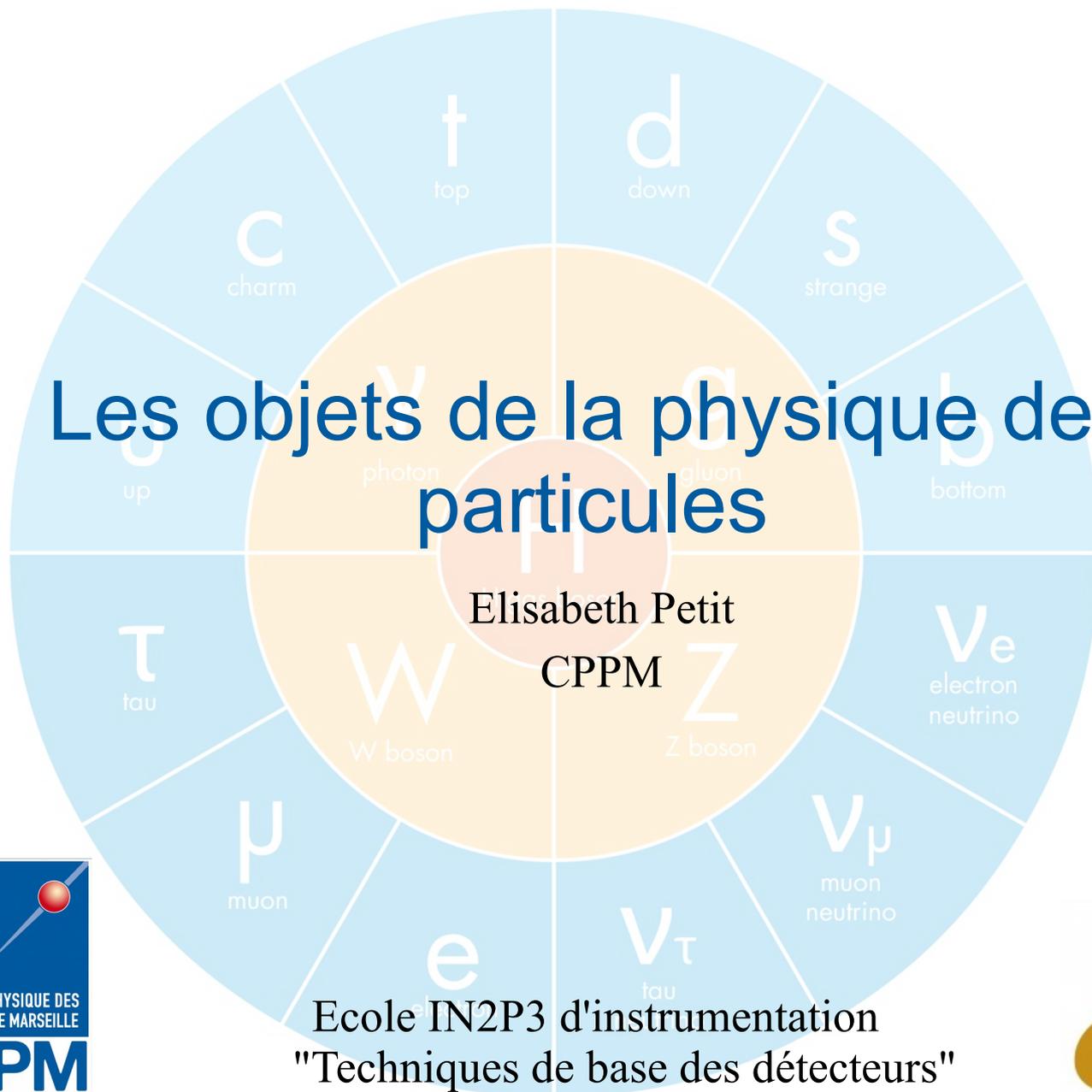


# Les objets de la physique des particules



Elisabeth Petit  
CPPM



Ecole IN2P3 d'instrumentation  
"Techniques de base des détecteurs"

Cargèse, 1-6 avril 2019



- ◆ Les objets de la Physique des particules : 02/04 à 10h50
- ◆ Les particules et leurs signatures : 02/04 à 11h40
- ◆ Collisionneurs et détecteurs (1/3) : 02/04 à 17h20 : accélérateurs
- ◆ Collisionneurs et détecteurs (2/3) : 03/04 à 10h30 : trajectographes et calorimètres
- ◆ Collisionneurs et détecteurs (3/3) : 03/04 à 11h20 : hors accélérateurs
- ◆ La quête du boson de Higgs : 04/04 à 11h40



# Voyage au pays de l'infiniment petit...

## ◆ Vidéo CERN



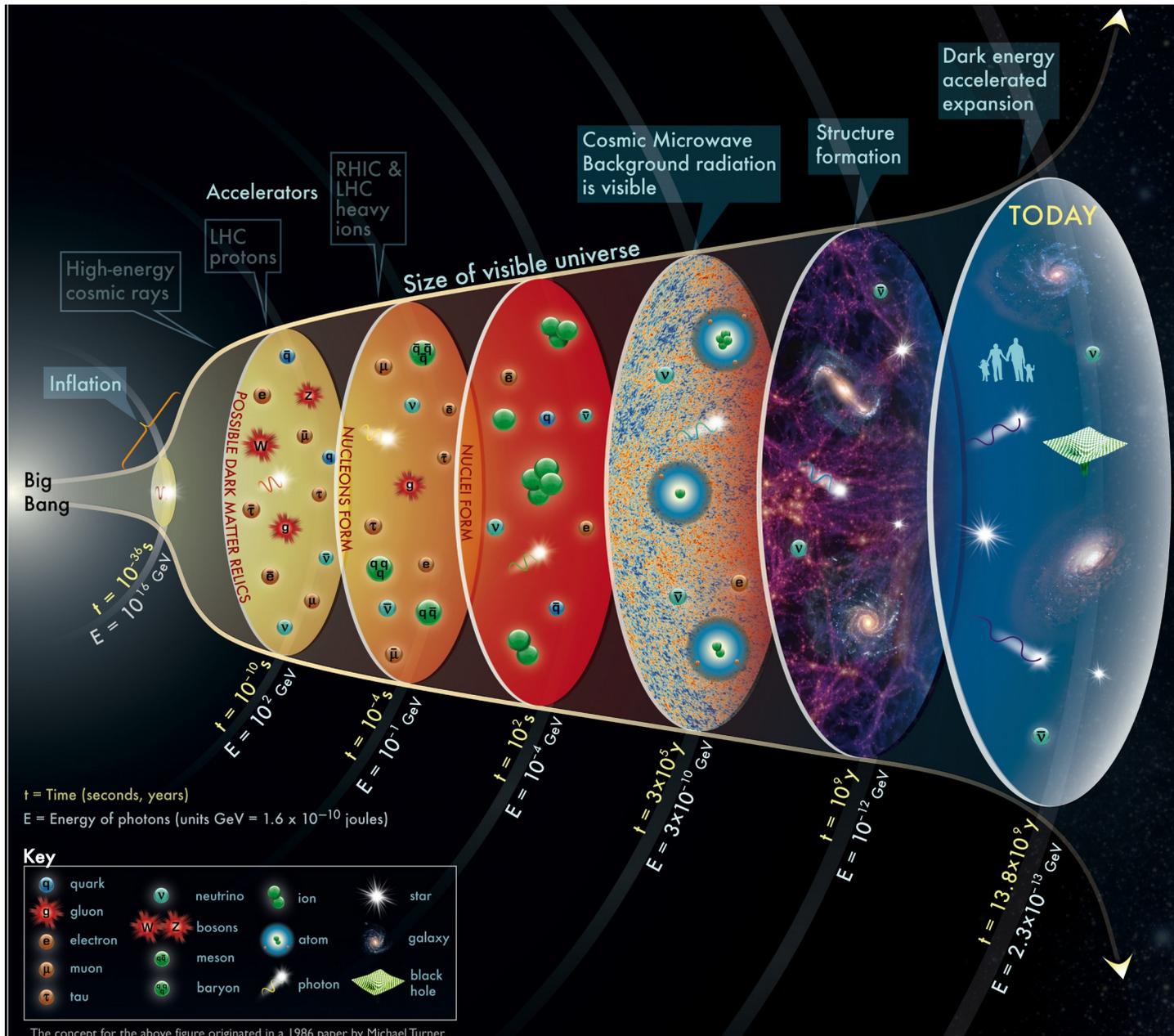
version pdf : [lien vers la vidéo](#)





# ... en lien avec l'infiniment grand

## ◆ Description des deux premières minutes de l'univers



◆ Unités usuelles inadaptées à cette échelle

◆ **Energie** : electron-volt (eV)

- $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

◆ **Impulsion** : eV/c

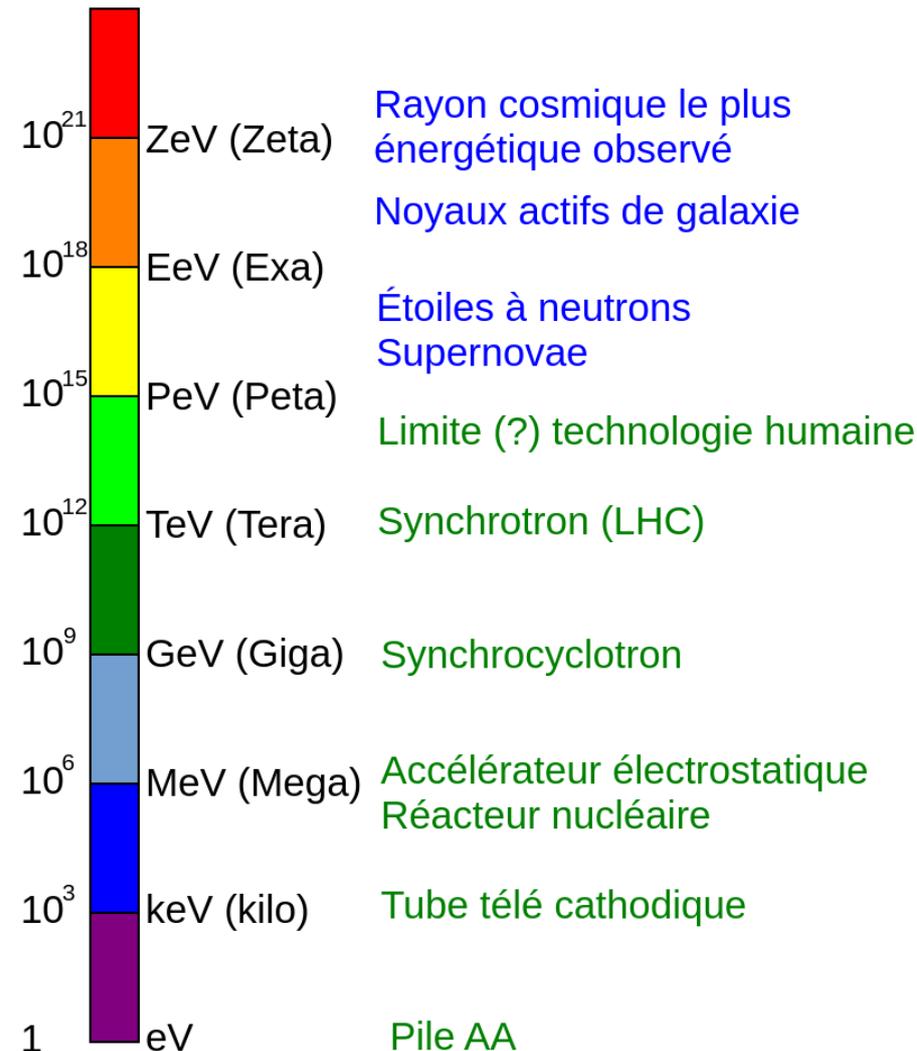
◆ **Masse** : eV/c<sup>2</sup>

- $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

◆ Habituellement on écrit que la vitesse de la lumière  $c = 1$

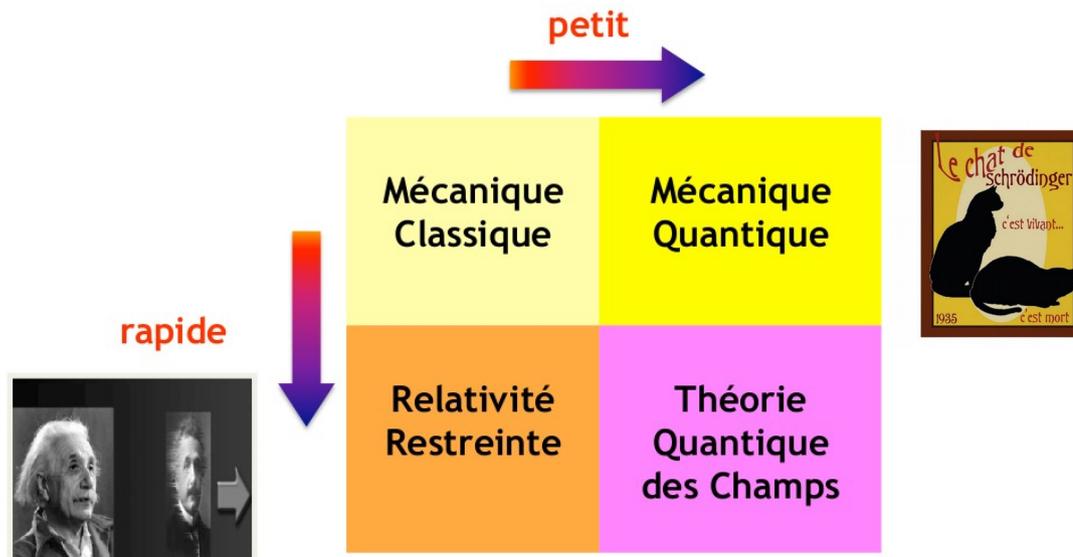
⇒ impulsions et masses en eV

◆ 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

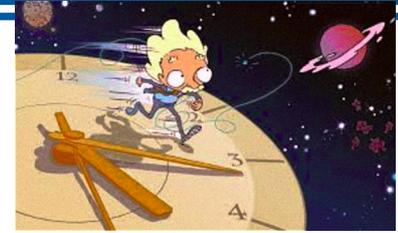
- ◆ Théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**
  - constituants *élémentaires* : “particules” sans structure interne
  - *interactions* : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires
- ◆ À cette échelle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

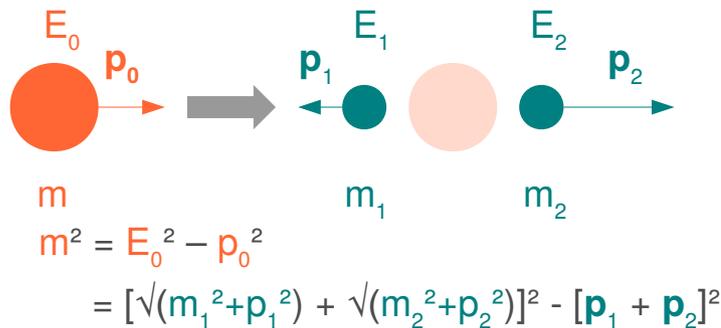


# Quelques mots sur la relativité restreinte (2)



## ◆ Conséquence 2 : Équivalence masse-énergie

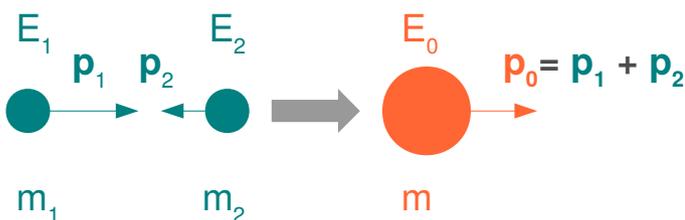
- La masse est une forme d'énergie
  - Si un corps perd une quantité d'énergie  $E$ , sa masse diminue de  $\Delta m = E/c^2$
  - $E_0 = mc^2$  : énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)
- Énergie totale d'un système :  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$  ( $p$  : quantité de mouvement)
-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



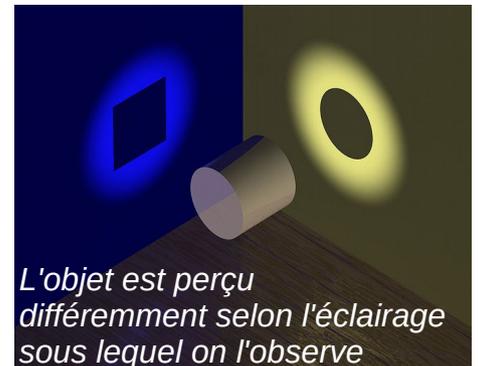
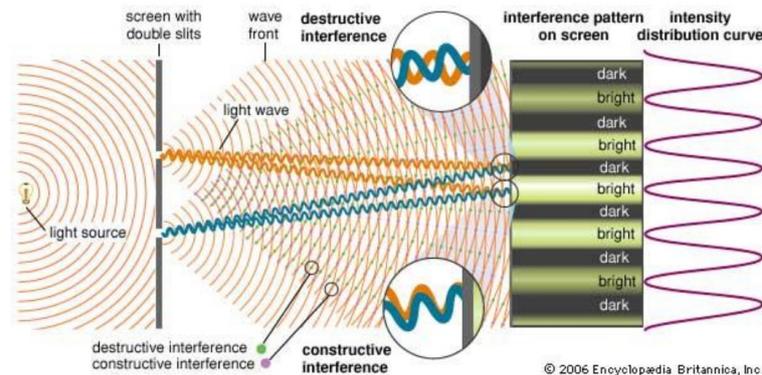
$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

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

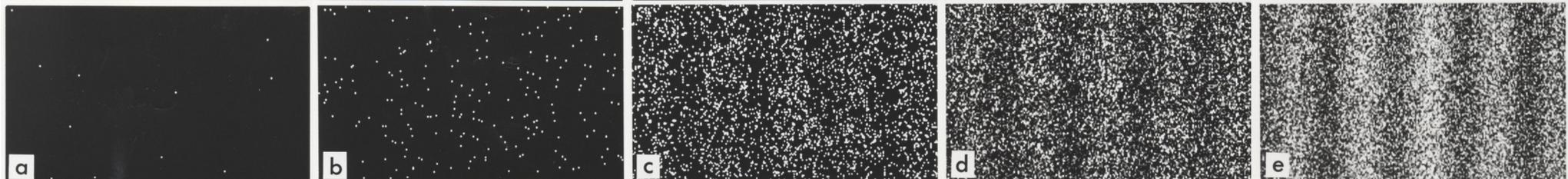


# Quelques mots sur la mécanique quantique (1)

- ◆ Physique permettant de décrire la physique à l'échelle (sub)-atomique
  - valeurs discrètes : l'énergie ne peut s'échanger que par multiples de quantités proportionnelles à la fréquence du rayonnement :  $E = h\nu$
- ◆ Dualité onde-corpuscule
  - les ondes présentent un aspect corpusculaire et vice-versa
  - conséquence : échanges d'énergie entre matière et ondes lumineuses sont le fait d'un corpuscule de lumière (photon) porteur de l'énergie des quanta de Planck
  - fentes de Young :
    - figure d'interférence avec de la lumière:



- apparaît même quand on envoie des électrons un par un !





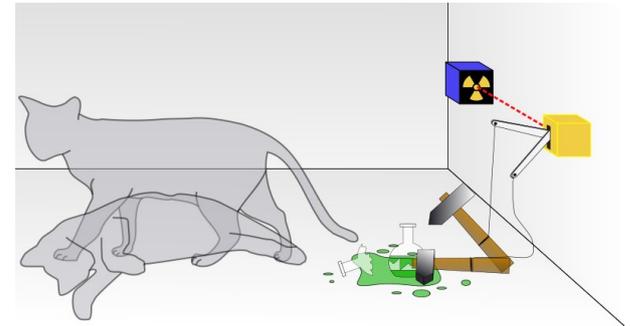
# Quelques mots sur la mécanique quantique (2)

## ◆ Quantification:

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

## ◆ Conséquences : utilisation de **probabilités**

- d'une désintégration : son moment, ses produits
- d'une production
- exemple : le chat de Schrödinger



## ◆ Relations de **Heisenberg**

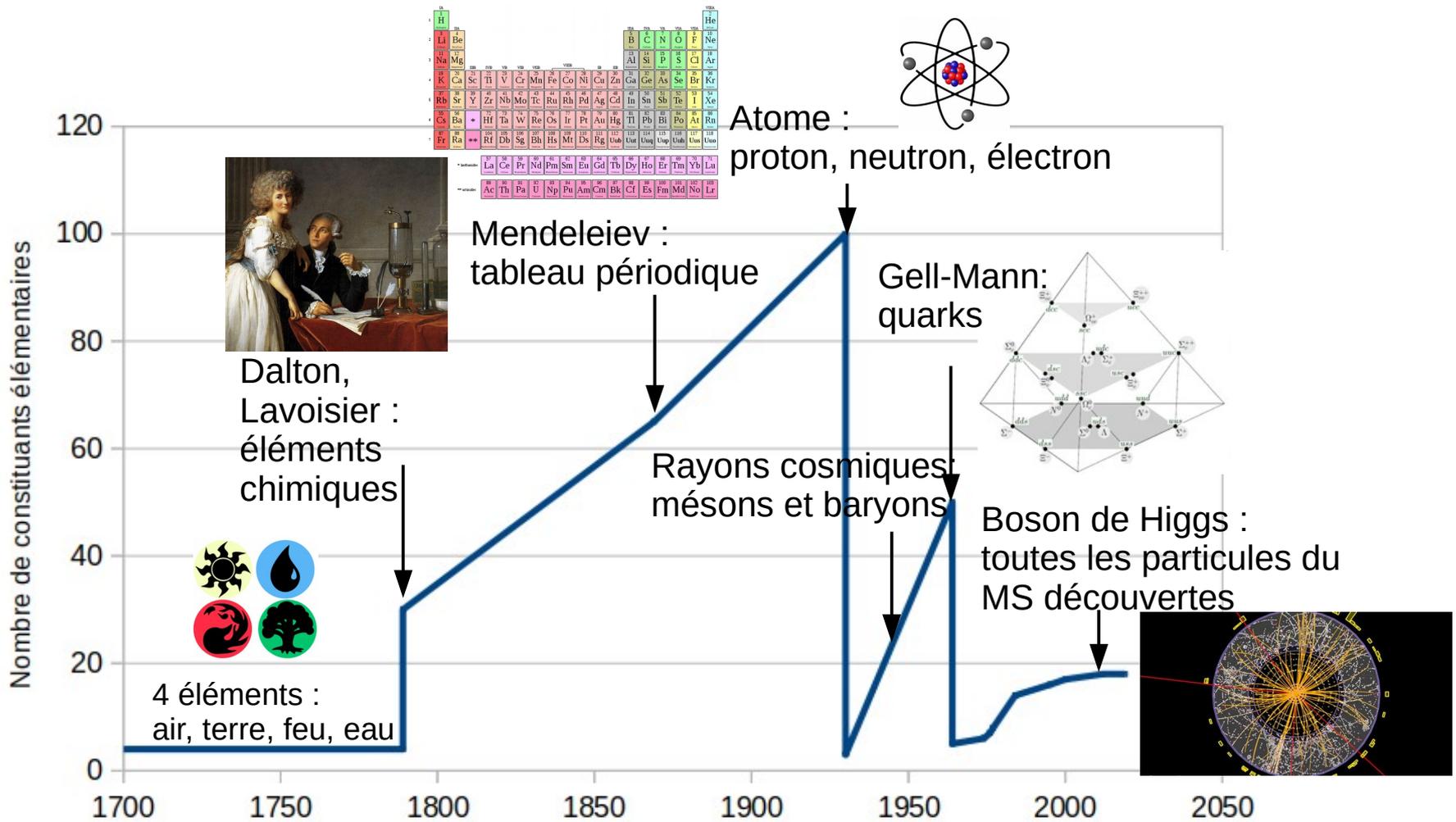
- si la précision sur la position d'une particule est  $\Delta x$ , son impulsion a une précision  $\Delta p$  telle que  $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
- si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est  $\Delta t$ , son énergie a une précision  $\Delta E$  telle que  $\Delta E \cdot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

## ◆ Conséquence : une énergie $\Delta E$ peut être "**empruntée**" au vide pendant un laps de temps $\Delta t$ 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

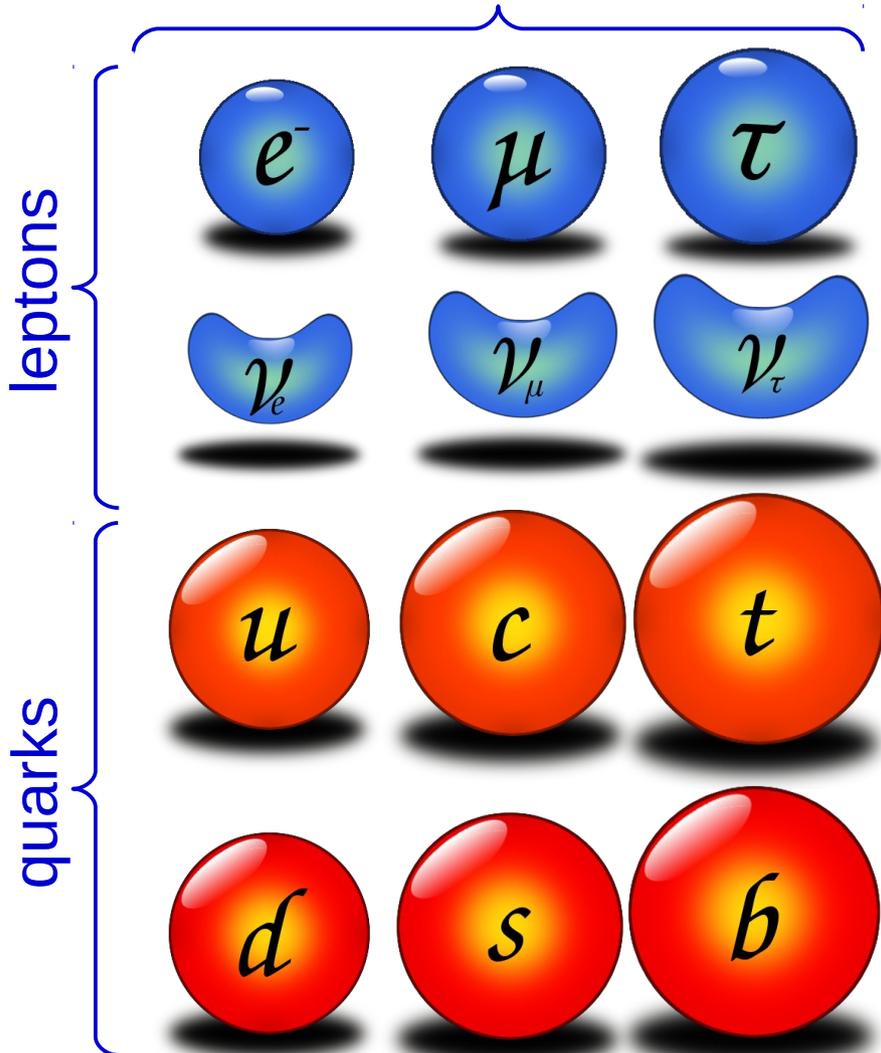




# Le zoo des particules

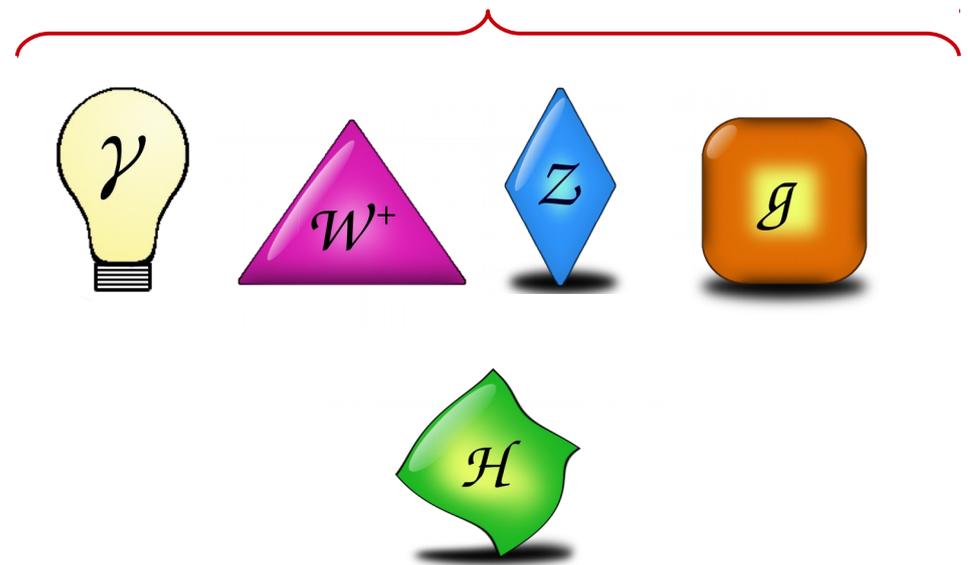
## ◆ Particules de matières

fermions



## ◆ Particules porteuses des interactions

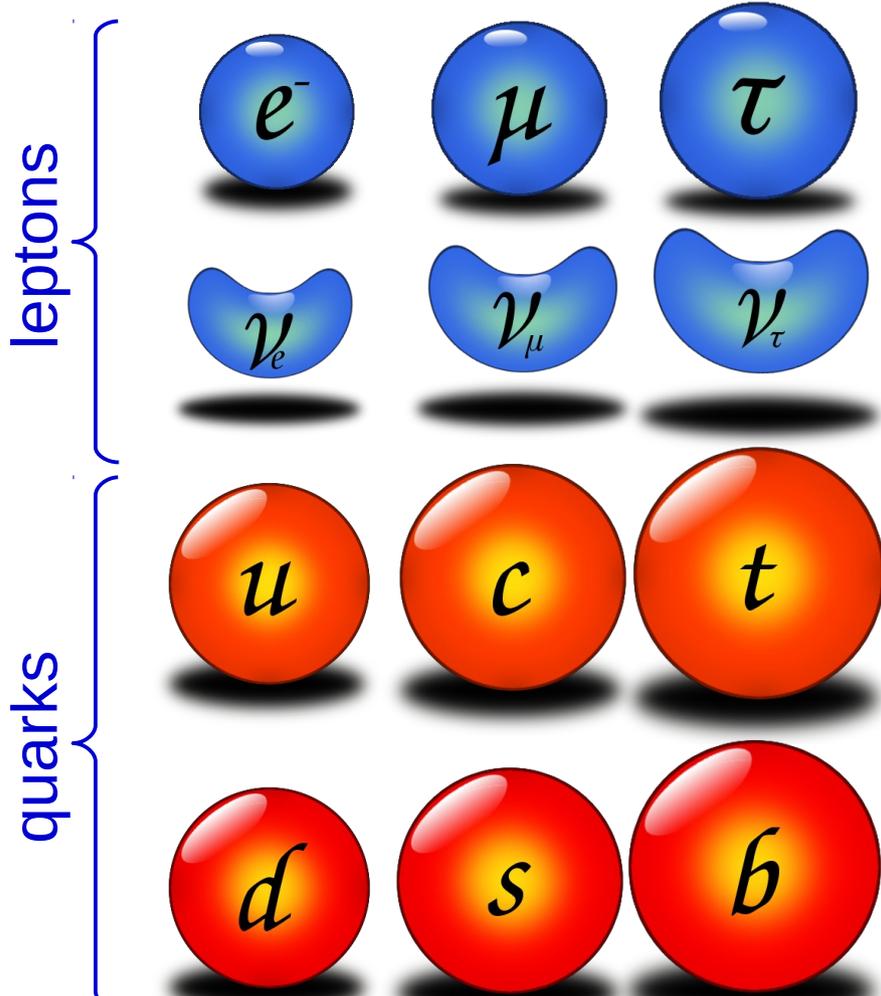
bosons





# Les particules de matière (1)

◆ Appelées **fermions**



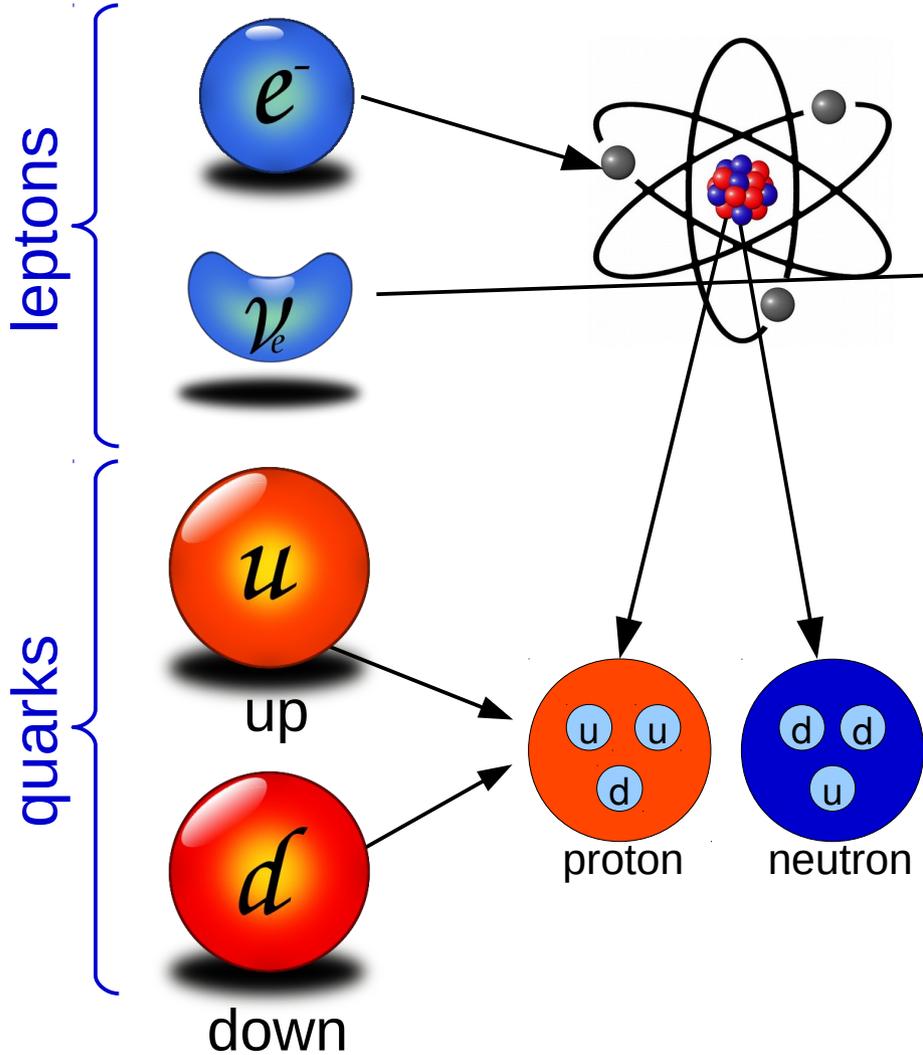
◆ Les quarks composent les **hadrons**

- trois quarks : baryons
- quark-antiquark : mésons

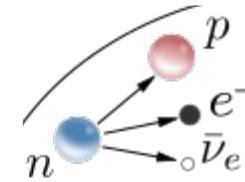


# Les particules de matière (2)

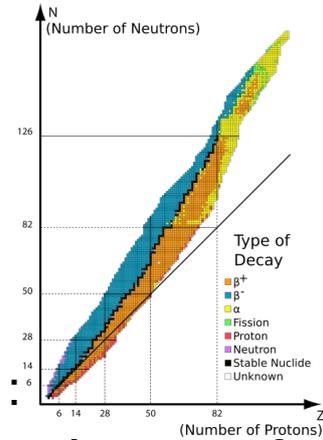
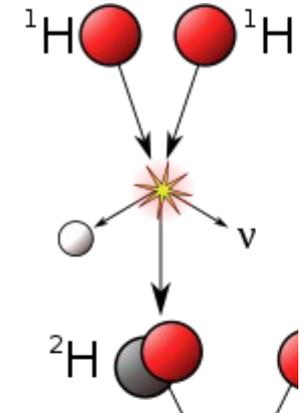
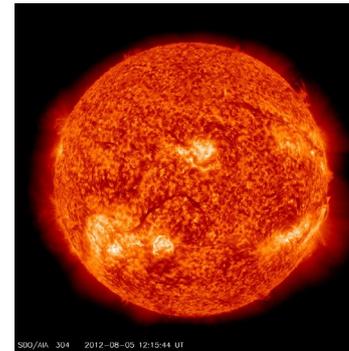
◆ La matière ordinaire :



neutrino électronique :  
- produit dans les désintégrations  $\beta^-$ :



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





# Les particules de matière (3)

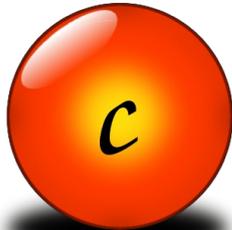


## ◆ Deuxième famille

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)

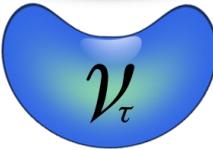
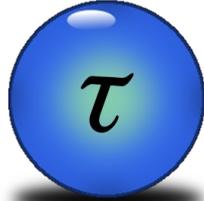
quark **strange** (20x masse down)



# Les particules de matière (4)

## ◆ Troisième famille

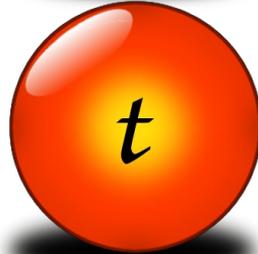
leptons



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.

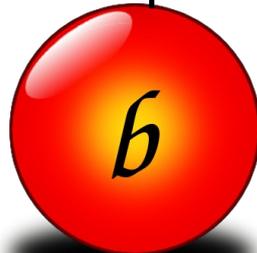
Il a aussi son neutrino associé.

quarks



top

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



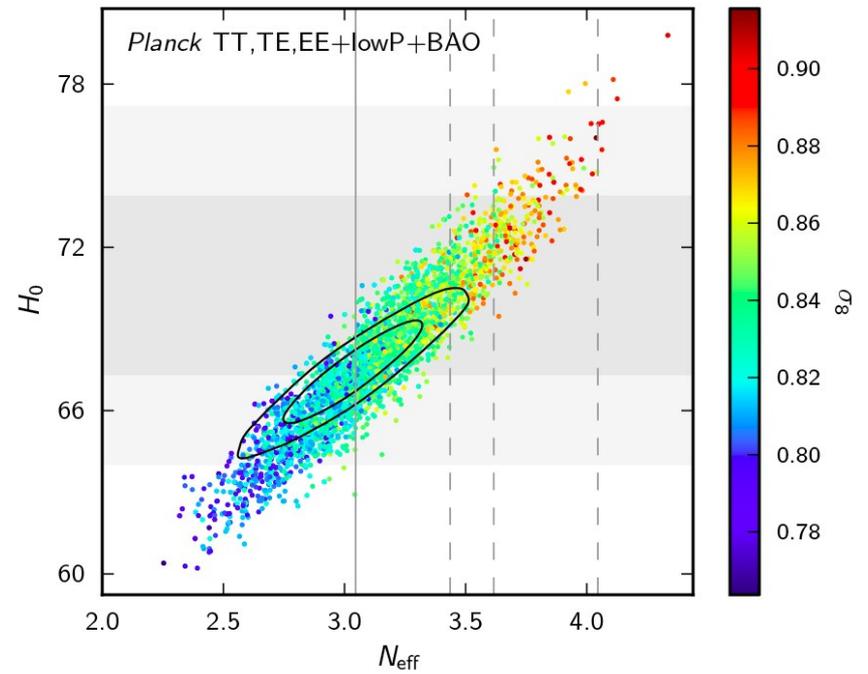
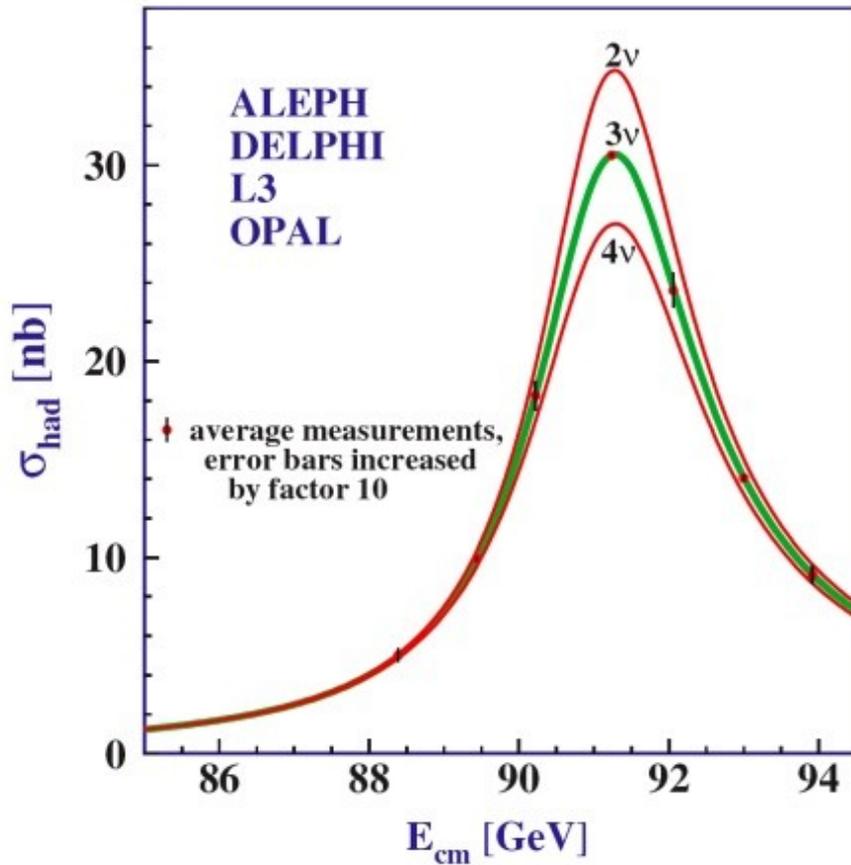
beauty

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



# Les particules de matière (5)

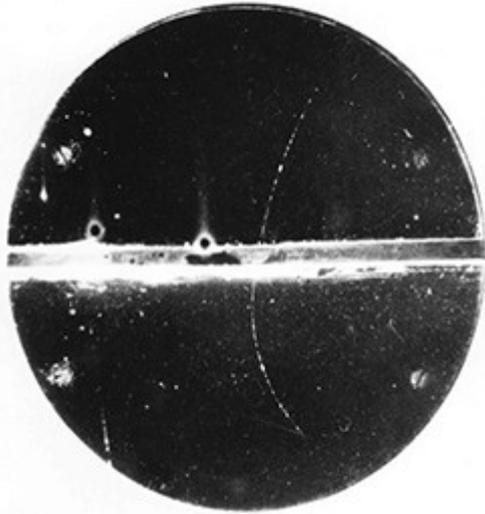
- ◆ Une **quatrième** famille ?
- ◆ A priori **non** : mesures du LEP et cosmologie



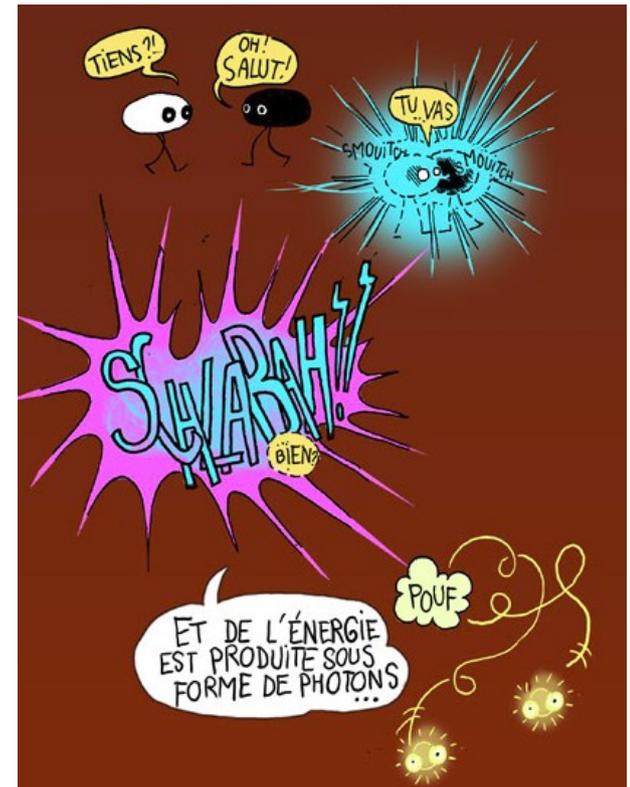
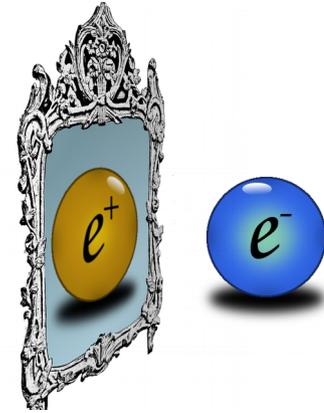


# L'antimatière

- ◆ 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

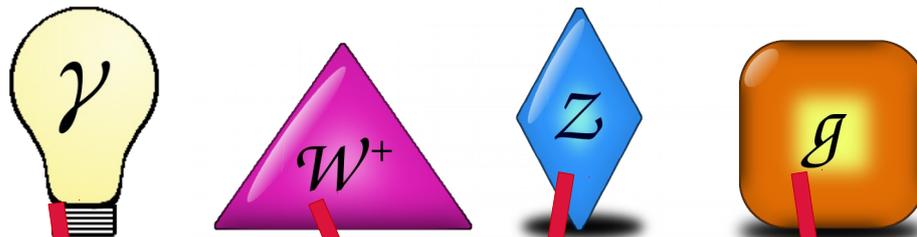


# Les particules d'interaction (1)

◆ Appelées **bosons de jauge**



**Satyendra  
Nath Bose**



◆ Elles portent les **interactions fondamentales**



électromagnétisme



interaction faible



interaction forte

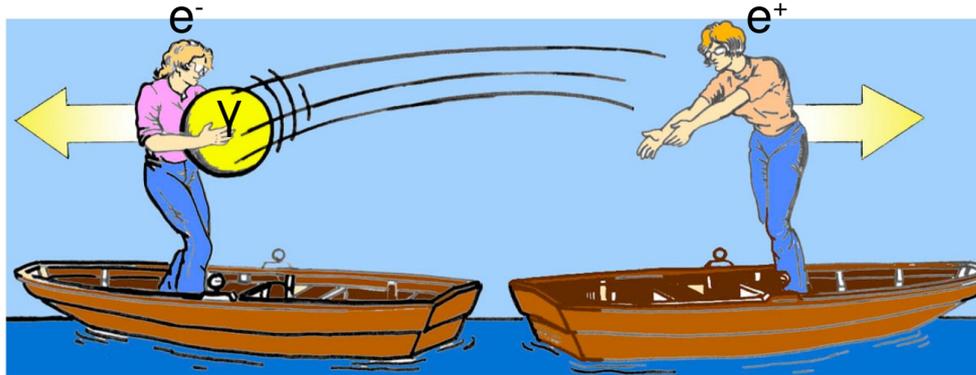


gravité

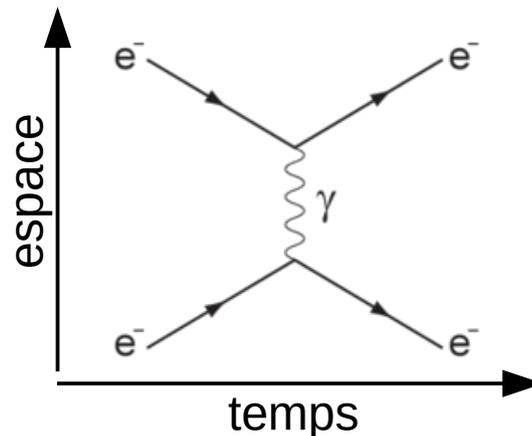


# Les particules d'interaction (2)

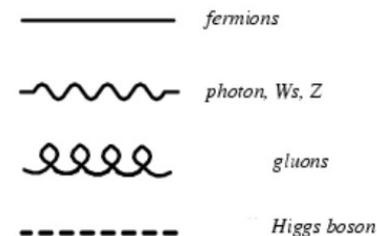
- ◆ Les **interactions** entre particules se font par l'intermédiaire d'**échanges** de bosons de jauge
  - les particules doivent posséder la "charge" correspondante



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



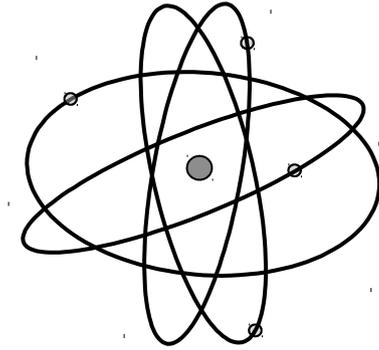
conventions :





# Interaction électromagnétique

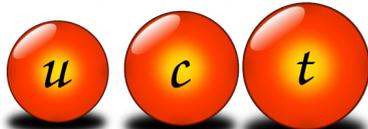
- ◆ Elle réunit dans un même formalisme
  - les phénomènes électriques
  - les phénomènes magnétiques
  - l'optique
- ◆ Elle est responsable de la cohésion de l'atome
- ◆ Au niveau fondamental : échange de **photons** entre particules chargées électriquement
  - portée infinie



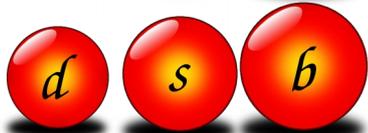
Charge électrique +1



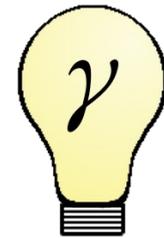
Charge électrique +1/-1



Charge électrique +2/3



Charge électrique -1/3

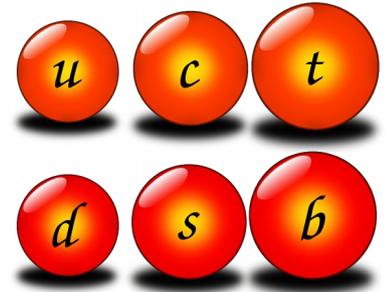
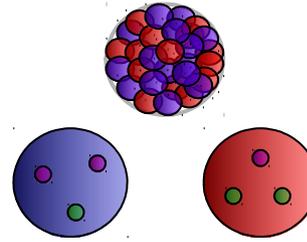


Photon

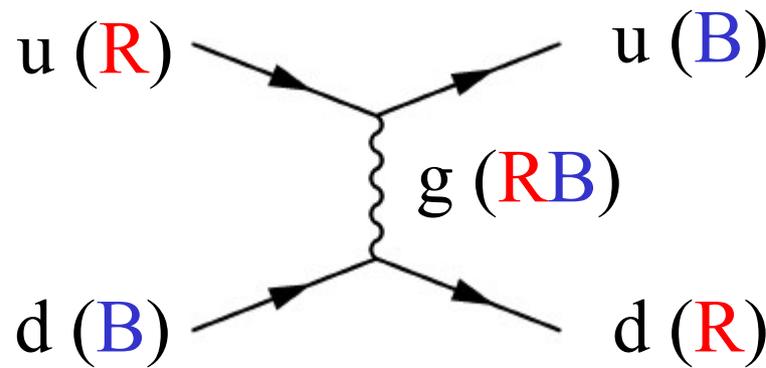


# Interaction forte

- ◆ 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 :  $\sim 1$  fm (ie la taille d'un noyau), mais l'intensité augmente avec la distance

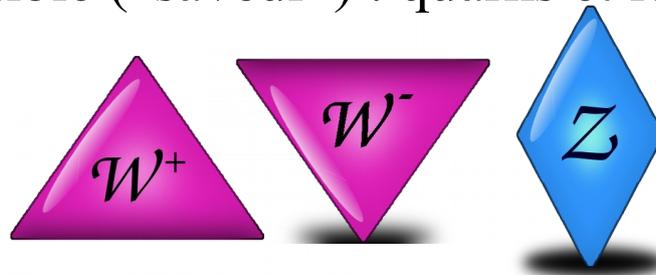


- ◆ Les particules observées sont blanches  $\Rightarrow$  les quarks ne s'observent jamais seuls : ils s'associent pour former des hadrons
  - baryons : trois quarks **RVB**
  - mésons : un quark et un anti-quark **Rouge-AntiRouge**, **Vert-AntiVert**, **Bleu-AntiBleu**

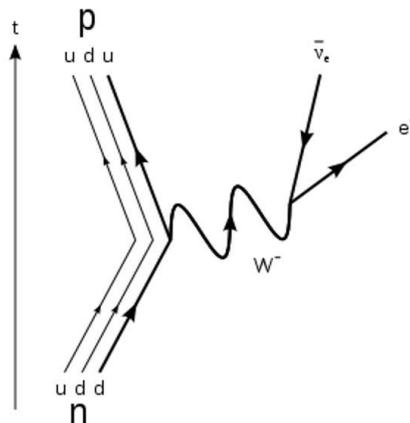
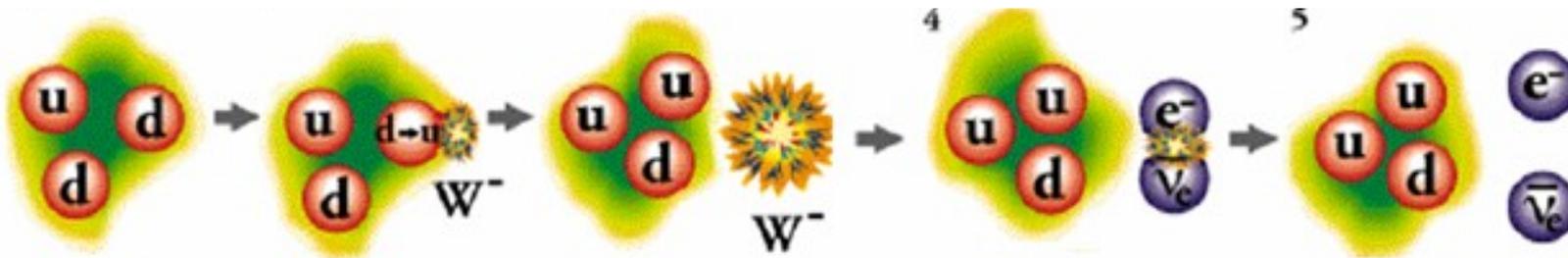


# Interaction faible

- ◆  $10^{-7}$  à 0.8 plus faible que l'électromagnétisme
- ◆ Responsable des 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



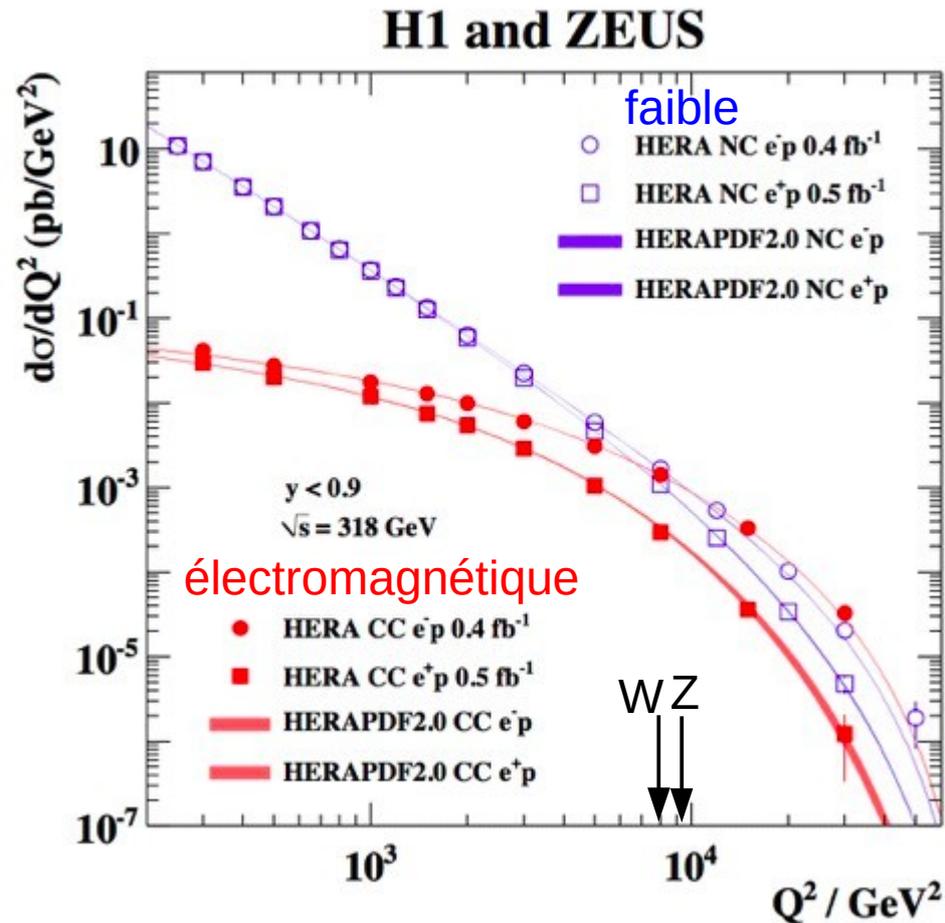
- ◆ Exemple : désintégration du neutron (demie-vie : 20 min)





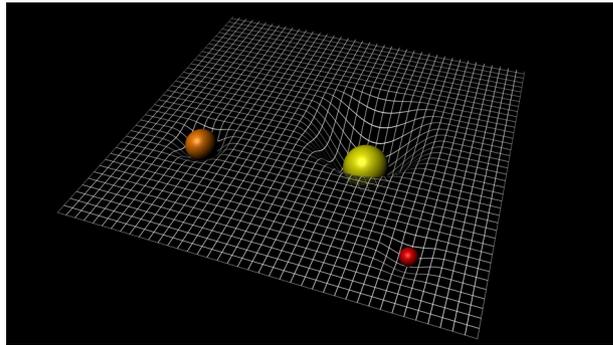
# Interaction électrofaible

- ◆ 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

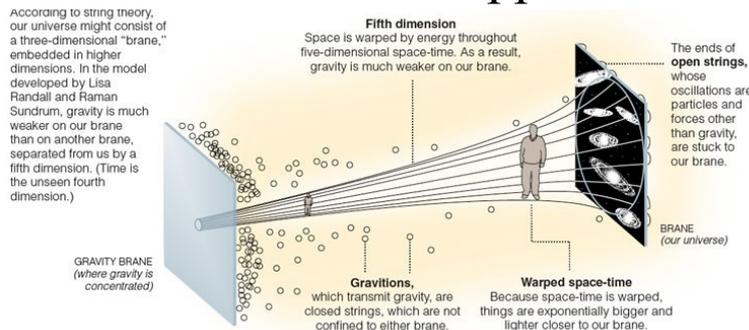


- ◆ Vrai jusqu'à  $\sim 10^{-10}$  s après le Big-Bang

- ◆ 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

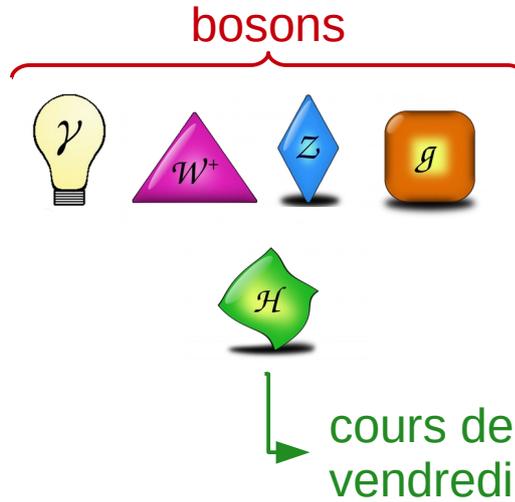
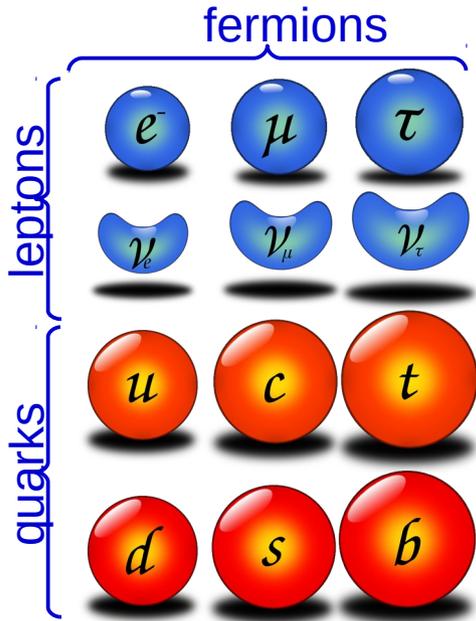


- ◆ Il existe des théories au-delà du Modèle Standard qui prévoient l'existence d'un boson qui transmet la gravité : le graviton
  - nécessite souvent des dimensions supplémentaires d'espace-temps...



# Résumé : le Modèle Standard (1)

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



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

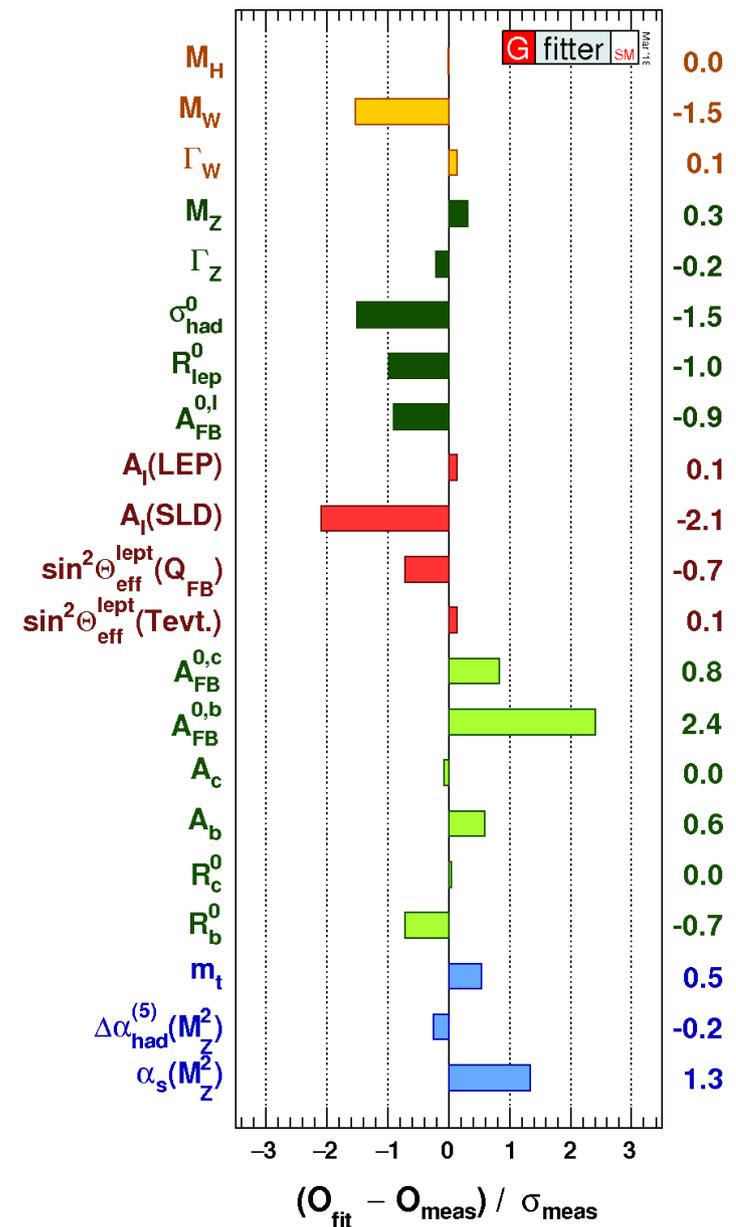
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \partial_\mu \psi_\ell + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} i\bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{\ell'} + \sum_{q=u,c,t} i\bar{\psi}_q \gamma^\mu \partial_\mu \psi_q + \sum_{q'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'} \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'} \\ & - \left(\frac{gv}{2}\right)^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{2} \left(\frac{gv}{2 \cos \theta_W}\right)^2 Z_\mu Z^\mu - \frac{1}{2} (-2m^2)^2 h^2 \\ & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left( \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (4 \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_\ell Z_\mu + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_\mu,\nu_\tau} \bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell'} Z_\mu \right) \\ & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left( \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3} \sin^2 \theta_W - \gamma^5) \psi_q Z_\mu + \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (\frac{4}{3} \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_{q'} Z_\mu \right) \\ & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_\ell W_\mu^+ + \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell'} W_\mu^- \\ & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} V_{qq'} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{q'} W_\mu^+ + V_{qq'}^* \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_q W_\mu^- \\ & + g_{em} \left( - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \psi_\ell \gamma^\mu \psi_\ell A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \psi_q \gamma^\mu \psi_q A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} A_\mu \right) \\ & + g_s \left( \sum_{\lambda,q=u,c,t} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q G_\mu^a T_{a_j} + \sum_{\lambda',q'=d,s,b} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} G_\mu^a T_{a_j} \right) \\ & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell h - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q h - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} h \\ & + ig_{em} [\partial_\mu A_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} A^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} A^\mu - \partial_\mu A_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\ & \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} A^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} A^\nu] \\ & + ig \cos \theta_W [\partial_\mu Z_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} Z^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} Z^\mu - \partial_\mu Z_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\ & \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} Z^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} Z^\nu] + \frac{g^2 v}{2} W_\mu^+ W^{-\mu} h + \frac{g^2 v}{4 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h - \lambda v h^3 \\ & + g_{em}^2 [W_\nu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\mu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu] + g^2 \cos^2 \theta_W [W_\nu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu] \\ & + g^2 \cos \theta_W \sin \theta_W [2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\nu} A_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\nu} A^\mu Z_\nu] \\ & + \frac{g^2}{2} [W_\mu^- W^{-\mu} W^{+\nu} - W_\mu^- W^{+\mu} W^{-\nu}] + \frac{g^2}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} h^2 + \frac{g^2}{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_\mu^a - \partial_\nu G_\mu^a) G^{\mu b} G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{a,b,c} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G^{\mu d} G^{\nu e} \end{aligned}$$

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)

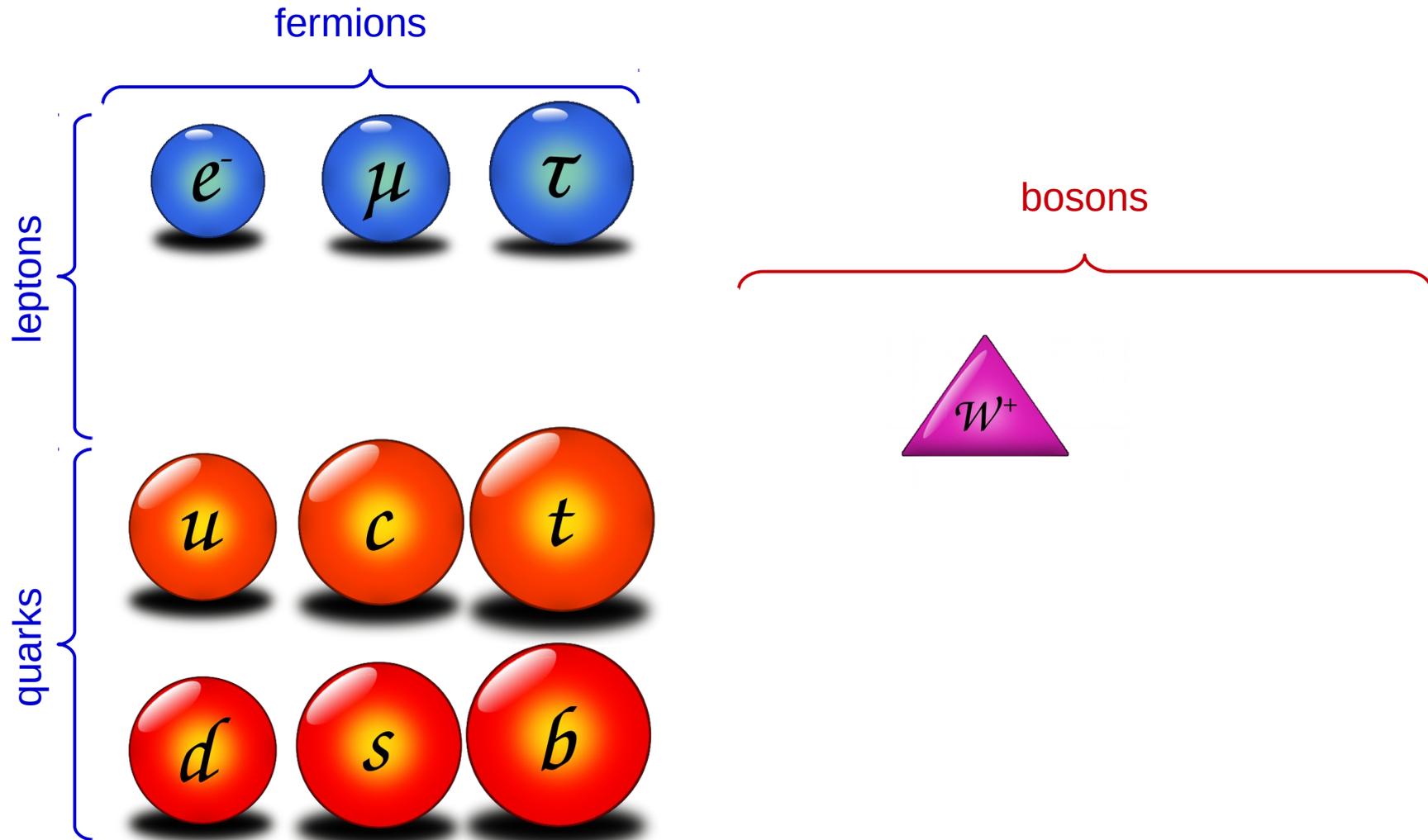
- ◆ Le Modèle Standard est vérifié parfaitement au niveau expérimental !
- ◆ Corollaire : toute nouvelle théorie doit être au moins aussi performante





# Résumé des interactions (1)

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

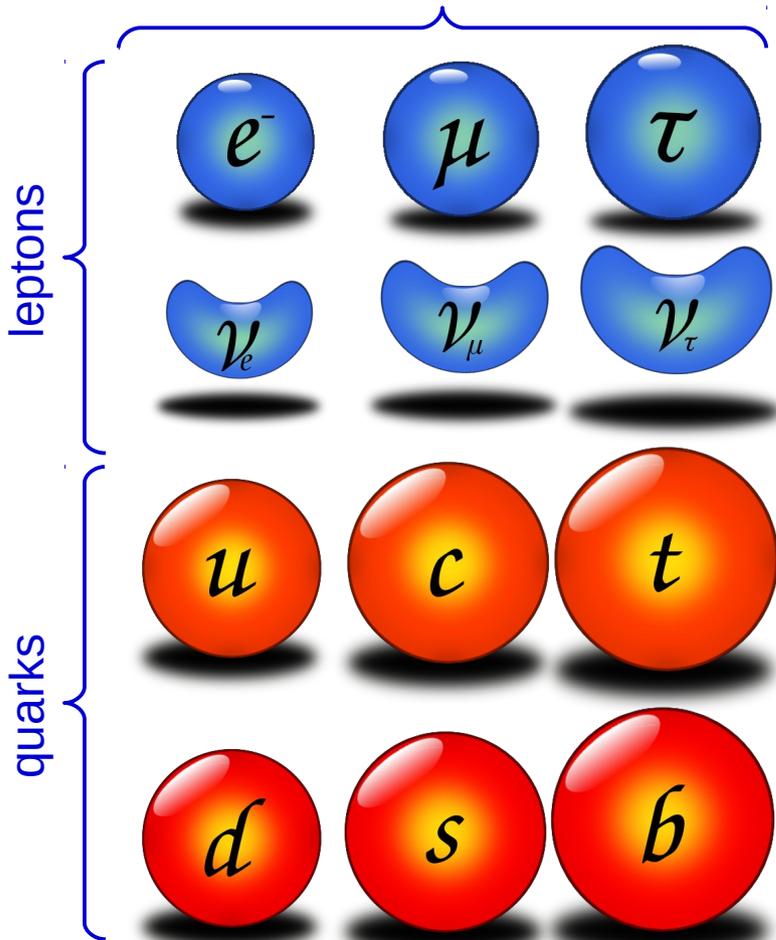




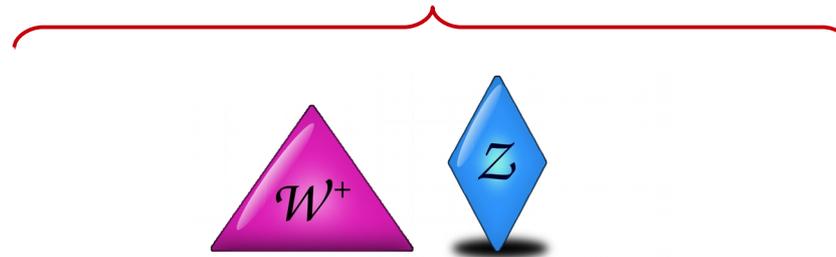
# Résumé des interactions (2)

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

fermions



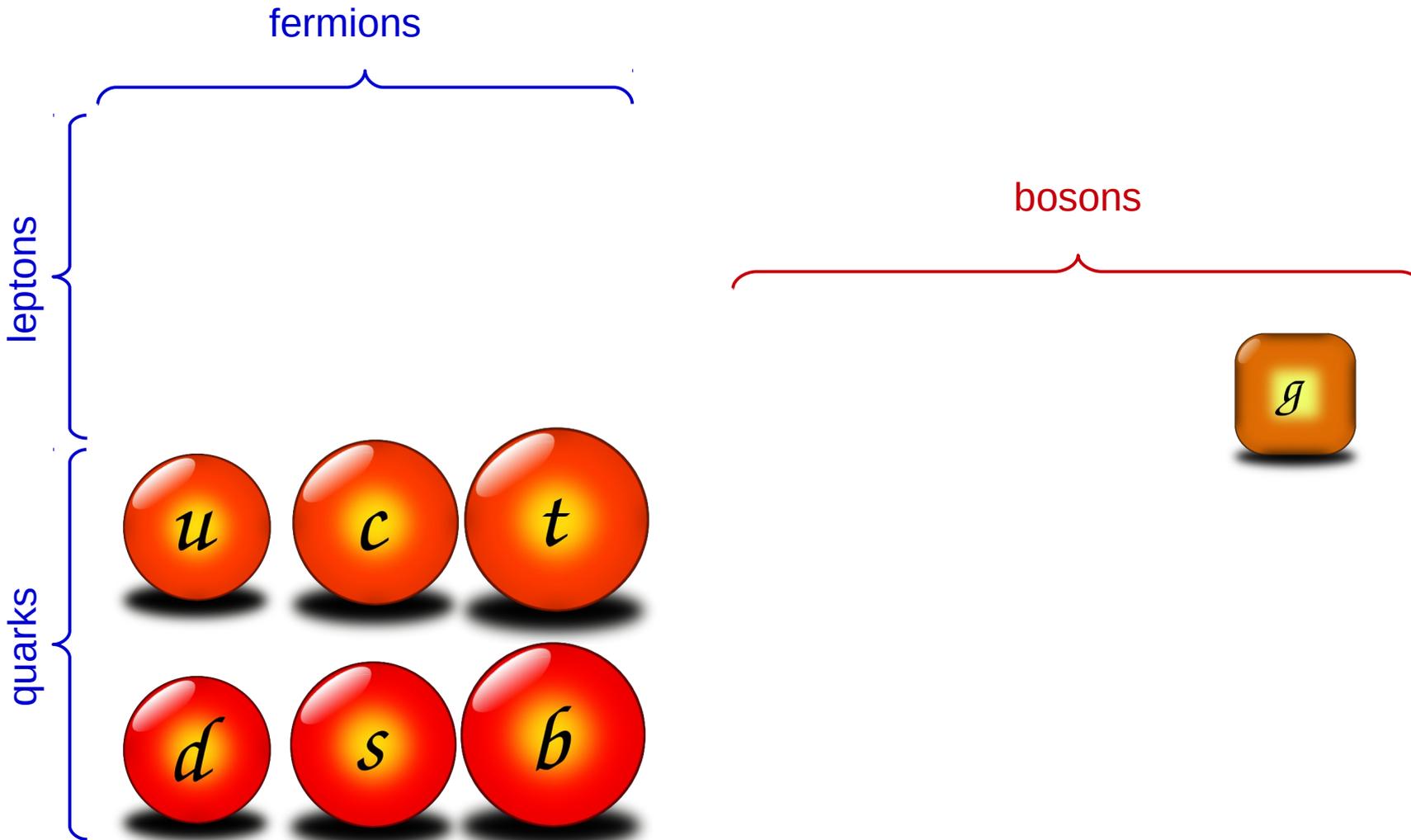
bosons





# Résumé des interactions (3)

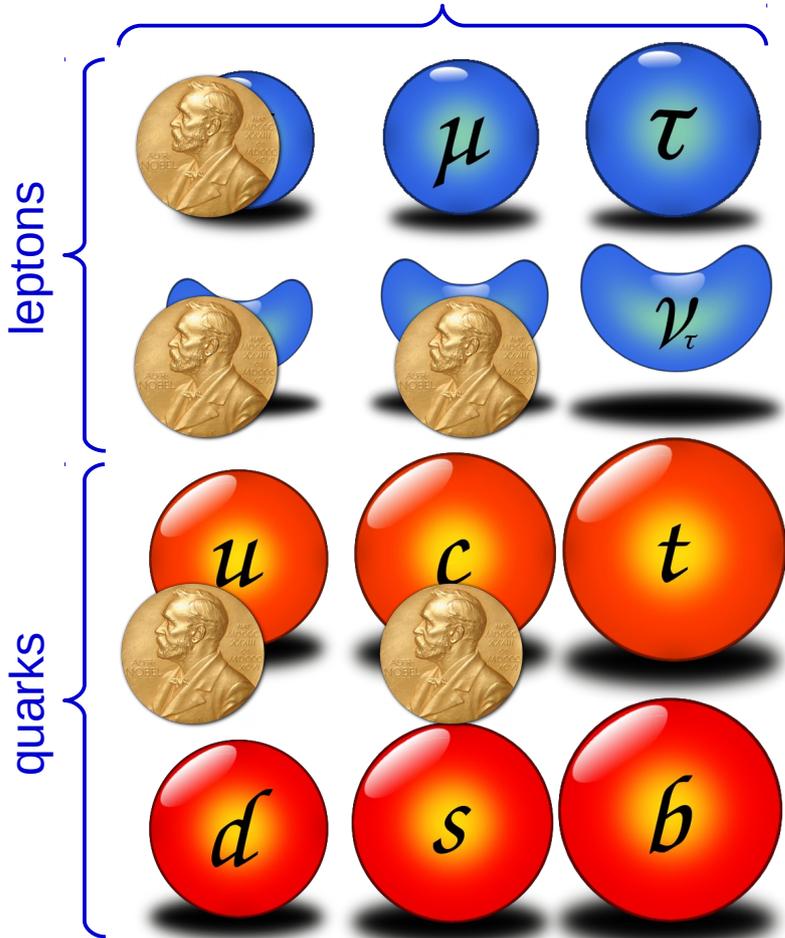
- ◆ Particules sensibles à l'interaction **forte** :



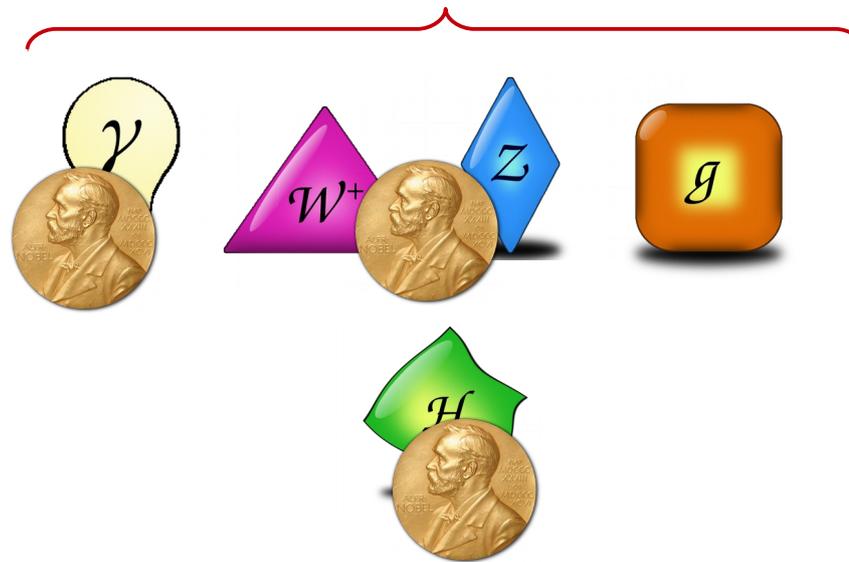


# Machine à Prix Nobel

fermions



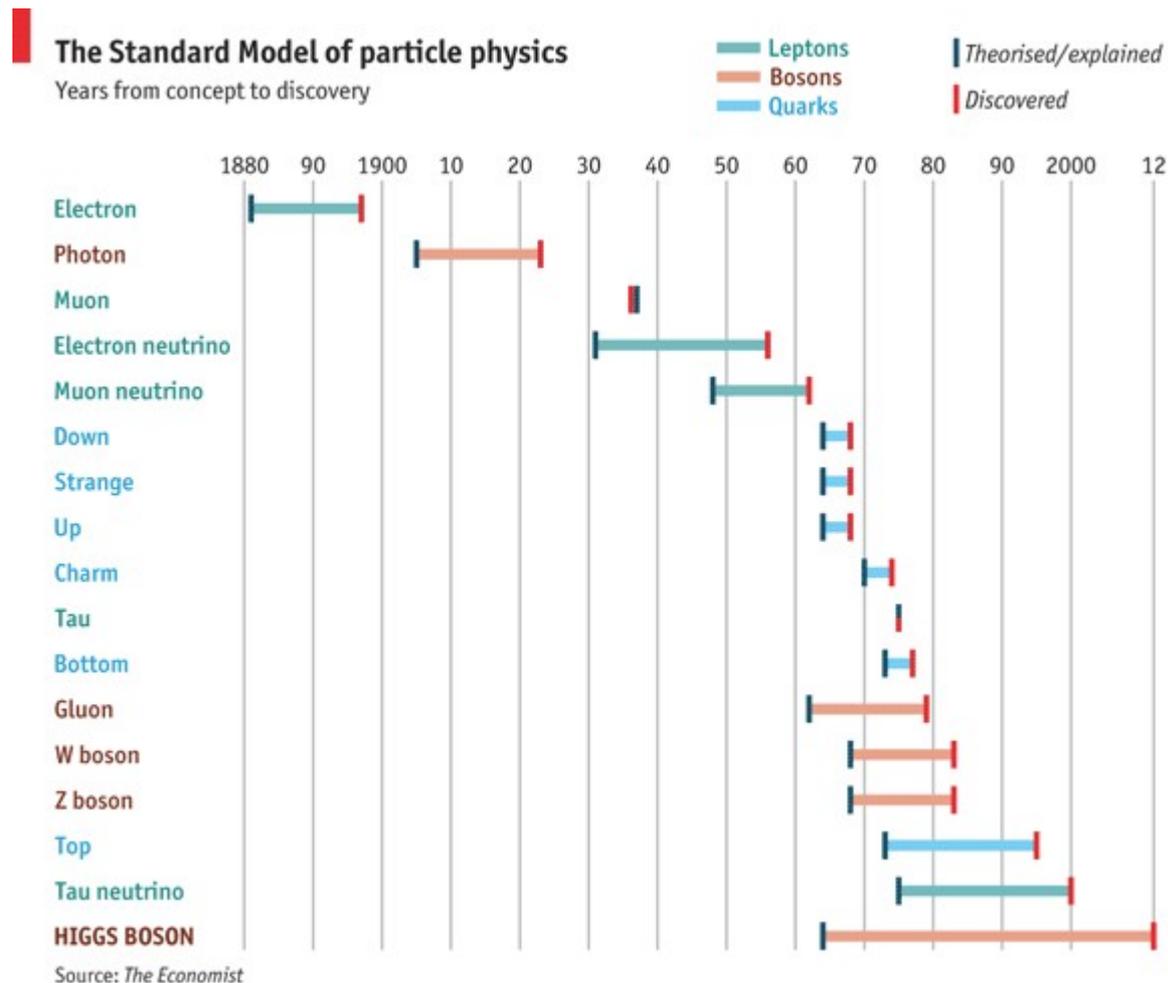
bosons





# 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



- ◆ On va voir au cours suivant comment observer toutes ces particules !

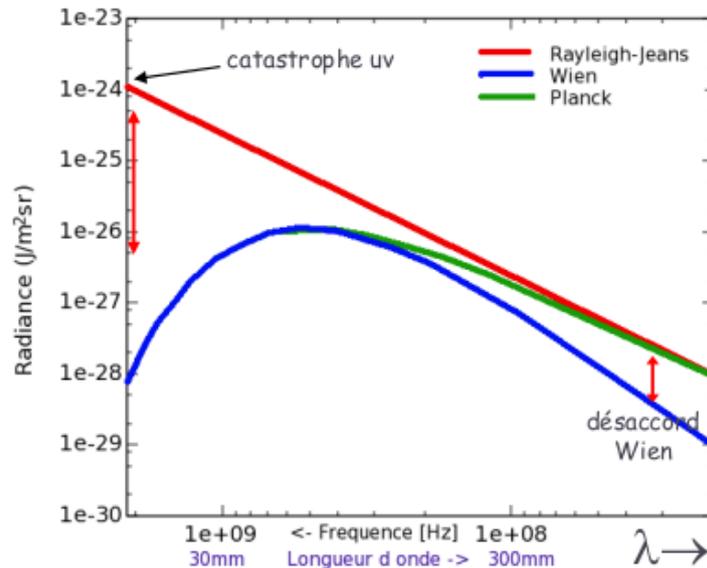
Back-up



## 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**

$E = n\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  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....



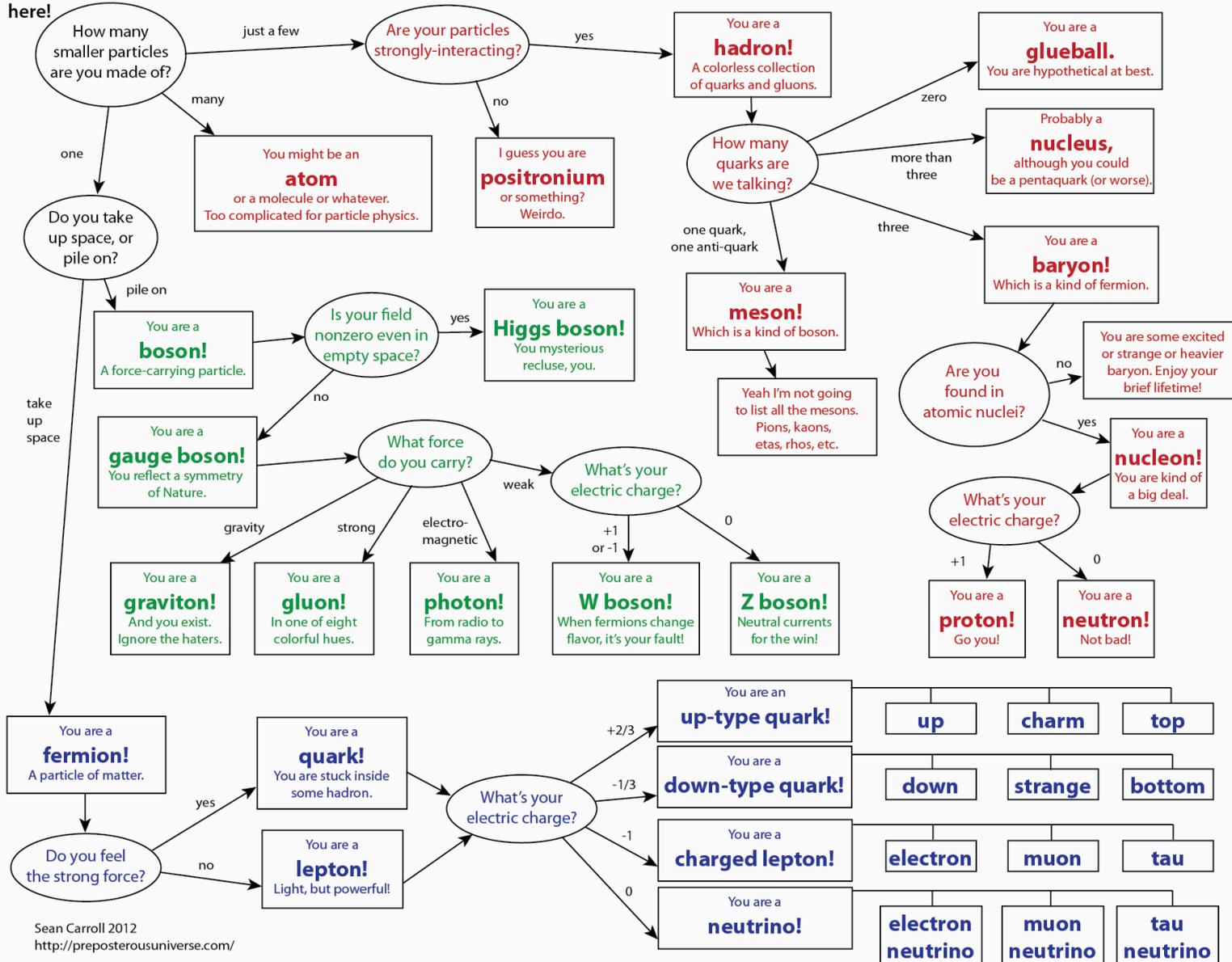
# Quelle particule êtes-vous ?

## What Particle Are You?

(Standard Model particles only! Dark matter and other exotica not welcome.)

Color code:  
elementary fermions  
elementary bosons  
composite particles

Start here!



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