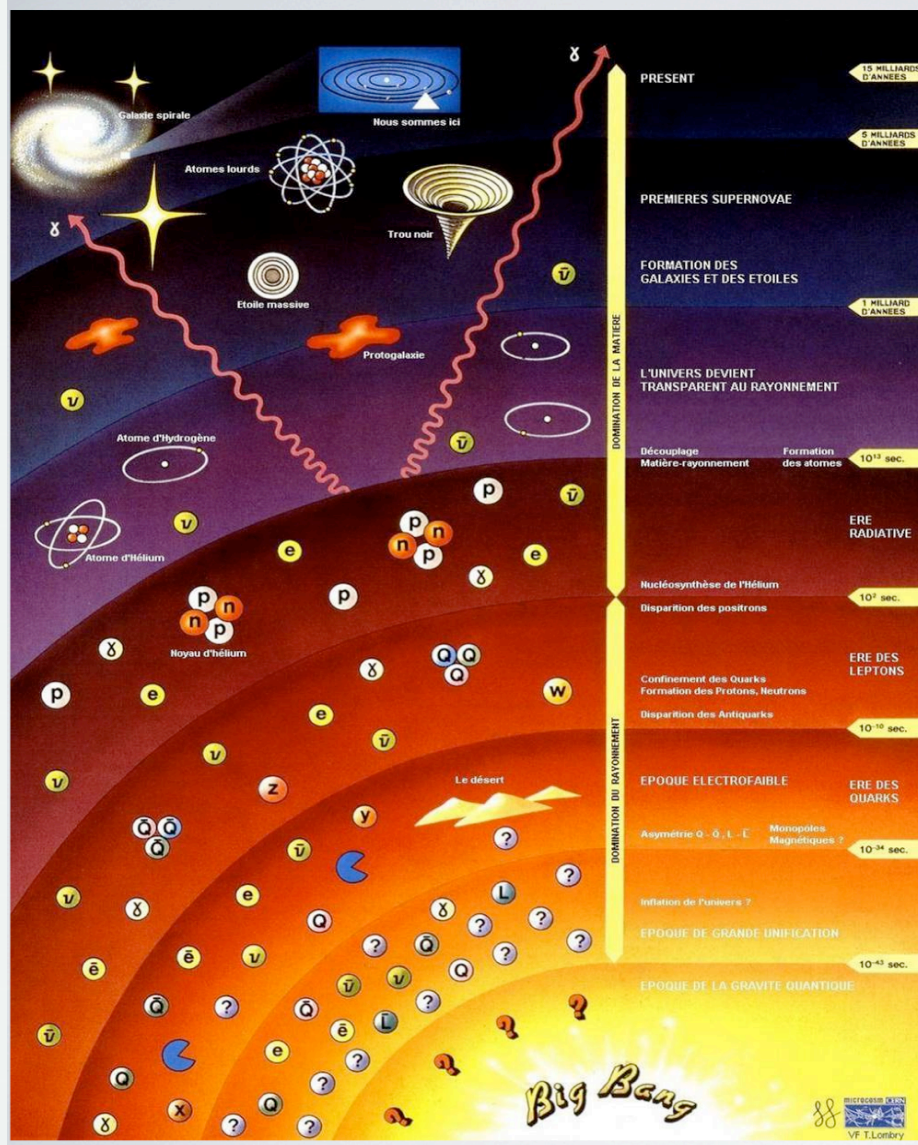


Physique statistique  
Ludwig Boltzmann

# Lien entre physique des particules et cosmologie

Temps

Température / densité d'énergie

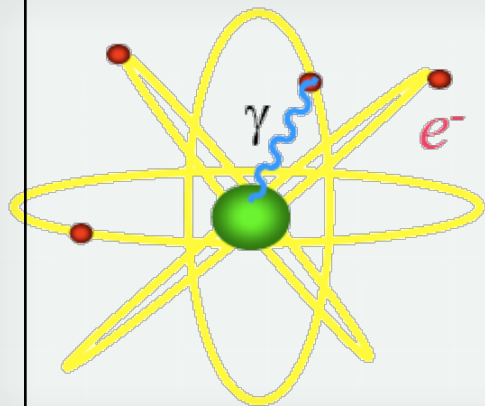


## l'histoire de notre univers

- 10<sup>13</sup> s** premiers atomes
- 1 s** hadrons
- 10<sup>-6</sup> s** quarks leptons
- 10<sup>-10</sup> s** quarks leptons
- 10<sup>-34</sup> s** ??
- 10<sup>-44</sup> s** gravitation quantique

$$E = kT$$

# 3- La matière



## ATOME

Energie de liaison ~10 eV

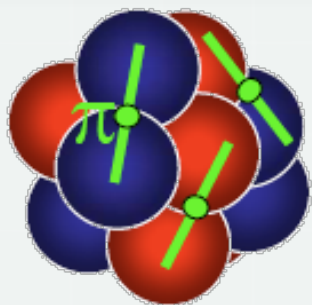
Electrons liés à l'atome par la force **force electromagnetique**

**Taille:** Atom  $\sim 10^{-10}$  m,  $e^- < 10^{-19}$  m

**Charge :** globalement neutre, electron  $-e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C

**Masse :** Masse de l'atome  $\sim$  Masse du noyau,  $m_e = 0.511$  MeV/c<sup>2</sup>

Propriétés chimiques dependent du nombre d'électrons



## NOYAU

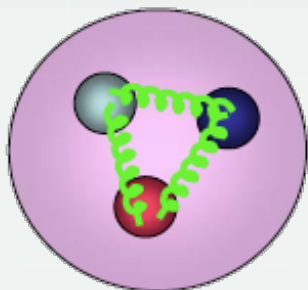
Energie de liaison ~10 MeV/nucleon

Noyau lié par l'**interaction nucléaire forte**

**Size :** Noyau moyen  $\sim 5$  fm (1 fm =  $10^{-15}$  m)

**Charge :** Ze

**Mass :** de quelques GeV/c<sup>2</sup> quelques centaines GeV/c<sup>2</sup>



## NUCLEON

Energie de liaison ~1 GeV

Proton (p) et neutrons (n) : liaison assurée par l'**interaction forte**

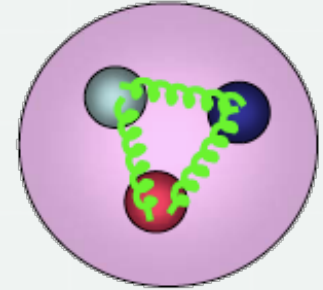
**Size :** p, n  $\sim 1$  fm

**Charge :** proton +e; neutron uncharged

**Mass :** p = 938.27 MeV/c<sup>2</sup>, n = 939.57 MeV/c<sup>2</sup>  $\sim 1836$  Me

# Les nucléons

- Proton (p) and neutrons (n) : cohésion assurée par la **force forte (de couleur)**
- Taille** : p,n ~1 fm
- Charge** : proton +e; neutron non chargé
- Masse** :
  - $m_p = 1.672621637(83) \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}/c^2$
  - $m_n = 1.67492729(28) \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}/c^2$
  - $m_p \sim m_n \sim 1836 m_e$
- Stabilité** :
  - Proton : stable (période  $> 3 \times 10^{29}$  ans)
  - neutron : instable, période 614 s ~10 minutes



Energie de  
liaison ~ 1 GeV

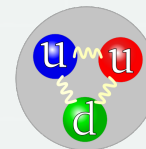
# La matière qui nous entoure

Toute la matière ordinaire peut être décrite par les interactions de quatre fermions élémentaires (spin  $\frac{1}{2}$ ) :

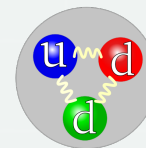
Particule	Symbole	Type	Charge (unité e)
Electron	$e^-$	Lepton	-1
Neutrino Electronique	$\nu_e$	Lepton	0
Quark up	u	Quark	$\frac{2}{3}$
Quark down	d	Quark	$-\frac{1}{3}$

## LA PREMIÈRE GÉNÉRATION

Les quarks sont les briques élémentaires des protons et des neutrons, qui sont les états liés de plus basse énergie d'un système trois quarks.

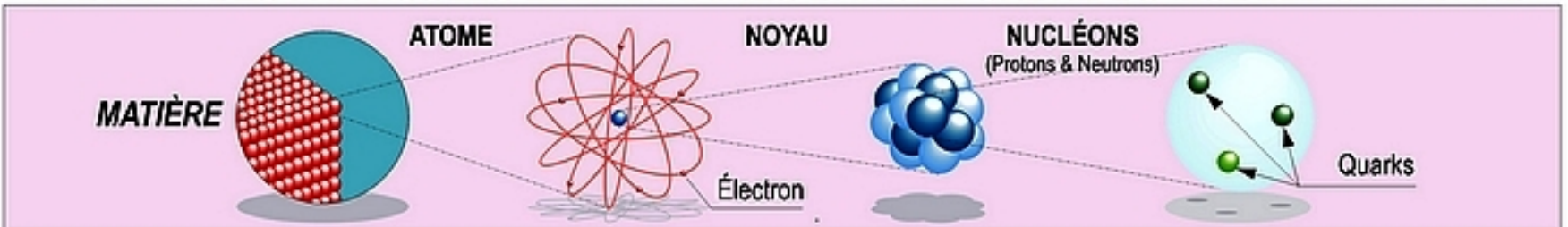


**Proton** (uud)  
stable (période  $>3 \times 10^{29}$  ans)



**Neutron** (udd)  
instable, période  $\sim 10$  minutes

# • TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •



FERMIONS		LEPTONS		QUARKS					
		peuvent se déplacer librement		prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.					
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe</p>	Première Famille	<b>ELECTRON</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.	$e$	<b>NEUTRINO ELECTRON</b> Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.	$\nu_e$	<b>BAS</b> Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.	$d$	<b>HAUT</b> Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.	$u$
	Deuxième Famille	<b>MUON</b> Un compagnon plus massif de l'électron.	$\mu$	<b>NEUTRINO MUON</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.	$\nu_\mu$	<b>ETRANGE</b> Un compagnon plus lourd du "Bas".	$s$	<b>CHARME</b> Un compagnon plus lourd du "Haut".	$c$
	Troisième Famille	<b>TAU</b> Un compagnon encore plus lourd que le Muon.	$\tau$	<b>NEUTRINO TAU</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.	$\nu_\tau$	<b>BEAUTÉ</b> Un compagnon encore plus lourd du "Bas".	$b$	<b>VÉRITÉ ou TOP</b> Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".	$t$

M  
a  
s  
s  
e

+ Antiparticules associées



# **4- Les interactions fondamentales**

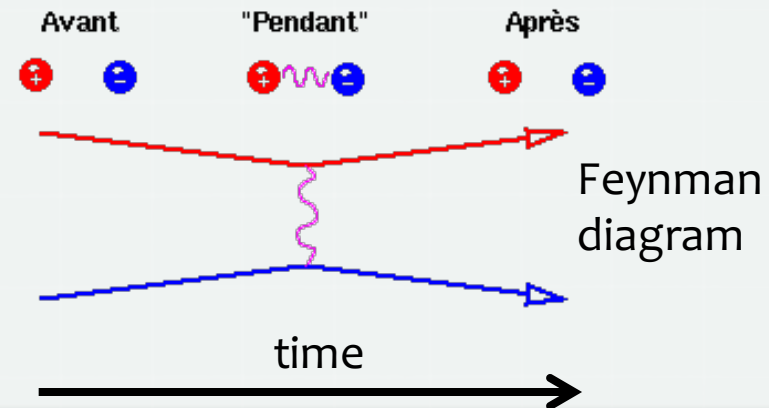
# Interactions entre particules fondamentales

- Vue classique : action instantannée à distance   
La force dépend de la position relative des particules. Mais comment « savent-elles » ?

- Interaction via un champ: 

Chaque particule crée un champ dans l'espace. Elle interagissent avec le champs créé par une autre particule.

- Theorie quantique:   
Les particules échangent d'autres particules qui sont des médiateurs de la force.



# Interaction Gravitationnelle

- Importante à très grande échelle, négligeable à très petite échelle
- S'exerce sur toutes les particules
- Messenger : Graviton ?
- Interaction à **longue portée** dépendant des masses



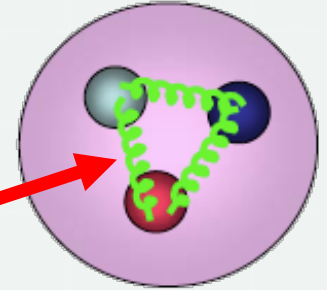
# Interaction Électromagnétique

- $S'$  exerce sur toutes les particules possédant une charge électrique.
- Messenger : Photon
- Interaction à longue portée dépendant de la charge électrique



# Interaction Forte

- $S'$  exerce uniquement sur les quarks
- Messagers : gluons
- Assure la cohésion des **quarks** dans les nucléons et des protons et neutrons dans le noyau



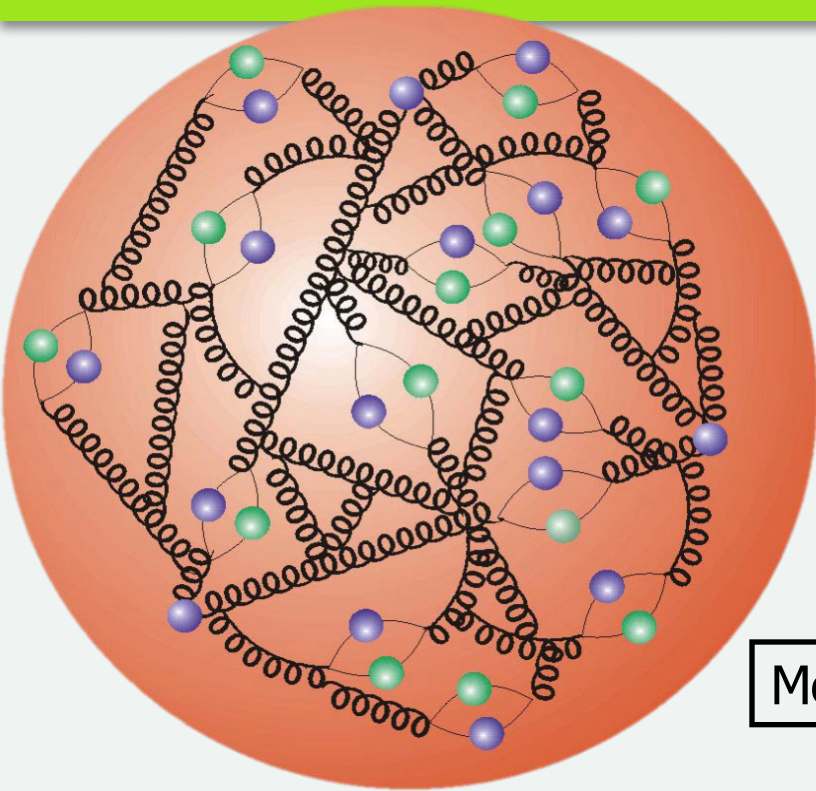
# Hadrons

- Les **quarks** libres ne sont jamais **observés**, ils sont toujours confinés dans des **états liés** appelés **hadrons**.
- Macroscopiquement les **hadrons** se comportent comme des particules ponctuelles
- Les Hadrons sont de deux types :
  - MESONS** ( $q\bar{q}$ )  
états liés d'un quark et d'un anti-quark  $\pi^+ = (u\bar{d})$  and  $K^- = (d\bar{s})$
  - BARYONS** ( $qqq$ )  
états liés de 3 quarks  $p = (uud)$  and  $n = (udd)$
  - ANTIBARYONS** ( $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ ) e.g.  $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

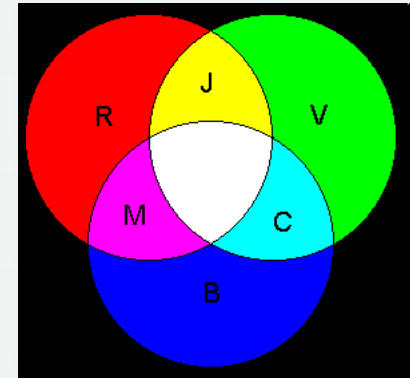
# L'interaction forte

En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de couleur: Bleu vert rouge

Ainsi le proton est "incolore"

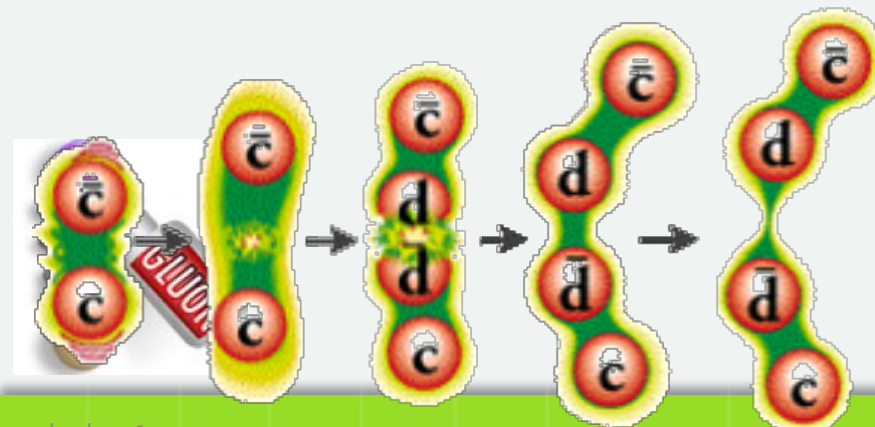


Médiateurs: **gluons**



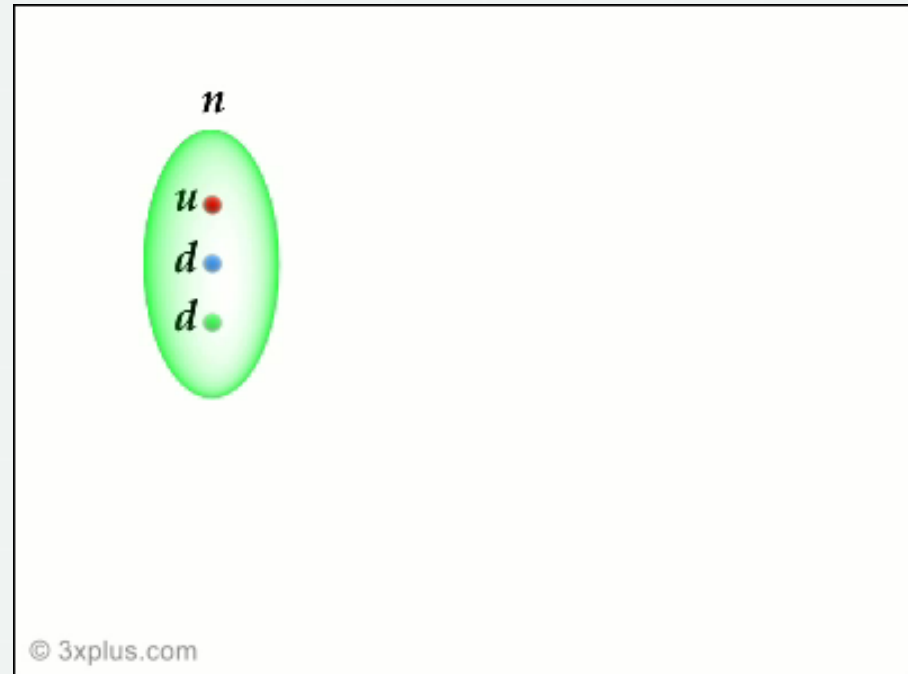
Les gluons « collent » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...). On ne peut pas observer un quark seul.

🦋 Stabilité des noyaux



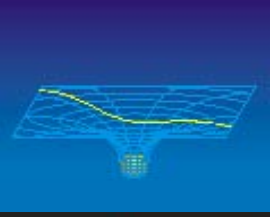



# Interaction Faible

- Radioactivité  $\beta$
- S'exerce sur toutes les particules
- Messagers :  
des particules appelées  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$
- Interaction de courte portée





# Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Range	Charge	Relative intensity
	<b>Gravitation</b> Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	mass	$10^{-39}$
	<b>Electromagnetique</b> Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	$10^{-2}$
	<b>Forte</b> Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	$10^{-15}$ m	Charge de couleur	1
	<b>Faible</b> Radioactivité $\beta$ , Soleil	leptons et quarks	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$ bosons	$10^{-18}$ m	Charge faible	$10^{-7}$

# Théorie quantique des champs

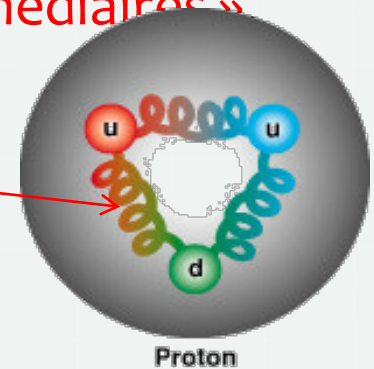
• Aux 4 forces fondamentales sont associés des « champs » qui remplissent l'espace. (par ex le champ électromagnétique pour la force électromagnétique).

• Ces champs sont **quantifiés**. Les « quanta » du champ sont des particules élémentaires appelées « bosons intermédiaires »

• Quanta de la **force électromagnétique**: photons

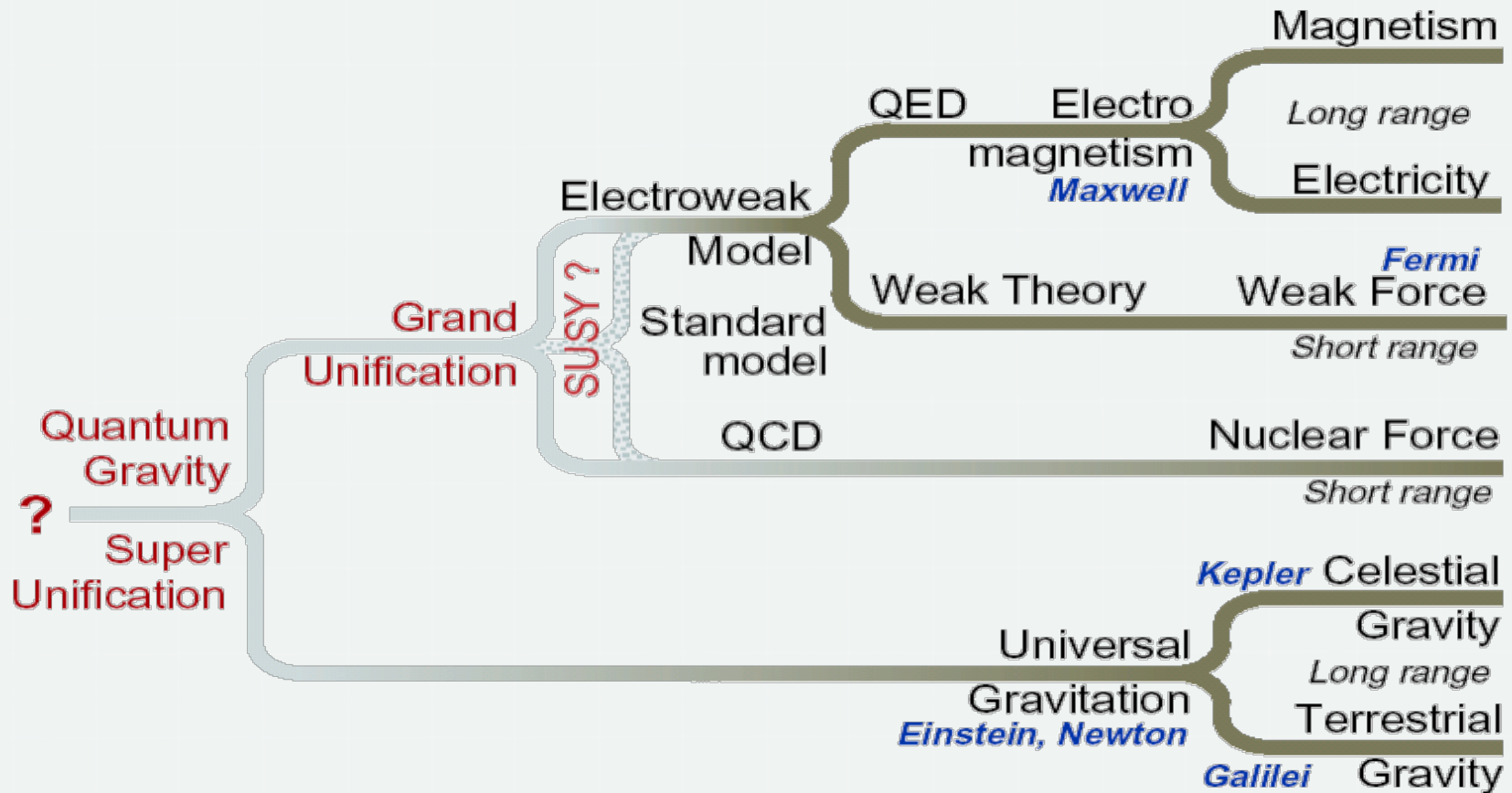
• Quanta de la **force forte**: gluons

• Quanta de la **force faible**: Bosons W et Z



• Tous ces bosons intermédiaires ont une masse nulle, sauf W et Z qui sont très massifs (environ 100 fois la masse du proton)

# Paradigme de l'unification



# 5- le boson de Higgs

# Masse

- La masse est omniprésente en physique

$\vec{P} = m\vec{g}$	Masse gravitationnelle	Galilée
$\vec{F} = m\vec{a}$	Masse inertielle	Newton
$E = mc^2$	Equivalence masse-énergie	Einstein

Toutes ces masses sont identiques

- Or au sein du modèle standard les particules sont toutes de masse nulle, sinon les invariances de jauge (symétries de la théorie) sont explicitement brisées.  
→ Contraire aux résultats expérimentaux

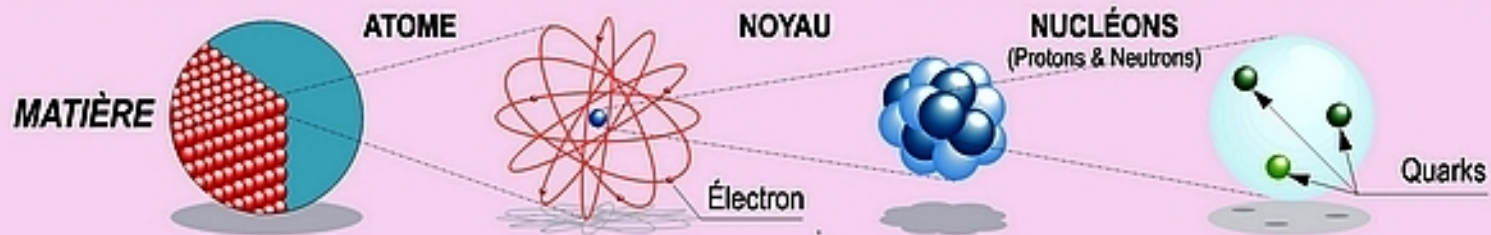
# Le mécanisme de Higgs

- La solution la plus simple est (Higgs, Kibble, Brout, Englert 1960's):
  - Toutes les particules sont de masse nulle.
  - Un nouveau champ scalaire imprègne l'univers. Les particules interagissant avec ce champ acquièrent une masse. Plus l'interaction avec ce champ est intense, plus la masse est élevée.
- L'équation la plus connue de la physique  $E=mc^2$  est le cas particulier d'une équation plus générale  $E^2=p^2c^2+m^2c^4$   
Pour une particule de masse nulle  $m=0$ , on obtient  $E=pc$  et puisque  $v/c=pc/E$ , alors  $v=c$ .  
→ Les particules de masse nulle se déplacent obligatoirement à la vitesse de la lumière. Avec des arguments similaires, les particules massives ne peuvent jamais atteindre la vitesse de la lumière
- Quand les particules de masse nulle se propagent dans le champ de Higgs, elles interagissent avec ce champ. Elles sont ralenties ( $v < c$ ) et de ce fait acquièrent une masse.

# Le boson de Higgs

- 🌐 Comme tous les champs, le champs de Higgs doit avoir un “quanta”, qui est nommé le “**boson de Higgs**”
- 🌐 la théorie ne contraint pas significativement la masse du boson de Higgs.  $M_H$  peut-être considéré comme un paramètre libre. Le boson de Higgs pouvait être n’importe où entre 10GeV and  $\sim 1000$ GeV.
- 🌐 Cette théorie est élégante, cohérente et en accord avec toutes les observations ... mais pendant 40 ans, cette particule a échappé à l’observation, elle a été observée EN 2012 dans des expériences ATLAS et CMS du CERN

# • TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •



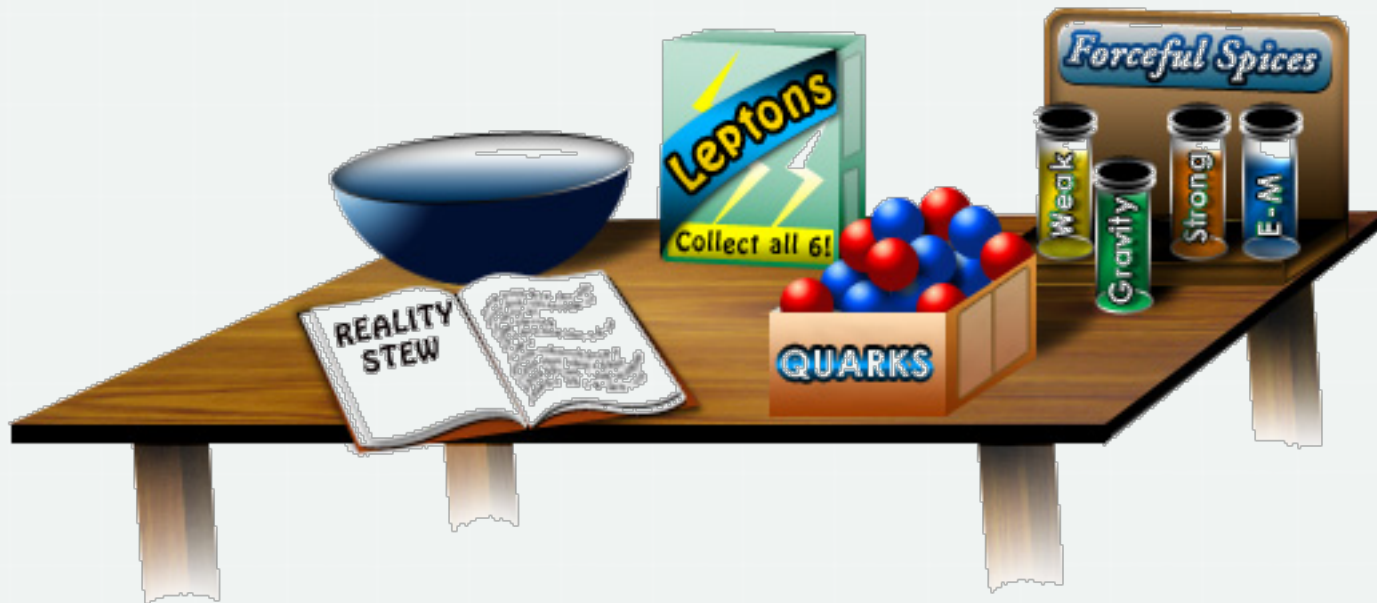
		LEPTONS peuvent se déplacer librement		QUARKS prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
<b>FERMIONS</b> La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe  Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	Première Famille	<b>ELECTRON</b> Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. 	<b>NEUTRINO ELECTRON</b> Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant. 	<b>BAS</b> Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2. 	<b>HAUT</b> Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2. 
	Deuxième Famille	<b>MUON</b> Un compagnon plus massif de l'électron. 	<b>NEUTRINO MUON</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. 	<b>ETRANGE</b> Un compagnon plus lourd du "Bas". 	<b>CHARME</b> Un compagnon plus lourd du "Haut". 
	Troisième Famille	<b>TAU</b> Un compagnon encore plus lourd que le Muon. 	<b>NEUTRINO TAU</b> Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. 	<b>BEAUTÉ</b> Un compagnon encore plus lourd du "Bas". 	<b>VÉRITÉ ou TOP</b> Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut". 
<b>BOSONS VECTEURS</b> Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.		<b>PHOTON</b> Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique. 	<b>GLUON</b> Porteur de la force "forte" entre Quarks. 	<b>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup> et Z<sup>0</sup></b> Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives. 	
<b>BOSON DE HIGGS ?</b> Hypothétique  Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"		<b>GRAVITON ?</b> Hypothétique			

M  
a  
s  
s  
e

Daniel BONNEFUE - CEA/DSM/DAPNIA février 1992 (MJ sept. 2005)



# Modèle standard de la physique des particules



Aboutissement et fleuron de la physique du  
20<sup>ème</sup> siècle

# Le modèle standard

- Une théorie quantique des champs décrivant des constituants ponctuels de spin-1/2 interagissant via l'échange de particules de spin-1.
- Théorie élégante basée sur des invariances de jauge locale.
- Contient 19 paramètres libres, dont la valeur n'est pas fixée par des principes premiers mais doit être déterminée expérimentalement.
- Description remarquablement complète et précise des phénomènes connus en physique des particules (on comprend vraiment la physique jusqu'à une échelle de 100GeV (LEP, CDF&Do))
- (Sur)testé avec précision  
précision  $<10^{-4}$  dans des centaines de mesures, jusqu'à un impressionnant  $10^{-12}$  pour le facteur gyromagnétique de l'électron.

Pourquoi chercher au-delà ?

Quantity	Value PDG 2009	Standard Model	Pull	Dev.
$m_t$ [GeV]	$170.9 \pm 1.8 \pm 0.6$	$171.1 \pm 1.9$	-0.1	-0.8
$M_W$ [GeV]	$80.428 \pm 0.039$ $80.376 \pm 0.033$	$80.375 \pm 0.015$	1.4 0.0	1.7 0.5
$M_Z$ [GeV]	$91.1876 \pm 0.0021$	$91.1874 \pm 0.0021$	0.1	-0.1
$\Gamma_Z$ [GeV]	$2.4952 \pm 0.0023$	$2.4968 \pm 0.0010$	-0.7	-0.5
$\Gamma(\text{had})$ [GeV]	$1.7444 \pm 0.0020$	$1.7434 \pm 0.0010$	-	-
$\Gamma(\text{inv})$ [MeV]	$499.0 \pm 1.5$	$501.59 \pm 0.08$	-	-
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	$83.984 \pm 0.086$	$83.988 \pm 0.016$	-	-
$\sigma_{\text{had}}$ [nb]	$41.541 \pm 0.037$	$41.466 \pm 0.009$	2.0	2.0
$R_e$	$20.804 \pm 0.050$	$20.758 \pm 0.011$	0.9	1.0
$R_\mu$	$20.785 \pm 0.033$	$20.758 \pm 0.011$	0.8	0.9
$R_\tau$	$20.764 \pm 0.045$	$20.803 \pm 0.011$	-0.9	-0.8
$R_b$	$0.21629 \pm 0.00066$	$0.21584 \pm 0.00006$	0.7	0.7
$R_c$	$0.1721 \pm 0.0030$	$0.17228 \pm 0.00004$	-0.1	-0.1
$A_{FB}^{(0,e)}$	$0.0145 \pm 0.0025$	$0.01627 \pm 0.00023$	-0.7	-0.6
$A_{FB}^{(0,\mu)}$	$0.0169 \pm 0.0013$		0.5	0.7
$A_{FB}^{(0,\tau)}$	$0.0188 \pm 0.0017$		1.5	1.6
$A_{FB}^{(0,b)}$	$0.0992 \pm 0.0016$	$0.1033 \pm 0.0007$	-2.5	-2.0
$A_{FB}^{(0,c)}$	$0.0707 \pm 0.0035$	$0.0738 \pm 0.0006$	-0.9	-0.7
$A_{FB}^{(0,s)}$	$0.0976 \pm 0.0114$	$0.1034 \pm 0.0007$	-0.5	-0.4
$\bar{s}_\ell^2(A_{FB}^{(0,q)})$	$0.2324 \pm 0.0012$ $0.2238 \pm 0.0050$	$0.23149 \pm 0.00013$	0.8 -1.5	0.6 -1.6
$A_e$	$0.15138 \pm 0.00216$ $0.1544 \pm 0.0060$ $0.1498 \pm 0.0049$	$0.1473 \pm 0.0011$	1.9 1.2 0.5	2.4 1.4 0.7
$A_\mu$	$0.142 \pm 0.015$		-0.4	-0.3
$A_\tau$	$0.136 \pm 0.015$ $0.1439 \pm 0.0043$		-0.8 -0.8	-0.7 -0.5
$A_b$	$0.923 \pm 0.020$	$0.9348 \pm 0.0001$	-0.6	-0.6
$A_c$	$0.670 \pm 0.027$	$0.6679 \pm 0.0005$	0.1	0.1
$A_s$	$0.895 \pm 0.091$	$0.9357 \pm 0.0001$	-0.4	-0.4
$g_V^2$	$0.3010 \pm 0.0015$	$0.30386 \pm 0.00018$	-1.9	-1.8
$g_R^2$	$0.0308 \pm 0.0011$	$0.03001 \pm 0.00003$	0.7	0.7
$g_V^{\nu e}$	$-0.040 \pm 0.015$	$-0.0397 \pm 0.0003$	0.0	0.0
$g_A^{\nu e}$	$-0.507 \pm 0.014$	$-0.5064 \pm 0.0001$	0.0	0.0
$A_{PV}$	$(-1.31 \pm 0.17) \cdot 10^{-7}$	$(-1.54 \pm 0.02) \cdot 10^{-7}$	1.3	1.2
$Q_W(\text{Cs})$	$-72.62 \pm 0.46$	$-73.16 \pm 0.03$	1.2	1.2
$Q_W(\text{Tl})$	$-116.4 \pm 3.6$	$-116.76 \pm 0.04$	0.1	0.1
$\frac{\Gamma(b \rightarrow s\gamma)}{\Gamma(b \rightarrow X e \nu)}$	$(3.55^{+0.53}_{-0.46}) \cdot 10^{-3}$	$(3.19 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$	0.8	0.7
$\frac{1}{2}(g_\mu - 2 - \frac{\alpha}{\pi})$	$4511.07(74) \cdot 10^{-9}$	$4509.08(10) \cdot 10^{-9}$	2.7	2.7
$\tau_\tau$ [fs]	$290.93 \pm 0.48$	$291.80 \pm 1.76$	-0.4	-0.4

# Pour en savoir plus ...

Revue élémentaire : <http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/>



N° 1 : De l'atome au noyau



N° 5 : Les Neutrinos



N° 2 : Le neutron



N° 6 : Le Modèle Standard



N° 3 : Les rayons cosmiques



N° 7 : Quand l'Univers fait boum



N° 4 : La couleur des particules



N° 8 : En route pour l'au-delà