

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
7/11/2013

CERN 4 juillet 2012

**Spécial
Festival d'Avignon**
La 66^e fête du théâtre
démarré le 7 juillet
Supplément

Le Monde

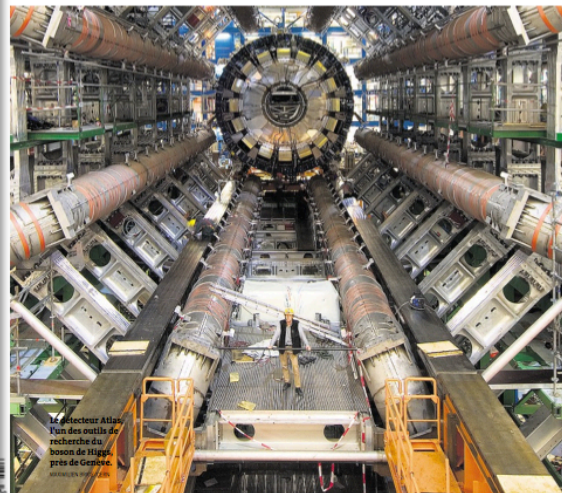
**Le Monde
des livres**
Les coups de cœur
de la rédaction
Supplément

Jeudi 5 juillet 2012 - 68^e 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 Alain
Léon, 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'Ecclesiaste 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 1 milliard de km/h dans un anneau géant enterré entre France et Suisse pour parvenir à éteindre 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. Étonnantes 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-édition des journaux jeudi 5 juillet, avec un jour d'avance par rapport au jour habituel, nos suppléments « Le Monde des livres » et « Le Monde des livres » nous prient 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 24-25

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

1,50 EURO, PREMIÈRE ÉDITION N° 9688

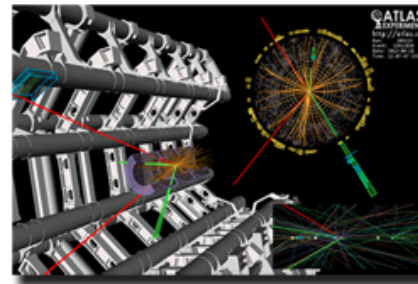
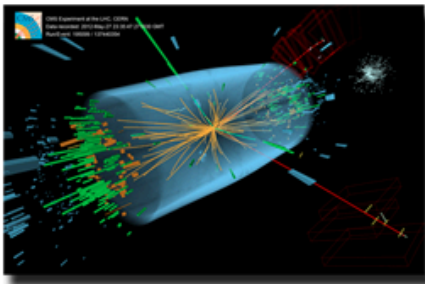
JEUDI 5 JUILLET 2012

WWW.LIBERATION.FR

Prix nobel de physique 2013

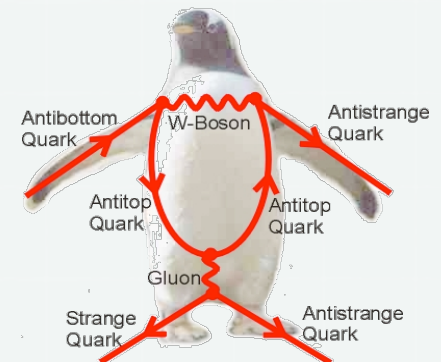
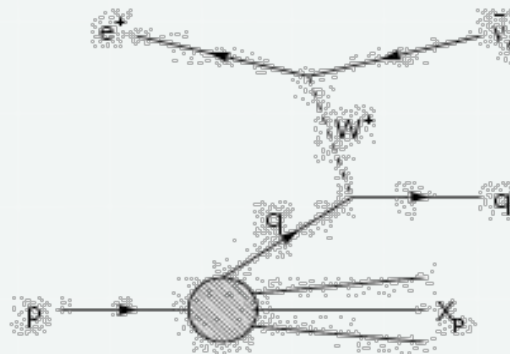
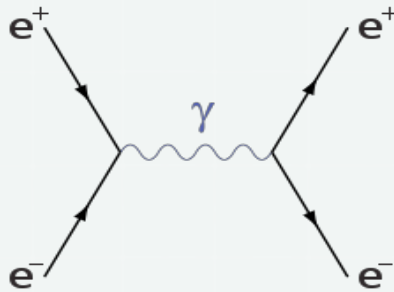


"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

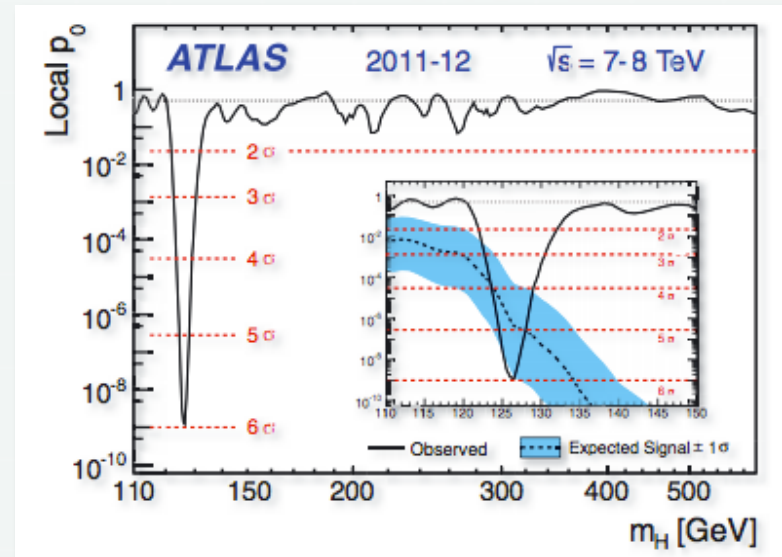
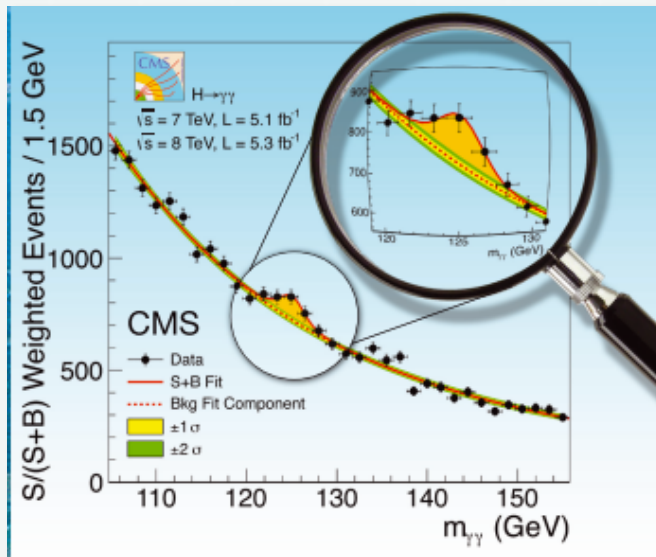


Point de vue théorique

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



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



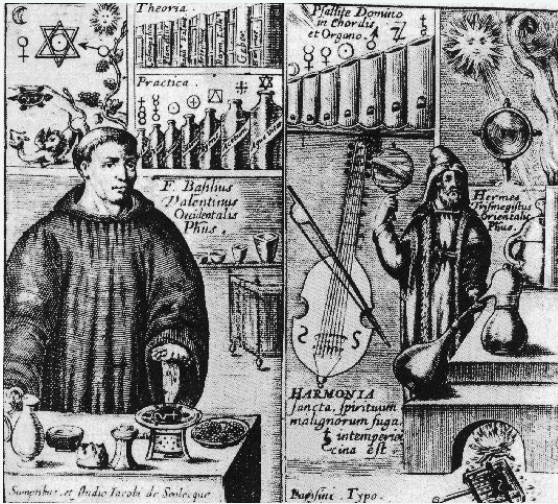
terre
état solide



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

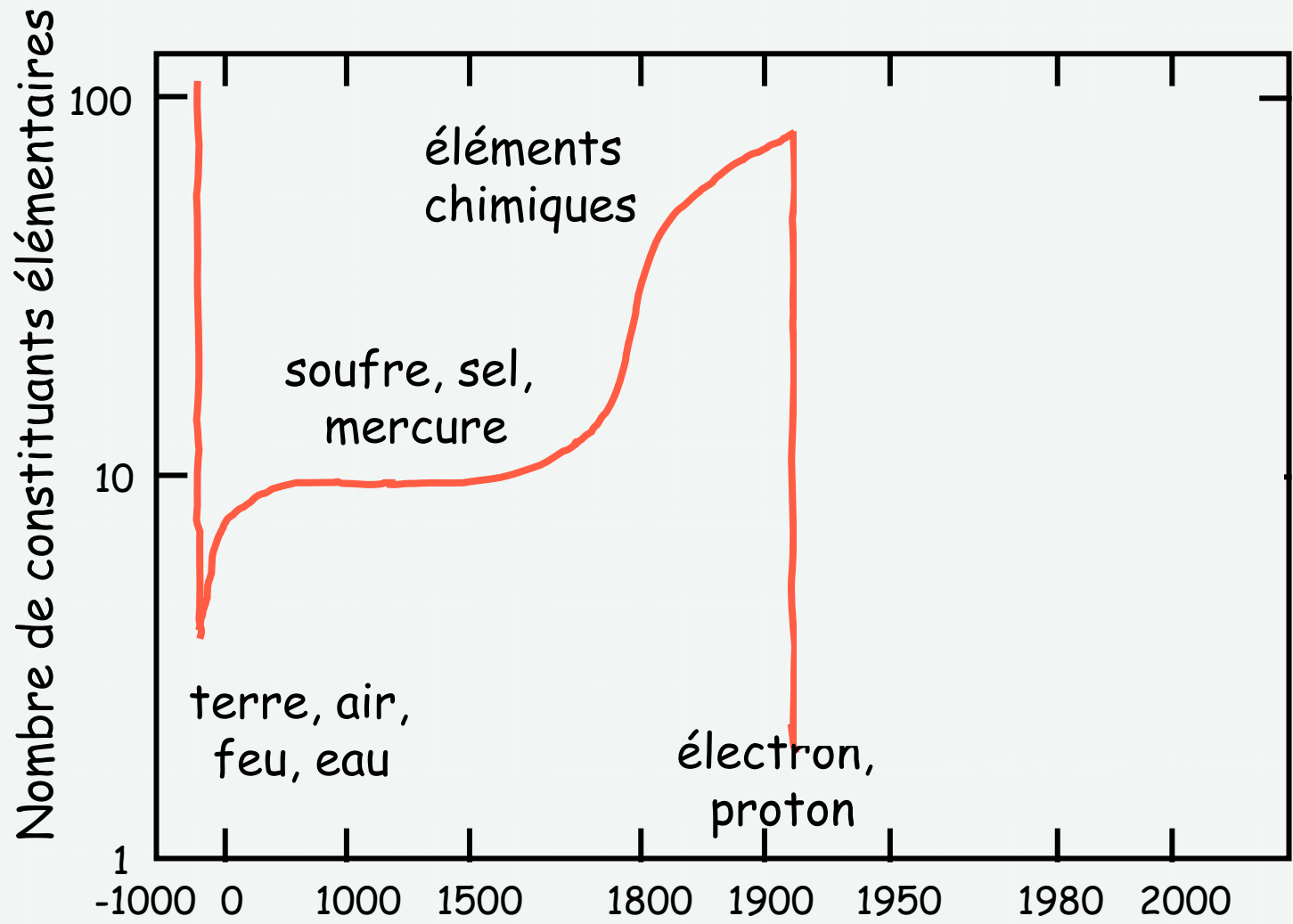


XVIII siècle : Les chimistes (Boyle, Cavendish, Lavoisier) et la renaissance de l'hypothèse atomique (Dalton): l'eau, l'air, le sel sont composites.

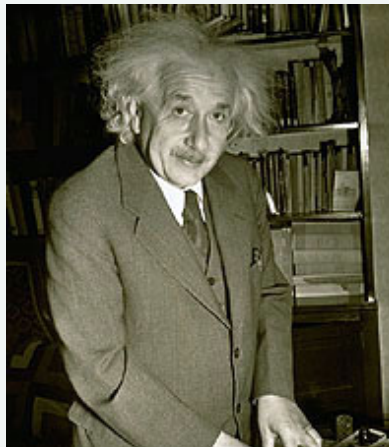
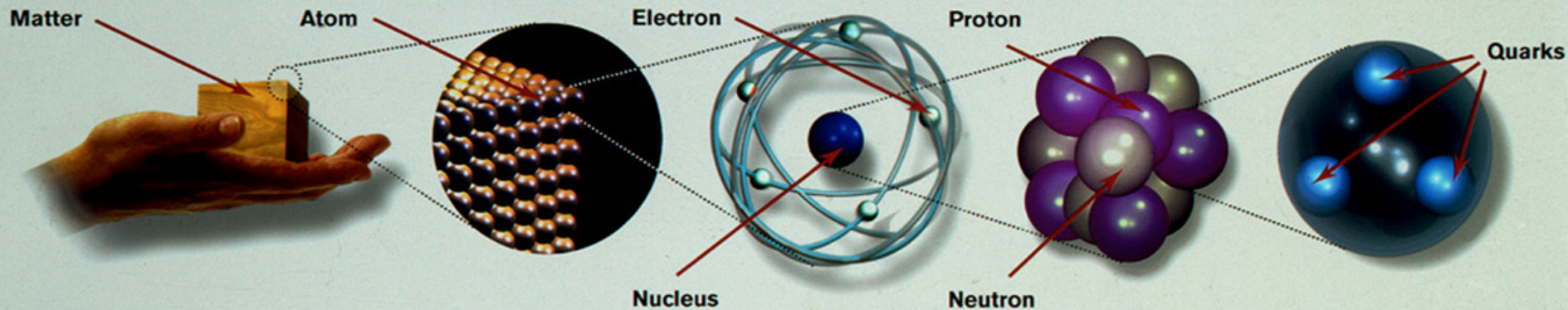


| Etat physique du corps simple(25°C,1 atm) | | SOLIDE | | | | | LIQUIDE | | | | GAZEUX | | | | SYNTHESE | | | | | |
|---|----|--------|-----|----|----|----|---------|----|----|----|--------|----|----|----|----------|----|----|----|----|----|
| * Lanthanides | | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | 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



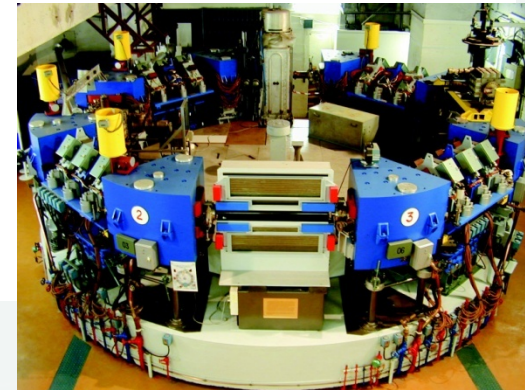
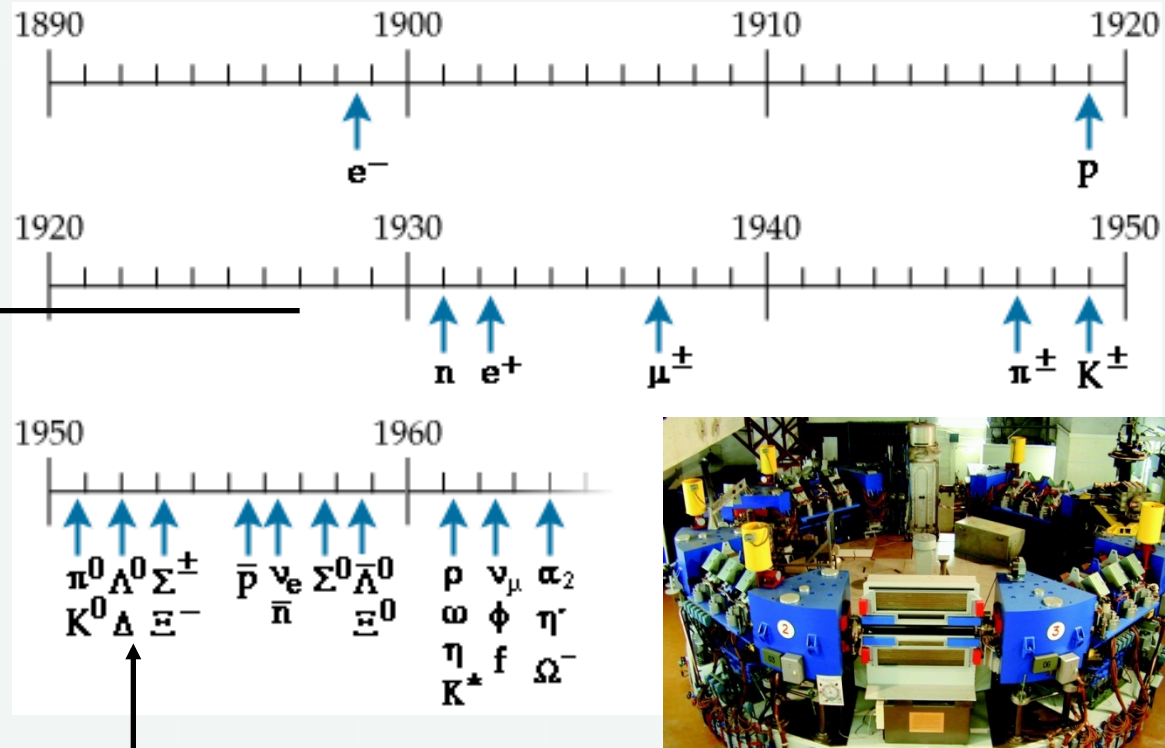
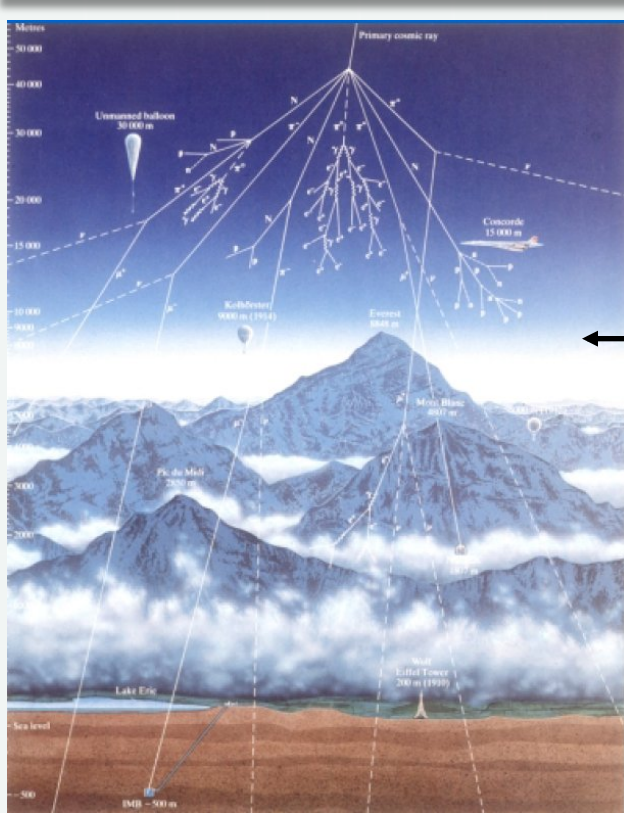
Le XX^{ème} siècle



Depuis le début du XX^{ème} siècle :
23 prix Nobel pour la physique des particules

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

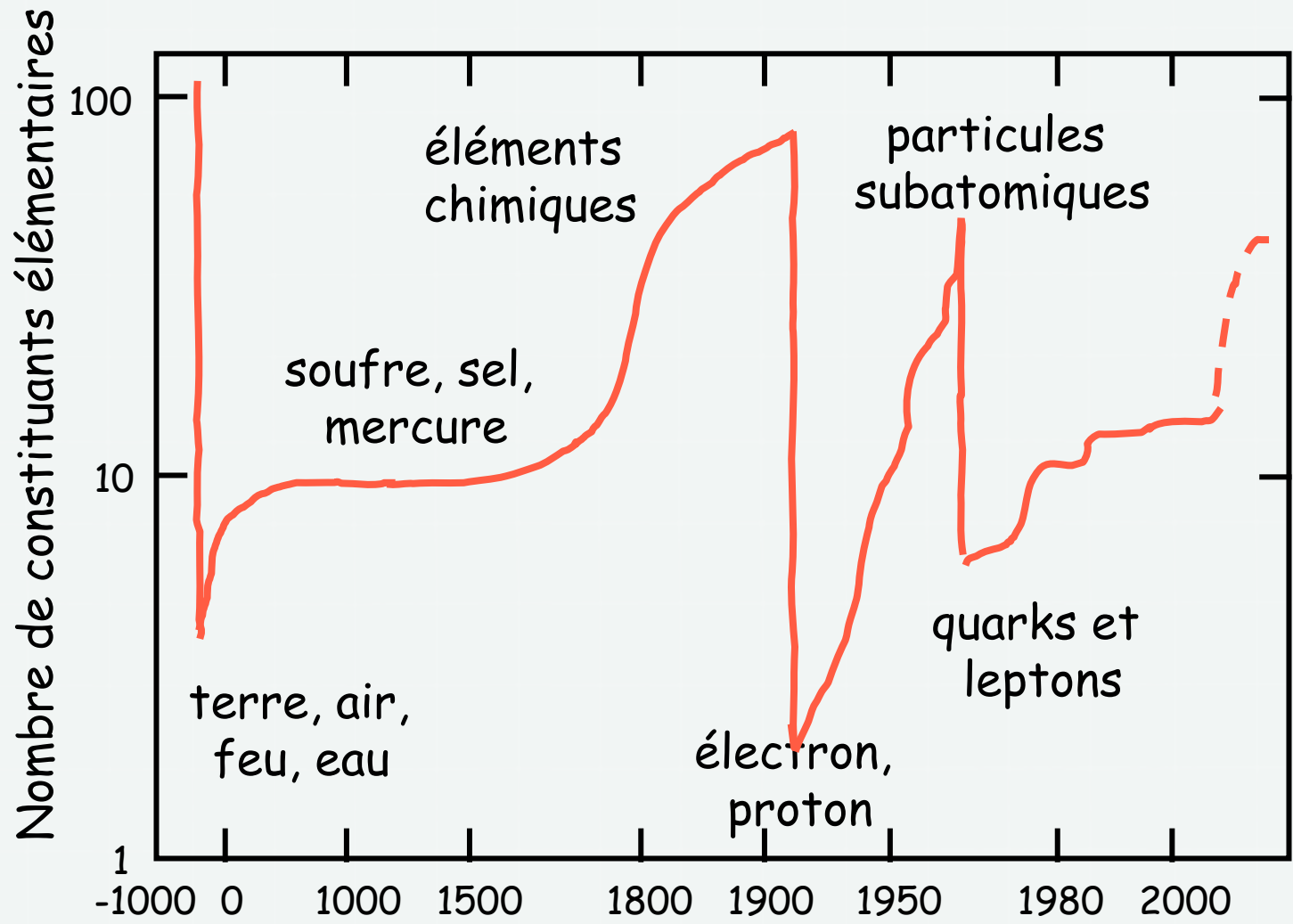
Trop de nouvelles particules...



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

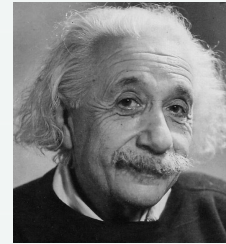
$$E \propto 1/\lambda$$



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

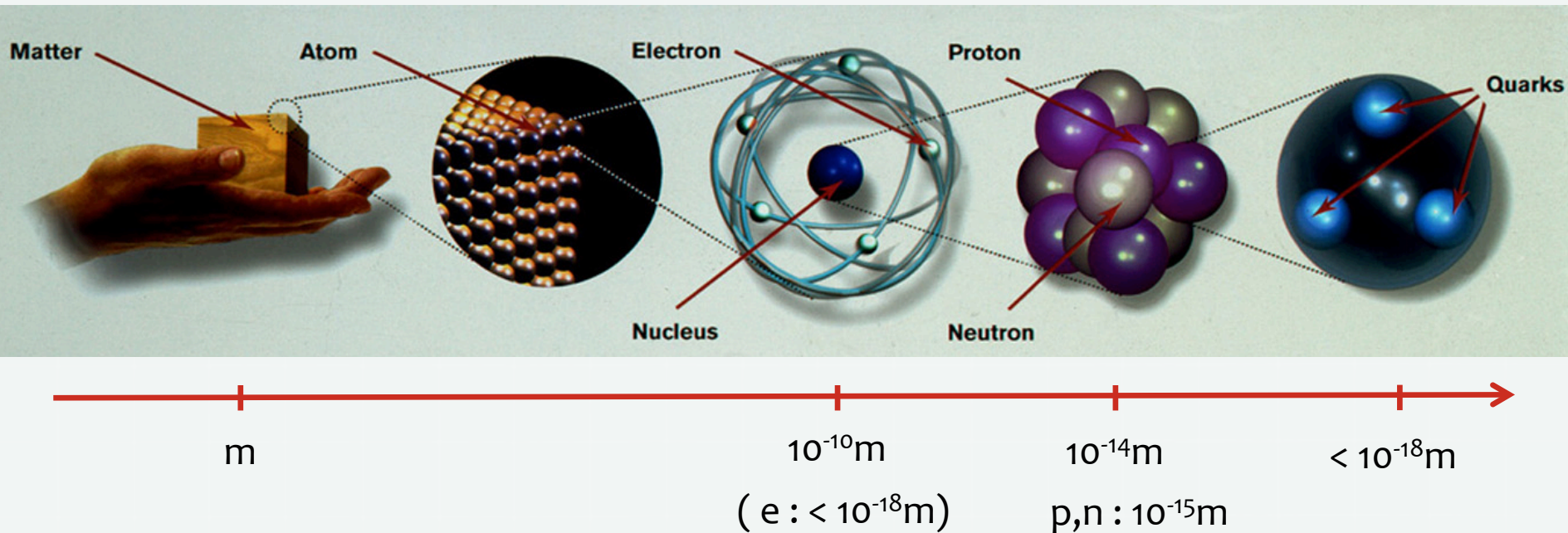
Les hautes énergies permettent de

- 🌐 Sonder la matière à petite échelle

$$E \propto 1/\lambda$$



Dualité
onde-corpuscule
Louis De Broglie

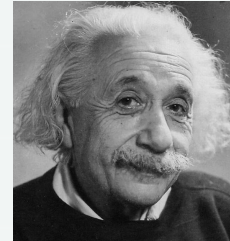


Physique des hautes énergies

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

$$E = kT$$

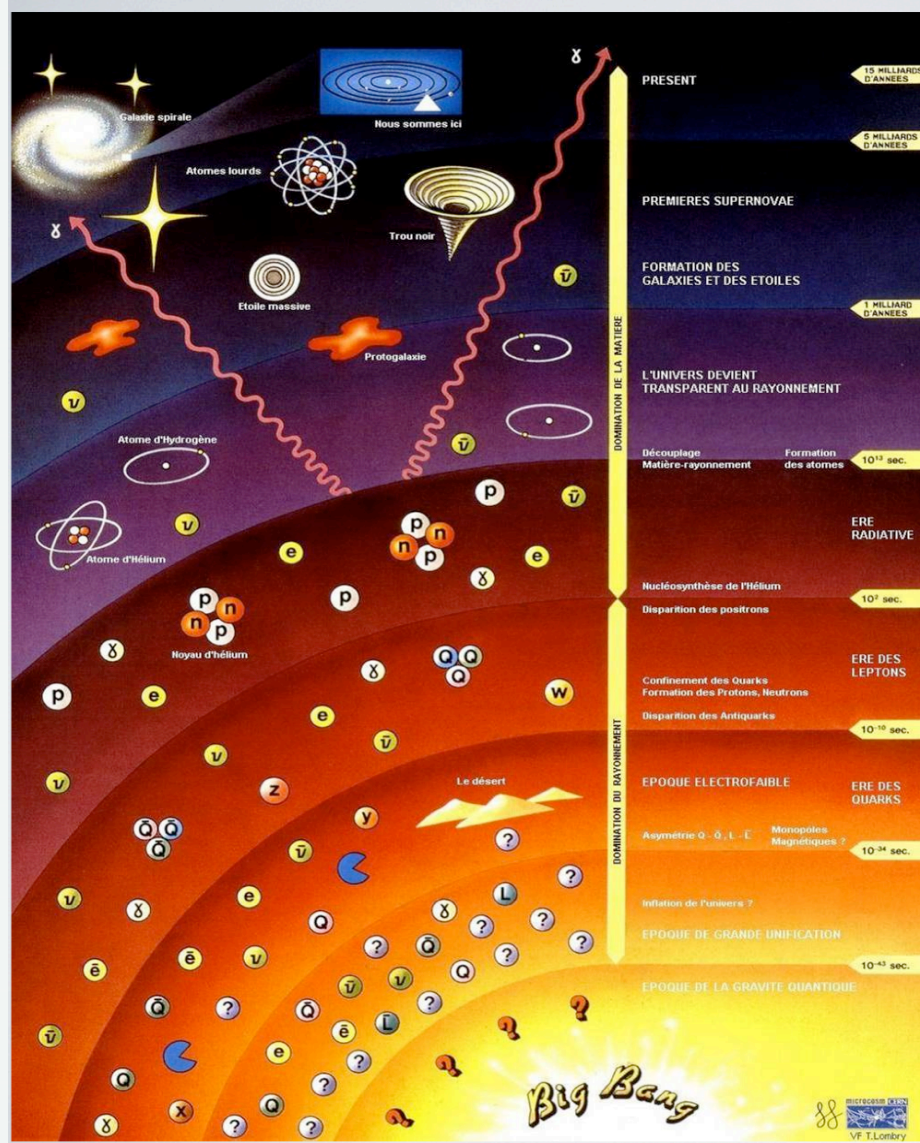


Physique statistique
Ludwig Boltzmann

Lien entre physique des particules et cosmologie

↑ Temps

↓ Température / densité d'énergie



l'histoire de notre univers

10^{13} s

premiers atomes

1 s

hadrons

10^{-6} s

quarks
leptons

10^{-10} s

10^{-34} s

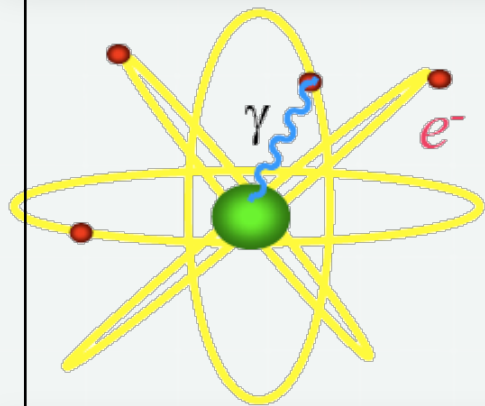
??

10^{-44} s

gravitation
quantique

$$E = kT$$

3- La matière



ATOME

Energie de liaison ~ 10 eV

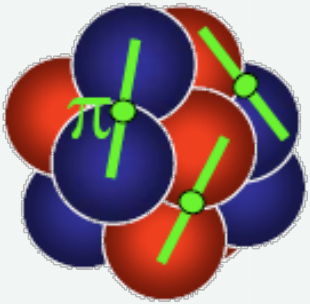
Electrons liés à l'atome par la force **force electromagnetique**

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/c²

Propriétés chimiques dependent du nombre d'électrons



NOYAU

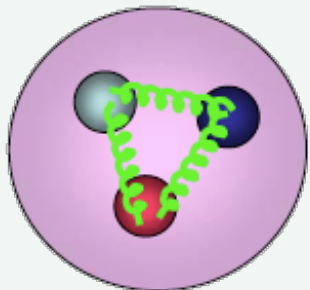
Energie de liaison ~ 10 MeV/nucleon

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

Size : Noyau moyen ~ 5 fm (1 fm = 10^{-15} m)

Charge : Ze

Mass : de quelques GeV/c² quelques centaines GeV/c²



NUCLEON

Energie de liaison ~ 1 GeV

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

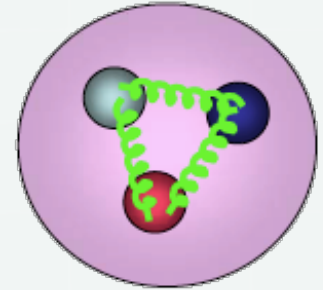
Size : p, n ~ 1 fm

Charge : proton +e; neutron uncharged

Mass : p = 938.27 MeV/c², n = 939.57 MeV/c² ~ 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

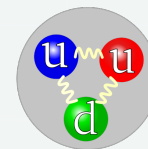
La matière qui nous entoure

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

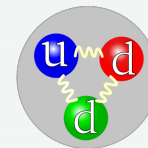
| Particule | Symbole | Type | Charge (unité e) |
|-----------------------|---------|--------|------------------|
| Electron | e^- | Lepton | -1 |
| Neutrino Electronique | ν_e | Lepton | 0 |
| Quark up | u | Quark | $2/3$ |
| Quark down | d | Quark | $-1/3$ |

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.

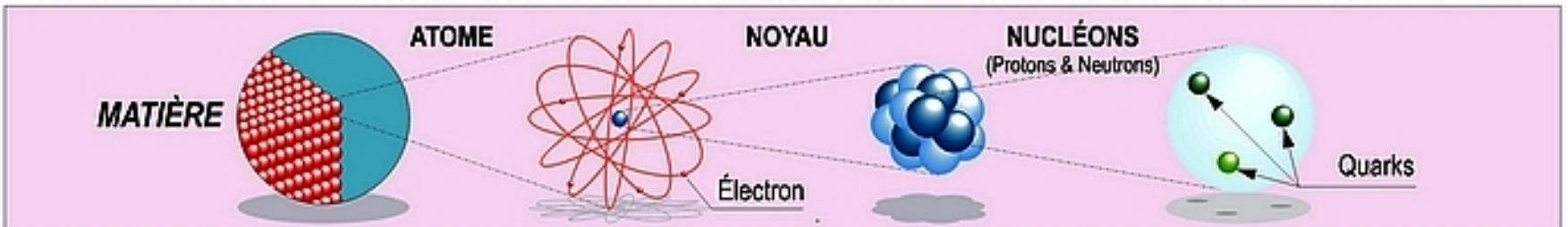


Proton (uud)
stable (période $>3 \times 10^{29}$ ans)



Neutron (udd)
instable, période ~ 10 minutes

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



| FERMIONS | | LEPTONS peuvent se déplacer librement | | QUARKS 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 | ELECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. | e | NEUTRINO ELECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant. | ν_e | BAS Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2. | d | HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2. | u |
| | Deuxième Famille | MUON Un compagnon plus massif de l'électron. | μ | NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. | ν_μ | ETRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas". | s | CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut". | c |
| | Troisième Famille | TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon. | τ | NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. | ν_τ | BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas". | b | VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut". | t |

M
a
s
s
e

+ Antiparticules associées

4- Les interactions fondamentales

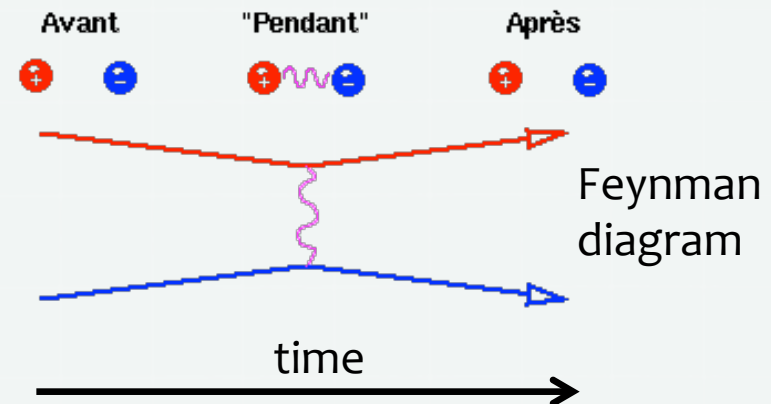
Interactions entre particules fondamentales

- 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



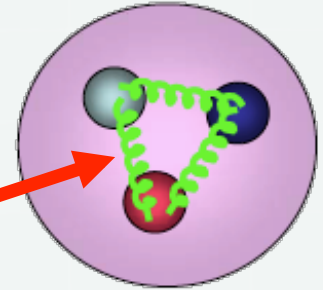
Interaction Électromagnétique

- 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



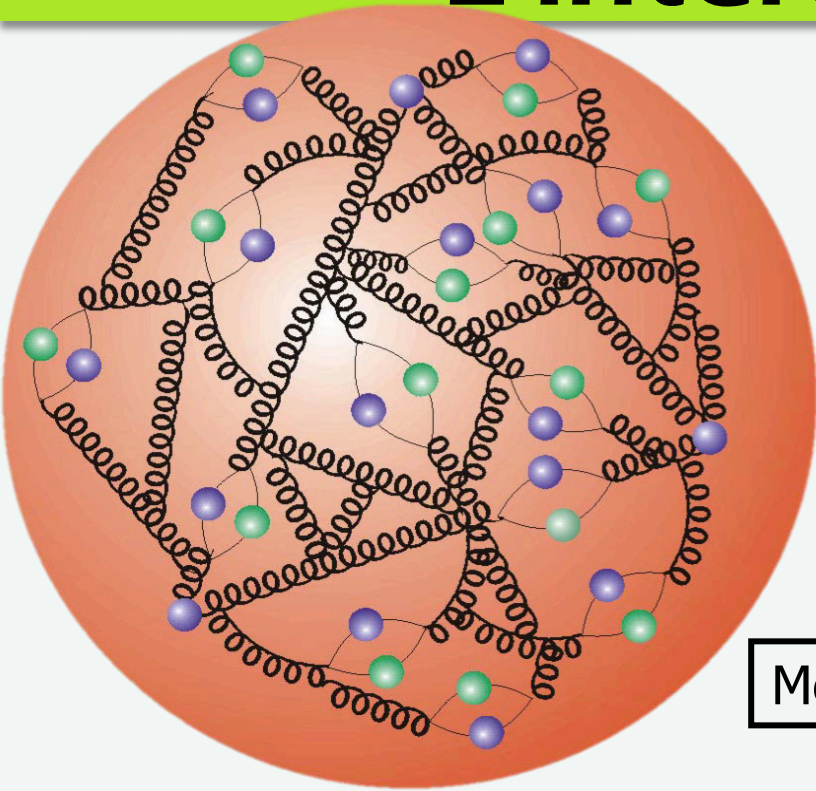
Hadrons

- 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. $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

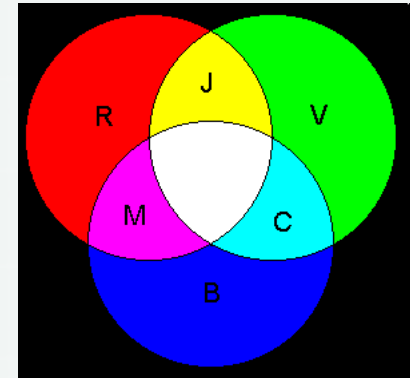
L'interaction forte

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

Ainsi le proton est "incolore"

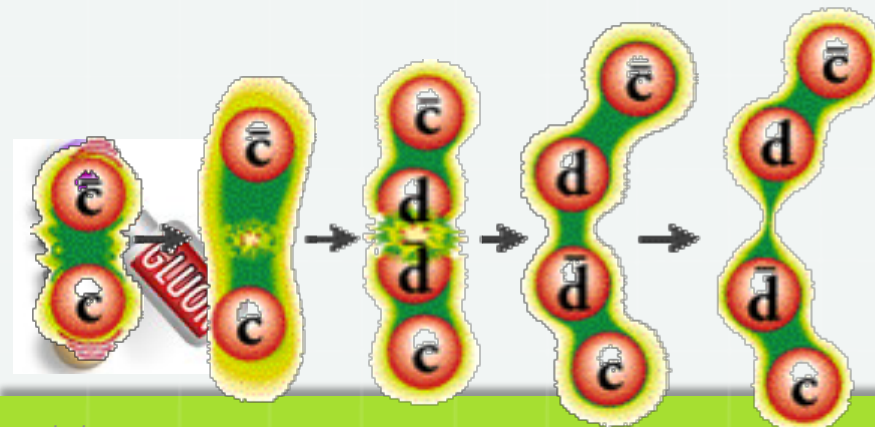


Médiateurs: **gluons**



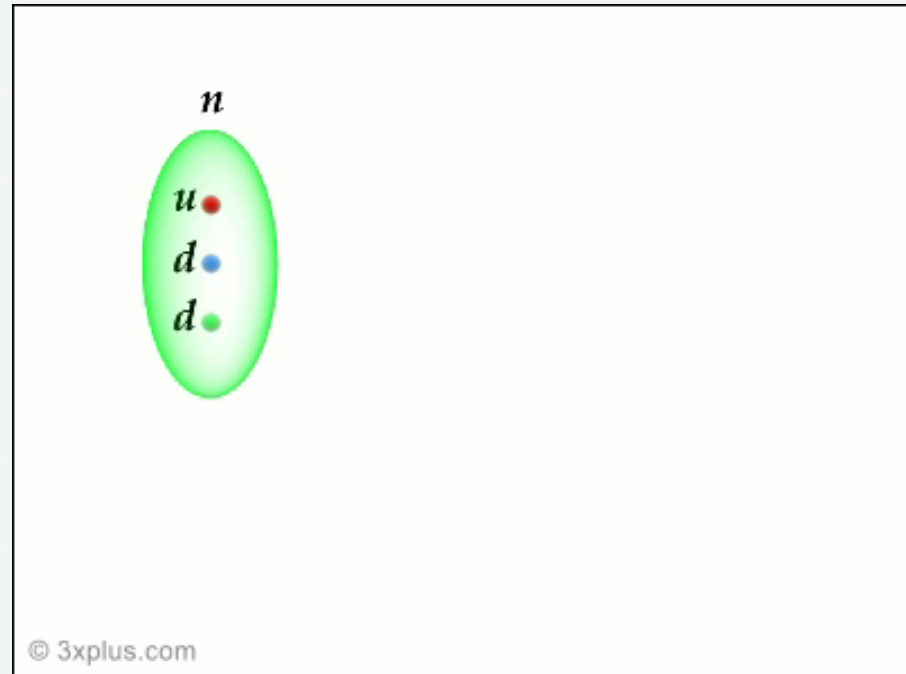
Les gluons « collent » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...). On ne peut pas observer un quark seul.

⇒ Stabilité des noyaux

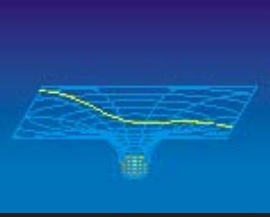





Interaction Faible

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

Théorie quantique des champs

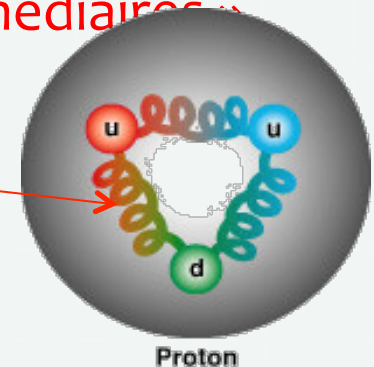
• Aux 4 forces fondamentales sont associés des « champs » qui remplissent l'espace. (par ex le champ électromagnétique pour la force électromagnétique).

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

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

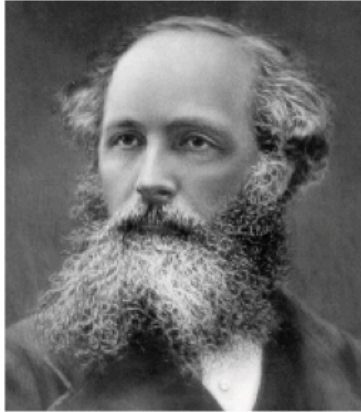
• Quanta de la **force forte**: gluons

• 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)

Naissance d'un paradigme

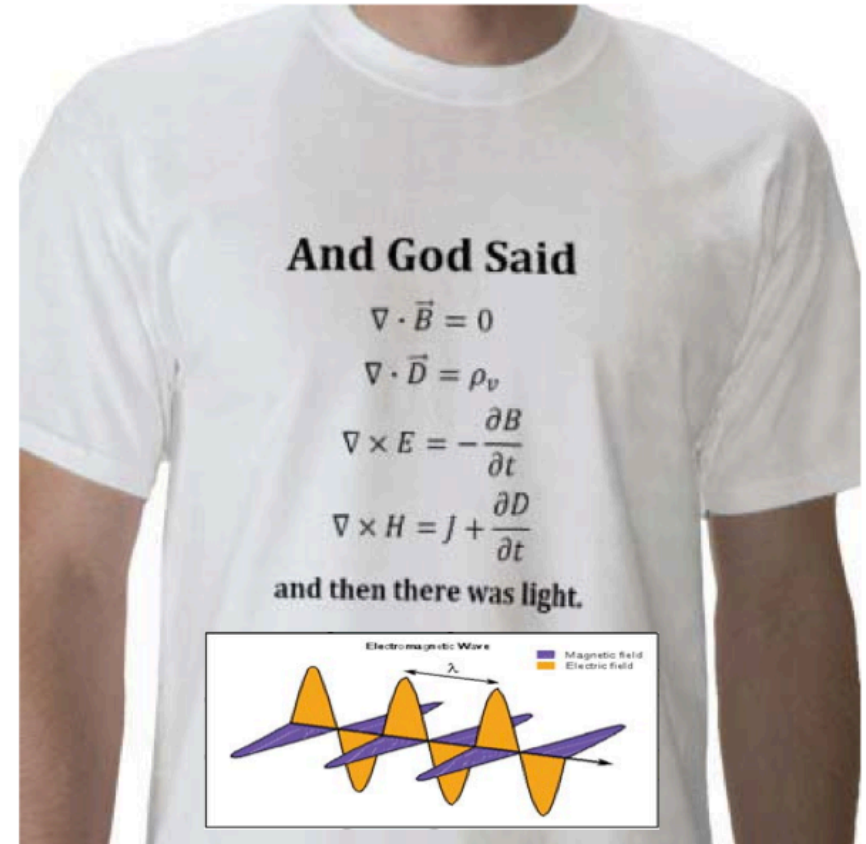


James Clerk
Maxwell

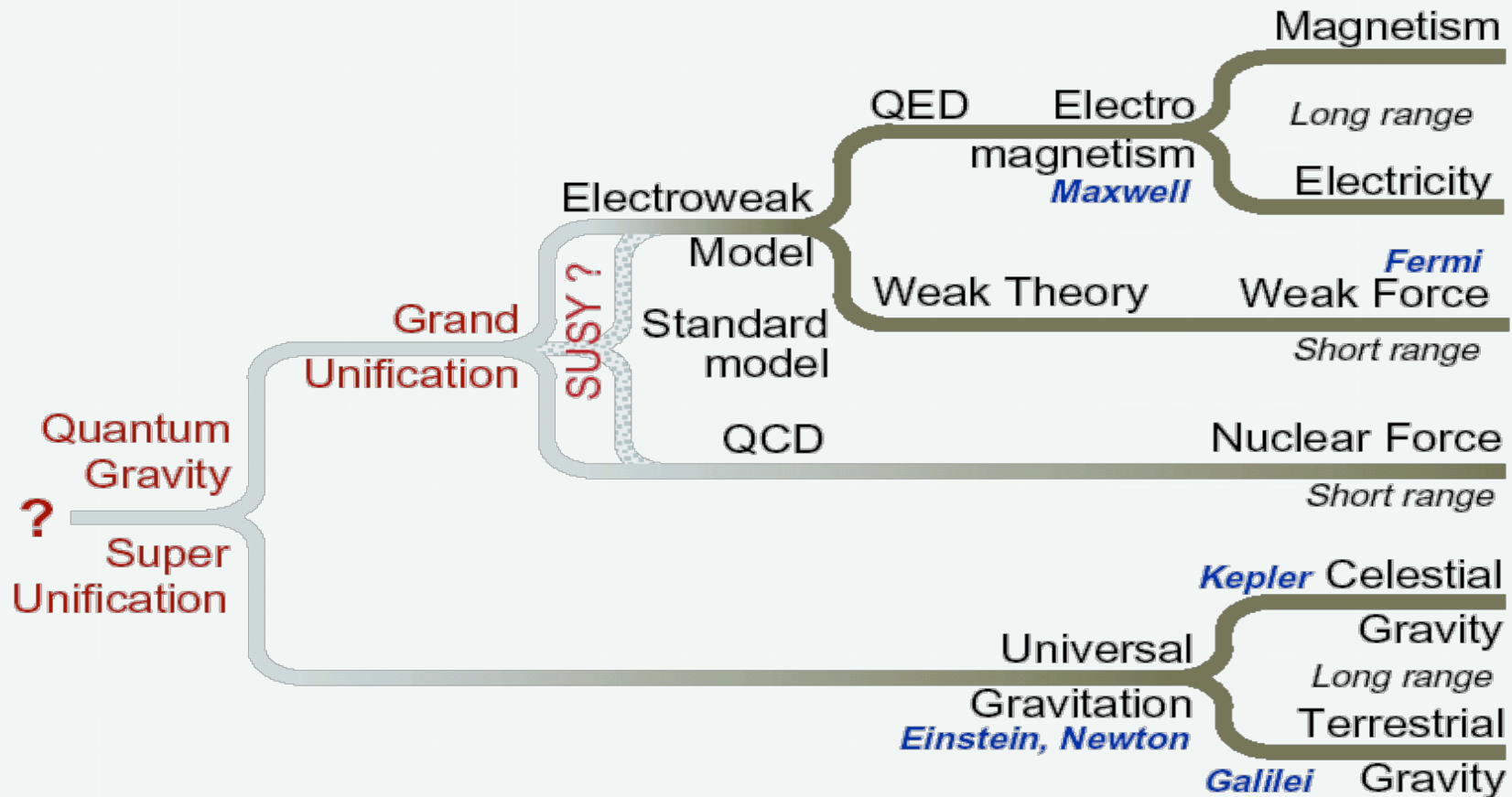
Maxwell introduit le concept de champ et remarque une symétrie entre les équations de l'électricité et du magnétisme

Unification : ELECTROMAGNÉTISME

La lumière est une onde électromagnétique ... conséquence inévitable des lois unifiées de l'électricité et du magnétisme !!!



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

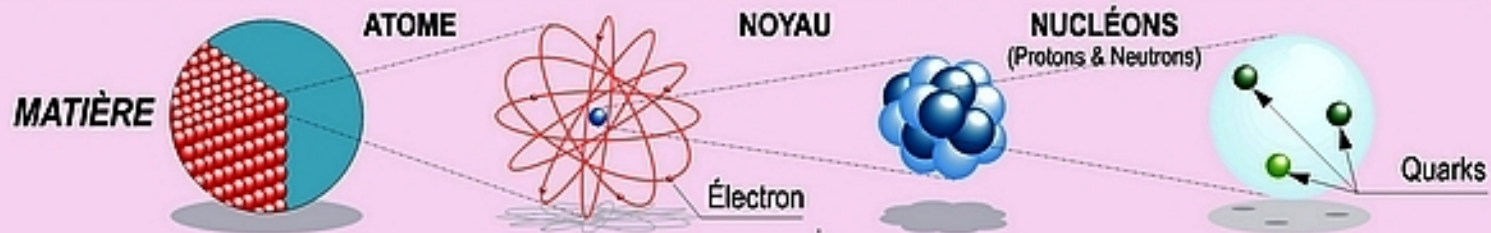
Le mécanisme de Higgs

- 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 $\sim 1000\text{GeV}$.
- 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 •

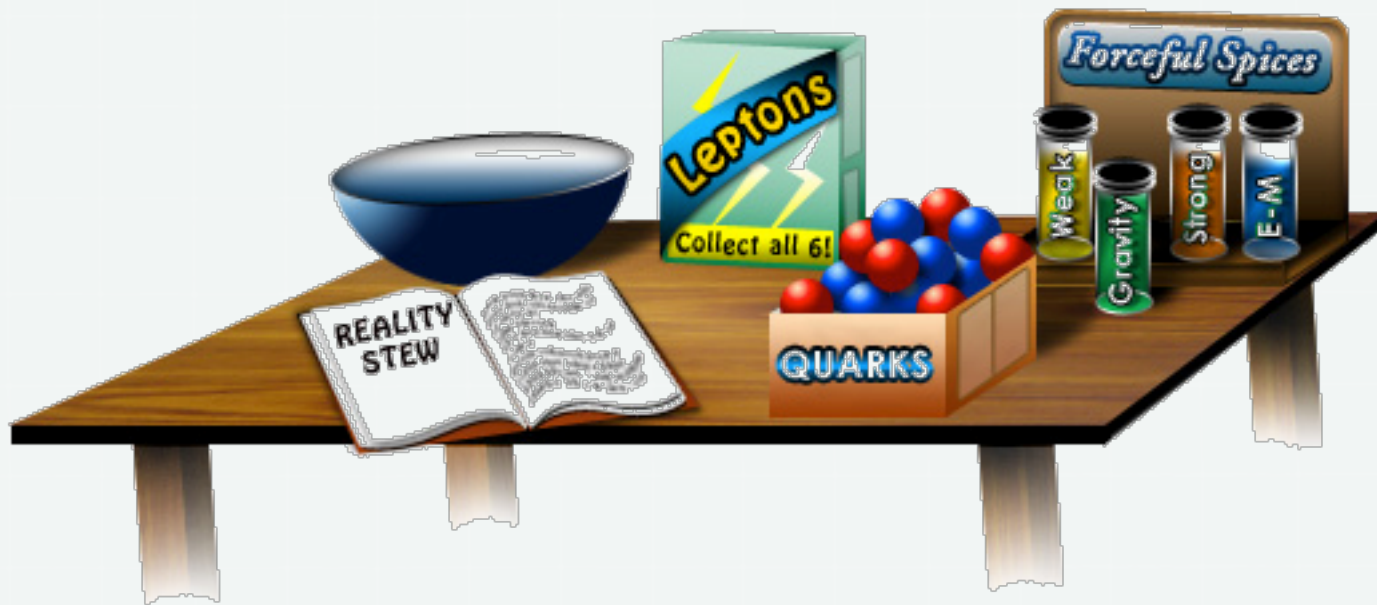


| | | LEPTONS peuvent se déplacer librement | | QUARKS prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement. | |
|--|-------------------|---|--|--|---|
| FERMIONS La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe | Première Famille | ELECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1. | NEUTRINO ELECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant. | BAS Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2. | HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2. |
| | Deuxième Famille | MUON Un compagnon plus massif de l'électron. | NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. | ETRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas". | CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut". |
| | Troisième Famille | TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon. | NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron. | BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas". | VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut". |
| BOSONS VECTEURS Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature. | | PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique. | GLUON Porteur de la force "forte" entre Quarks. | BOSONS INTERMÉDIAIRES : W⁺, W⁻ et Z⁰ Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives. | |
| BOSON DE HIGGS ? | | Hypothétique Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible" | | Hypothétique GRAVITON ? | |

M a s s e ↓

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

Modèle standard de la physique des particules



Aboutissement et fleuron de la physique du
20^{ème} 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 ± 1.9 | -0.1 | -0.8 |
| M_W [GeV] | 80.428 ± 0.039 80.376 ± 0.033 | 80.375 ± 0.015 | 1.4 0.0 | 1.7 0.5 |
| M_Z [GeV] | 91.1876 ± 0.0021 | 91.1874 ± 0.0021 | 0.1 | -0.1 |
| Γ_Z [GeV] | 2.4952 ± 0.0023 | 2.4968 ± 0.0010 | -0.7 | -0.5 |
| $\Gamma(\text{had})$ [GeV] | 1.7444 ± 0.0020 | 1.7434 ± 0.0010 | - | - |
| $\Gamma(\text{inv})$ [MeV] | 499.0 ± 1.5 | 501.59 ± 0.08 | - | - |
| $\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV] | 83.984 ± 0.086 | 83.988 ± 0.016 | - | - |
| σ_{had} [nb] | 41.541 ± 0.037 | 41.466 ± 0.009 | 2.0 | 2.0 |
| R_e | 20.804 ± 0.050 | 20.758 ± 0.011 | 0.9 | 1.0 |
| R_μ | 20.785 ± 0.033 | 20.758 ± 0.011 | 0.8 | 0.9 |
| R_τ | 20.764 ± 0.045 | 20.803 ± 0.011 | -0.9 | -0.8 |
| R_b | 0.21629 ± 0.00066 | 0.21584 ± 0.00006 | 0.7 | 0.7 |
| R_c | 0.1721 ± 0.0030 | 0.17228 ± 0.00004 | -0.1 | -0.1 |
| $A_{FB}^{(0,e)}$ | 0.0145 ± 0.0025 | 0.01627 ± 0.00023 | -0.7 | -0.6 |
| $A_{FB}^{(0,\mu)}$ | 0.0169 ± 0.0013 | - | 0.5 | 0.7 |
| $A_{FB}^{(0,\tau)}$ | 0.0188 ± 0.0017 | - | 1.5 | 1.6 |
| $A_{FB}^{(0,b)}$ | 0.0992 ± 0.0016 | 0.1033 ± 0.0007 | -2.5 | -2.0 |
| $A_{FB}^{(0,c)}$ | 0.0707 ± 0.0035 | 0.0738 ± 0.0006 | -0.9 | -0.7 |
| $A_{FB}^{(0,s)}$ | 0.0976 ± 0.0114 | 0.1034 ± 0.0007 | -0.5 | -0.4 |
| $\bar{s}_\ell^2(A_{FB}^{(0,q)})$ | 0.2324 ± 0.0012 | 0.23149 ± 0.00013 | 0.8 | 0.6 |
| | 0.2238 ± 0.0050 | - | -1.5 | -1.6 |
| A_e | 0.15138 ± 0.00216 | 0.1473 ± 0.0011 | 1.9 | 2.4 |
| | 0.1544 ± 0.0060 | - | 1.2 | 1.4 |
| | 0.1498 ± 0.0049 | - | 0.5 | 0.7 |
| A_μ | 0.142 ± 0.015 | - | -0.4 | -0.3 |
| A_τ | 0.136 ± 0.015 | - | -0.8 | -0.7 |
| | 0.1439 ± 0.0043 | - | -0.8 | -0.5 |
| A_b | 0.923 ± 0.020 | 0.9348 ± 0.0001 | -0.6 | -0.6 |
| A_c | 0.670 ± 0.027 | 0.6679 ± 0.0005 | 0.1 | 0.1 |
| A_s | 0.895 ± 0.091 | 0.9357 ± 0.0001 | -0.4 | -0.4 |
| g_V^2 | 0.3010 ± 0.0015 | 0.30386 ± 0.00018 | -1.9 | -1.8 |
| g_R^2 | 0.0308 ± 0.0011 | 0.03001 ± 0.00003 | 0.7 | 0.7 |
| g_V^{Ve} | -0.040 ± 0.015 | -0.0397 ± 0.0003 | 0.0 | 0.0 |
| g_A^{Ve} | -0.507 ± 0.014 | -0.5064 ± 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 ± 0.46 | -73.16 ± 0.03 | 1.2 | 1.2 |
| $Q_W(\text{Tl})$ | -116.4 ± 3.6 | -116.76 ± 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 |
| τ_τ [fs] | 290.93 ± 0.48 | 291.80 ± 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