

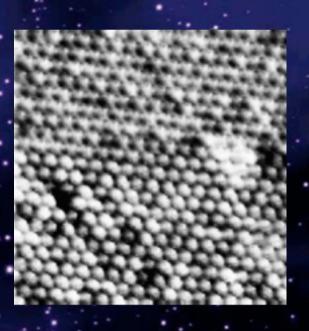
L'univers est fait de particules







Les êtres vivants



Les atomes

La physique des particules

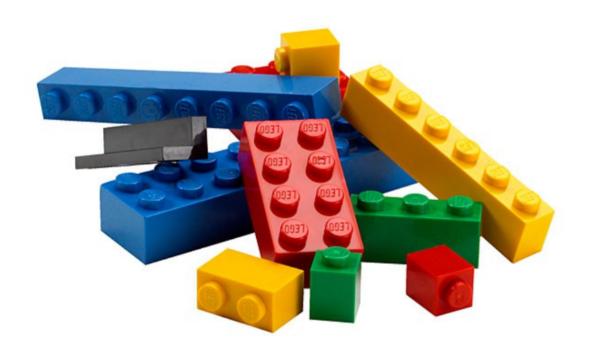
Recherche fondamentale qui porte sur l'étude des constituants ultimes de la matière.

Objectif : décrire les propriétés du tout à partir de ses parties :

- Les particules de matière (les «briques» formant toute la matière)
- Les interactions de ces briques : lois de la physique (forces)

Approche théorique: réduction du nombre d'éléments, recherche des similitudes/symétries, unification de phénomènes apparemment différents. Le tout dans un cadre mathématique extrêmement rigoureux et prédictif.

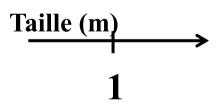
Approche expérimentale : mesures/études pour valider ou infirmer la théorie



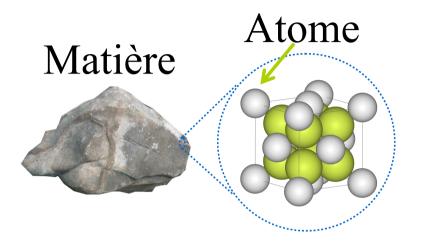
La « **boîte de Lego** » de l'Univers qui compose toute la matière connue

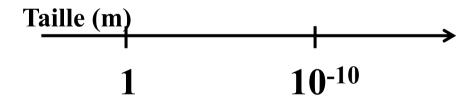
Matière



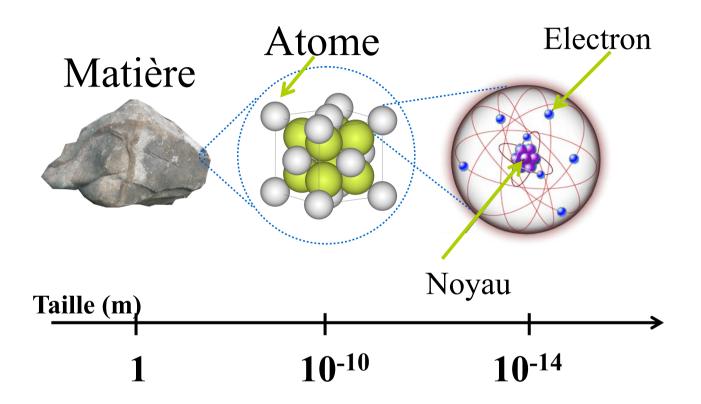


- → Des particules sans sous-structure!
- → Notion qui varie avec l'époque et les moyens expérimentaux

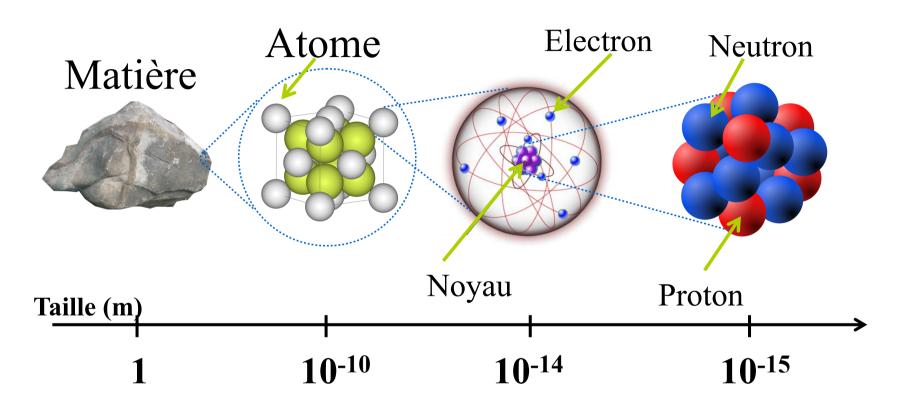




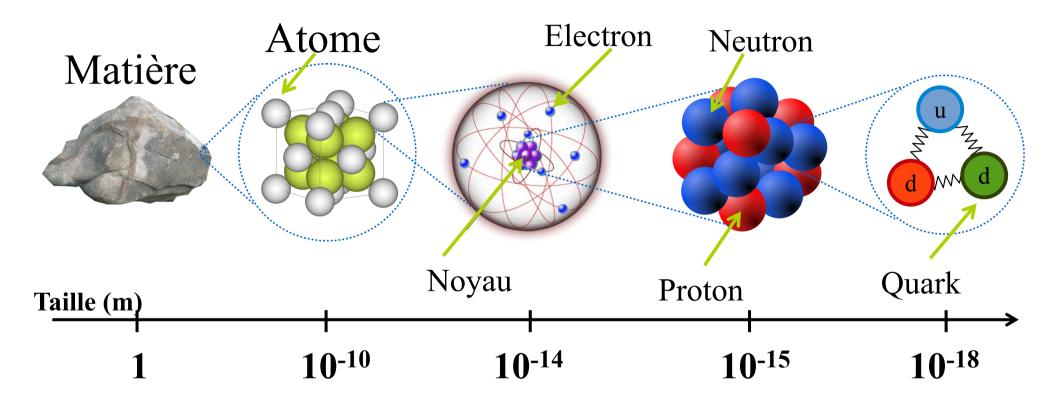
- → **Atomes** : notion inventée dès l'antiquité. Composant indivisible de la matière.
- → Atomes au sens moderne : XIXe siècle



→ Découverte du noyau et de l'électron : fin XIXe, début XXe



→ Les noyaux sont faits de **protons et neutrons** (neutron découvert dans les années 1930)



- → Les **électrons** et **quarks** (années 1960) sont des particules élémentaires : **sans sous-structure**
- \rightarrow Masse $\sim 10^{-30}$ kg, taille $< 10^{-18}$ m!

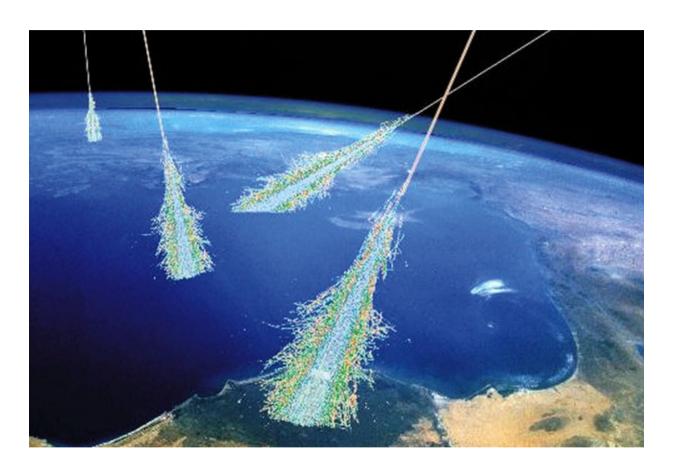
La boîte de base ...



- Quark up (u)
- Quark down (d)
- Electron (e)

- \cdot 2 u 1 d = proton
- \cdot 1 u 2 d = neutron

Un peu d'exotisme...



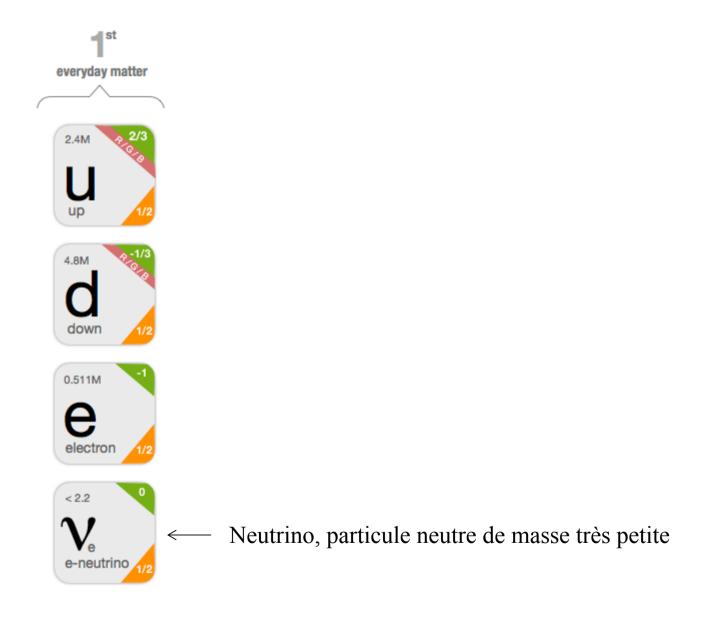
Découvertes de nouvelles particules (pions, kaons, muons...) Au total, des centaines... Pas toutes « élémentaires » Impossible à décrire à partir de notre boîte de base

Hummm....

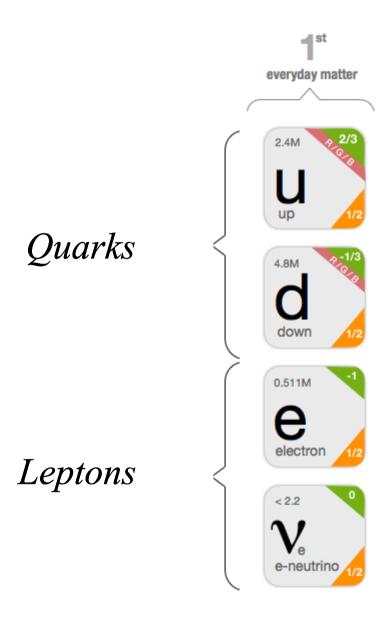


Si on rangeait un peu?!

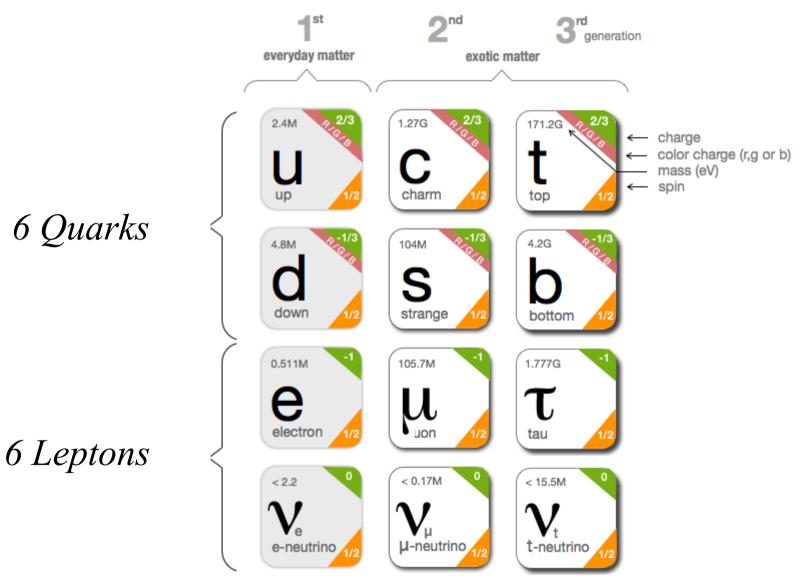




Matière ordinaire



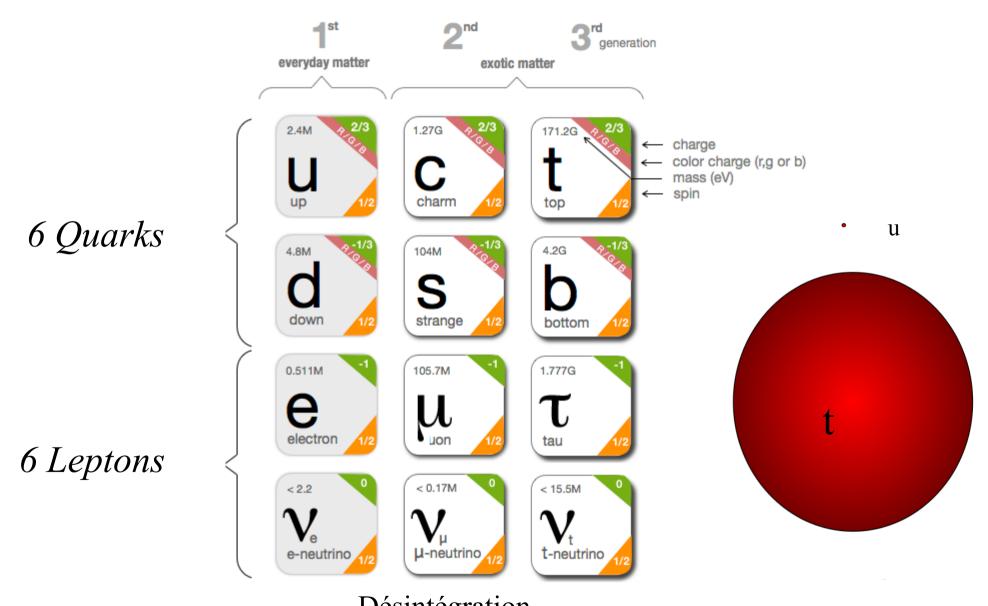
Matière ordinaire



Désintégration

Matière ordinaire

Matière « exotique »

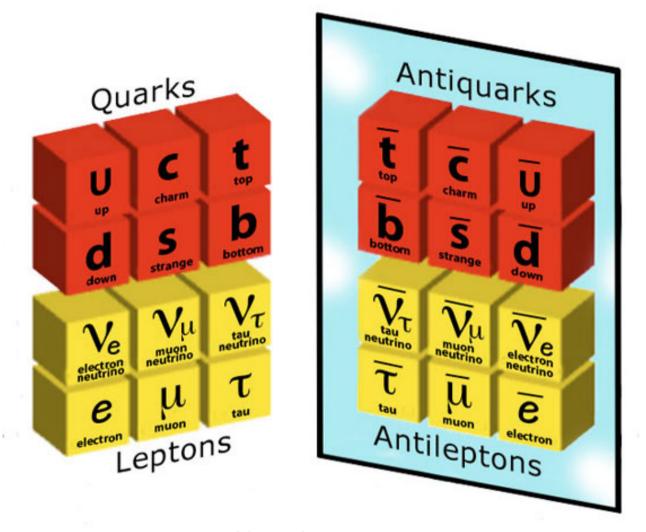


Matière ordinaire

Désintégration

Matière « exotique »

et leurs antiparticules



Pour chaque particule, il existe une anti-particule associée, avec les mêmes propriétés et la même masse, mais une charge électrique opposée.

Des particules élémentaires vous traversent!

Muons (μ)

~ 100 par seconde (produits par les rayons cosmiques)

Neutrinos (v)

100 000 milliards vous traversent chaque seconde!

(produits par le soleil)

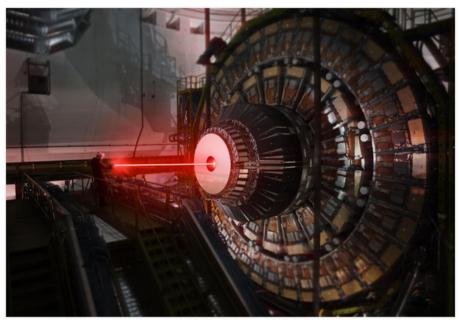
Les forces qui agissent sur les particules élémentaires



Des chercheurs du CERN confirment l'existence de la Force

Des physiciens du Laboratoire européen pour la physique des particules ont annoncé qu'une force invisible assure la cohésion de la galaxie

1 AVRIL, 2015 Par Cian O'Luanaigh

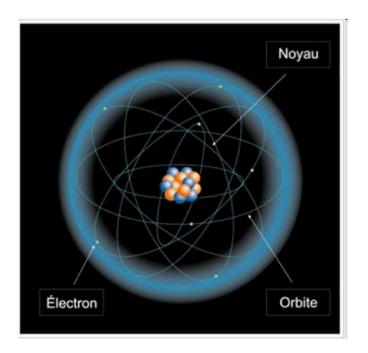


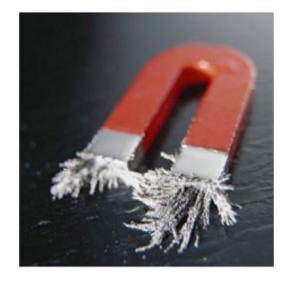
La Force est devenue un outil de recherche populaire dans le département Faisceaux du CERN (Image : Max Brice et Daniel Dominguez/CERN)

L'interaction électromagnétique

Responsable des phénomènes électriques et magnétiques : aimantation, lumière, cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de charges électriques identiques (attraction si charges opposées)







Médiateur : photon (ou gamma)

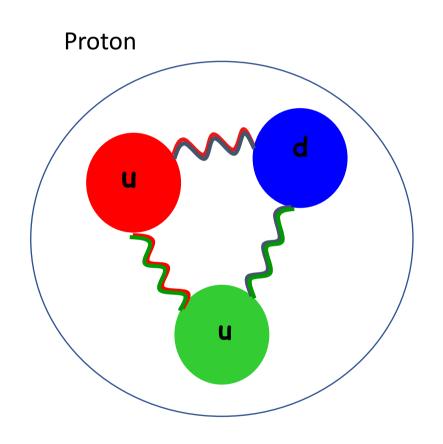
Masse= 0 (vitesse=c=vitesse de la lumière) portée infinie

L'interaction forte

Responsable de la stabilité des noyaux.

Médiateurs: gluons

Masse = 0, mais la portée de l'interaction est très faible car les gluons se « collent » eux-même.



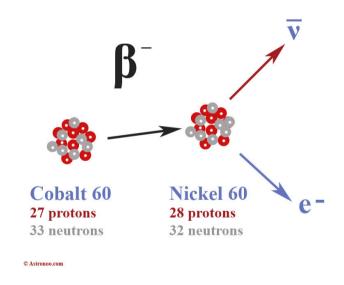
Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (objets de charge électrique entière: proton, neutron,...)

En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de "couleur": Bleu vert rouge → Ainsi le proton est "incolore"

L'interaction faible

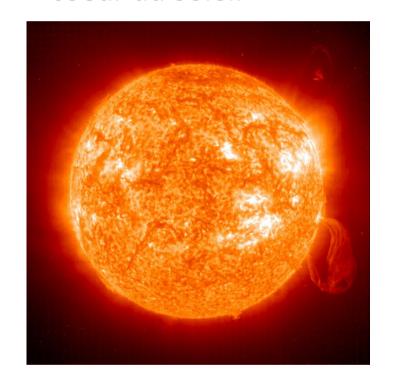
Intervient dans

La Radioactivité β



Médiateurs : W⁺, W⁻ et Z⁰

Masse = ~100 x celle du proton Portée limitée. Les réactions nucléaires au coeur du Soleil



La gravitation

Gravitation newtonienne

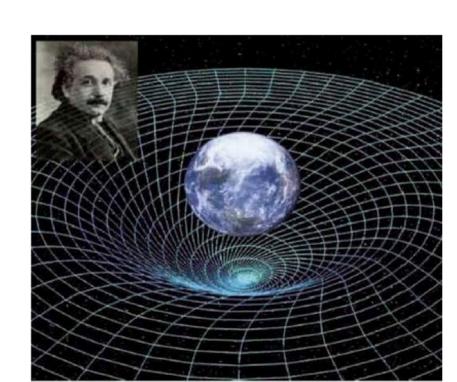
- Force complètement négligeable à l'échelle des particules élémentaires, mais dominante à grande échelle.
- portée infinie



Relativité générale d' Einstein

- La gravitation est issue d'une déformation de l'espace temps
- La gravitation est très difficile à marier avec les autres forces

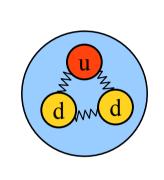
Médiateur hypothétique : graviton

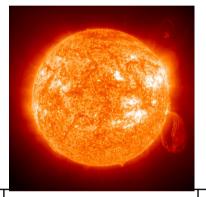


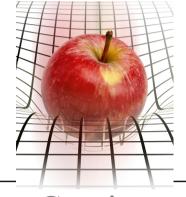
Les interactions

Nous décrivons la nature par 4 interactions fondamentales, qui résultent de l'échange de particules médiatrices



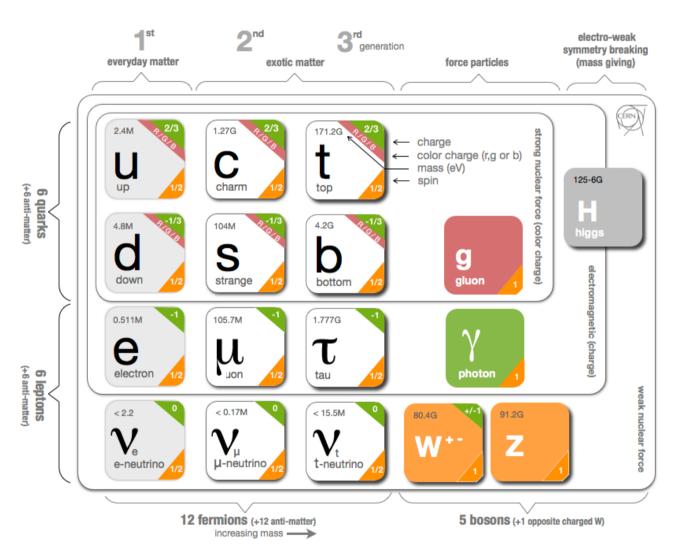






Interaction	Electro magnétique	Forte	Faible	Gravita- tionelle
Mediateur	Photon _γ	Gluon	3 bosons W ⁺ , W ⁻ , Z	(graviton ?)
Intensité relative	1	100	10-12	10-38

Le Modèle Standard



Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit les particules connues et leurs interactions.

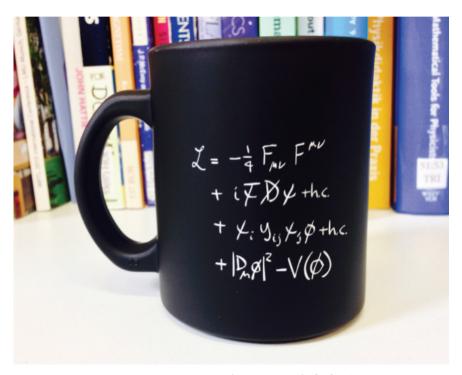
Une théorie qui repose sur un formalisme mathématique puissant

Le **Modèle Standard** est basé sur la mécanique quantique et la relativité restreinte.

```
-\frac{1}{2}\partial_{\nu}g^{a}_{\mu}\partial_{\nu}g^{a}_{\mu} - g_{s}f^{abc}\partial_{\mu}g^{a}_{\nu}g^{b}_{\nu}g^{c}_{\nu} - \frac{1}{4}g^{2}_{s}f^{abc}f^{ade}g^{b}_{\mu}g^{e}_{\nu}g^{d}_{\sigma}g^{e}_{\nu} +
                     \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^{\sigma}\gamma^{\mu}q_j^{\sigma})g_{\mu}^{\dot{a}} + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_{\mu}\bar{G}^aG^bg_{\mu}^c - \partial_{\nu}W_{\mu}^+\partial_{\nu}W_{\mu}^- -
 M^2W_{\mu}^+W_{\mu}^- - \frac{1}{2}\partial_{\nu}Z_{\mu}^0\partial_{\nu}Z_{\mu}^0 - \frac{1}{2c^2}M^2Z_{\mu}^0Z_{\mu}^0 - \frac{1}{2}\partial_{\mu}A_{\nu}\partial_{\mu}A_{\nu} - \frac{1}{2}\partial_{\mu}H\partial_{\mu}H -
 \frac{1}{2}m_h^2H^2 - \partial_\mu\phi^+\partial_\mu\phi^- - M^2\phi^+\phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu\phi^0\partial_\mu\phi^0 - \frac{1}{2}M\phi^0\phi^0 - \beta_h\left[\frac{2M^2}{a^2} + \frac{1}{2}M\phi^0\phi^0 - \frac{
        W_{\mu}^{-}\partial_{\nu}W_{\mu}^{+}) + A_{\mu}(W_{\nu}^{+}\partial_{\nu}W_{\mu}^{-} - W_{\nu}^{-}\partial_{\nu}W_{\mu}^{+})] - \frac{1}{2}g^{2}W_{\mu}^{+}W_{\mu}^{-}W_{\nu}^{+}W_{\nu}^{-} + \frac{1}{2}g^{2}W_{\mu}^{+}W_{\nu}^{-}W_{\mu}^{+}W_{\nu}^{-} + g^{2}c_{w}^{2}(Z_{\nu}^{0}W_{\mu}^{+}Z_{\nu}^{0}W_{\nu}^{-} - Z_{\mu}^{0}Z_{\nu}^{0}W_{\nu}^{+}W_{\nu}^{-}) +
              g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^- W_\mu^- W_\mu^- W_\mu^-)] + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^- W_\mu^- 
                         W_{\nu}^{+}W_{\nu}^{-}) -2A_{\mu}Z_{\mu}^{0}W_{\nu}^{+}W_{\nu}^{-}] -g\alpha[H^{3}+H\phi^{0}\phi^{0}+2H\phi^{+}\phi^{-}]-
 \frac{1}{2}g^{2}\alpha_{h}[H^{4}+(\phi^{0})^{4}+4(\phi^{+}\phi^{-})^{2}+4(\phi^{0})^{2}\phi^{+}\phi^{-}+4H^{2}\phi^{+}\phi^{-}+2(\phi^{0})^{2}H^{2}]-
                     gMW_{\mu}^{+}W_{\mu}^{-}H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c^{2}}Z_{\mu}^{0}Z_{\mu}^{0}H - \frac{1}{2}ig[W_{\mu}^{+}(\phi^{0}\partial_{\mu}\phi^{-} - \phi^{-}\partial_{\mu}\phi^{0}) -
W_{\mu}^{-}(\phi^{0}\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{+}\partial_{\mu}\phi^{0})] + \frac{1}{2}g[W_{\mu}^{+}(H\partial_{\mu}\phi^{-} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) - W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H)] + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) - W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H)] + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) - W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H)] + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H)] + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{+} - \phi^{-}\partial_{\mu}H) + W_{\mu}^{-}(H\partial_{\mu}\phi^{-} -
\phi^{+}\partial_{\mu}H)] + \frac{1}{2}g^{\perp}_{ec}(Z^{0}_{\mu}(H\partial_{\mu}\phi^{0} - \phi^{0}\partial_{\mu}H) - ig\frac{s^{2}_{ec}}{2}MZ^{0}_{\mu}(W^{+}_{\mu}\phi^{-} - W^{-}_{\mu}\phi^{+}) +
            igs_w MA_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - ig \frac{1-2c_\pi^2}{2c_\sigma} Z^0_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) +
     igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W^+_\mu W^-_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] -
 \frac{1}{4}g^2 + \frac{1}{2}Z_{\mu}^0 Z_{\mu}^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{2} Z_{\mu}^0 \phi^0 (W_{\mu}^+ \phi^- + 1)^2 \phi^+ \phi^-]
              W_{\mu}^{-}\phi^{+}) -\frac{1}{2}ig^{2}\frac{s_{\mu}^{2}}{c_{\nu}}Z_{\mu}^{0}H(W_{\mu}^{+}\phi^{-}-W_{\mu}^{-}\phi^{+})+\frac{1}{2}g^{2}s_{w}A_{\mu}\phi^{0}(W_{\mu}^{+}\phi^{-}+W_{\mu}^{-}\phi^{+})
 W_{\mu}^{-}\phi^{+}) + \frac{1}{2}ig^{2}s_{w}A_{\mu}H(W_{\mu}^{+}\phi^{-} - W_{\mu}^{-}\phi^{+}) - g^{2}\frac{\epsilon_{w}}{\epsilon_{w}}(2c_{w}^{2} - 1)Z_{\mu}^{0}A_{\mu}\phi^{+}\phi^{-} -
           g^1 s_u^2 A_u A_u \phi^+ \phi^- - \bar{e}^{\lambda} (\gamma \partial + m_e^{\lambda}) e^{\lambda} - \bar{\nu}^{\lambda} \gamma \partial \nu^{\bar{\lambda}} - \bar{u}_e^{\lambda} (\gamma \partial + m_e^{\lambda}) u_e^{\lambda} -
       \bar{d}_{j}^{\lambda}(\gamma \partial + m_{d}^{\lambda})d_{j}^{\lambda} + igs_{w}A_{\mu}[-(\bar{e}^{\lambda}\gamma^{\mu}e^{\lambda}) + \frac{2}{3}(\bar{u}_{j}^{\lambda}\gamma^{\mu}u_{j}^{\lambda}) - \frac{1}{3}(\bar{d}_{j}^{\lambda}\gamma^{\mu}d_{j}^{\lambda})] +
           \frac{ig}{4\pi}Z_{\mu}^{0}[(\bar{\nu}^{\lambda}\gamma^{\mu}(1+\gamma^{5})\nu^{\lambda})+(\bar{e}^{\lambda}\gamma^{\mu}(4s_{w}^{2}-1-\gamma^{5})e^{\lambda})+(\bar{u}_{i}^{\lambda}\gamma^{\mu}(\frac{4}{3}s_{w}^{2}-1-\gamma^{5})e^{\lambda})]
 (1 - \gamma^5)u_j^{\lambda} + (\bar{d}_j^{\lambda}\gamma^{\mu}(1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d_j^{\lambda}) + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W_{\mu}^+[(\bar{\nu}^{\lambda}\gamma^{\mu}(1 + \gamma^5)a_j^{\lambda}) +
     (\bar{u}_j^{\lambda}\gamma^{\mu}(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d_j^{\kappa})] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W_{\mu}^-[(\bar{e}^{\lambda}\gamma^{\mu}(1+\gamma^5)\nu^{\lambda}) + (\bar{d}_j^{\kappa}C_{\lambda\kappa}^{\dagger}\gamma^{\mu}(1+\gamma^5)\nu^{\lambda})]
                            \gamma^{5}(u_{i}^{\lambda}) + \frac{ig}{2\sqrt{3}}\frac{m_{i}^{\lambda}}{M}[-\phi^{+}(\bar{\nu}^{\lambda}(1-\gamma^{5})e^{\lambda}) + \phi^{-}(\bar{e}^{\lambda}(1+\gamma^{5})\nu^{\lambda})] -
          \frac{g}{2}\frac{m_{\lambda}^{N}}{M}[H(\bar{e}^{\lambda}e^{\lambda}) + i\phi^{0}(\bar{e}^{\lambda}\gamma^{5}e^{\lambda})] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^{+}[-m_{d}^{\kappa}(\bar{u}_{j}^{\lambda}C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^{5})d_{j}^{\kappa}) +
m_u^{\lambda}(\bar{u}_j^{\lambda}C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d_j^{\kappa}) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m_d^{\lambda}(\bar{d}_j^{\lambda}C_{\lambda\kappa}^{\dagger}(1+\gamma^5)u_j^{\kappa}) - m_u^{\kappa}(\bar{d}_j^{\lambda}C_{\lambda\kappa}^{\dagger}(1-\gamma^5)u_j^{\kappa})]
                              \gamma^5 [u_i^{\kappa}] = \frac{g}{2} \frac{m_{\lambda}^{\lambda}}{M} H(\bar{u}_i^{\lambda} u_i^{\lambda}) = \frac{g}{2} \frac{m_{\lambda}^{\lambda}}{M} H(\bar{d}_i^{\lambda} d_i^{\lambda}) + \frac{ig}{2} \frac{m_{\lambda}^{\lambda}}{M} \phi^0(\bar{u}_i^{\lambda} \gamma^5 u_i^{\lambda}) =
 \frac{ig}{2}\frac{m_{\lambda}^{2}}{M}\phi^{0}(\bar{d}_{1}^{\lambda}\gamma^{5}d_{1}^{\lambda}) + \bar{X}^{+}(\partial^{2}-M^{2})X^{+} + \bar{X}^{-}(\partial^{2}-M^{2})X^{-} + \bar{X}^{0}(\partial^{2}-M^{2})X^{-})
 \frac{M^2}{2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_wW_\mu^+(\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_wW_\mu^+(\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0)
           \partial_{\mu}\bar{X}^{+}Y) + igc_{w}W_{\mu}^{-}(\partial_{\mu}\bar{X}^{-}X^{0} - \partial_{\mu}\bar{X}^{0}X^{+}) + igs_{w}W_{\mu}^{-}(\partial_{\mu}\bar{X}^{-}Y - \partial_{\mu}\bar{X}^{0}X^{+}))
           \partial_{\mu}\bar{Y}X^{+}) + igc_{w}Z_{\mu}^{0}(\partial_{\mu}\bar{X}^{+}X^{+} - \partial_{\mu}\bar{X}^{-}X^{-}) + igs_{w}A_{\mu}(\partial_{\mu}\bar{X}^{+}X^{+} - \partial_{\mu}\bar{X}^{-}X^{-})
                                        \partial_{\mu}\bar{X}^{-}X^{-}) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^{+}X^{+}H + \bar{X}^{-}X^{-}H + \frac{1}{c^{2}}\bar{X}^{0}X^{0}H] +
 \frac{1-2c_{c}^{2}}{2c_{c}}igM[\bar{X}^{+}X^{0}\phi^{+} - \bar{X}^{-}X^{0}\phi^{-}] + \frac{1}{2c_{c}}igM[\bar{X}^{0}X^{-}\phi^{+} - \bar{X}^{0}X^{+}\phi^{-}] +
                     igMs_w[\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-] + \frac{1}{5}igM[\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0]
```

Une théorie qui repose sur un formalisme mathématique puissant

Le **Modèle Standard** est basé sur la mécanique quantique et la relativité restreinte.



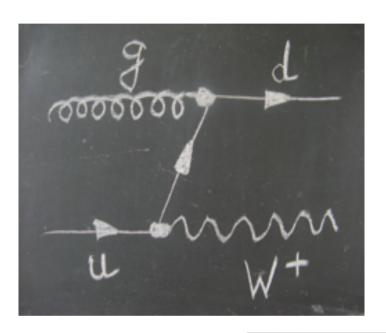
Formule simplifiée!

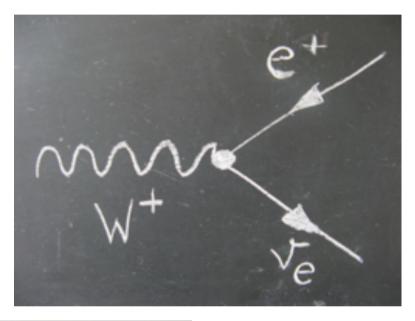
Le concept de champ

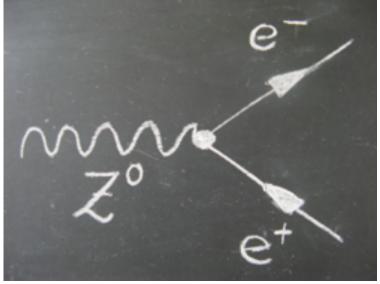




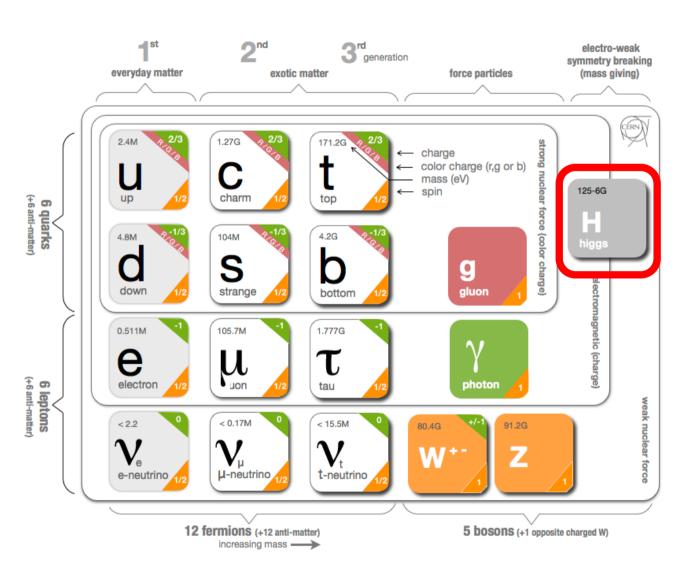
Les diagrammes de Feynman





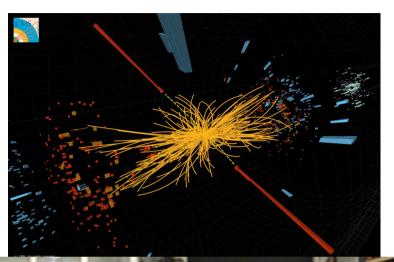


Le Modèle Standard



Toutes ces particules avaient été observées avant le LHC, sauf une : le boson de Higgs, responsable de la masse des particules

Le boson de Higgs



Observé en 2012, 48 ans après sa prédiction!



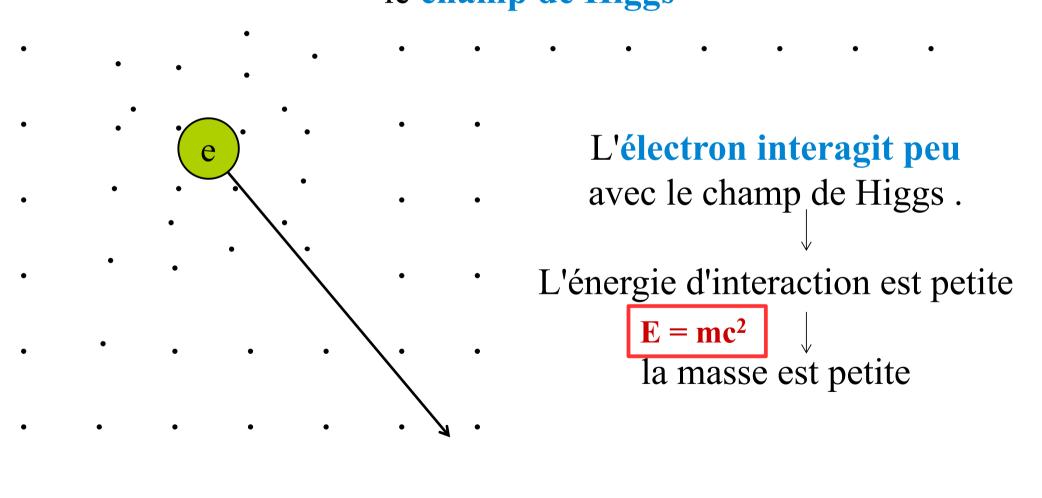
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le champ de Higgs



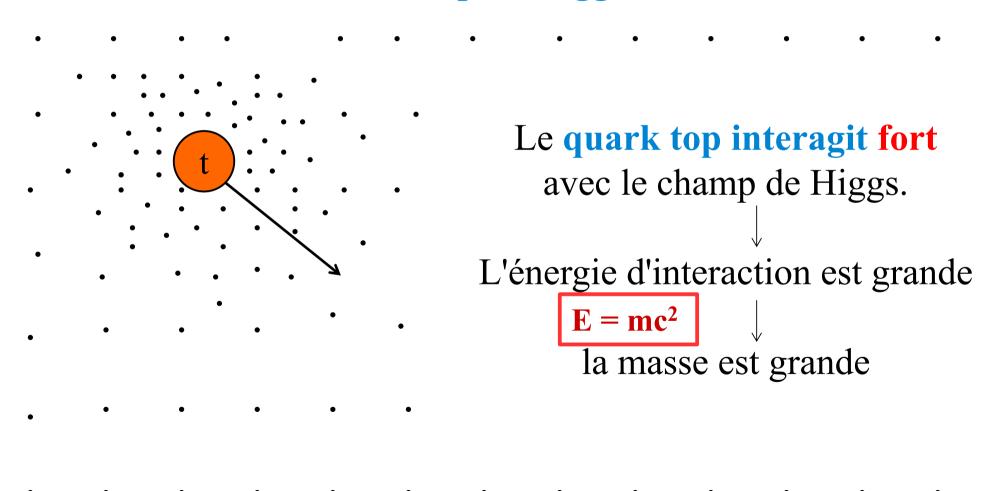
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le champ de Higgs



Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le champ de Higgs



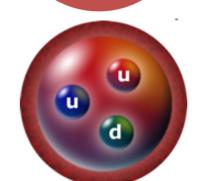
La masse de notre matière

La masse de notre matière = celle des atomes = presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse 2 1 GeV (2 1.10 $^{-27}$ g).

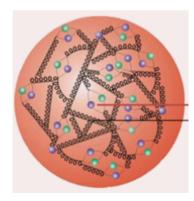
Protons et neutrons sont composés de trois quarks (masse de quelques 0.001 GeV).

L'essentiel de la masse des protons et neutrons vient de l'énergie des gluons liant les quarks entre eux (et E=mc²). Les protons et les neutrons (donc les atomes) c'est à 99% de l'énergie pure...

Boson de Higgs: il explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électrons [leptons], bosons Z et W±) et la sienne.



proton

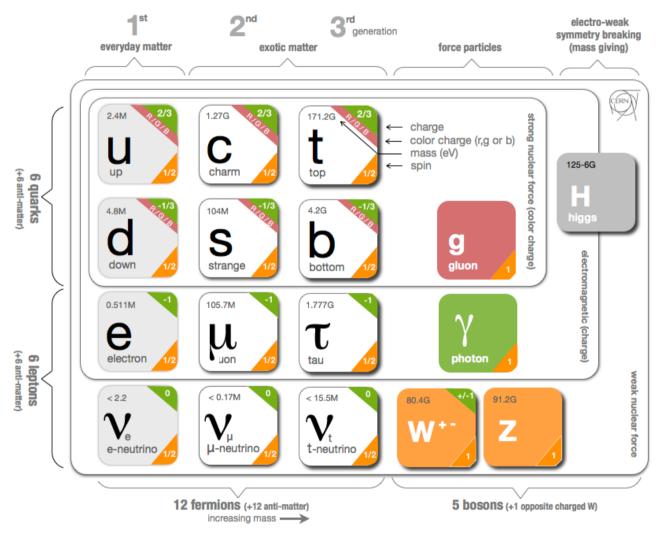


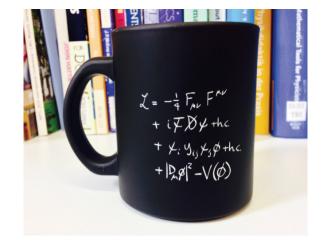
Pas grand chose?

avec des quarks sans masse, les protons et neutrons se désintègreraient très vite Avec des électrons sans masse, les atomes auraient des propriétés très différentes

→ pas de vie ou d'Univers tels que nous les connaissons...

Le Modèle Standard



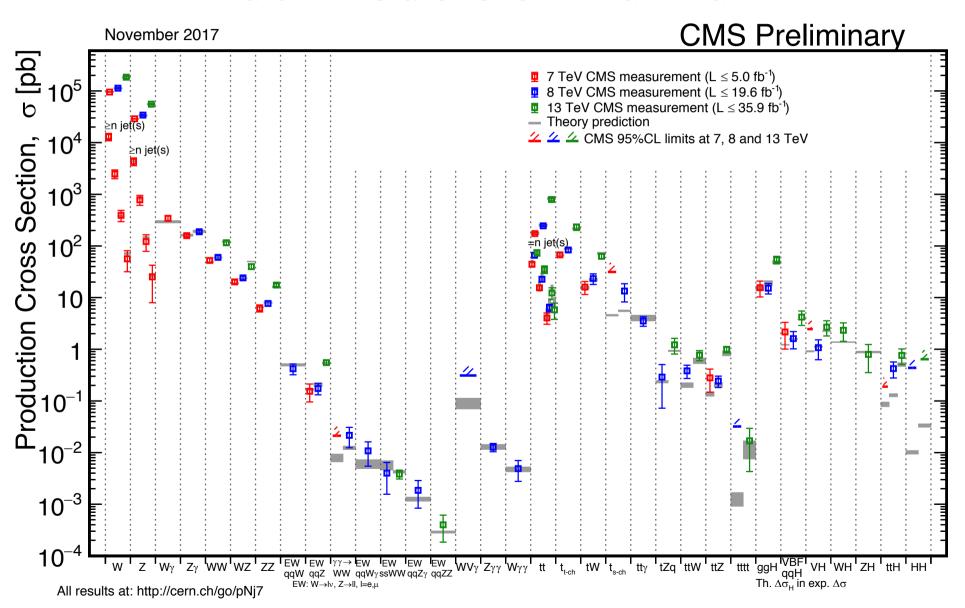


Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit les particules connues et leurs interactions.

Toutes ces particules avaient été observées avant le LHC, sauf une :

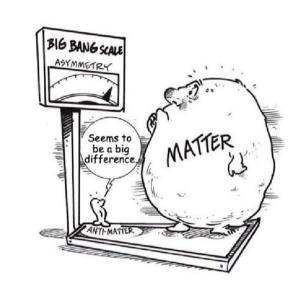
le **boson de Higgs**, responsable de la masse des particules

Immense succès du modèle standard

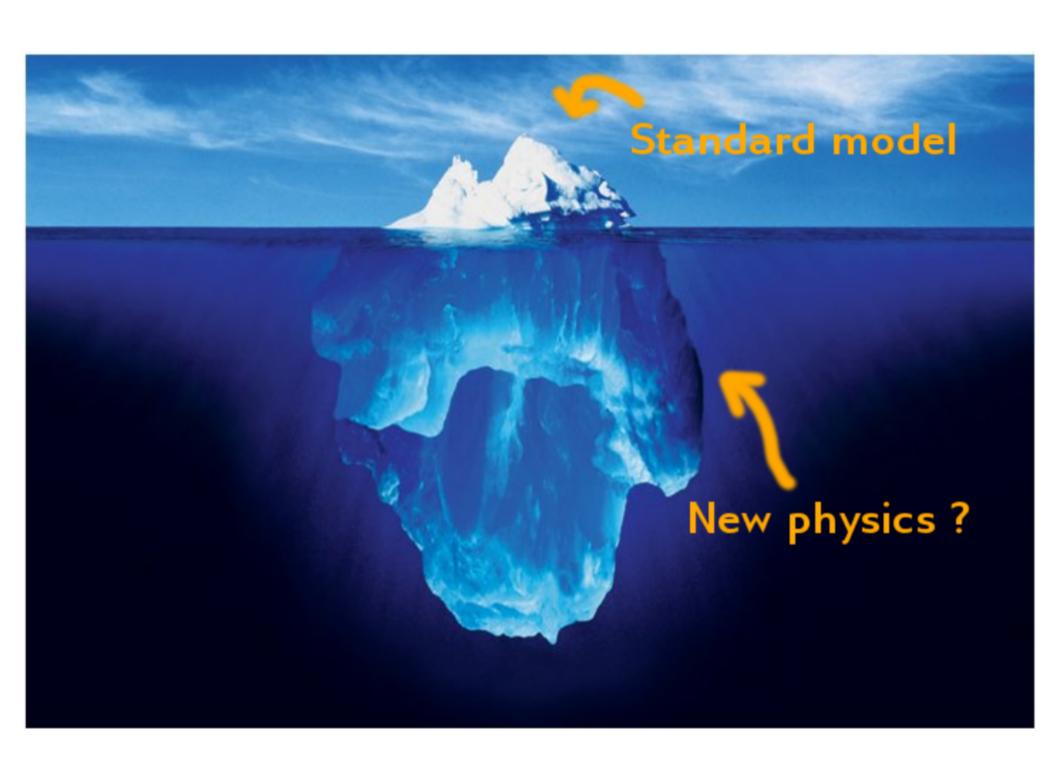


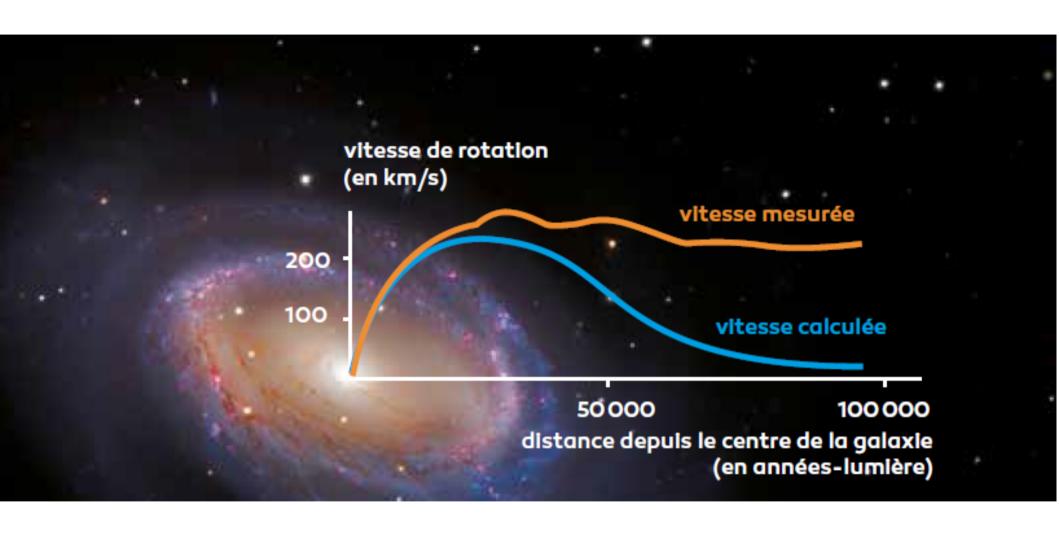
Cependant, encore beaucoup de questions sans réponses...

- → Pourquoi y a-t-il **trois familles** de constituants ?
- → Pourquoi le **quark top** est-il si lourd?
- → Où est passé l'antimatière ?
 A l'origine, il y devait y avoir autant de matière que d'antimatière.

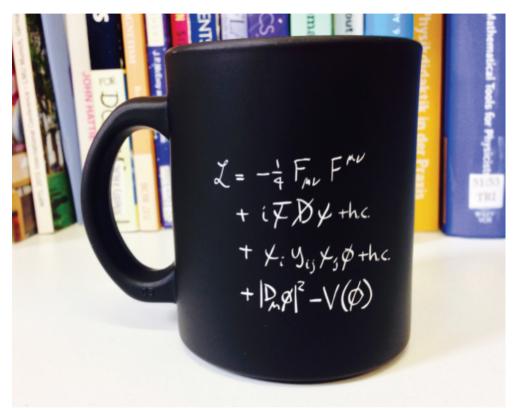


- → La matière ordinaire ne correspond qu'à 5% de ce qui est connu dans l'univers. Qu'est-ce que la matière noire et l'énergie noire ?
- → Comment inclure la description de la **gravitation** ?
- → Existe-t-il d'autres particules, proposées par des théories qui résoudraient ces problèmes ?





Le lagrangien du Modèle Standard



$$\mathcal{L} = \\ -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ +i\bar{\psi}\not{D}\psi \\ +\bar{\psi}_{i}y_{ij}\phi\psi_{j} \\ +h.c. \\ +|D^{\mu}\phi|^{2} \\ +V(\phi)$$

Propagation des bosons médiateurs, interactions entre gluons, entre bosons faibles Propagation des fermions, interaction entre fermions et bosons médiateurs Interaction entre fermions et Higgs, terme de masse des fermions Lien et asymétrie de comportement entre particules et antiparticules Propagation du boson de Higgs, interaction entre Higgs et bosons faibles Brisure de la symétrie électrofaible, source de la masse des particules

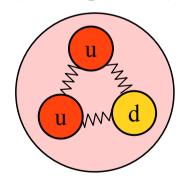
Les quarks forment des hadrons

Les **quarks** ne sont jamais isolés. Ils se regroupent en objets de charge électriques entière : les **hadrons**.

Matière ordinaire

Proton

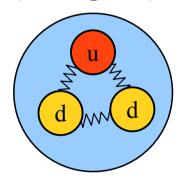
(charge +1)



$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

Neutron

(charge 0)

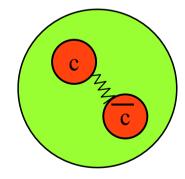


$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Et exotique (exemple)

J/ Psi

(charge 0)



$$\frac{2}{3} - \frac{2}{3} = 0$$

La cohésion des quarks provient d'une force (ou interaction)