

Les objets de la physique des particules

Elisabeth Petit
CPPM



École de la Physique au Détecteur 2024
Fréjus, 24-29 novembre 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

Présentation des cours

- ◆ Les objets de la physique des particules
- ◆ Limitations du Modèle Standard, panorama de la physique des particules au LHC et hors accélérateurs
- ◆ Accélérateurs et collisionneurs
- ◆ Détecteurs auprès des collisionneurs

Voyage au pays de l'infiniment petit...

◆ Vidéo CERN

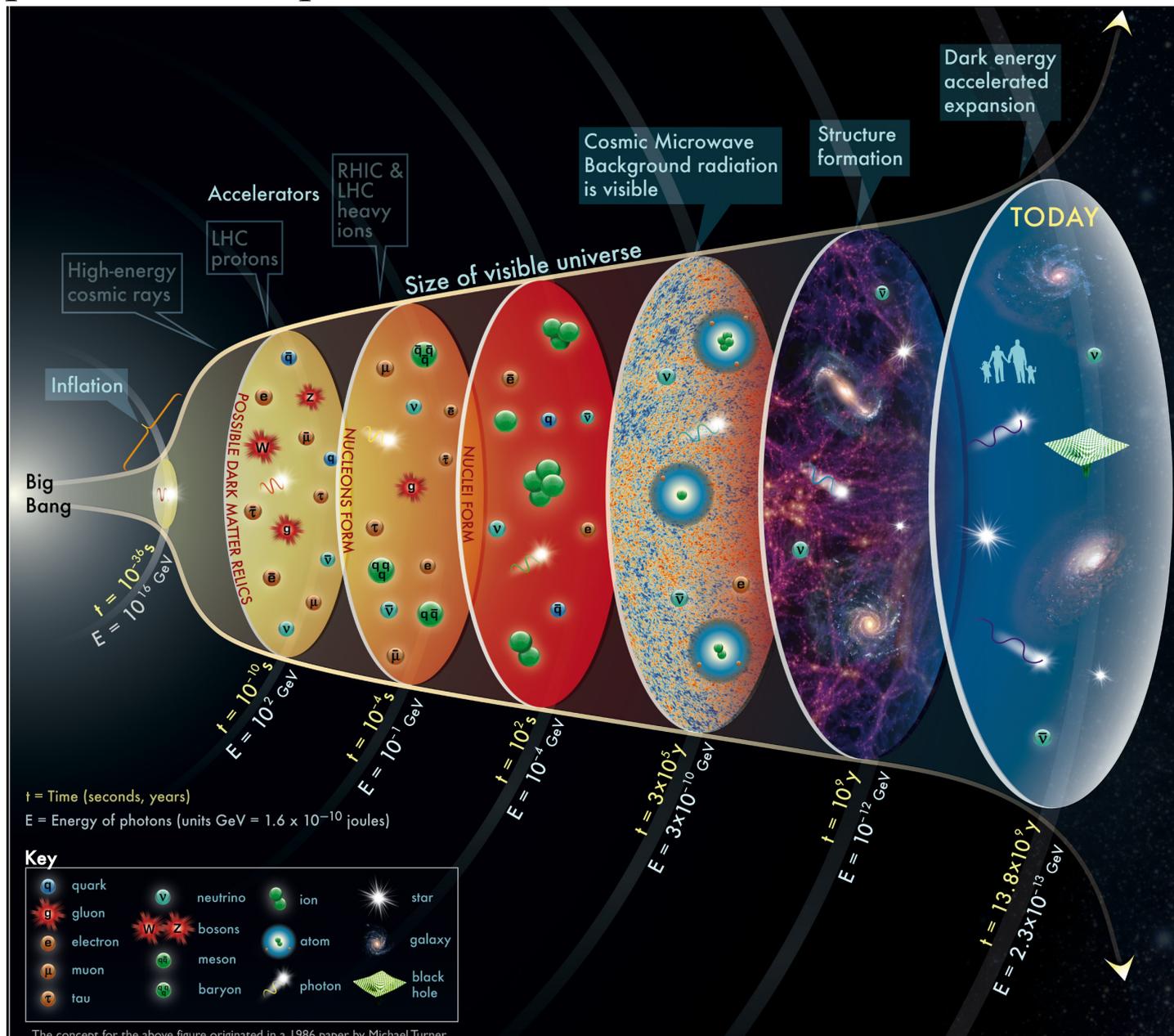


version pdf : [lien vers la vidéo](#)



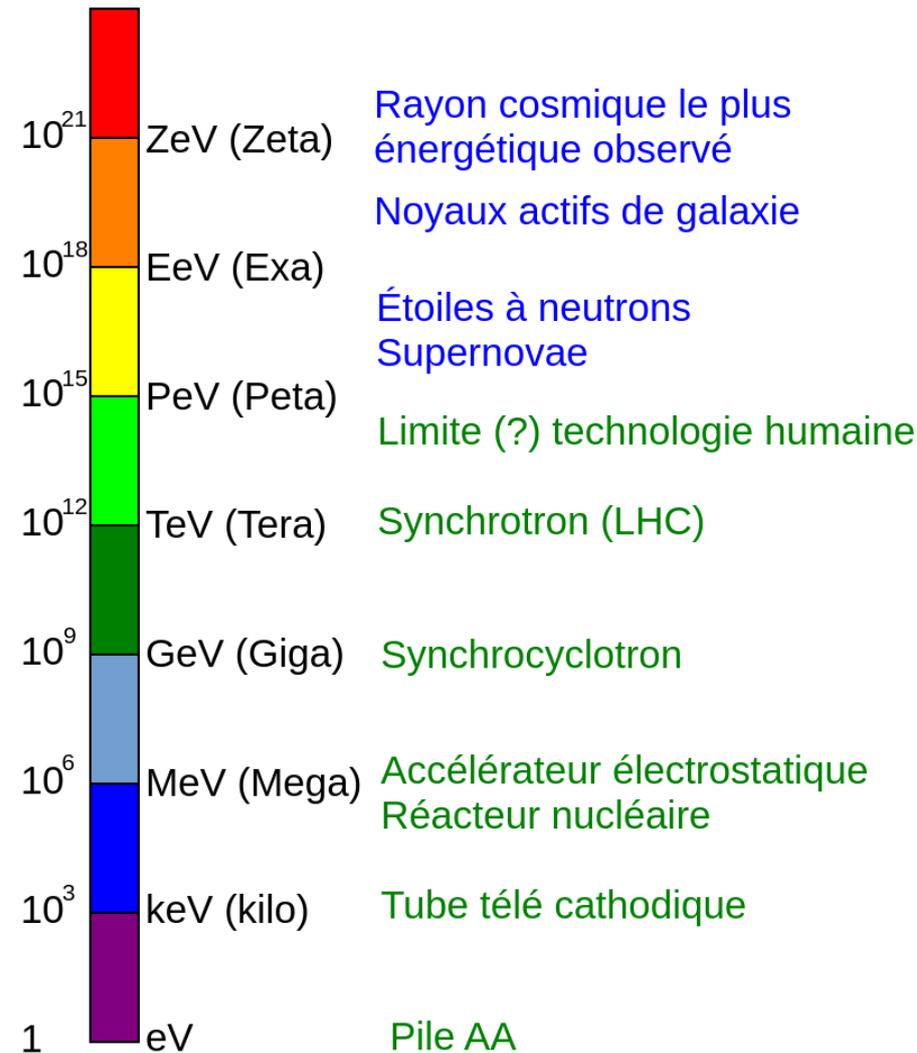
... en lien avec l'infiniment grand

◆ Description des deux premières minutes de l'univers



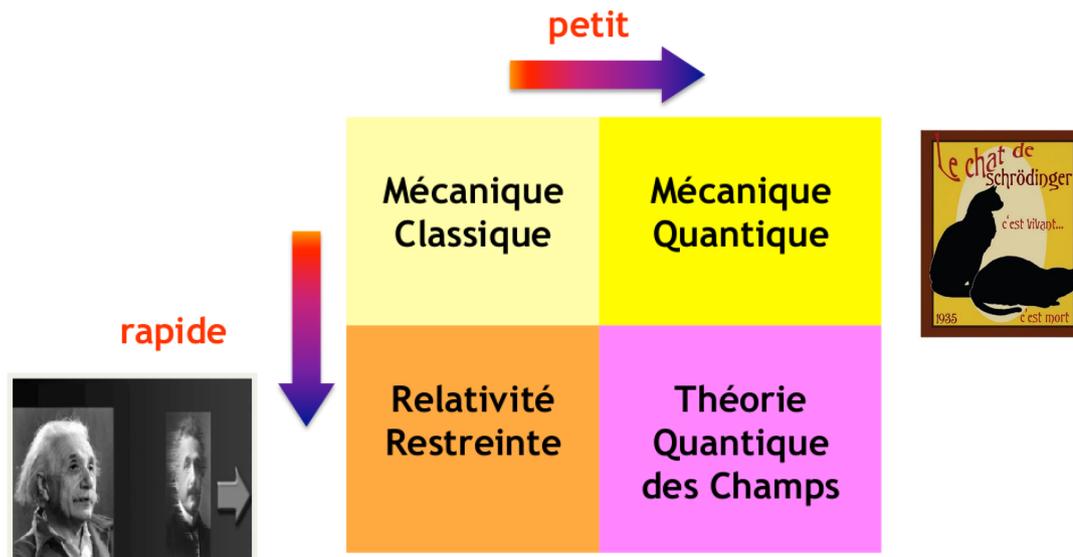
Unités

- ◆ Unités usuelles inadaptées à cette échelle
- ◆ **Energie (E)** : electron-volt (eV)
 - $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
 - énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V
- ◆ **Quantité de mouvement (p)**: eV/c
- ◆ **Masse (m)** : eV/c²
 - $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$
- ◆ Habituellement on écrit que la vitesse de la lumière $c = 1$
⇒ impulsions et masses en eV
- ◆ En physique des hautes énergies, on a souvent $pc \gg mc^2$, on confond alors **pc** et **E**. Ainsi, quand on parle “d’électrons de 50 GeV” ou de “protons de 3.5 TeV”, on ne précise pas s’il s’agit de leur énergie ou de leur quantité de mouvement



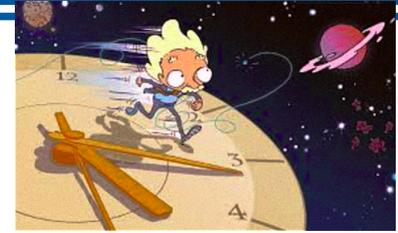
Le Modèle Standard des particules

- ◆ Théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**
 - constituants *élémentaires* : “particules” sans structure interne
 - *interactions* : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires
- ◆ À cette échelle la physique des quantique et relativiste!



- ◆ Fin du XIXème siècle : la physique est “belle et claire”, il y a juste deux petits nuages :
 - le rayonnement du corps noir → donnera naissance à la mécanique quantique
 - l’expérience de Michelson et Morley de la vitesse de la lumière → donnera naissance à la relativité restreinte

Quelques mots sur la relativité restreinte (1)

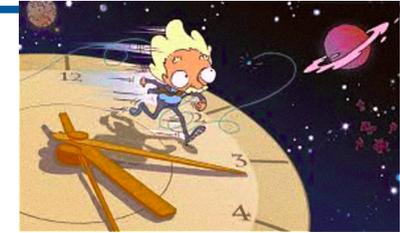


- ◆ Deux postulats, valable pour les référentiels galiléens (en mouvement de translation rectiligne uniforme) :
 - les lois de la physique ont la même forme dans tous les référentiels galiléens
 - la vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens

- ◆ *Conséquence 1* : Contraction des longueurs et dilatation du temps
 - l'écoulement du temps dépend du référentiel
 - temps propre (t_0): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
 - temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse v : $t = \gamma t_0$ où $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} > 1$

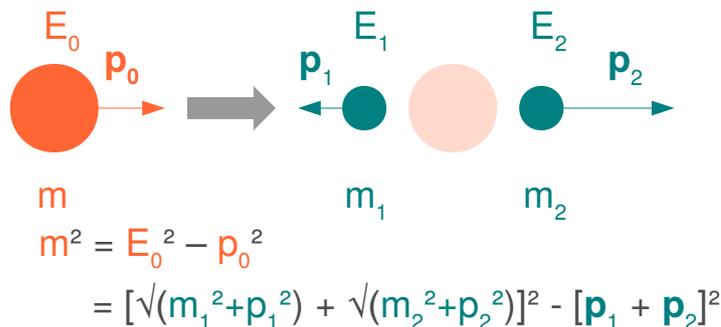
 - Exemple : une particule avec un temps de vie de $2.2 \mu\text{s}$ parcourra avant de se désintégrer :
 - 660 m à une vitesse non-relativiste
 - 6.6 km à une vitesse de $99\%*c$ (impulsion de 1 GeV)
 - 66 km à une vitesse de $99.99\%*c$ (impulsion de 10 GeV)

Quelques mots sur la relativité restreinte (2)



◆ Conséquence 2 : Équivalence masse-énergie

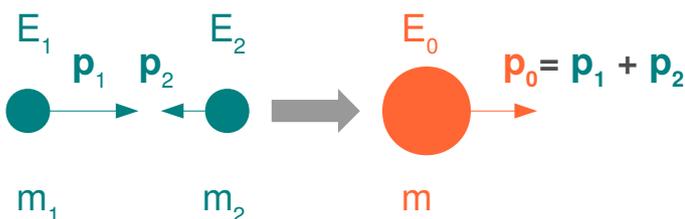
- La masse est une forme d'énergie
 - Si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de $\Delta m = E/c^2$
 - $E_0 = mc^2$: énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)
- Énergie totale d'un système : $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ (p : quantité de mouvement)
- Transformation de la masse en énergie cinétique :



exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.
 En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

- Transformation de l'énergie cinétique en masse :



$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

Quelques mots sur la mécanique quantique

◆ Quantification:

	classique	quantique
état d'un système	positions et quantité de mouvement	probabilités
évolution	une trajectoire (déterministe)	plusieurs états finaux, plusieurs chemins

◆ Conséquence 1 : utilisation de probabilités

- d'une désintégration : son moment, ses produits
- d'une production
- exemple : à chaque collision du LHC on connaît la probabilité de produire un boson de Higgs

◆ Relations de Heisenberg

- si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

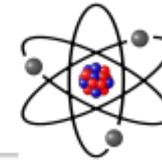
◆ Conséquence 2 : une énergie ΔE peut être “empruntée” au vide pendant un laps de temps Δt suffisamment court

- et comme $E = mc^2$ des particules “virtuelles” peuvent être créées et vivre pendant un laps de temps d'autant plus court que la particule est lourde



De quoi est fait l'univers ?

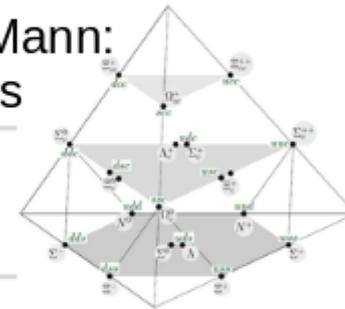
- ◆ À travers l'histoire, recherche d'un nombre minimal de constituants élémentaires de la matière



Atome :
proton, neutron, électron

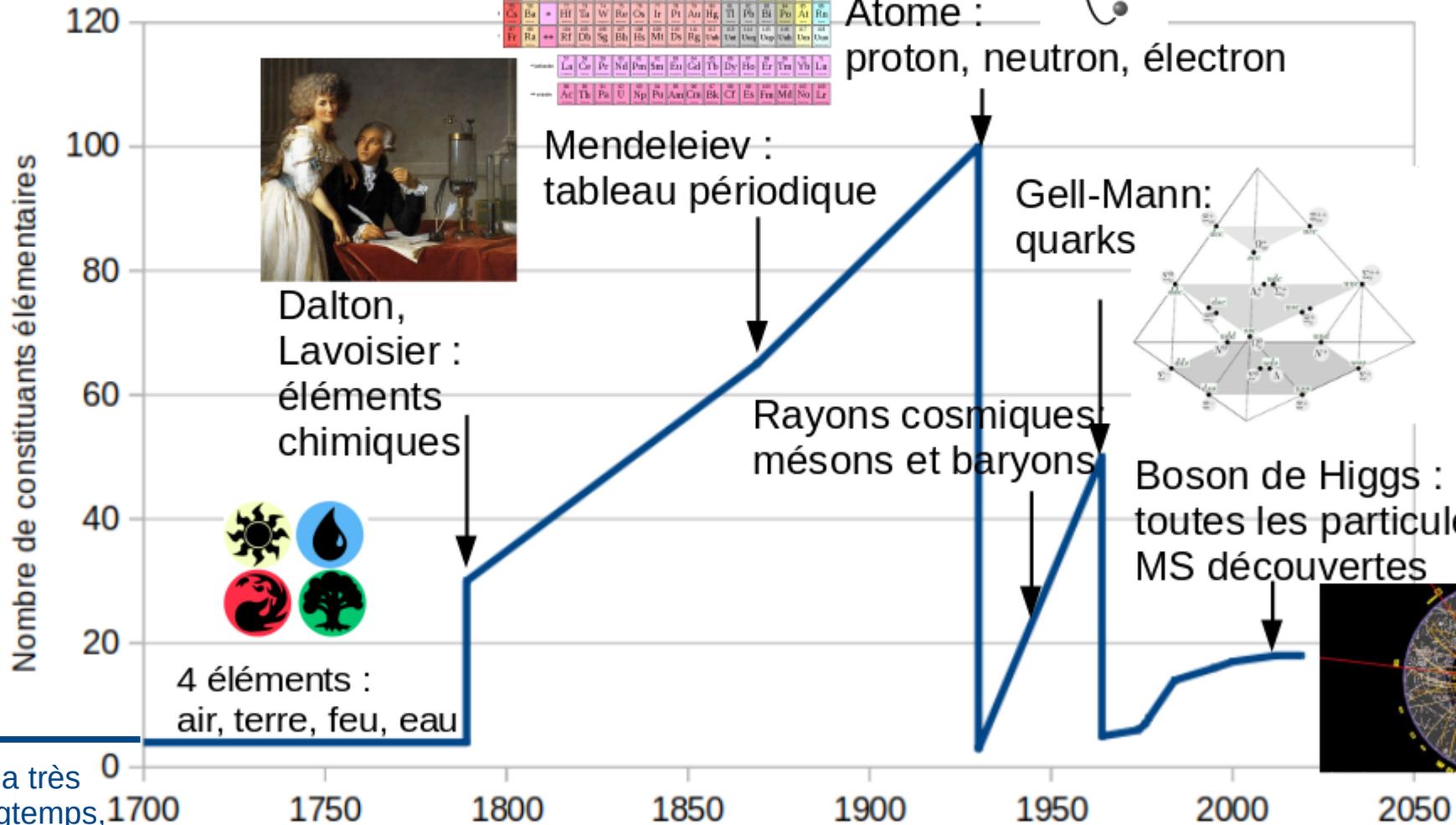
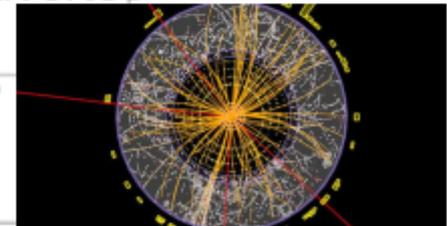
Mendeleiev :
tableau périodique

Gell-Mann:
quarks



Rayons cosmiques
mésons et baryons

Boson de Higgs :
toutes les particules du
MS découvertes



Dalton,
Lavoisier :
éléments
chimiques



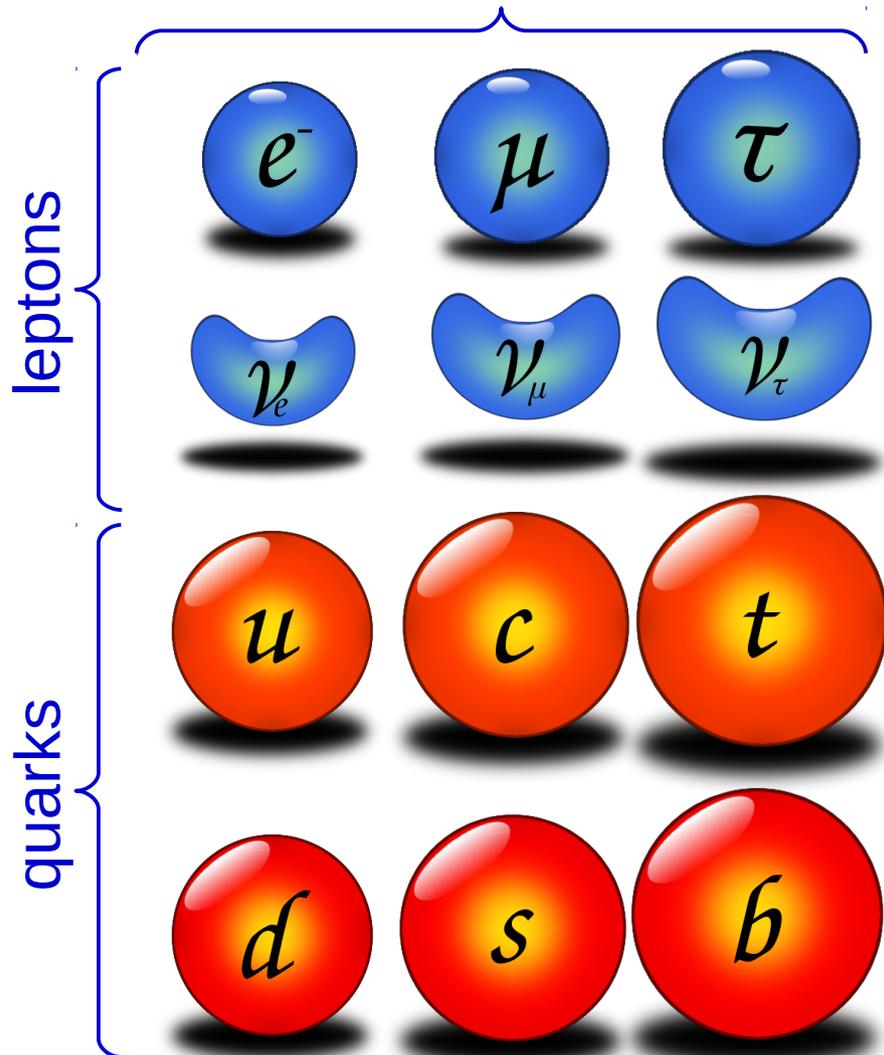
4 éléments :
air, terre, feu, eau

Il y a très
longtemps,
les grecs

Le zoo des particules

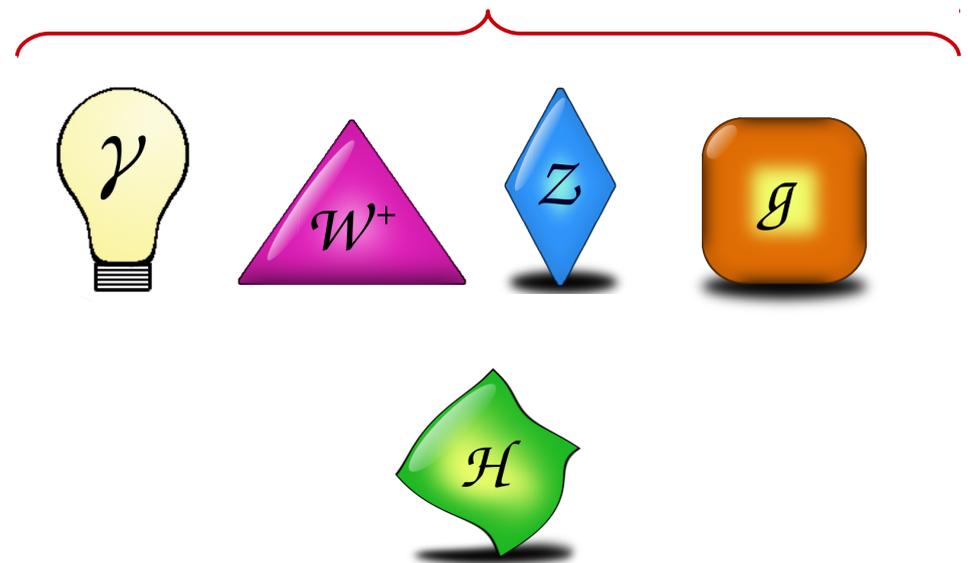
◆ Particules de matières

fermions



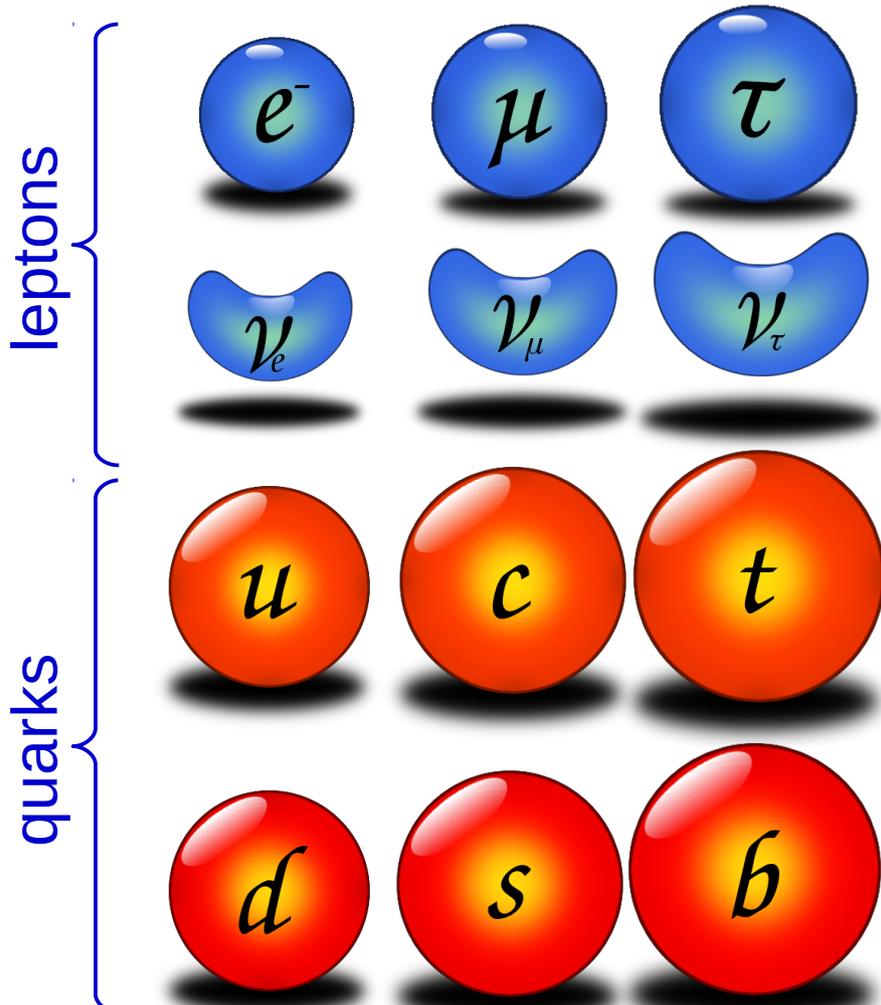
◆ Particules porteuses des interactions

bosons



Les particules de matière (1)

◆ Appelées **fermions**



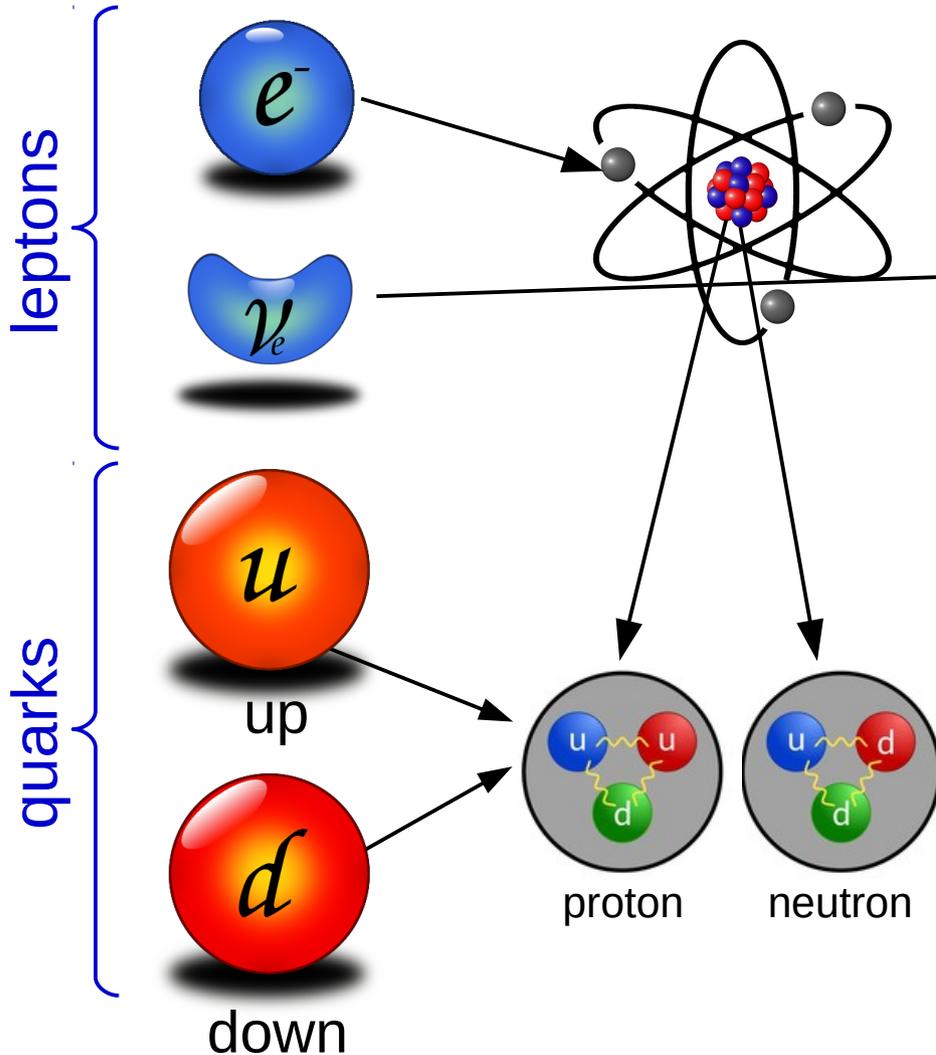
◆ Les quarks composent les **hadrons**

- trois quarks : baryons
- quark-antiquark : mésons

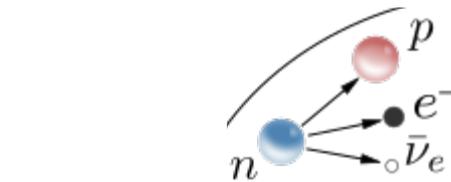
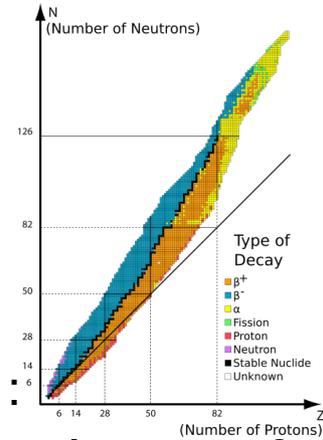


Les particules de matière (2)

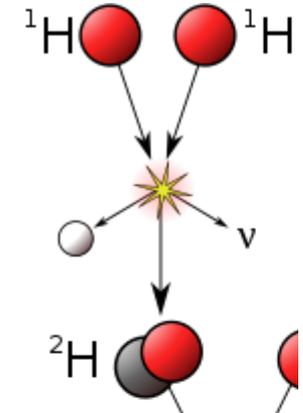
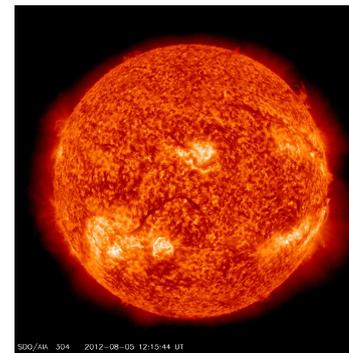
◆ La matière ordinaire :



neutrino électronique :
- produit dans les désintégrations β^- :



- aussi produit en grande quantité par la fusion dans le soleil !



Les particules de matière (3)

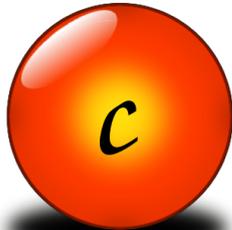


◆ Deuxième famille

leptons



quarks



charm



strange

Le **muon** a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Il a aussi **son neutrino** associé

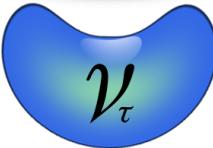
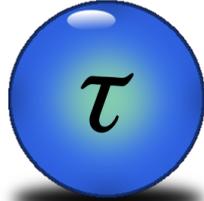
quark **charm** (550x masse up)

quark **strange** (20x masse down)

Les particules de matière (4)

◆ Troisième famille

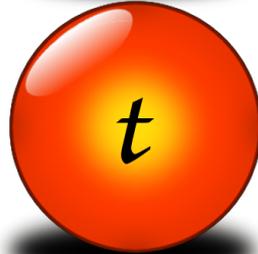
leptons



Le **tau** a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 3500 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 3 \cdot 10^{-13}$ s.

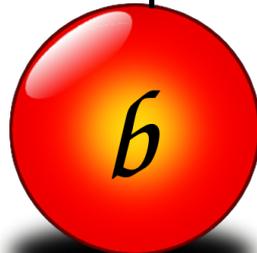
Il a aussi son neutrino associé.

quarks



top

quark **top** (76000x masse up)
particule la plus lourde du MS ~ atome d'or

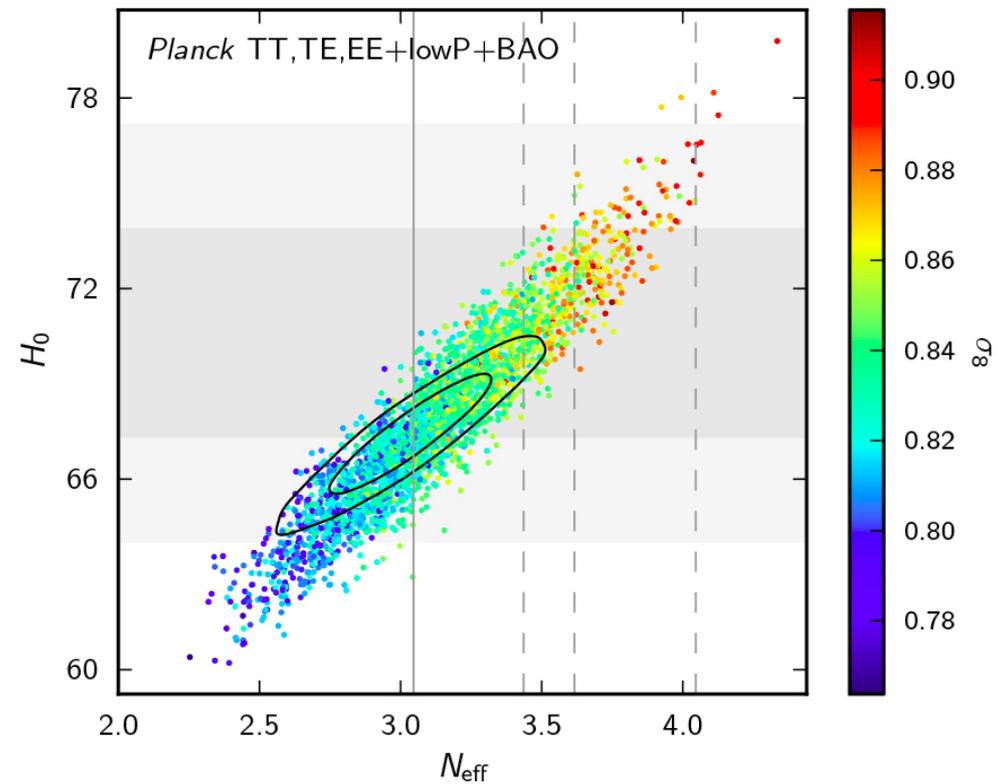
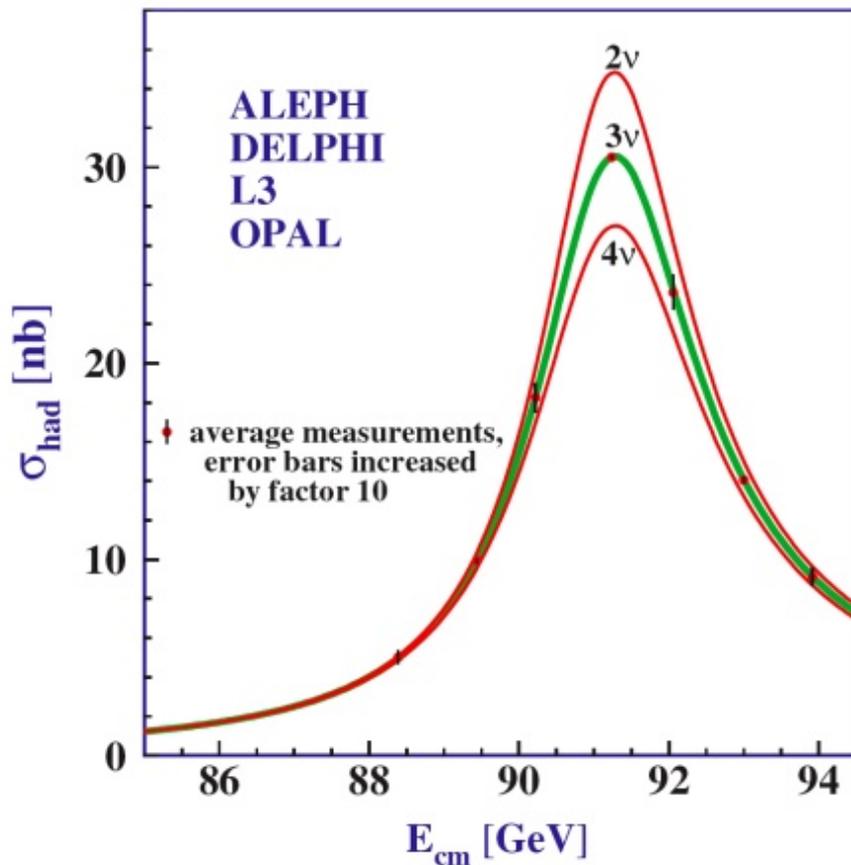


beauty

quark **bottom** ou *beauty* (980x masse down)

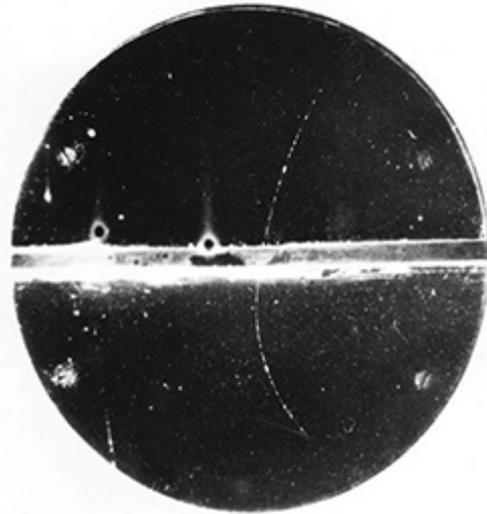
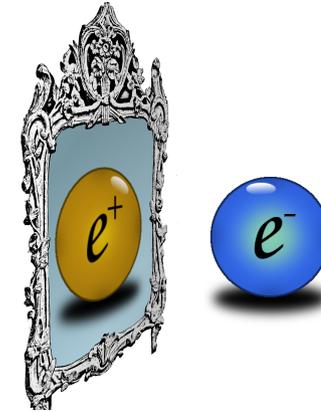
Les particules de matière (5)

- ◆ Une quatrième famille ?
- ◆ A priori non : mesures du LEP et cosmologie

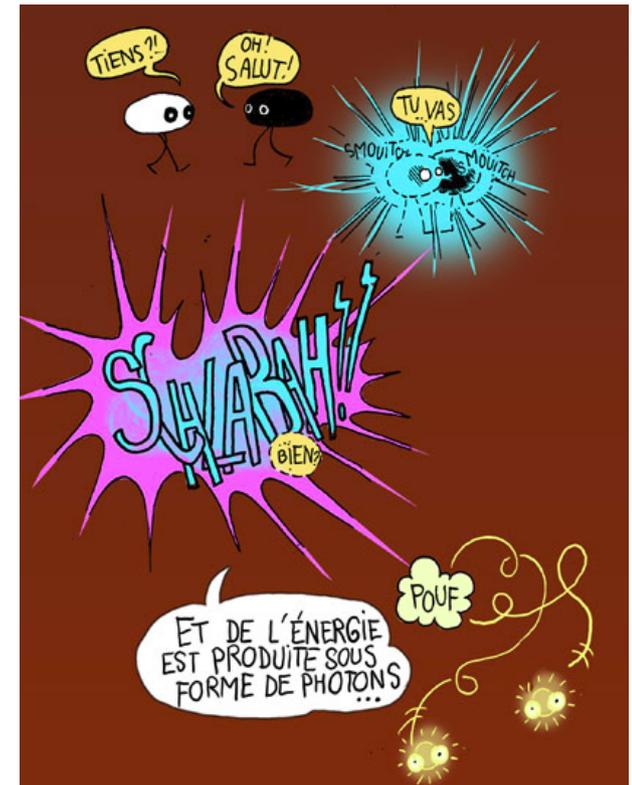


L'antimatière

- ◆ Il existe aussi les **anti-particules** : même particules mais charge inversée
 - exemple : positron e^+ antiparticule de l'électron e^-
- ◆ Prédite en 1923, découverte en 1932



- ◆ La matière et l'anti-matière s'annihilent pour donner des photons
- ◆ Il existe des toutes petites différences entre matière et anti-matière
 - au début de l'univers, $\sim 10^{-6}$ fois plus de matière

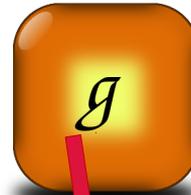
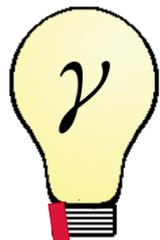


Les particules d'interaction (1)

- ◆ Appelées **bosons de jauge**



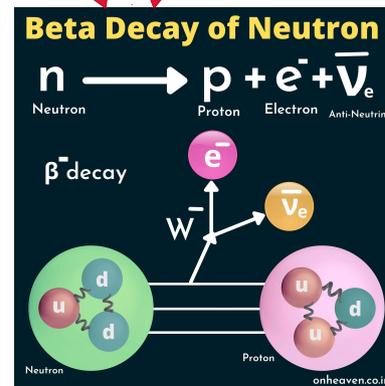
**Satyendra
Nath Bose**



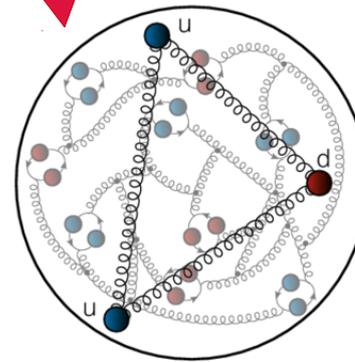
- ◆ Elles portent les **interactions fondamentales**



électromagnétisme



interaction faible



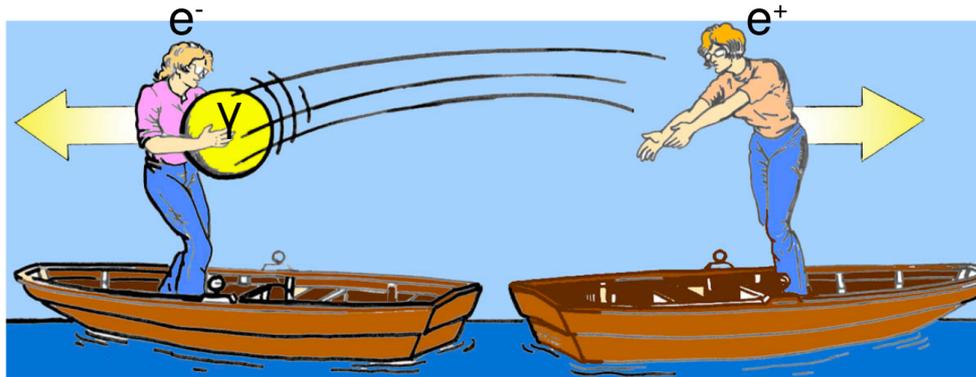
interaction forte



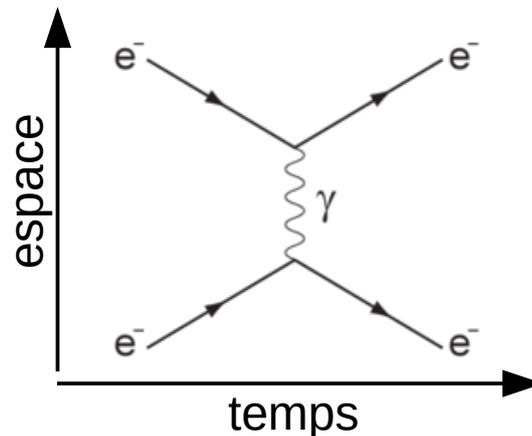
gravité

Les particules d'interaction (2)

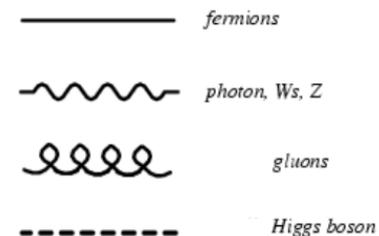
- ◆ Les **interactions** entre particules se font par l'intermédiaire d'**échanges** de bosons de jauge
 - les particules doivent posséder la "charge" correspondante



- ◆ Représentation de ces interactions : **diagrammes de Feynman**
 - servent à décrire les processus (mais pas les trajectoires!) et à faire les calculs correspondants
 - exemple :

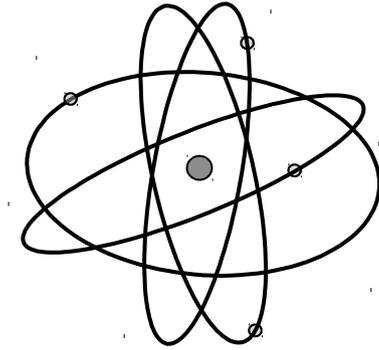


conventions :

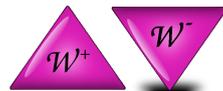


Interaction électromagnétique

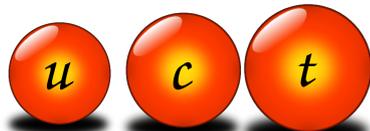
- ◆ Elle réunit dans un même formalisme
 - les phénomènes électriques
 - les phénomènes magnétiques
 - l'optique
- ◆ Elle est responsable de la cohésion de l'atome
- ◆ Au niveau fondamental : échange de **photons** entre particules chargées électriquement
 - portée infinie



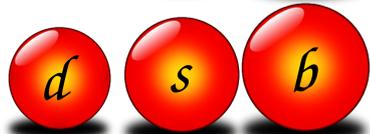
Charge électrique +1



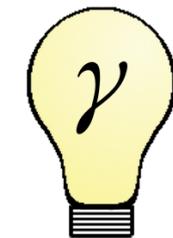
Charge électrique +1/-1



Charge électrique +2/3



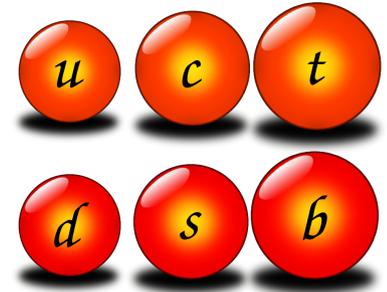
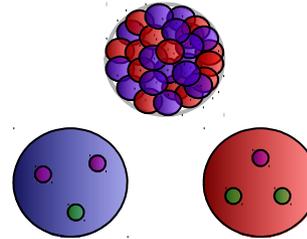
Charge électrique -1/3



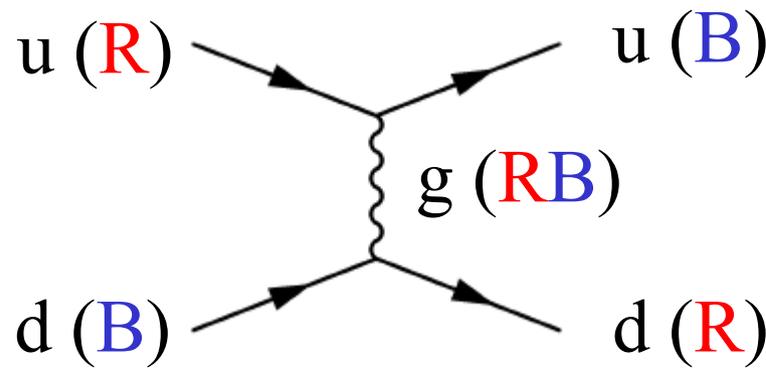
Photon

Interaction forte

- ◆ 20 à 60 plus forte que l'électromagnétisme
- ◆ Elle est responsable de la cohésion :
 - des nucléons dans le noyau atomique
 - des quarks dans les protons et neutrons



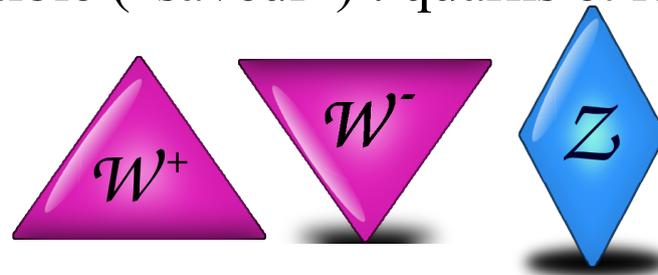
- ◆ Au niveau fondamental : échange de **gluons** entre particules qui portent une charge de “couleur” (quarks) : **rouge**, **bleu** ou **vert**
 - portée : ~ 1 fm (ie la taille d'un noyau), mais l'intensité augmente avec la distance



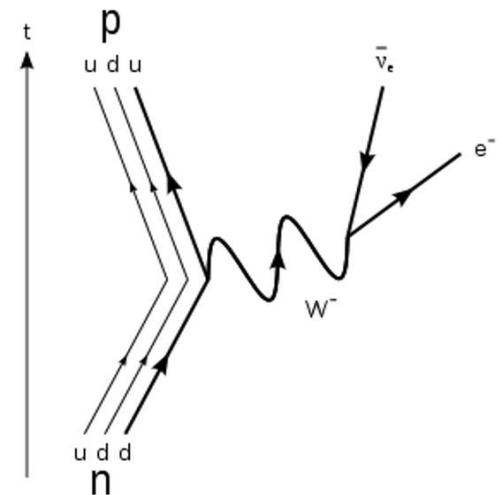
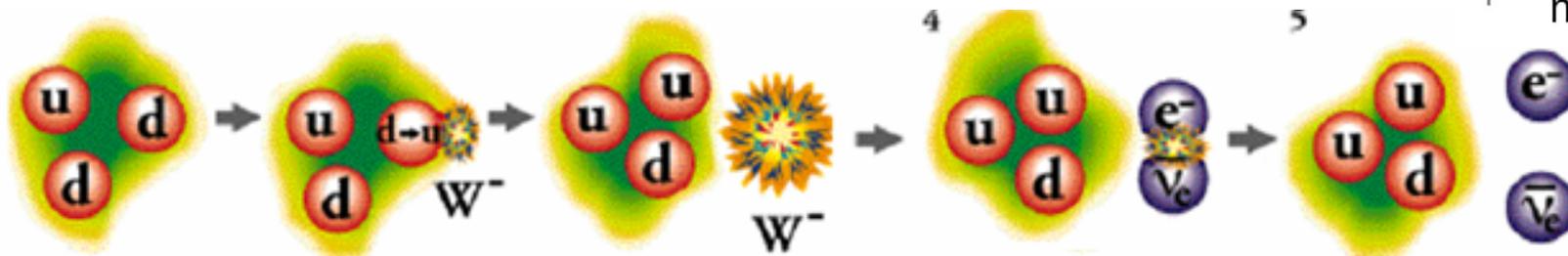
- ◆ Les particules observées sont blanches \Rightarrow les quarks ne s'observent jamais seuls : ils s'associent pour former des hadrons
 - baryons : trois quarks **RVB**
 - mésons : un quark et un anti-quark **Rouge-AntiRouge**, **Vert-AntiVert**, **Bleu-AntiBleu**

Interaction faible

- ◆ 10^{-7} à 0.8 plus faible que l'électromagnétisme
- ◆ Impliquée dans les phénomènes nucléaires (fission, fusion)
- ◆ Au niveau fondamental : échange de bosons W^+ , W^- ou Z entre particules qui possèdent une charge faible ("saveur") : quarks et leptons
 - portée : $\sim 10^{-4}$ fm

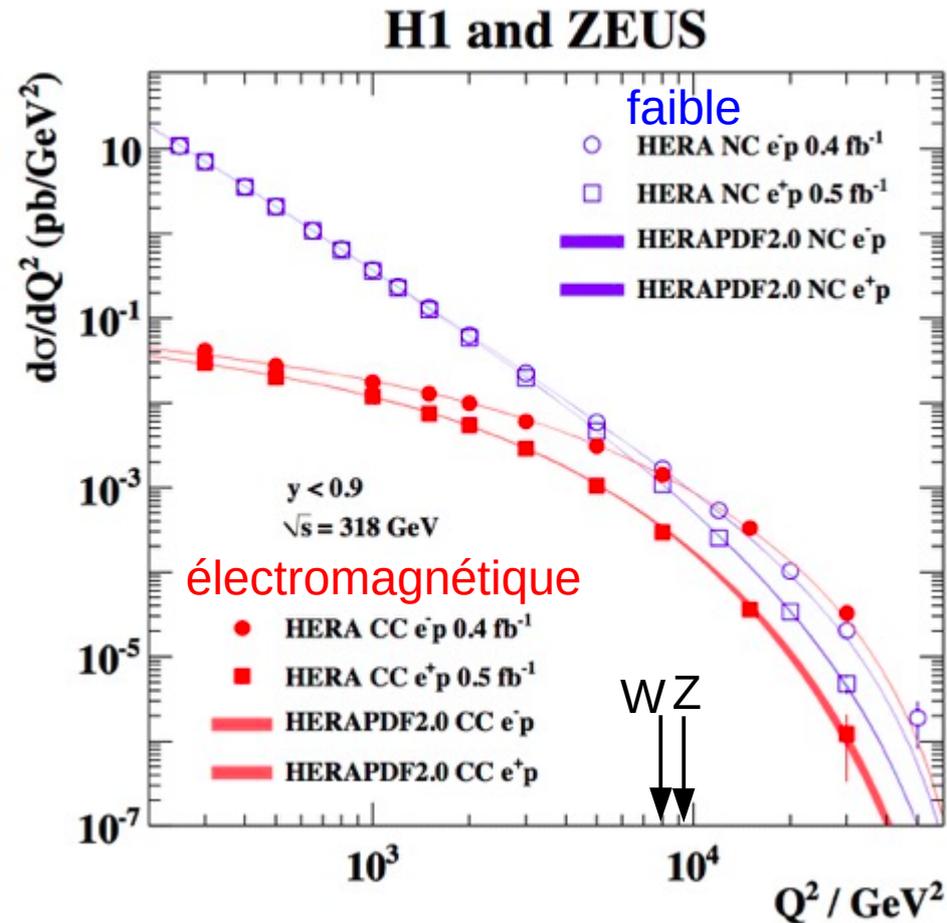


- ◆ Exemple : désintégration du neutron (demi-vie : 20 min)



Interaction électrofaible

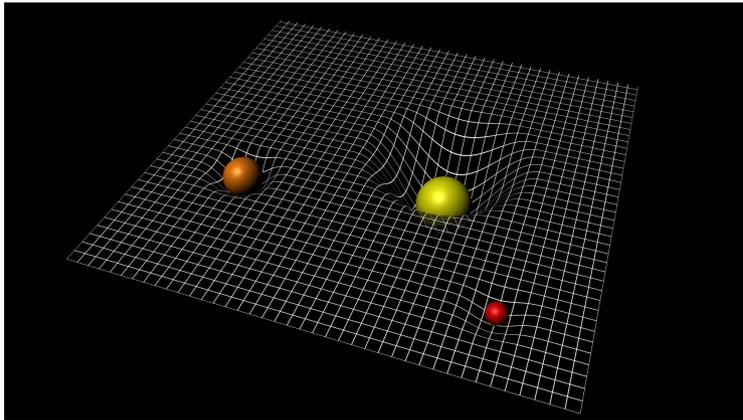
- ◆ À une certaine énergie il devient impossible de différencier les interactions électromagnétique et faible : on parle d'interaction “électrofaible”
- ◆ Expérimentalement on ne peut plus différencier un photon et un boson Z



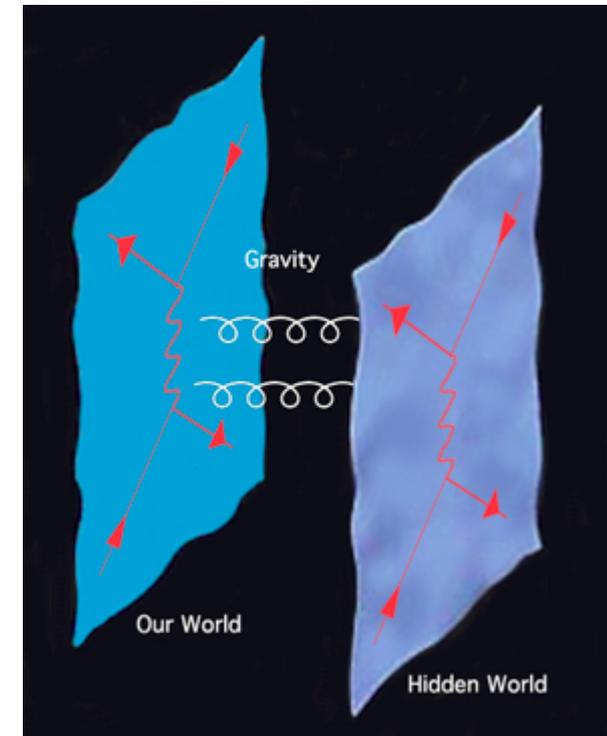
- ◆ Vrai jusqu'à $\sim 10^{-10}$ s après le Big-Bang

Gravité

- ◆ Régit la structure de l'univers et la chute des pommes
- ◆ Effects **négligeables** à l'échelle de la physique des particules
 - 10^{-41} fois plus faible que l'interaction électromagnétique
- ◆ **Ne peut pas être décrite** par le Modèle Standard (théorie quantique)
 - décrite par la relativité générale : déformation de l'espace-temps par les masses



- ◆ Il existe des théories au-delà du Modèle Standard qui prévoient l'existence d'un boson qui transmet la gravité : le graviton
 - nécessite souvent des dimensions supplémentaires d'espace-temps...



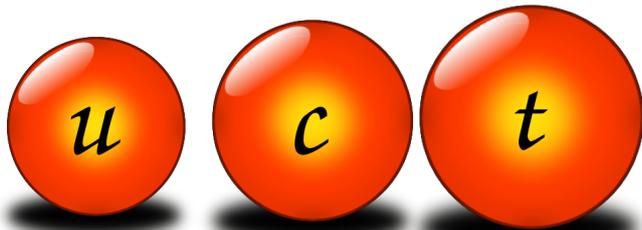
Résumé des interactions (1)

- ◆ Particules sensibles à l'interaction **électromagnétique** :

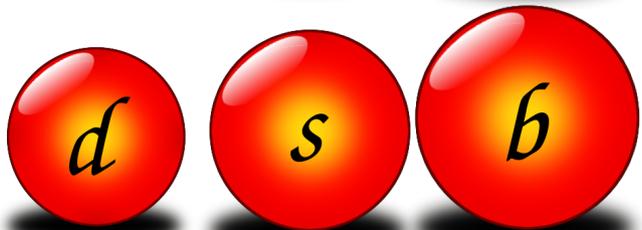
fermions



leptons



quarks



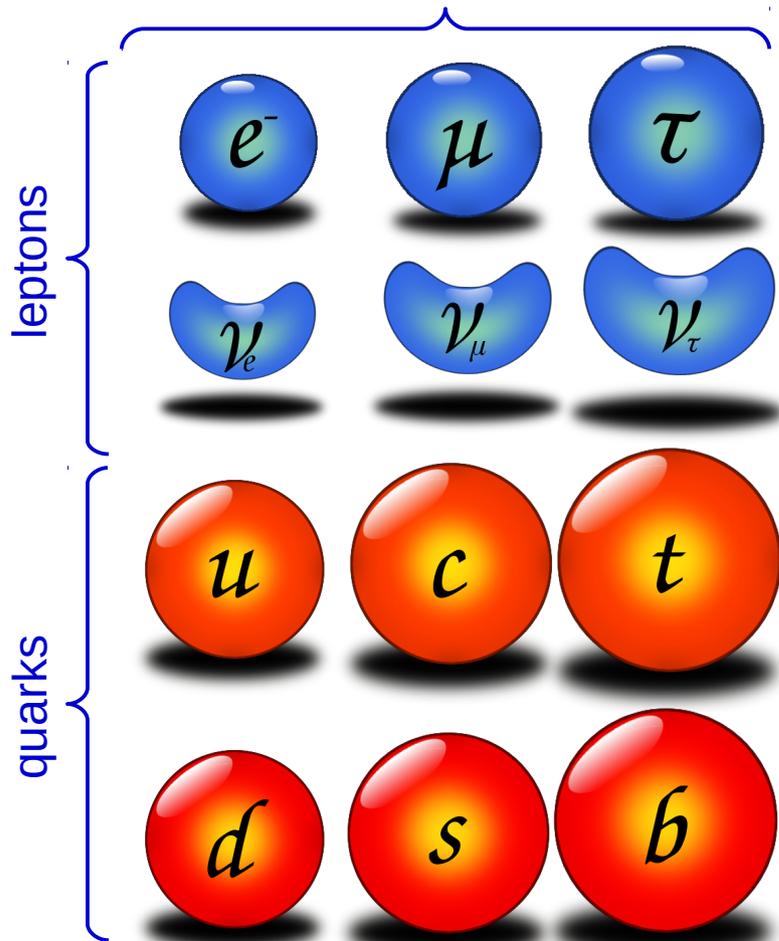
bosons



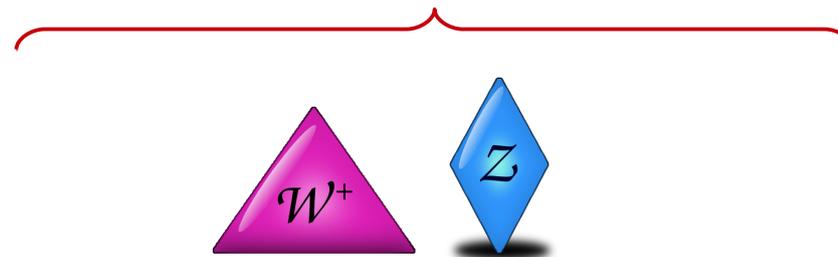
Résumé des interactions (2)

- ◆ Particules sensibles à l'interaction **faible** :

fermions

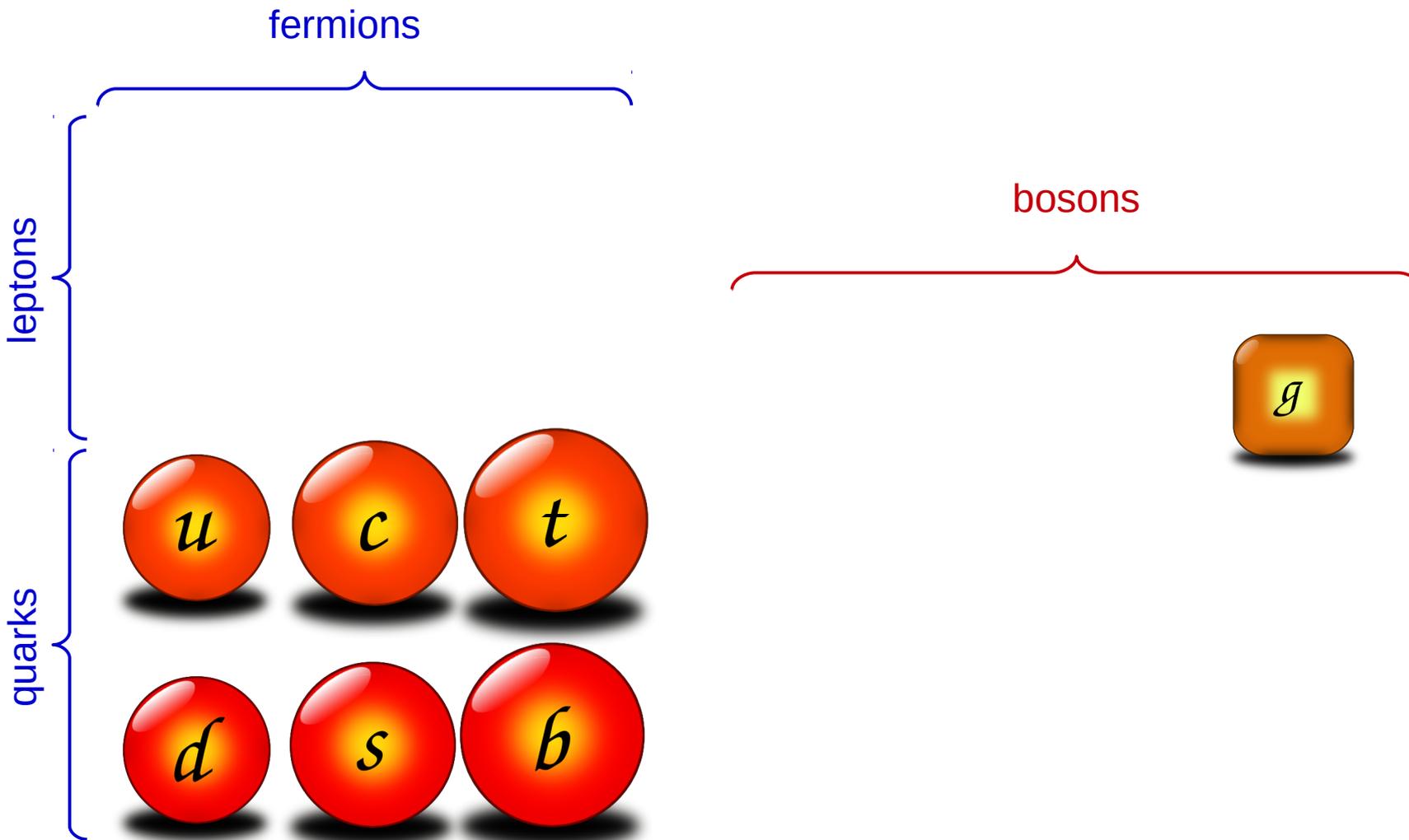


bosons



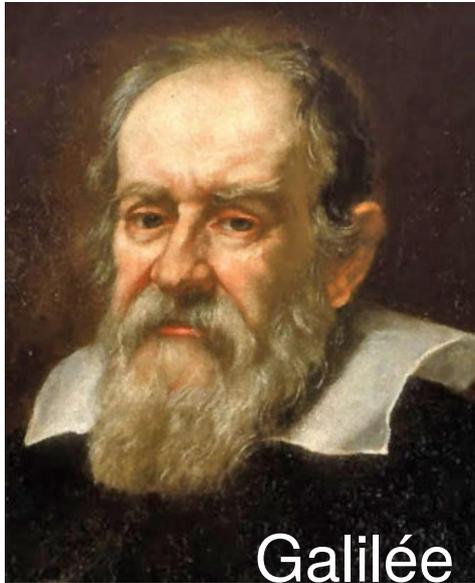
Résumé des interactions (3)

- ◆ Particules sensibles à l'interaction **forte** :



La notion de masse à travers l'histoire

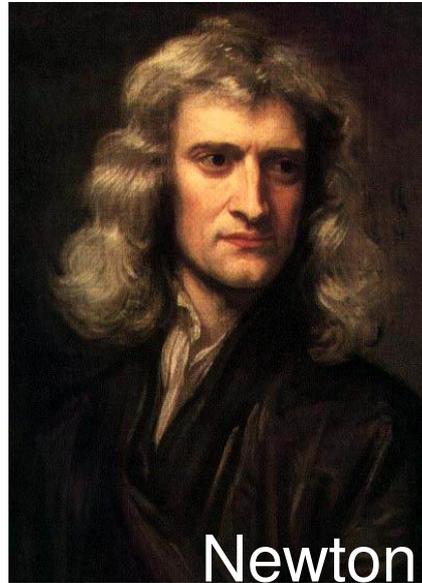
- ◆ Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes :



Galilée

- ◆ Masse gravitationnelle

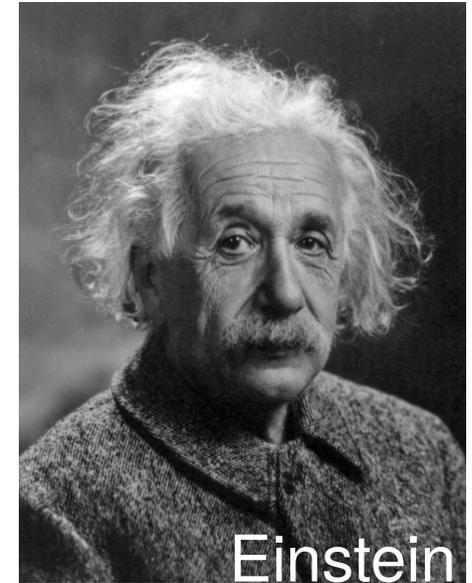
$$P = mg$$



Newton

- ◆ Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



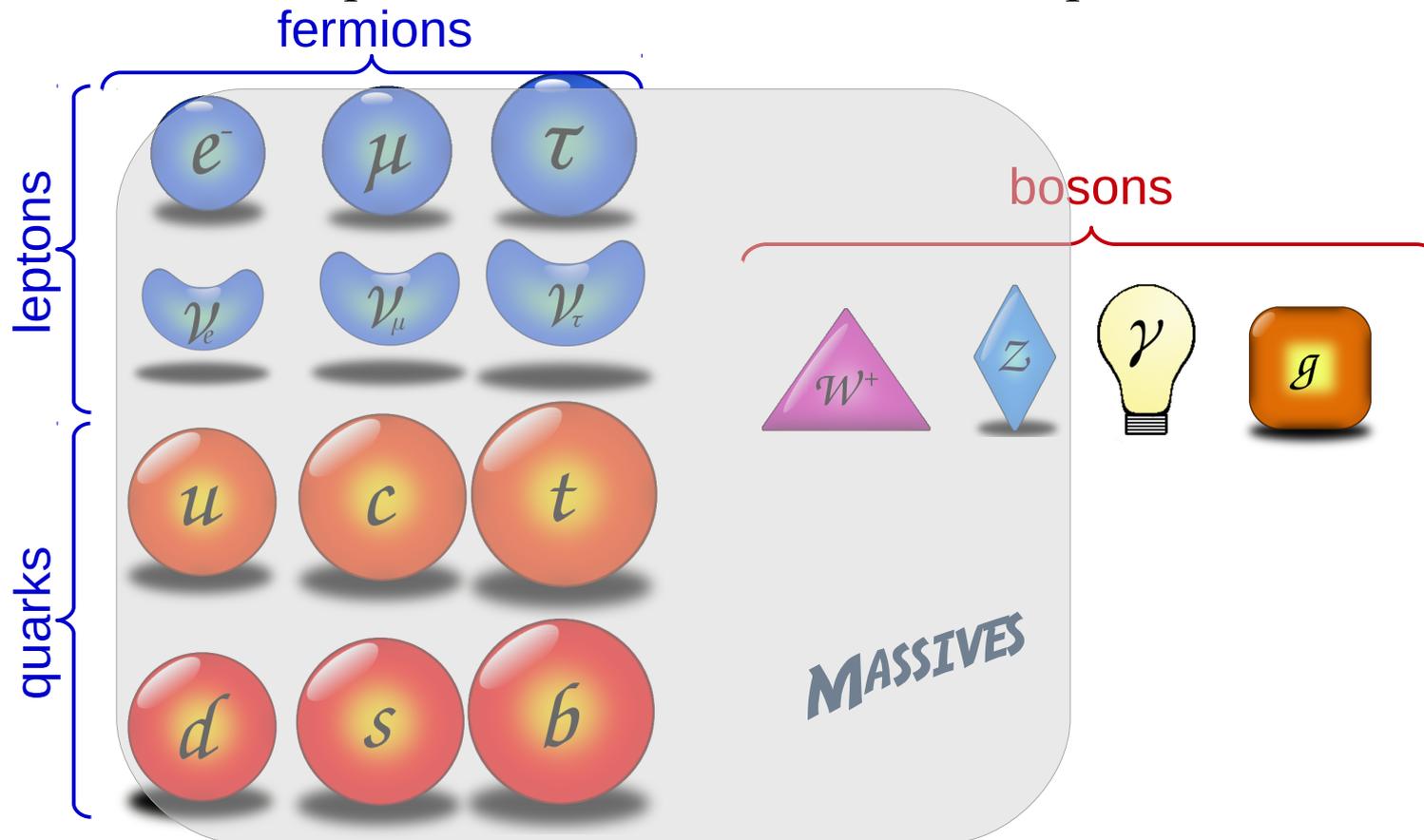
Einstein

- ◆ Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

La masse des particules élémentaires

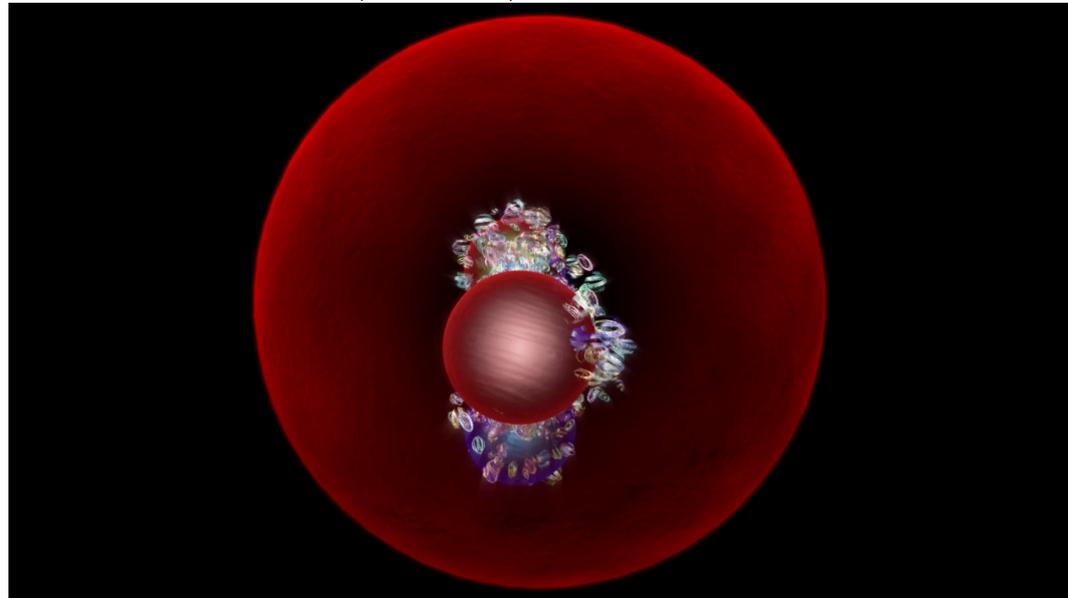
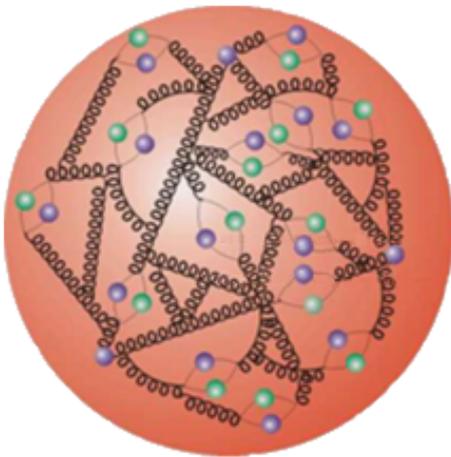
- ◆ D'après la théorie dans les années 1960, les particules élémentaires ont une masse nulle donc elles devraient toutes aller à la vitesse de la lumière
⇒ L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...



- ◆ Contraire à l'expérience
⇒ introduction d'un mécanisme pour générer la masse

La masse des particules PAS élémentaires

- ◆ La masse de la matière ordinaire : atomes
 - leur masse provient presque entièrement des **noyaux** (protons et neutrons)
- ◆ Les protons et neutrons
 - ont une masse de ~ 1 GeV
 - sont constitués de quarks up et down qui ont une masse de \sim qqs MeV
 - ils contiennent aussi des gluons qui servent à les lier entre eux
 \Rightarrow beaucoup d'**énergie de liaison** \Rightarrow masse ($E=mc^2$)

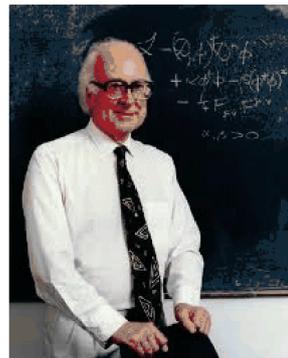
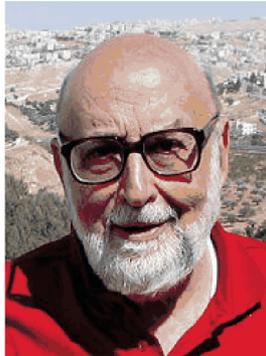


version pdf : [lien](#)

- ◆ Le boson de Higgs n'explique **que** la masse des particules **élémentaires**

Mécanisme de Higgs

- ◆ Proposé en 1964 par plusieurs scientifiques : Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble



BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout
 Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium
 (Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.⁴⁻⁶ A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
 Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
 (Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phe-

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4e^2\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

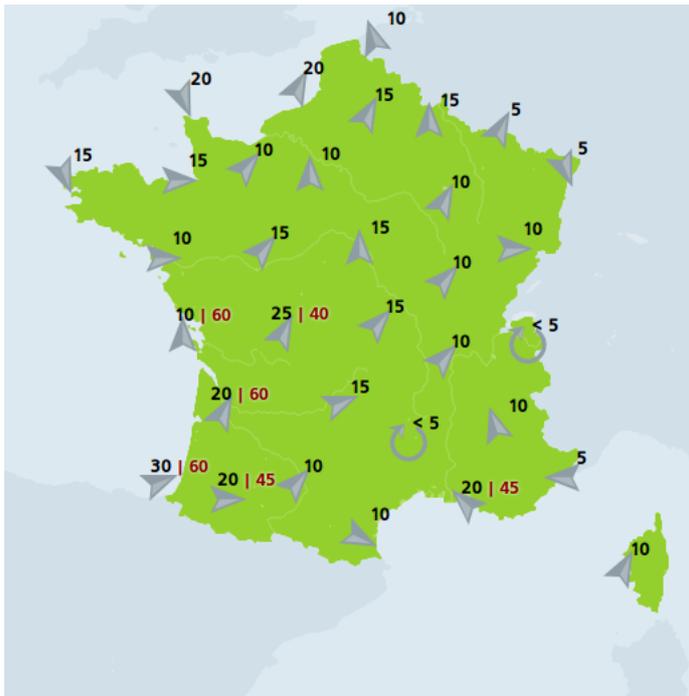
Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2e\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

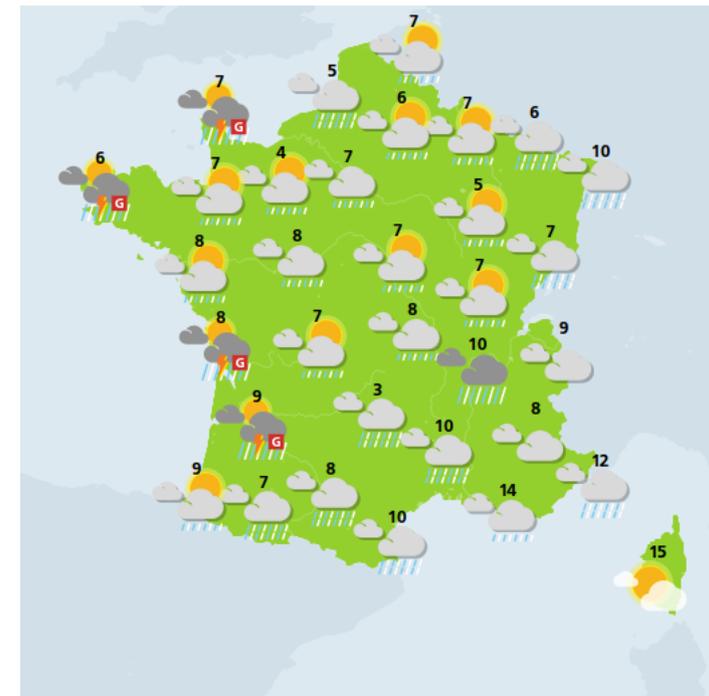
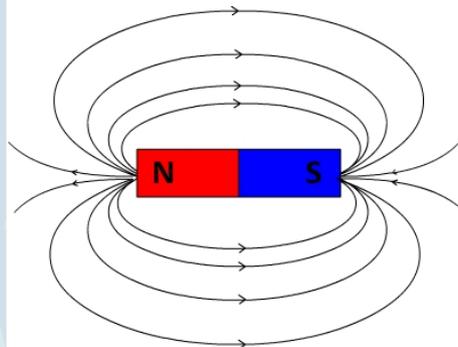
- ◆ Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

Le champ de Higgs (1)

- ◆ Champ : ensemble de valeurs prises par une grandeur physique en tout point de l'espace
- ◆ Le champ de Higgs est scalaire



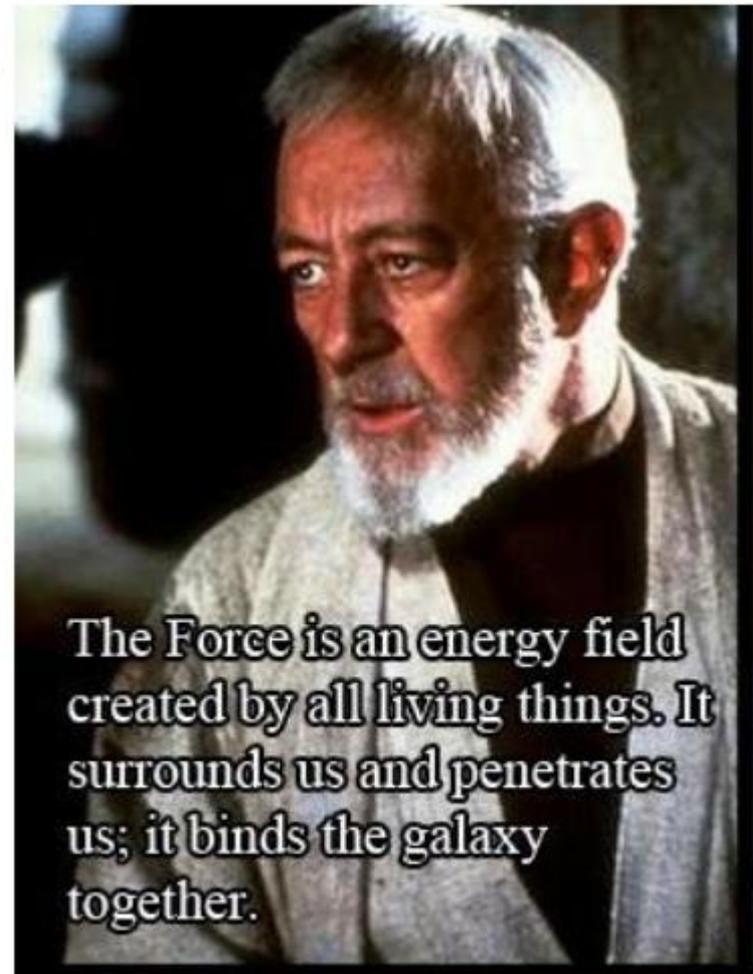
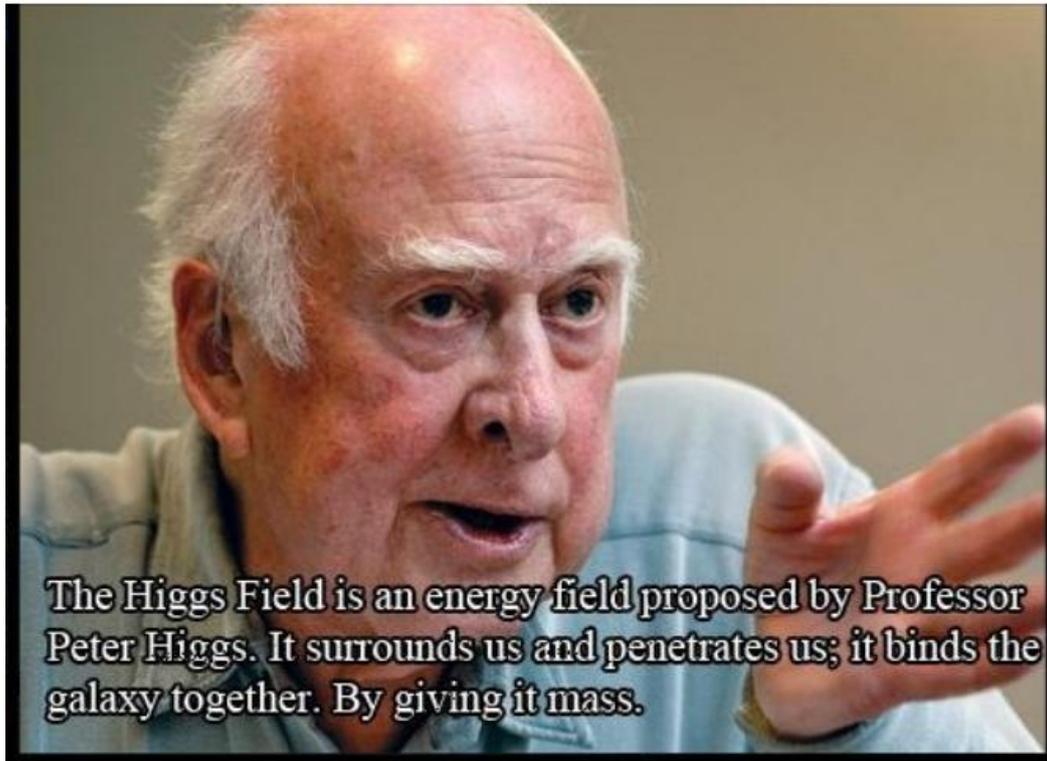
Vent, champ magnétique :
champs vectoriels



Température, champ de
Higgs :
champs scalaires

Le champ de Higgs (2)

- ◆ Le champ de Higgs est **uniforme** dans l'univers
- ◆ C'est l'**interaction** des particules avec le champ de Higgs qui vont leur donner leur masse
 - plus l'interaction est forte, plus la masse est grande



Interaction avec le champ de Higgs (1)

- ◆ Imaginons le champ de Higgs comme un champ de neige



Particules lourdes : W, Z, top



Particules légères : leptons, quarks



Particules sans masse :
photon, gluon



Le boson de Higgs interagit
avec lui-même
⇒ il se donne sa propre masse

Interaction avec le champ de Higgs (2)

◆ Et ça marche !

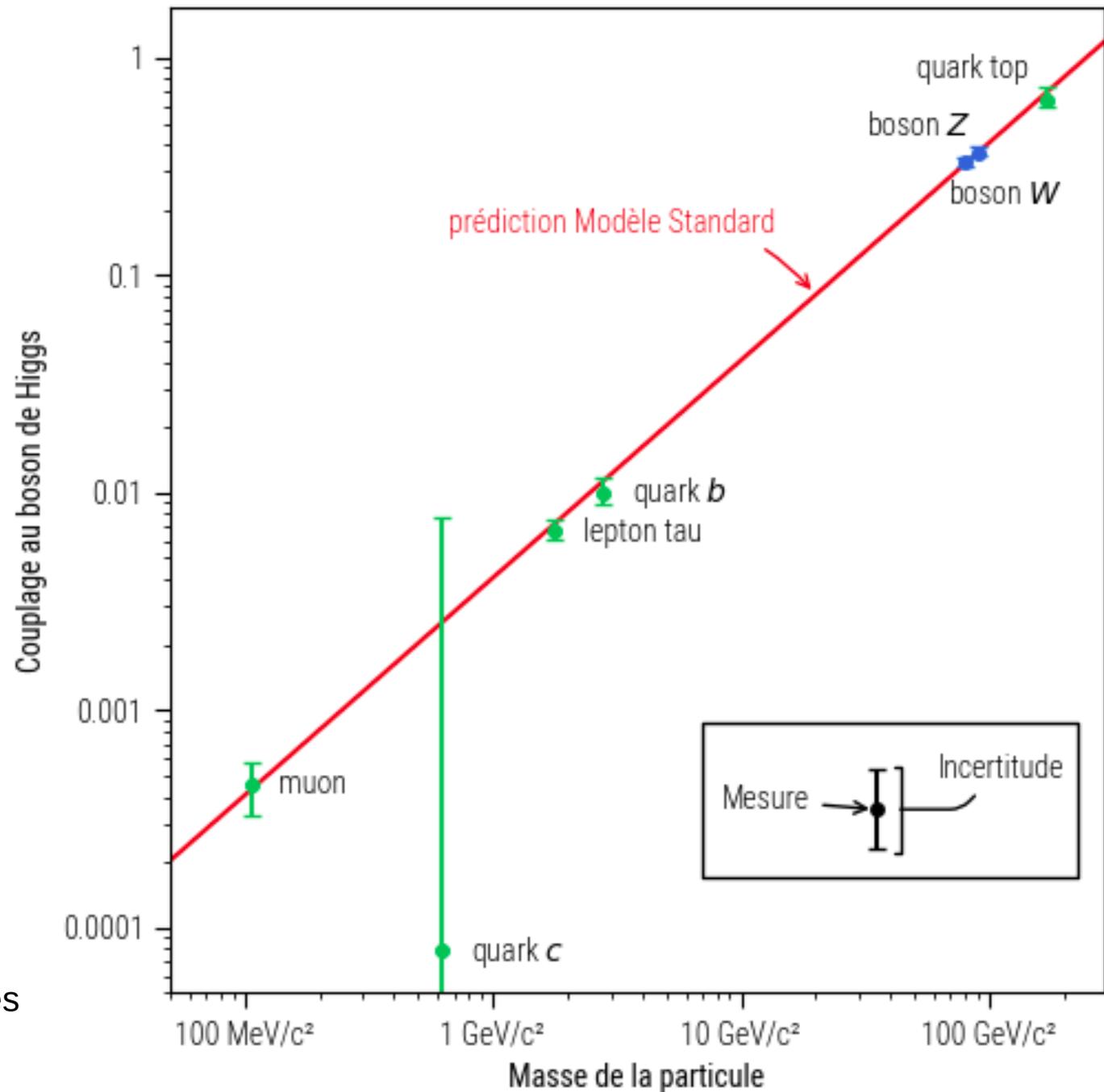
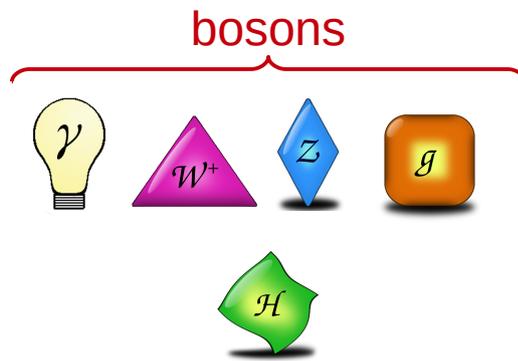
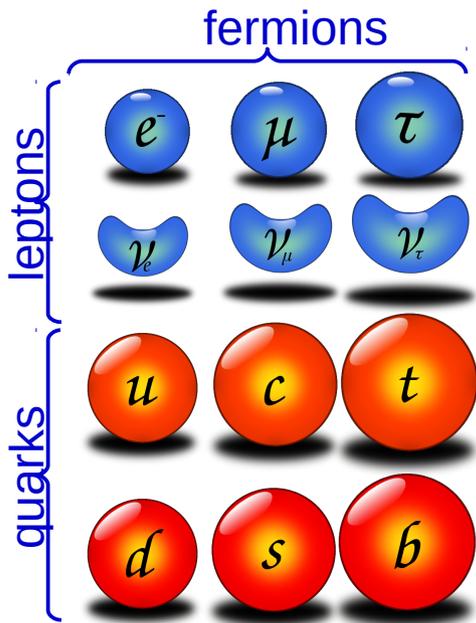


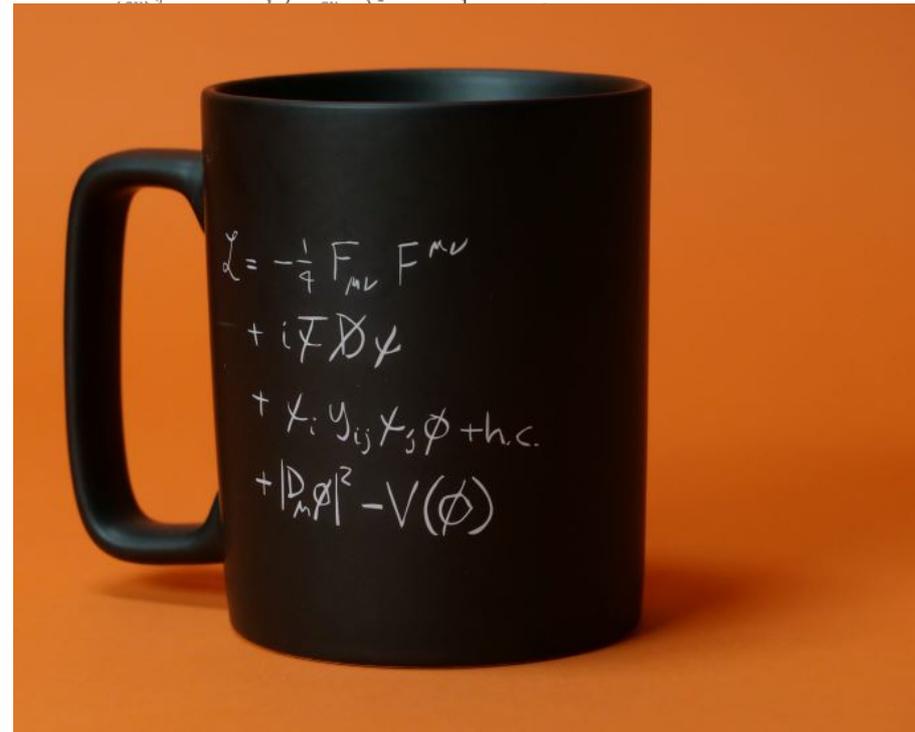
Image : N. Morange d'après
Nature 607 52 (2022)

Résumé : le Modèle Standard (1)

- ◆ < 20 particules pour décrire la matière et ses interactions



$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \partial_\mu \psi_\ell + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} i\bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{\ell'} + \sum_{q=u,c,t} i\bar{\psi}_q \gamma^\mu \partial_\mu \psi_q + \sum_{q'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{q'} \\ & - \frac{1}{2} (\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+) (\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{-\mu}) - \frac{1}{4} (\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu) (\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu) \\ & - \frac{1}{4} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) (\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) - \frac{1}{4} \sum_{a=1}^8 (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a) (\partial^\mu G^{a\nu} - \partial^\nu G^{a\mu}) + \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h \\ & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'} v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} \end{aligned}$$



- ◆ Toutes ces interactions sont décrites dans le **Modèle Standard**

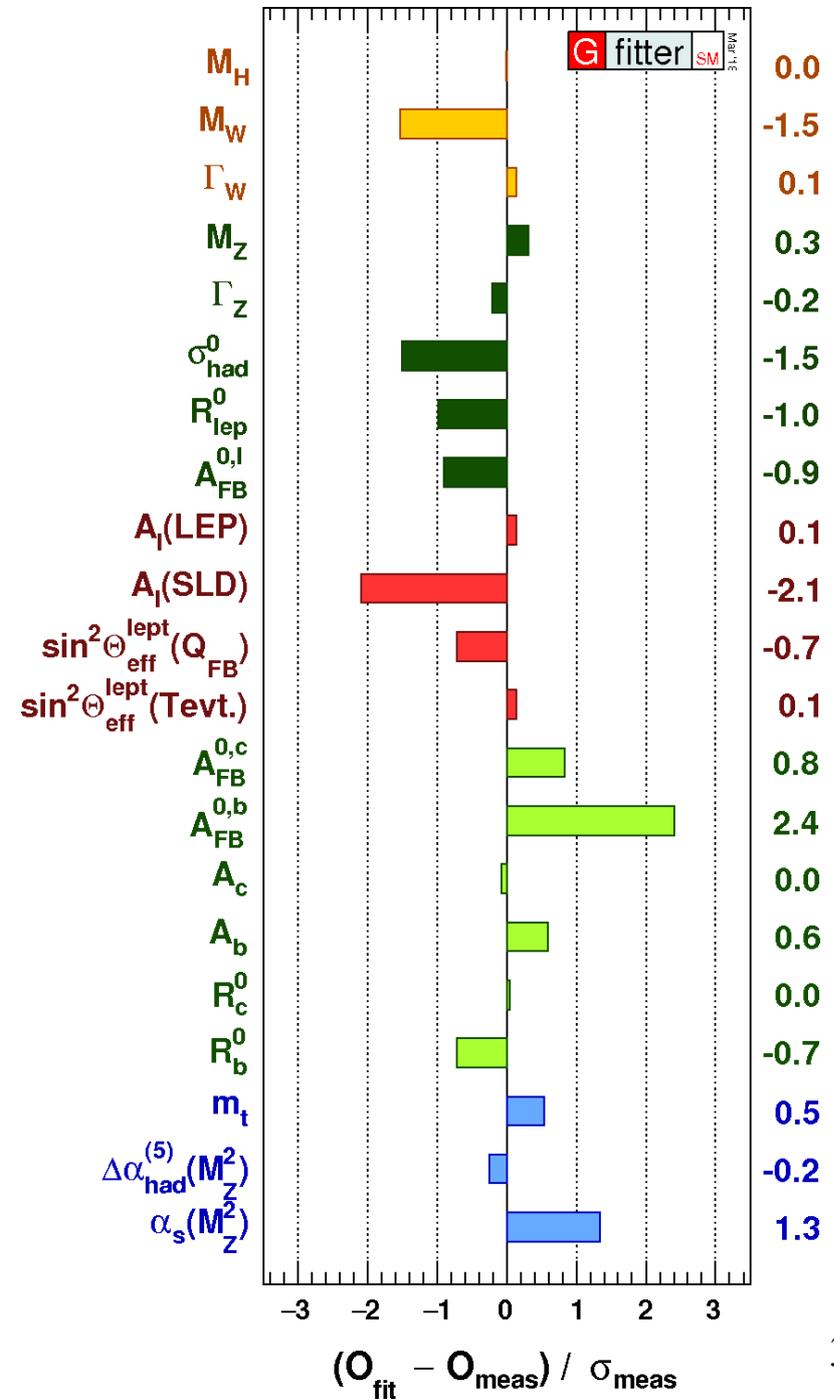
$$+ \frac{g}{2} [W_\mu^- W^{-\mu} W_\nu^+ W^{+\nu} - W_\mu^- W^{+\mu} W_\nu^- W^{-\nu}] + \frac{g}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} h^2 + \frac{g}{8 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h^2 - \frac{\lambda}{4} h^4 - \frac{g_s}{2} \sum_{a,b,c} f^{abc} (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a) G^{\mu b} G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{a,b,c,d,e,f} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G^{\mu d} G^{\nu e}$$

avec : $g_{em} = g \sin \theta_W$, $v^2 = \frac{-m^2}{\lambda}$, $m^2 < 0$, $\lambda > 0$

$$m_f = \frac{\lambda_f v}{\sqrt{2}}, m_w = \frac{gv}{2}, m_z = \frac{gv}{2 \cos \theta_W}, m_h = \sqrt{-2m^2}$$

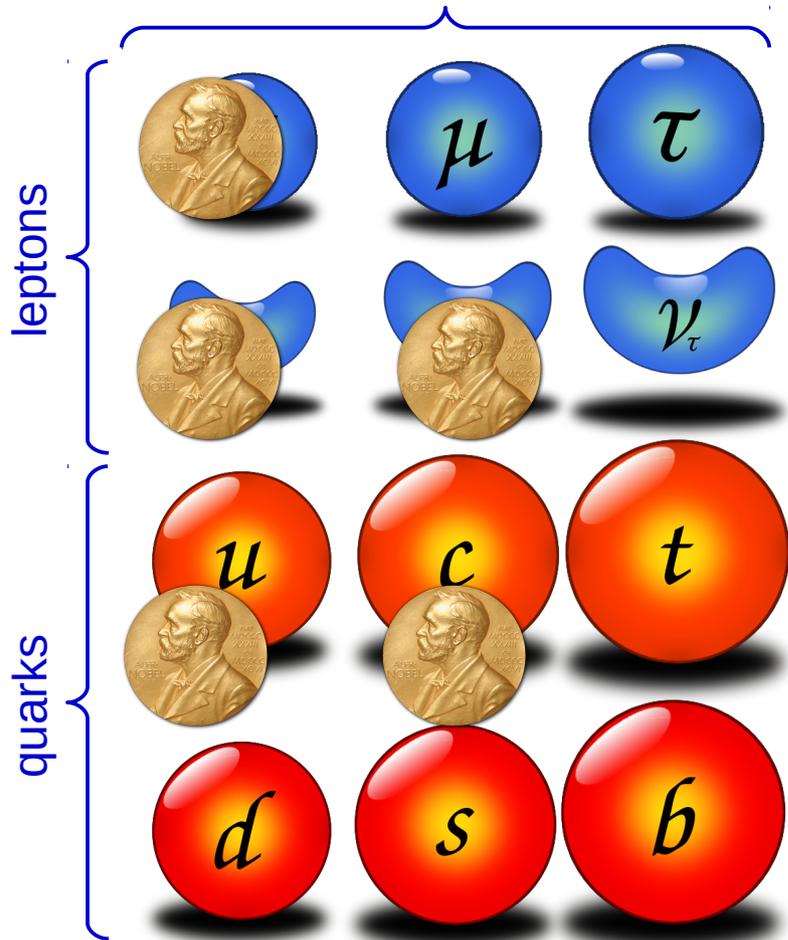
Résumé : le Modèle Standard (2)

- ◆ Le Modèle Standard est vérifié parfaitement au niveau expérimental !
- ◆ Corollaire : toute nouvelle théorie doit être au moins aussi performante

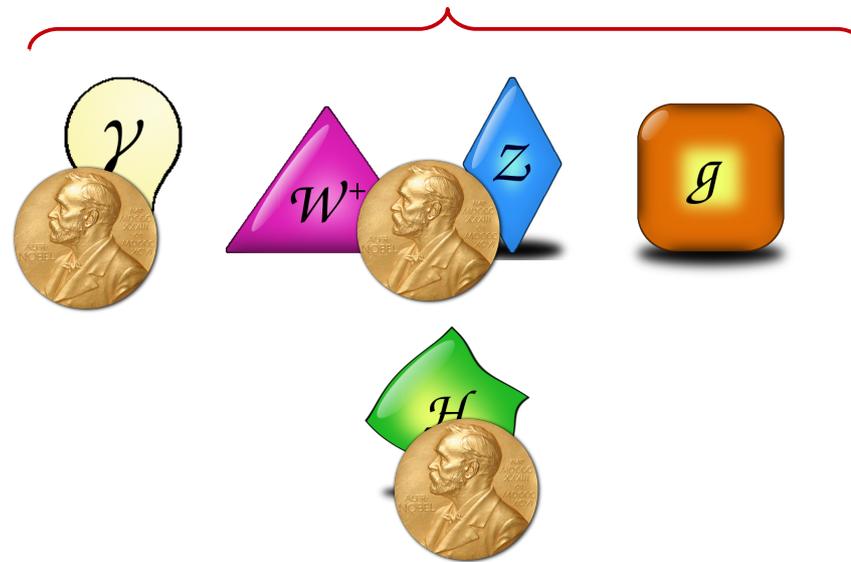


Machine à Prix Nobel

fermions

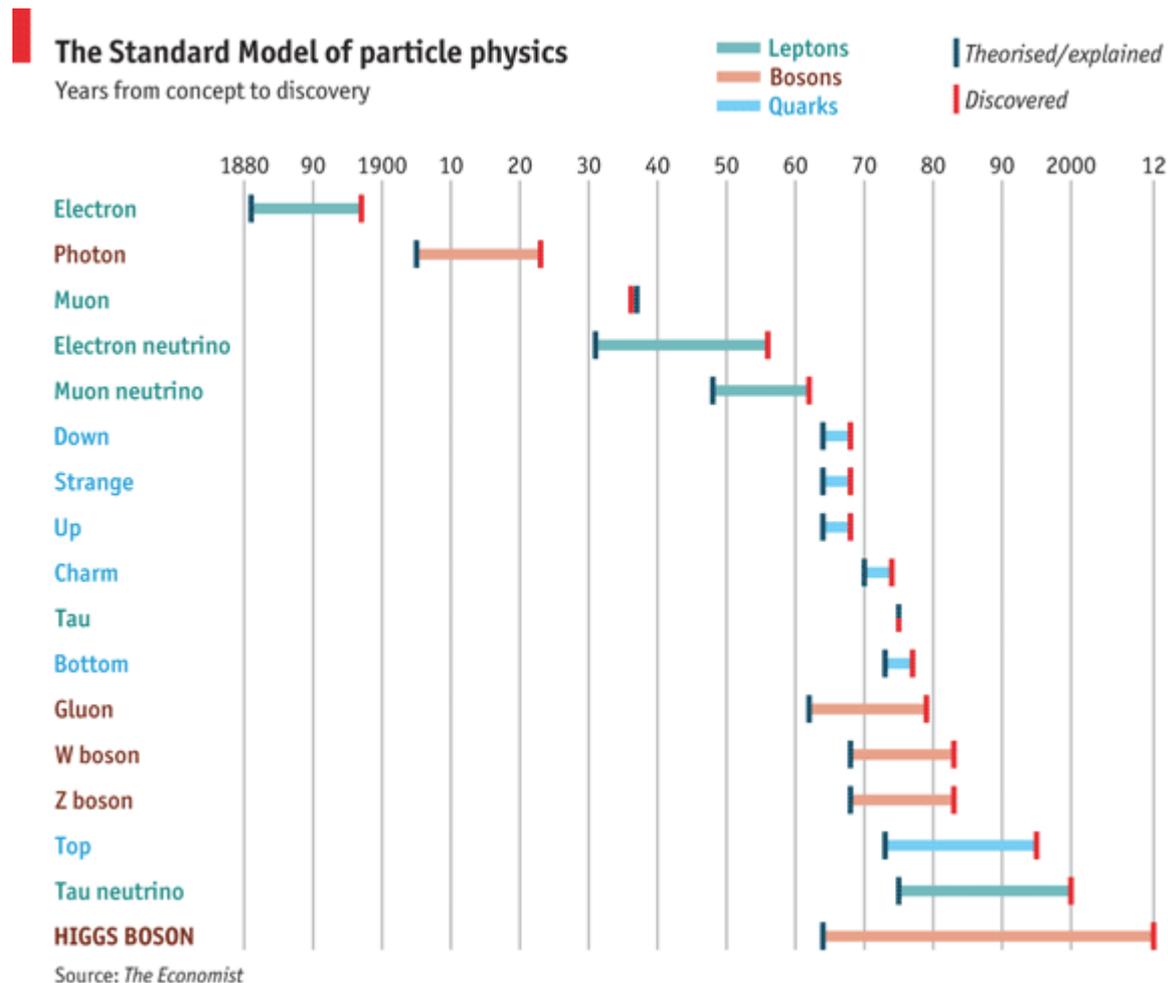


bosons



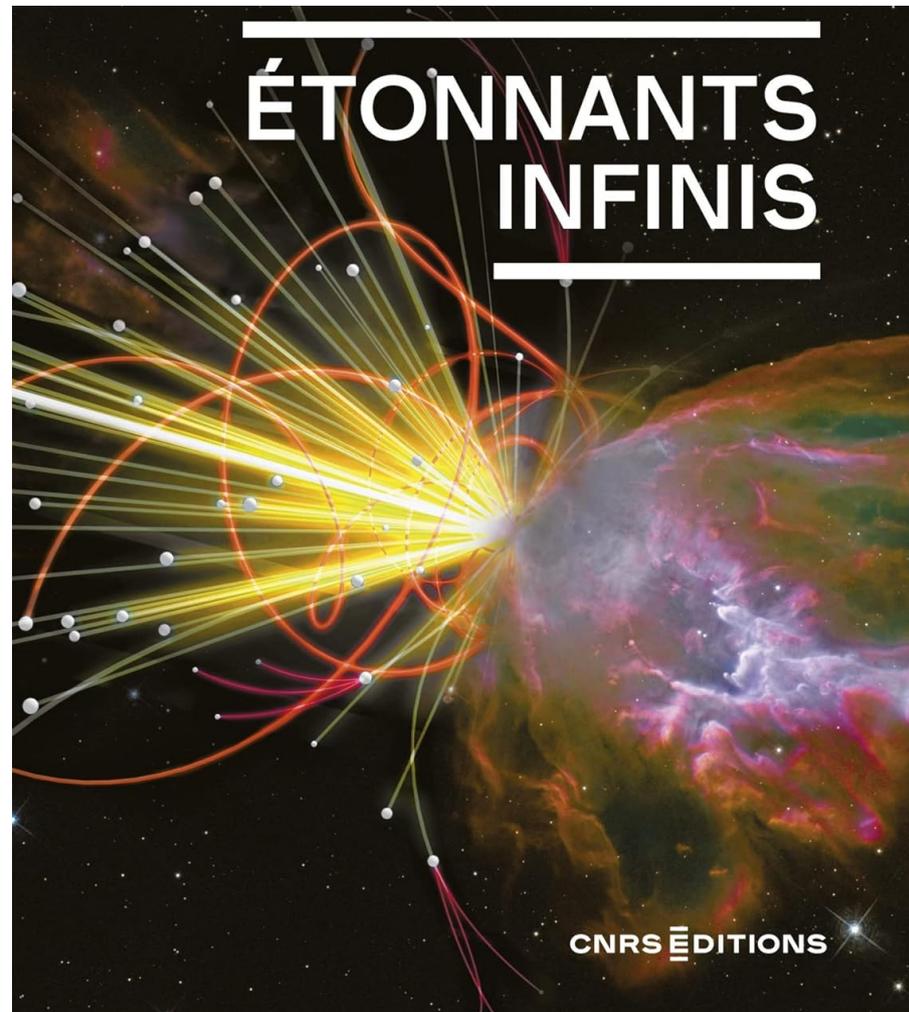
Historique de la découverte des particules

- ◆ Souvent plusieurs dizaines d'années entre prédiction/découverte
- ◆ NB : jusqu'ici presque toutes les particules ont été prédites par la théorie avant d'être découvertes

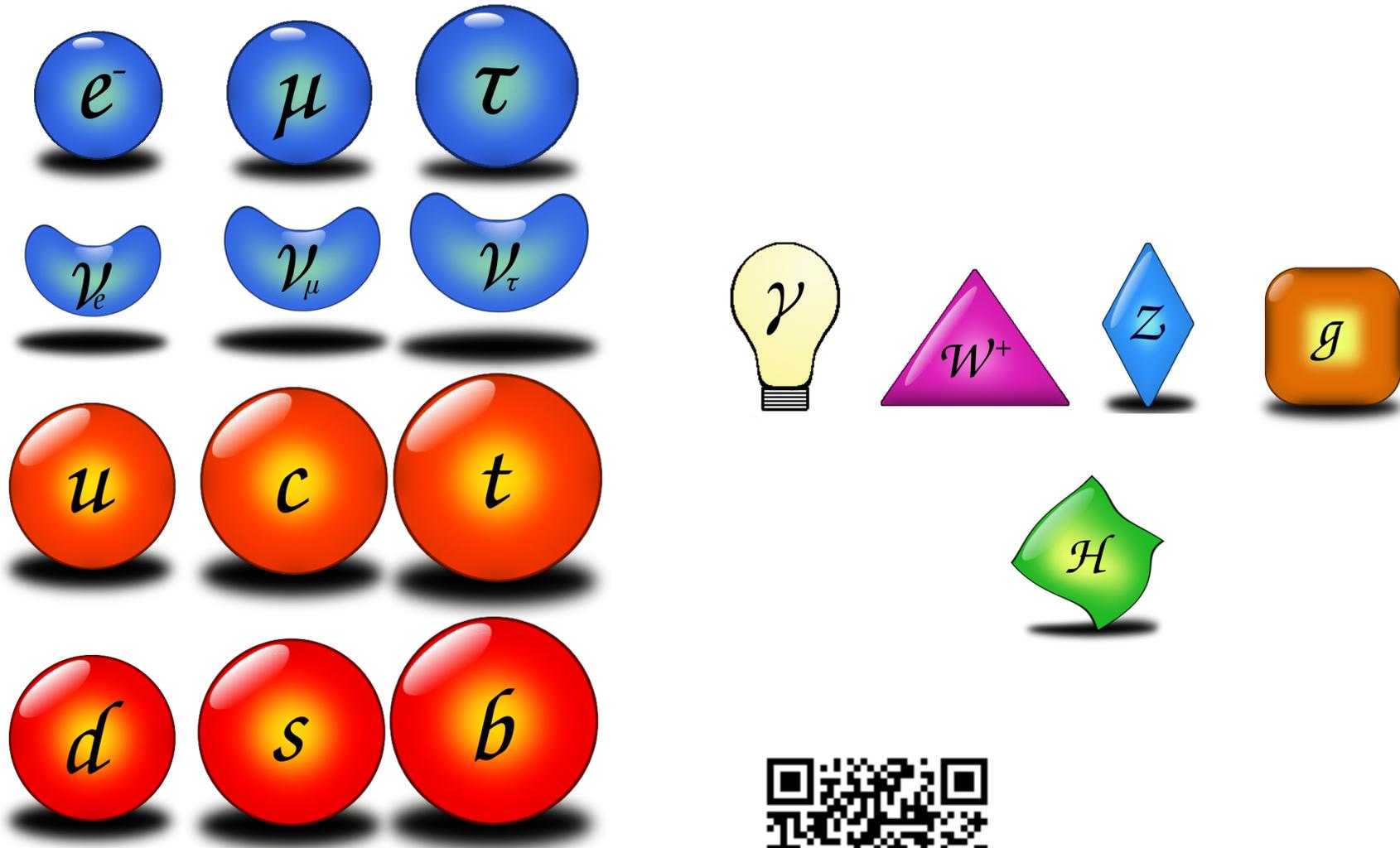


Conclusion

- ◆ On va voir au cours suivant quelques mesures actuelles et les limitations du Modèle Standard
- ◆ Référence recommandée :



Quelle particule êtes-vous ?



◆ Pour le savoir, scannez ce QR-code :



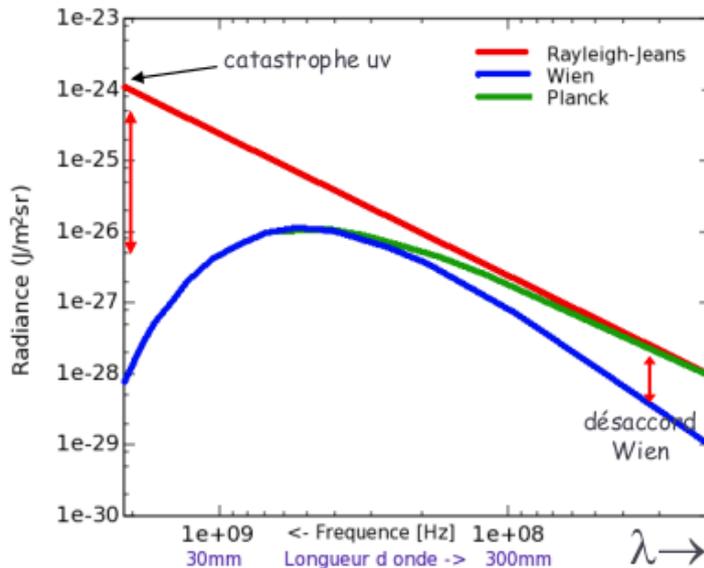
– ou https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/Particle_v2/index.html

Back-up

1900: Un petit coup de main

Planck (élève de Kirchoff)

Analogie entre les deux formules



Ajouter -1 au numérateur Wien

Alors Rayleigh \equiv Wien corrigé

SI

$E = n\varepsilon$, ε quantum énergie

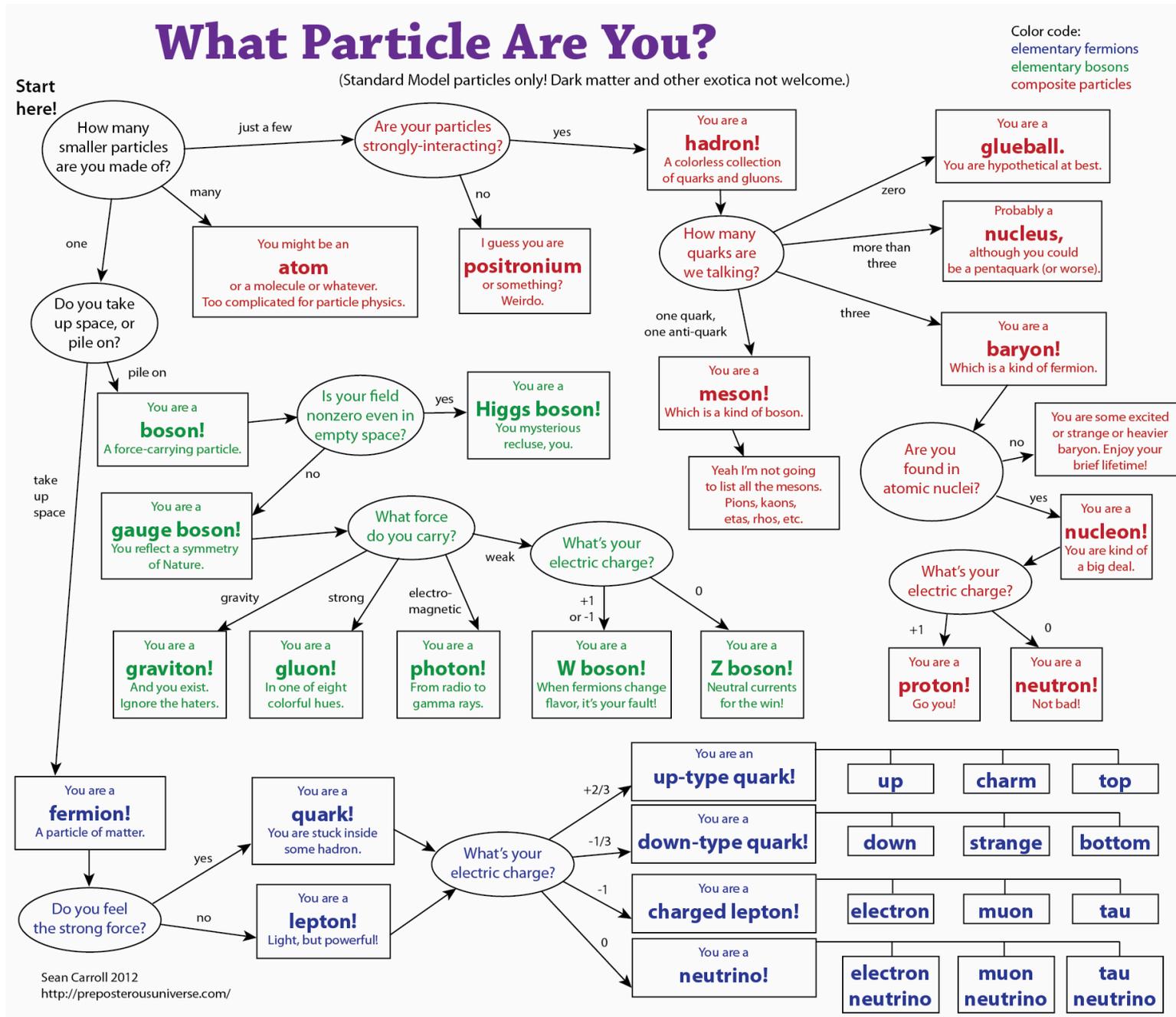
$\Rightarrow \varepsilon = h \nu$, $\nu = c/\lambda$

"hilkonstante" $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Js

HYP. PLANCK: énergie thermique \leftrightarrow énergie E.M par "quanta d'énergie"

Les ondes EM pas telles des ondes mécaniques....

Quelle particule êtes-vous ?



Sean Carroll 2012
<http://preposterousuniverse.com/>

Emprunts à d'autres cours 😊

- ◆ Cours de Steve Muanza à l'École "Techniques de base des détecteurs" 2017
- ◆ "Physique des particules aux collisionneurs", F. Ledroit, Bénodet 2017
- ◆ "Conception de détecteurs pour la physique des hautes énergies", P. Puzo, Bénodet 2017
- ◆ "Cours de master classes au CPPM", Y. Caodou et al
- ◆ Cours de I. Wingerter aux CERN Summer Students 2018
- ◆ "Un siècle d'étude des rayons cosmiques", D. Décamp, 2012

- ◆ Autre source importante : "The Review of Particle Physics (2018)", Particle Data Group