

# Introduction à la physique des particules



**MasterClasses 2025 - Strasbourg**

# La physique des particules

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

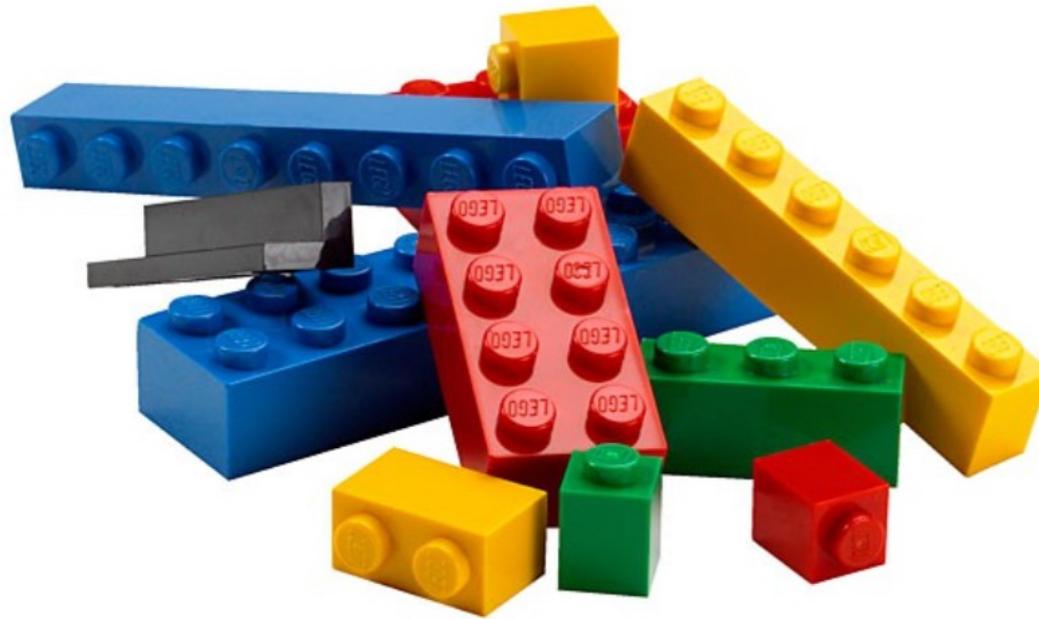
**Objectif :** décrire les propriétés du tout à partir de ses parties :

- 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

# Les particules élémentaires



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

# Les particules élémentaires

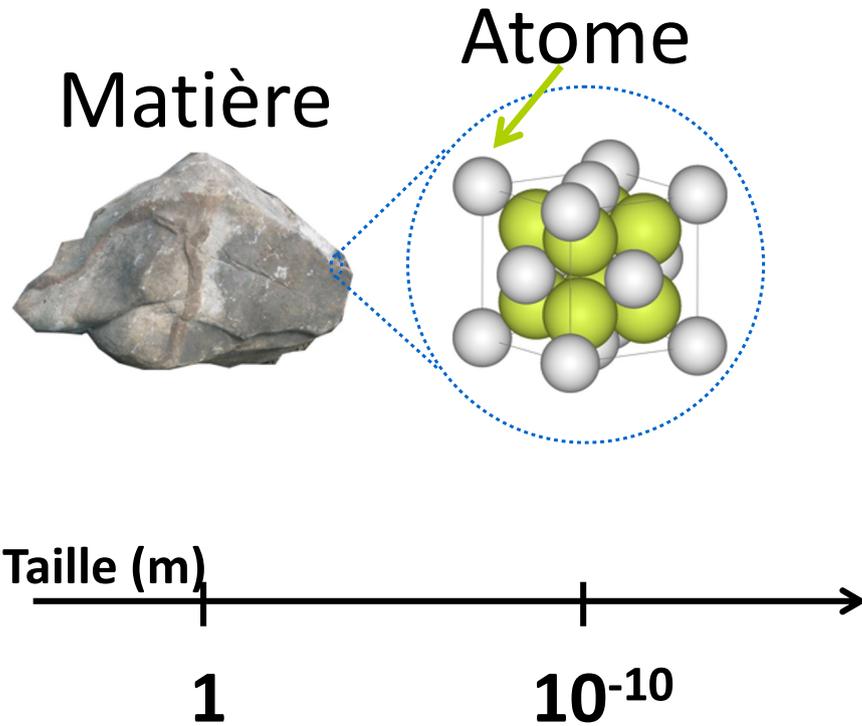
Matière



Taille (m)  
→  
1

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

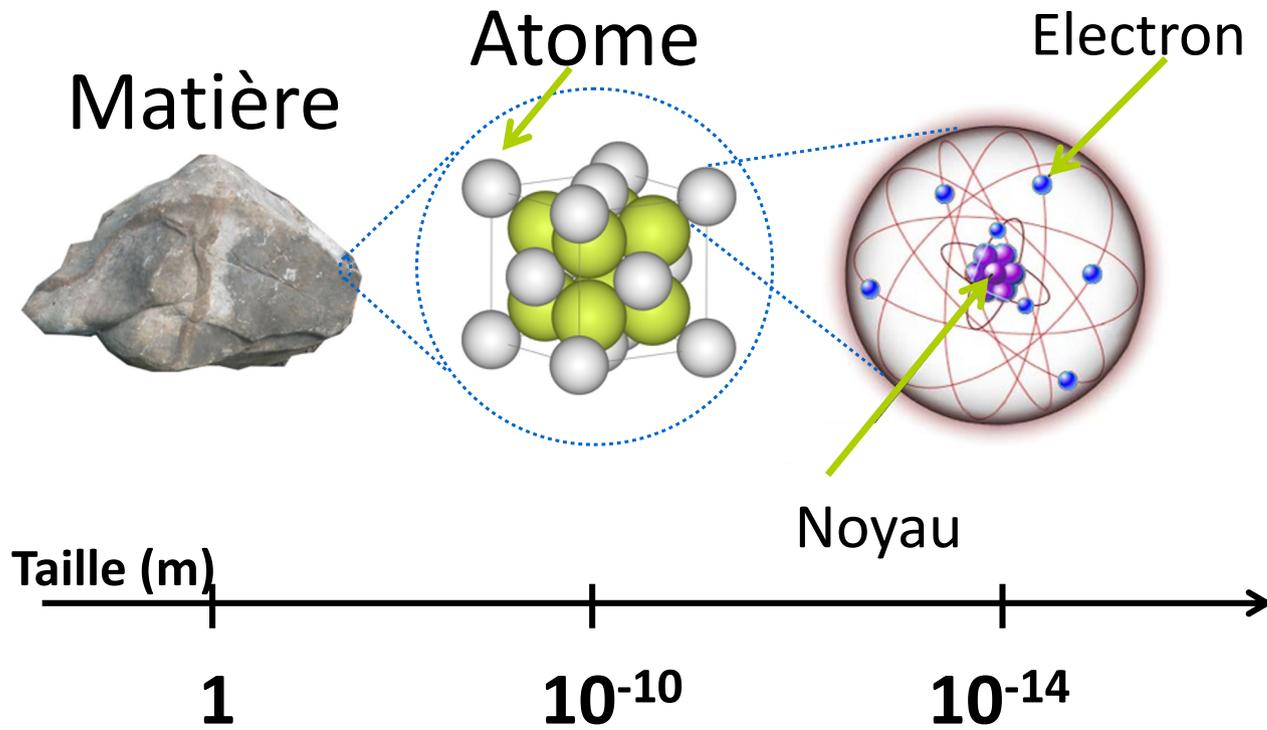
# Les particules élémentaires



→ **Atomes** : notion inventée dès l'antiquité. Composant indivisible de la matière.

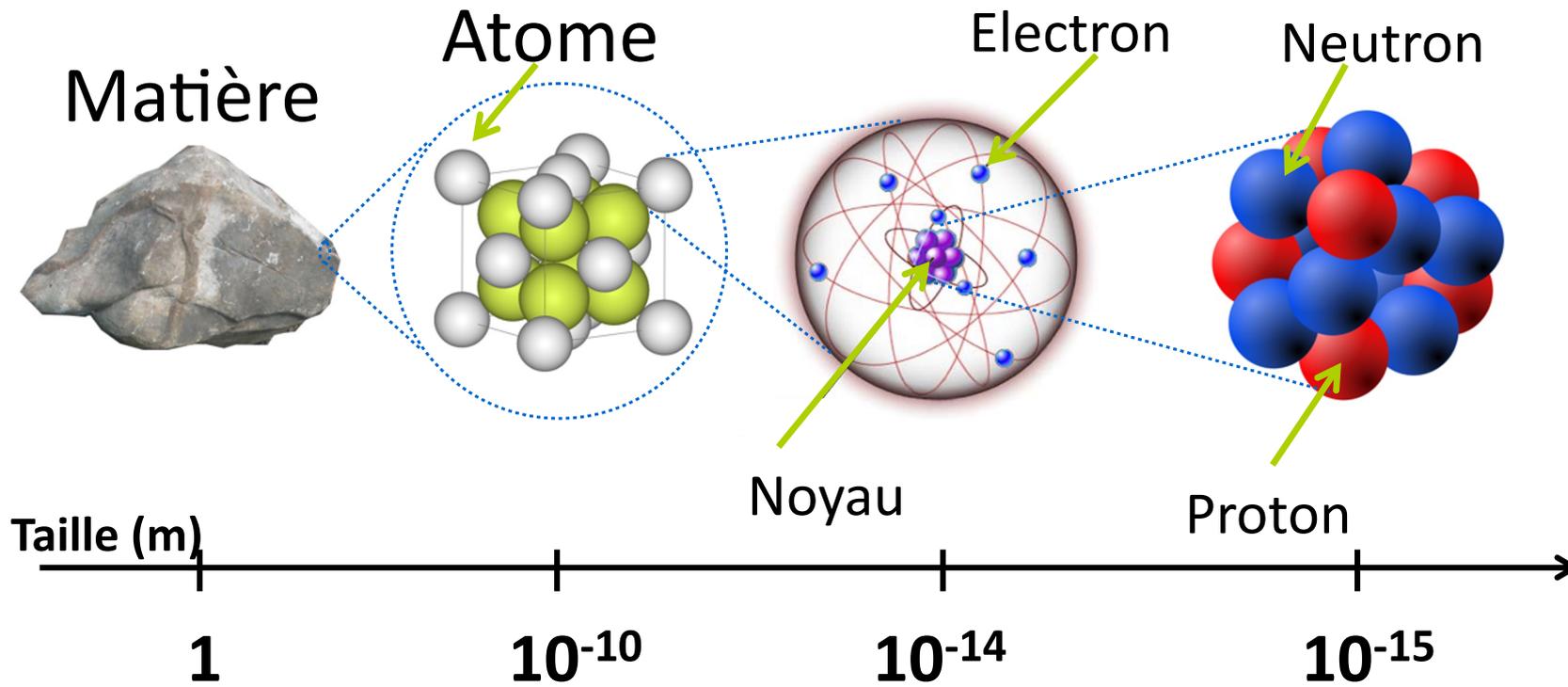
→ Atomes au sens moderne : XIXe siècle.

# Les particules élémentaires



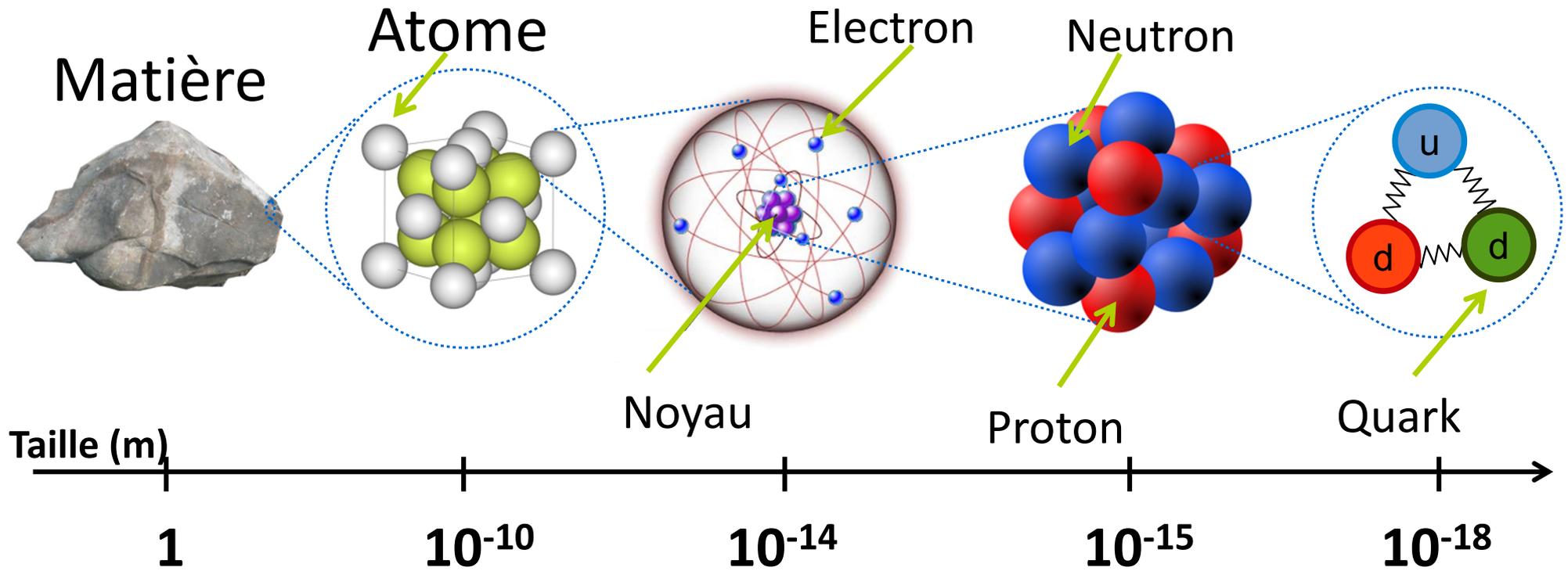
→ Découverte du **noyau et de l'électron** : fin XIXe, début XXe.

# Les particules élémentaires



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

# Les particules élémentaires



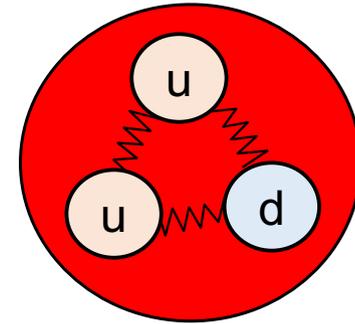
→ Les **électrons** et **quarks** (années 1960) sont des particules élémentaires : **sans sous-structure**.

→ Masse  $\sim 10^{-30}$  kg, taille  $< 10^{-18}$  m !

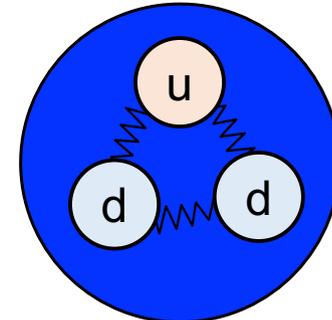
# La boîte de base ...



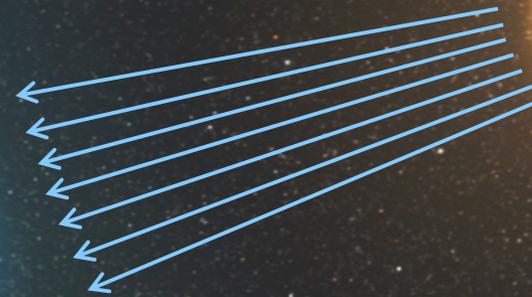
- Quark up (u)
- Quark down (d)
- Electron (e)



- 2 u et 1 d = proton
- 1 u et 2 d = neutron



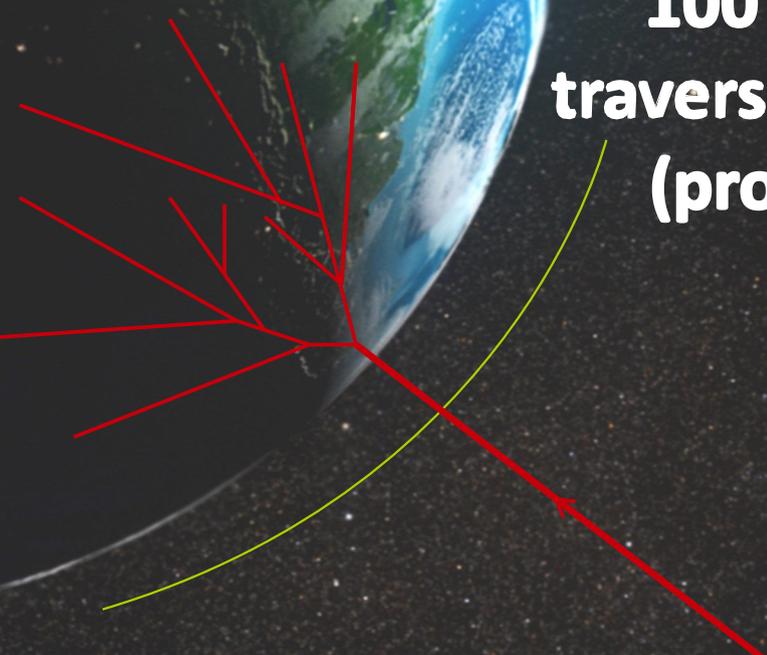
# Des particules élémentaires vous traversent !



Neutrinos ( $\nu$ )

**100 000 milliards vous traversent chaque seconde !  
(produits par le soleil)**

Muons ( $\mu$ )  
**~ 100 par seconde  
(produits par les  
rayons cosmiques)**





Si on rangeait un peu ?!

# Les particules de matière



Matière ordinaire

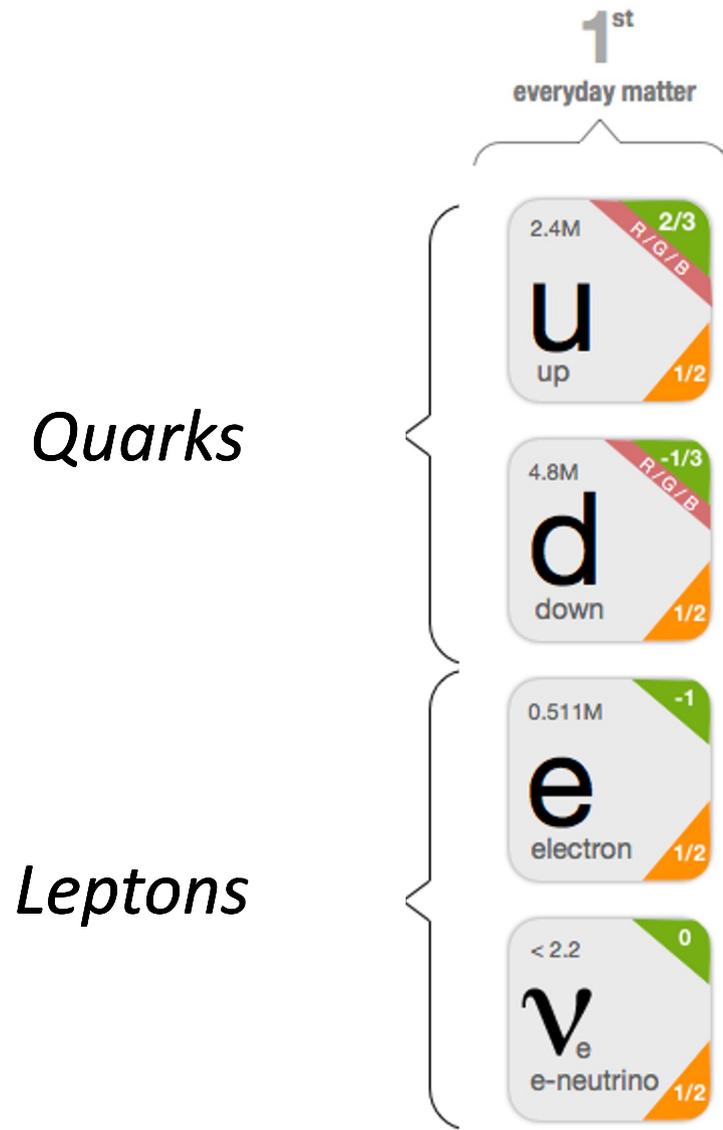
# Les particules de matière



Neutrino, particule neutre de masse très petite

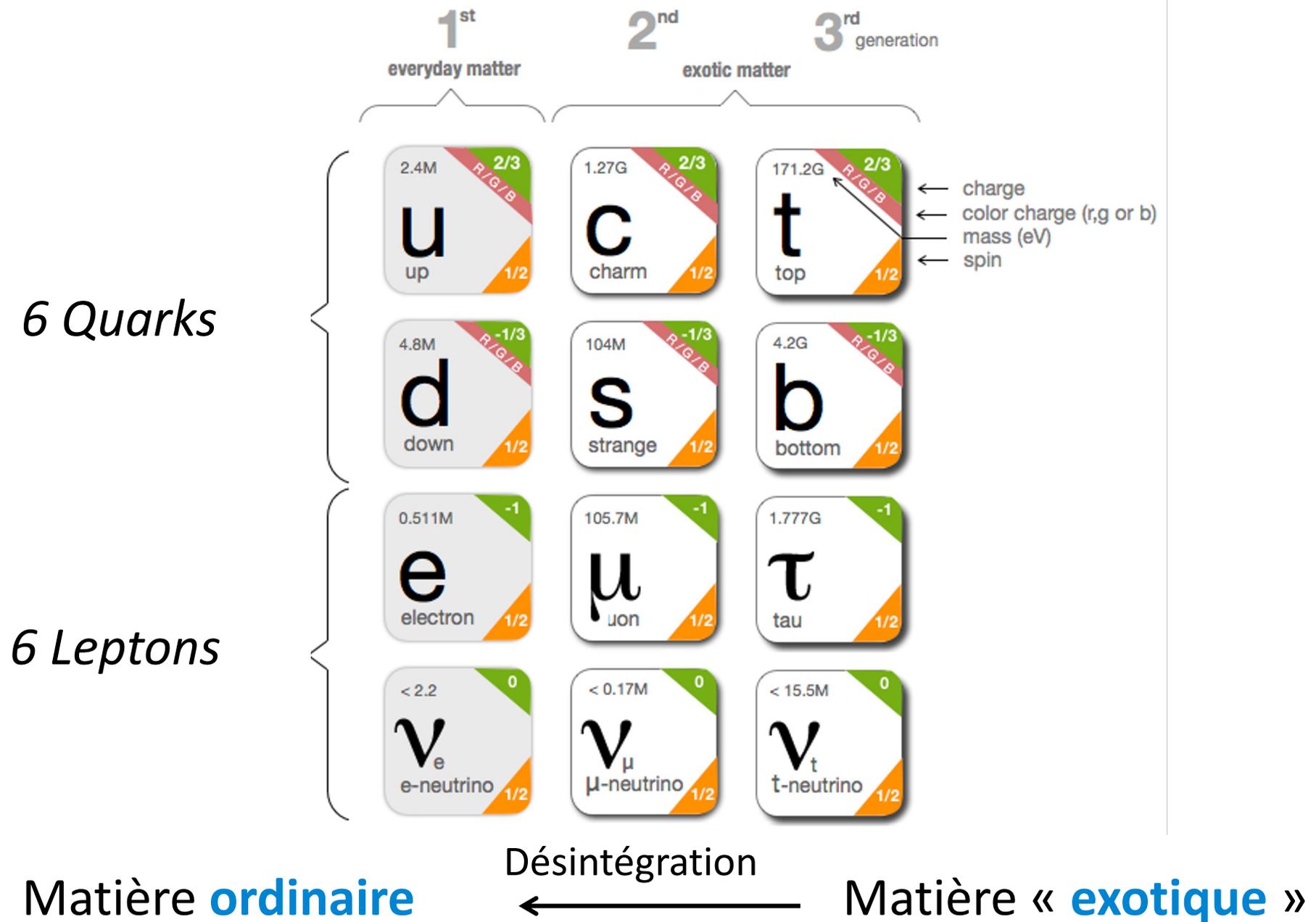
Matière ordinaire

# Les particules de matière

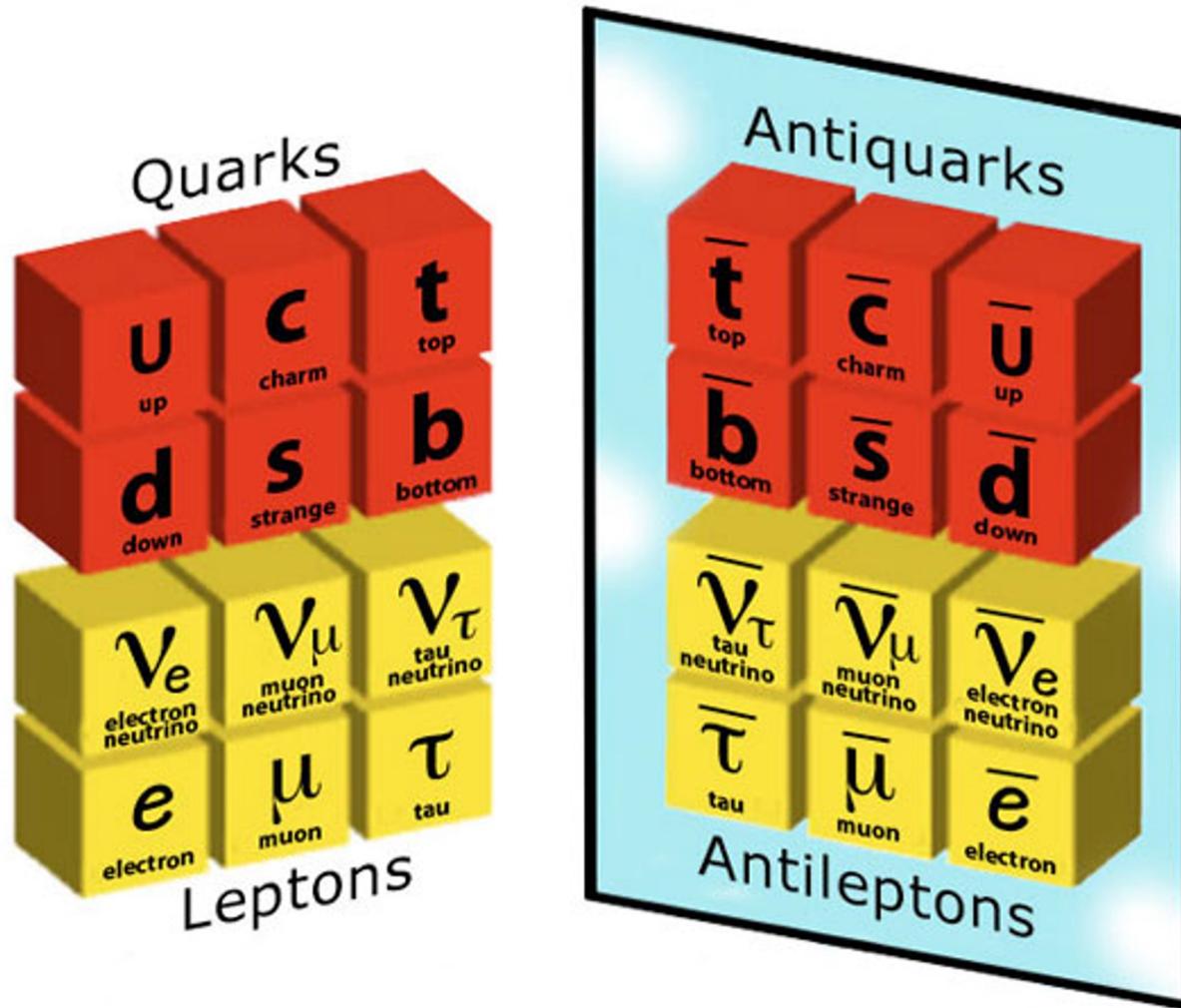


Matière ordinaire

# Les particules de matière



# 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**.

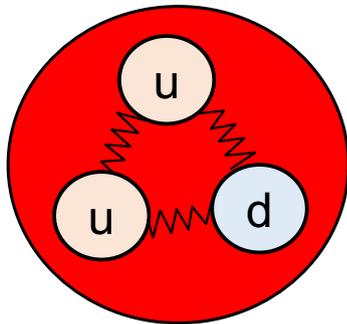
# Les quarks forment des hadrons

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

Matière ordinaire

**Proton**

(charge +1)

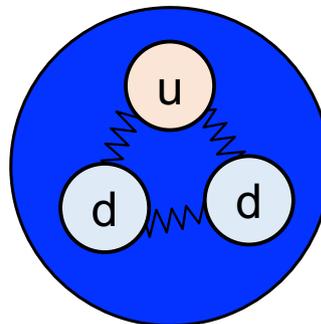


$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

u u d

**Neutron**

(charge 0)



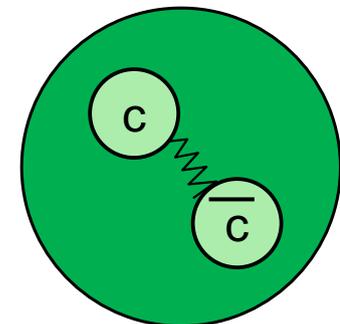
$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

u d d

Et exotique (exemple)

**J/ Psi**

(charge 0)



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

c-bar c

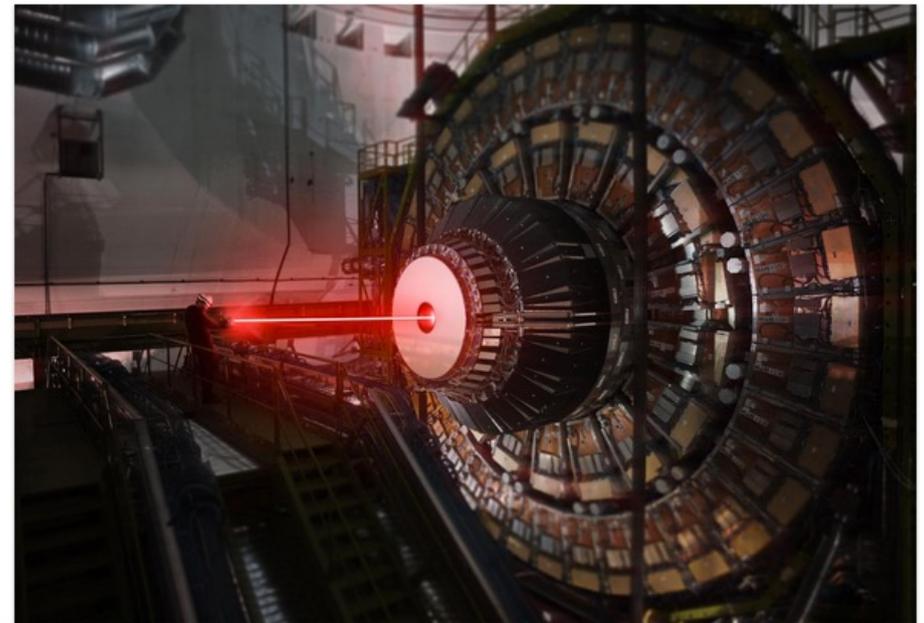
La cohésion des quarks provient d'une **force** (ou **interaction**)

# 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

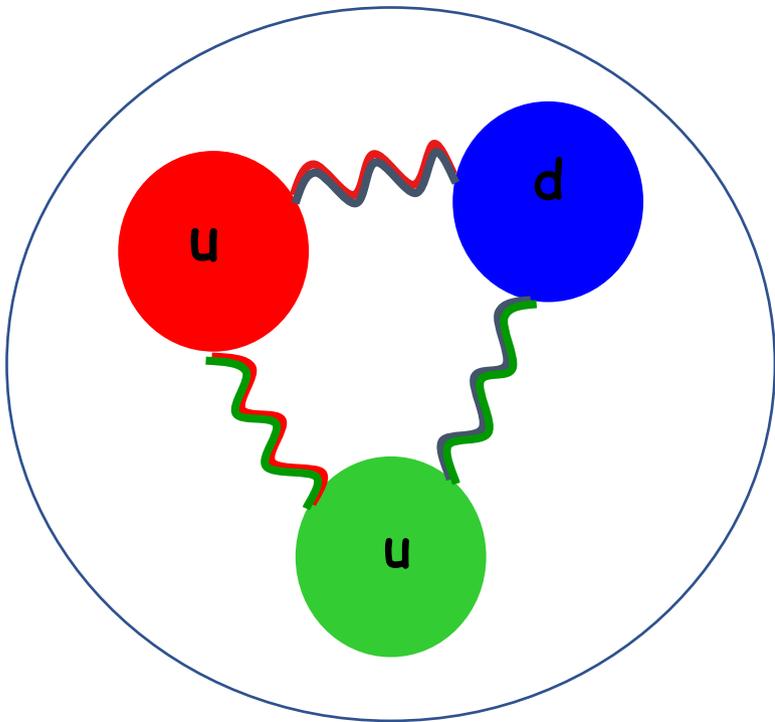


La Force est devenue un outil de recherche populaire dans le département Faisceaux du CERN (Image : Max Brice et Daniel Dominguez/CERN)

# L'interaction forte

Responsable de la stabilité des noyaux.

Proton



Médiateurs: **gluons**

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



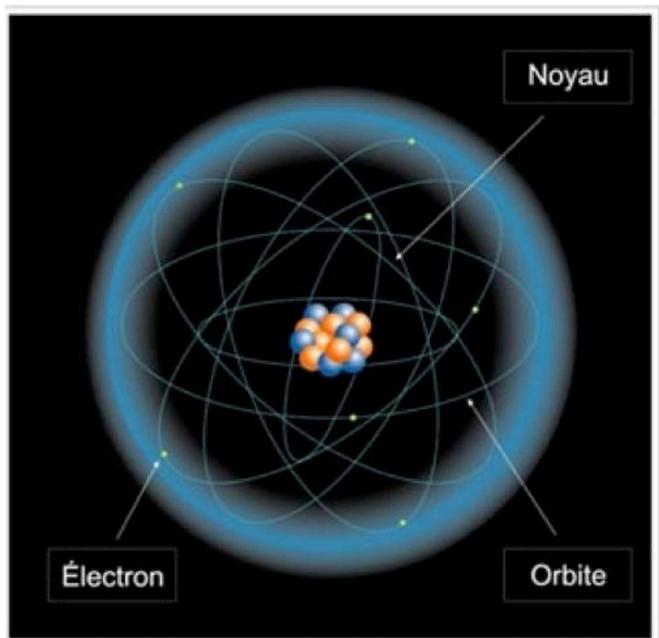
Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (objets de charge électrique entière: proton, neutron,...)

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

# L'interaction 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)

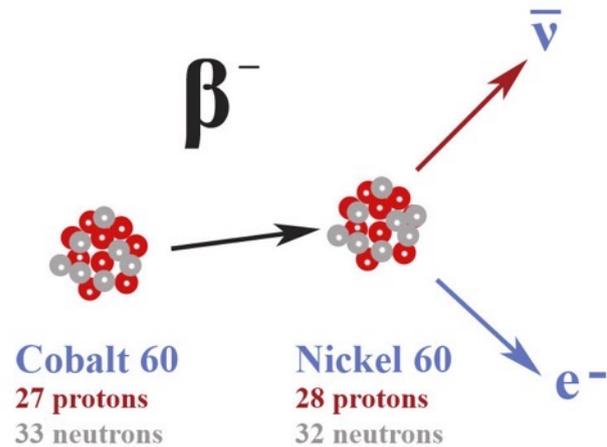
Masse= 0 (vitesse=c=vitesse  
de la lumière)  
portée infinie



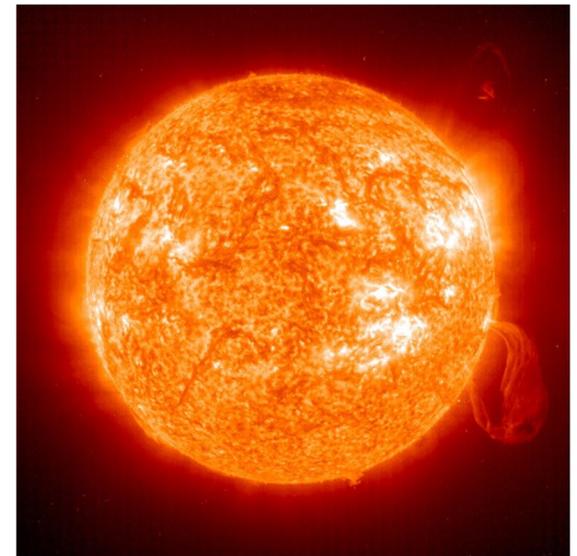
# L'interaction faible

## Intervient dans

- La Radioactivité  $\beta$
- Les réactions nucléaires au coeur du Soleil



© Astronoo.com



Médiateurs :  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$

Masse =  $\sim 100$  x celle du proton  
Portée limitée.



# La gravitation

## Gravitation newtonienne

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

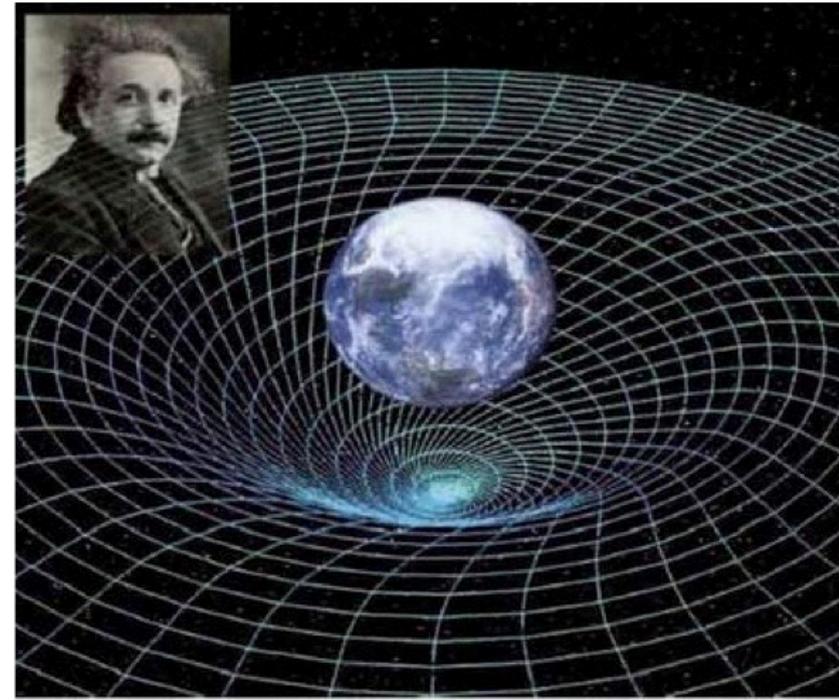


Rubrique à Brac © Gotlib - Dargaud

## Relativité générale d' Einstein

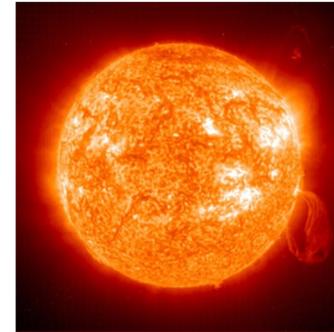
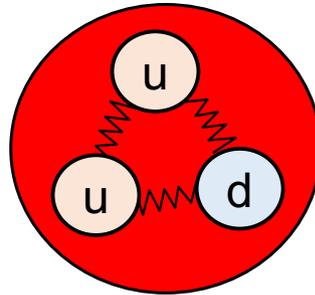
- La gravitation est issue d'une déformation de l'espace temps
- La gravitation est très difficile à marier avec les autres forces

Médiateur hypothétique : **graviton**



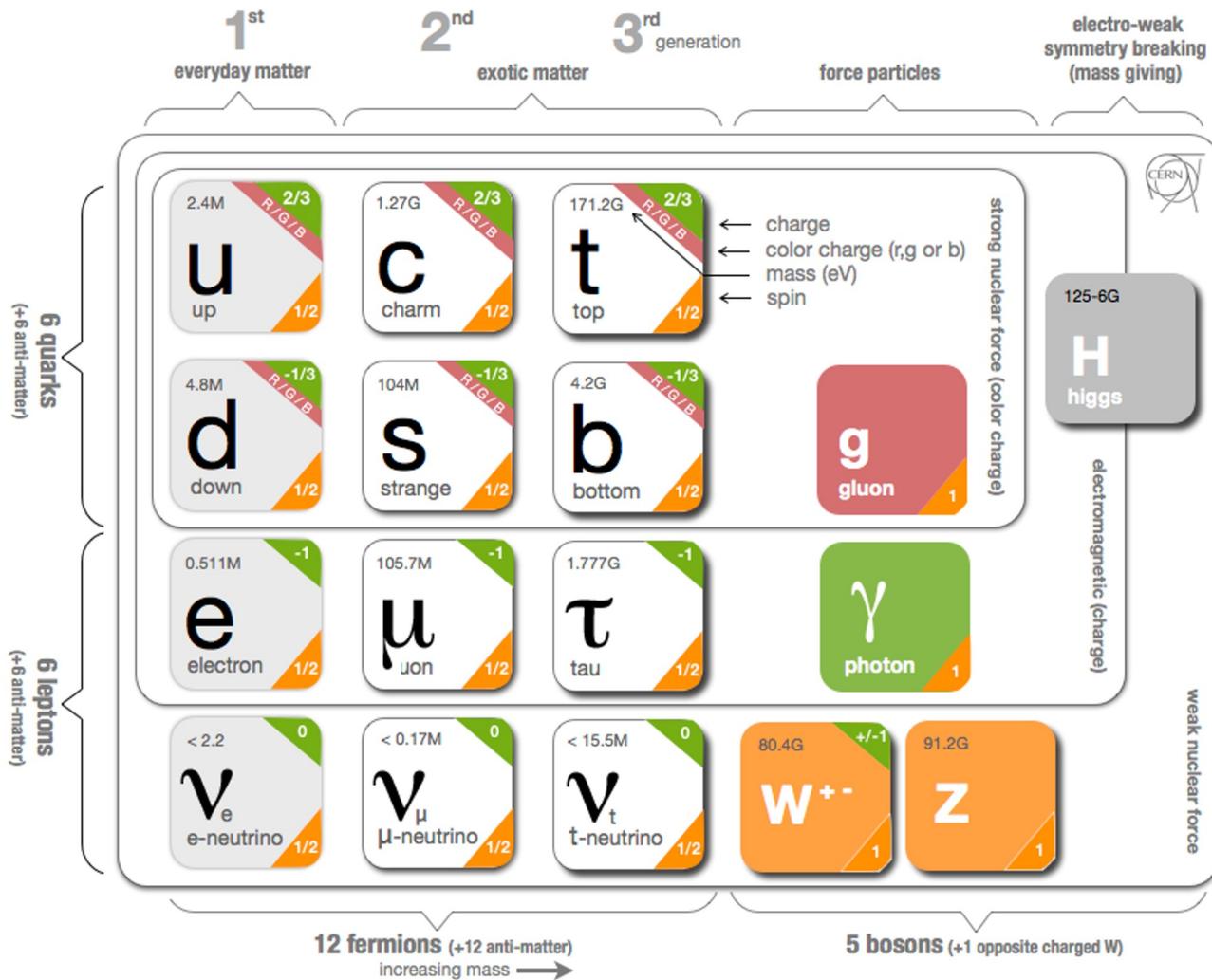
# Les interactions

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



Interaction	<b>Electro- magnétique</b>	<b>Forte</b>	<b>Faible</b>	Gravita- tionelle
Mediateur				(graviton ?)
Intensité relative	<b>1</b>	<b>100</b>	<b><math>10^{-12}</math></b>	<b><math>10^{-38}</math></b>

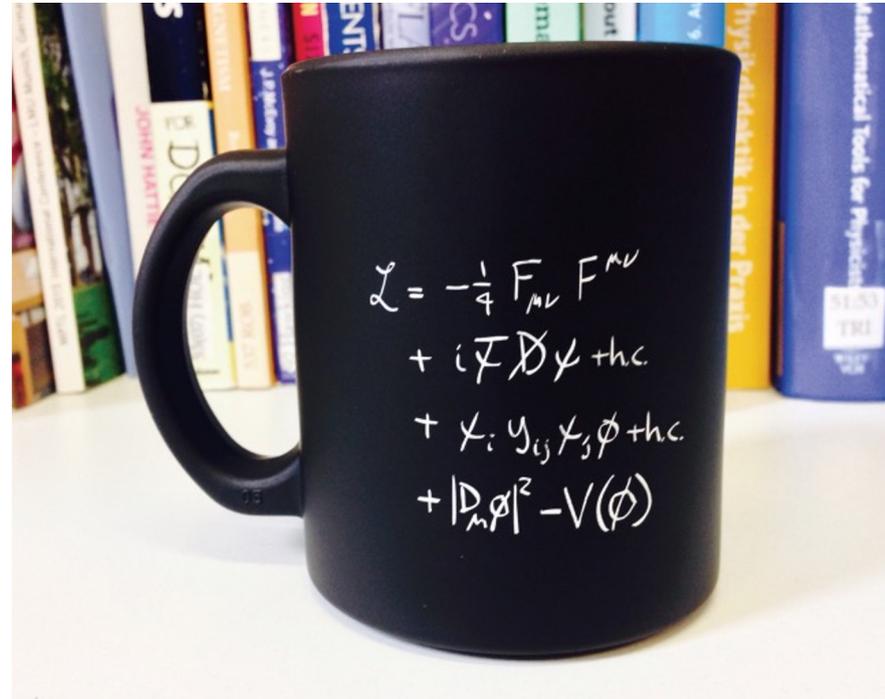
# Le Modèle Standard



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.



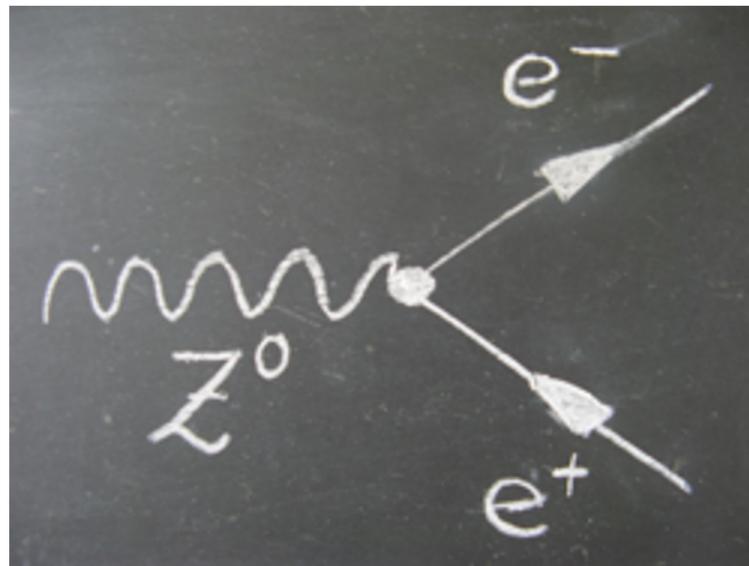
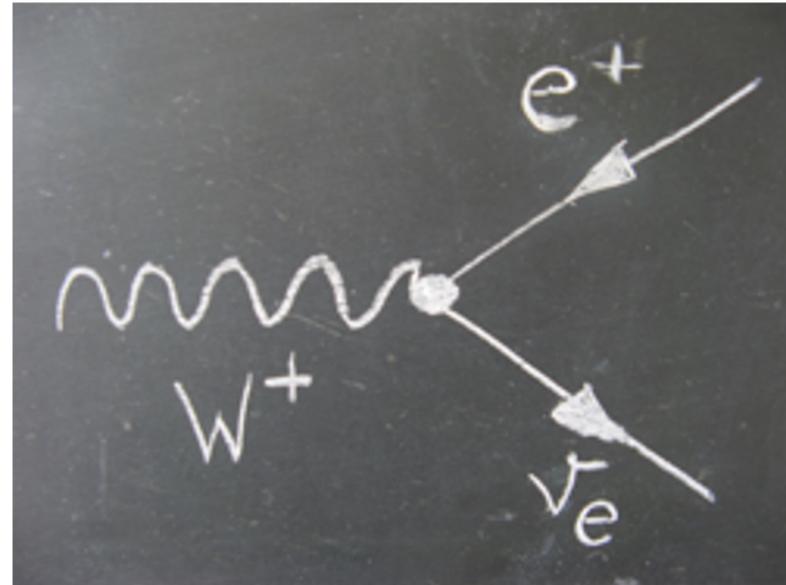
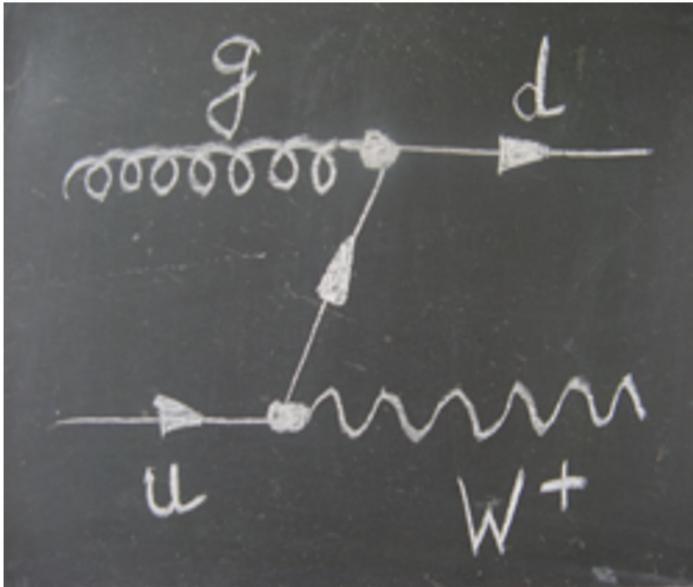
Formule simplifiée!

# Une théorie qui repose sur un formalisme mathématique puissant

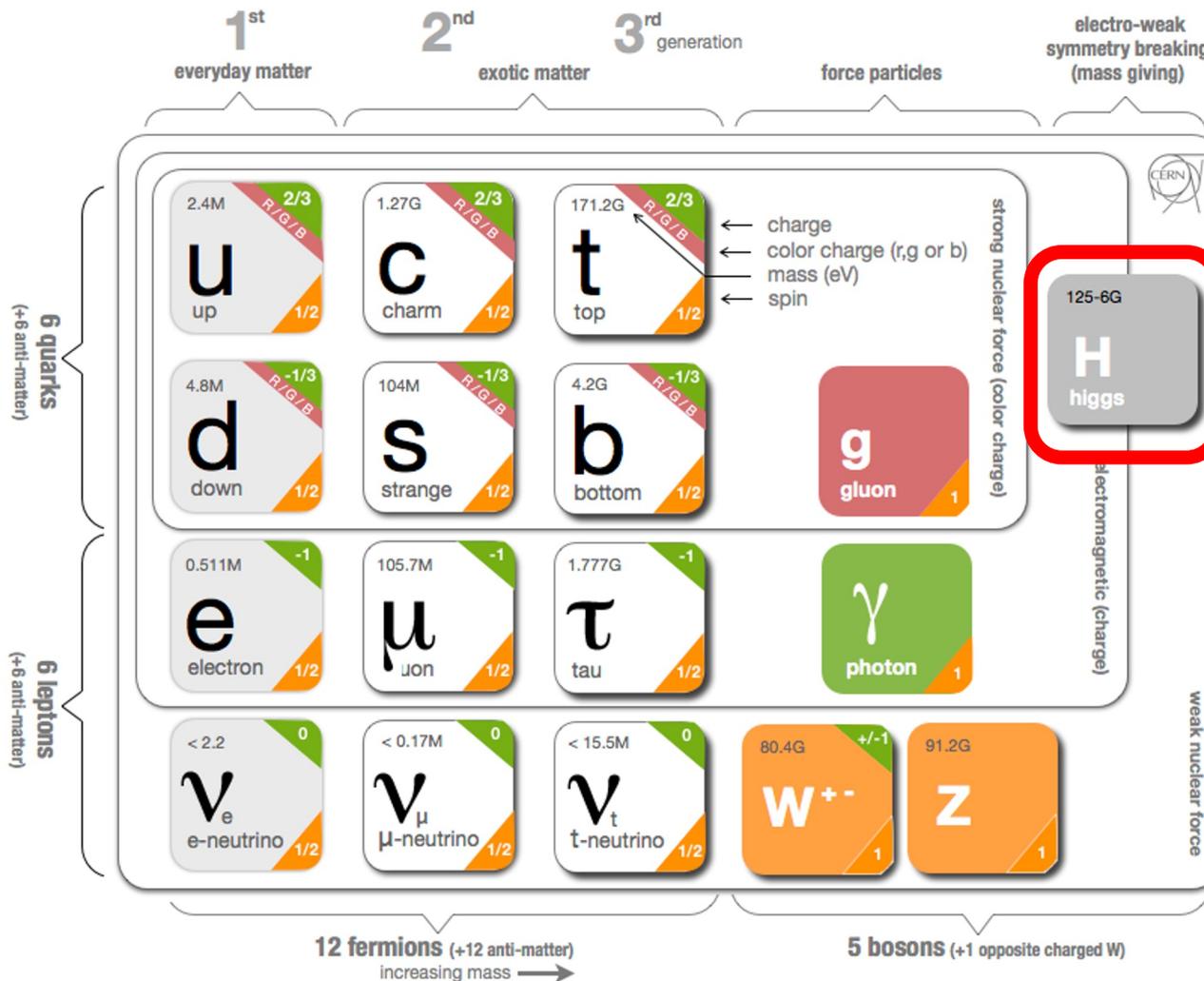
Le **Modèle Standard** est basé sur la mécanique quantique et la relativité restreinte.

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\nu) g_\mu^\alpha + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\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^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^4} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\mu W_\nu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\mu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}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_w} 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)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_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}{c_w^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}{c_w^2} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} 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^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \rho^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(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}{4c_w} Z_\mu^0 [(\rho^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{4}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\rho^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\alpha} d_j^\alpha)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\rho^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\alpha}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\alpha)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\rho^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} [H (e^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\lambda^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\alpha} (1 - \gamma^5) d_j^\alpha) + \\
 & m_\lambda^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\alpha} (1 + \gamma^5) d_j^\alpha)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\alpha}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\alpha) - m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\alpha}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\alpha)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# Les diagrammes de Feynman

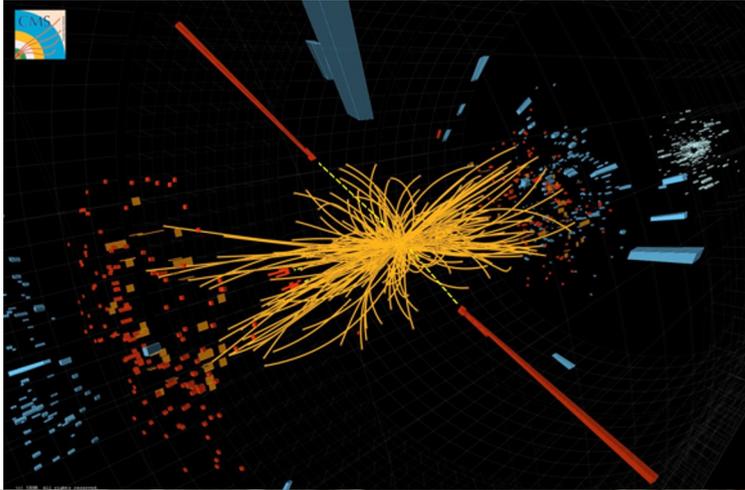


# Le Modèle Standard



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**



L'**électron interagit peu** avec le champ de Higgs .

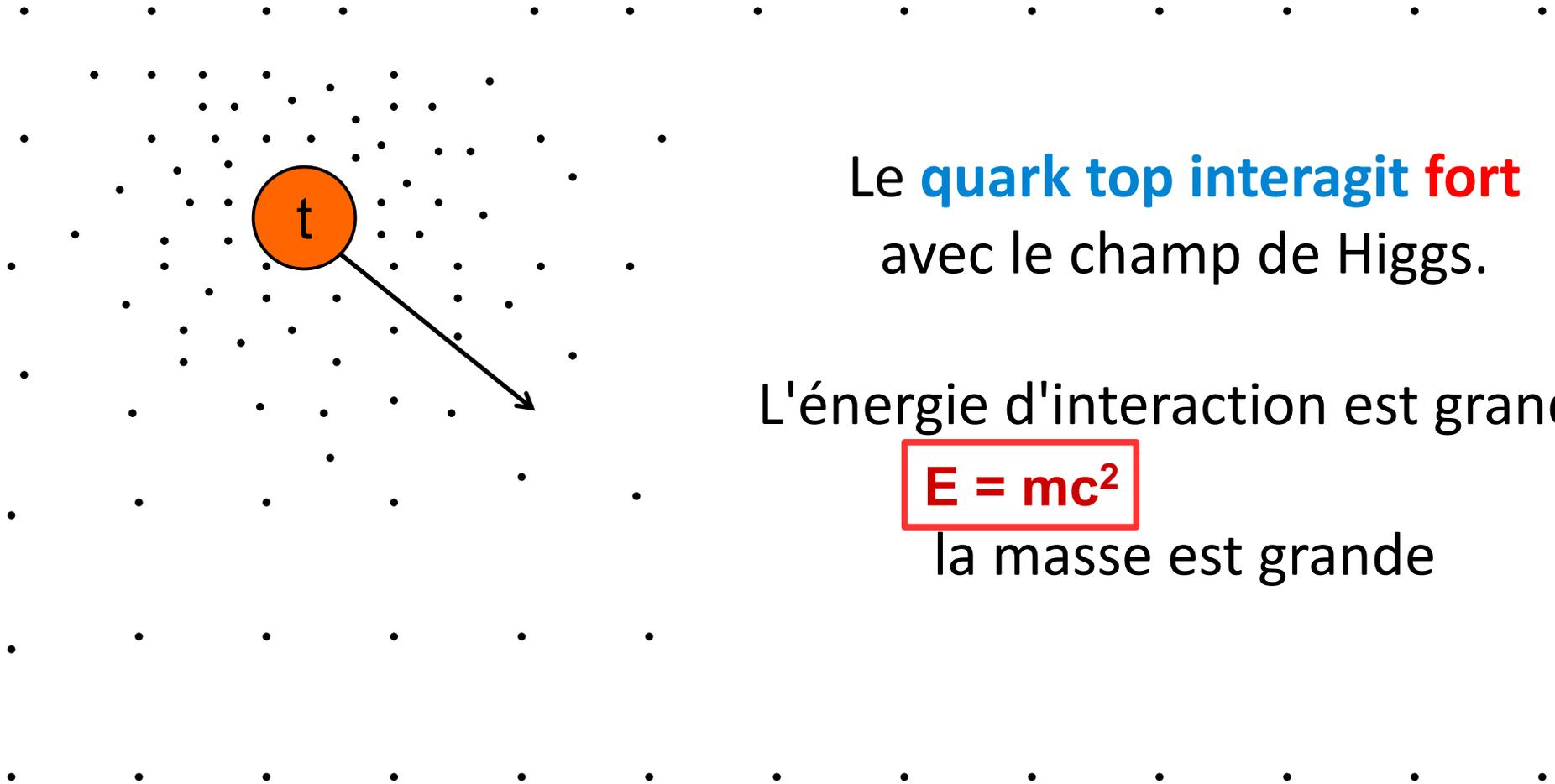
L'énergie d'interaction est petite

$$E = mc^2$$

la masse est petite

# Le mécanisme de Higgs

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



Le **quark top interagit fort** avec le champ de Higgs.

L'énergie d'interaction est grande

$$E = mc^2$$

la masse est grande

# 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  $\sim 1 \text{ GeV}$  ( $\sim 2 \cdot 10^{-27} \text{ g}$ ).

Protons et neutrons sont composés de trois quarks (masse de quelques  $0.001 \text{ GeV}$ ).

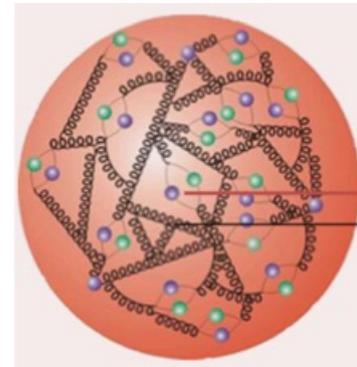
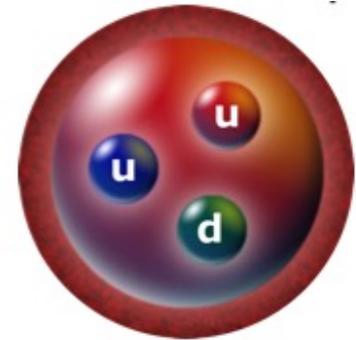
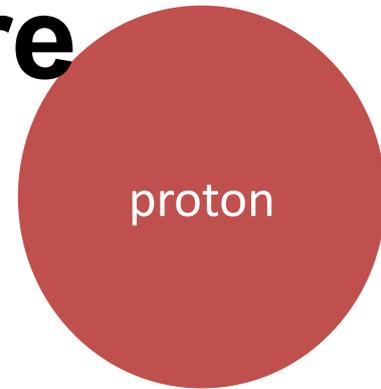
L'essentiel de la masse des protons et neutrons vient de l'énergie des gluons liant les quarks entre eux (et  $E=mc^2$ ). Les protons et les neutrons (donc les atomes) **c'est à 99% de l'énergie pure...**

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

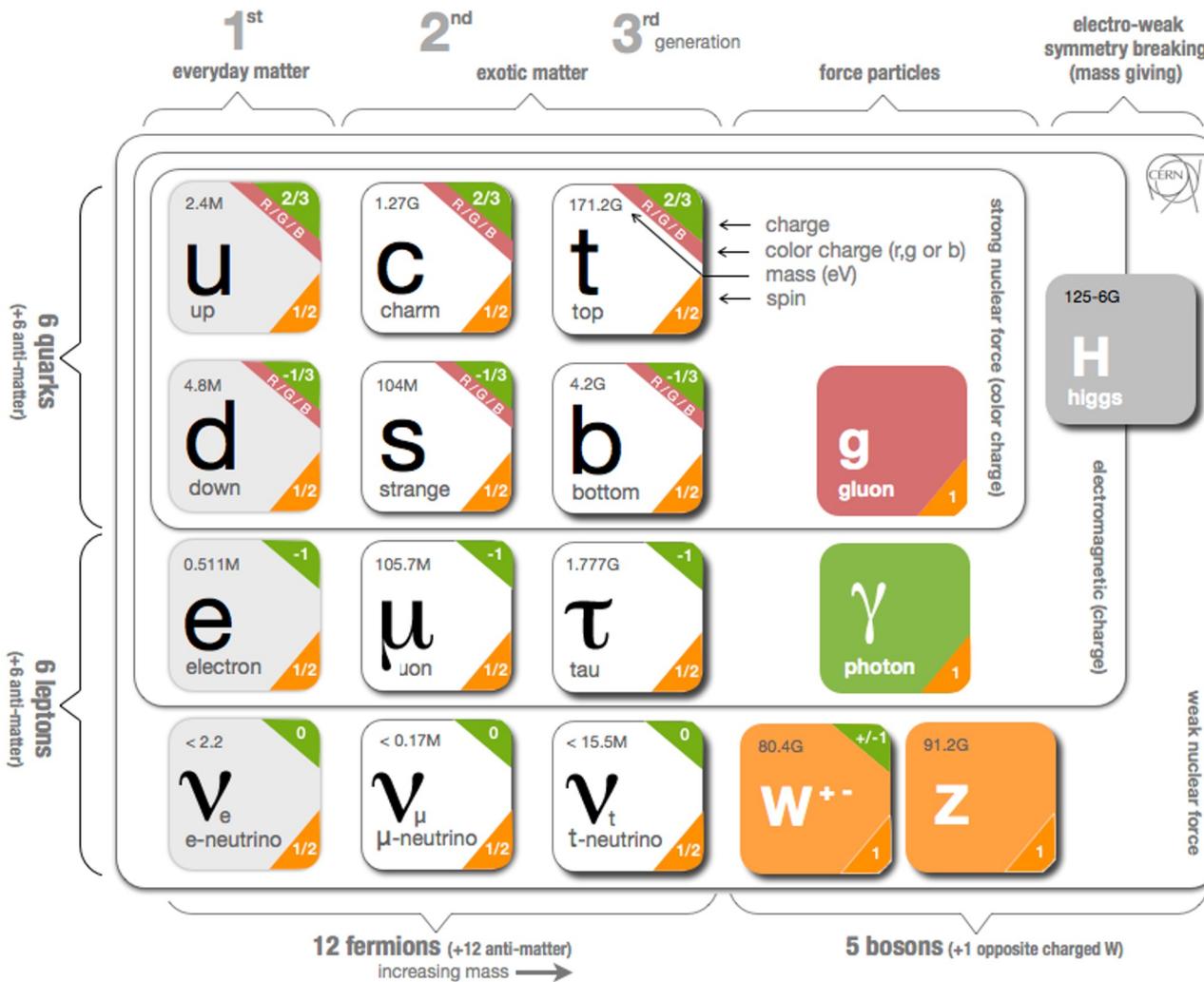
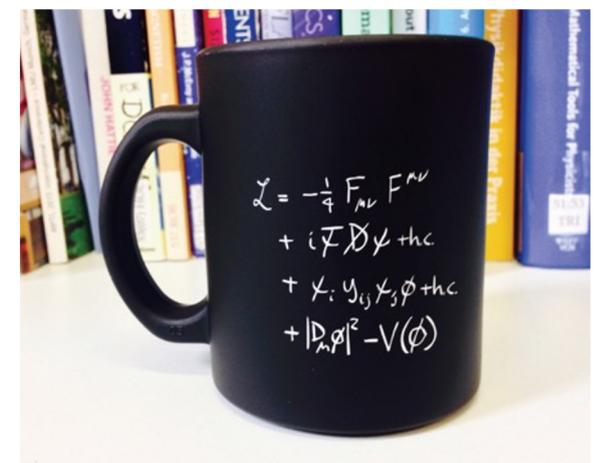
Pas grand chose ?

Avec des quarks sans masse, les protons et neutrons se désintégreraient 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



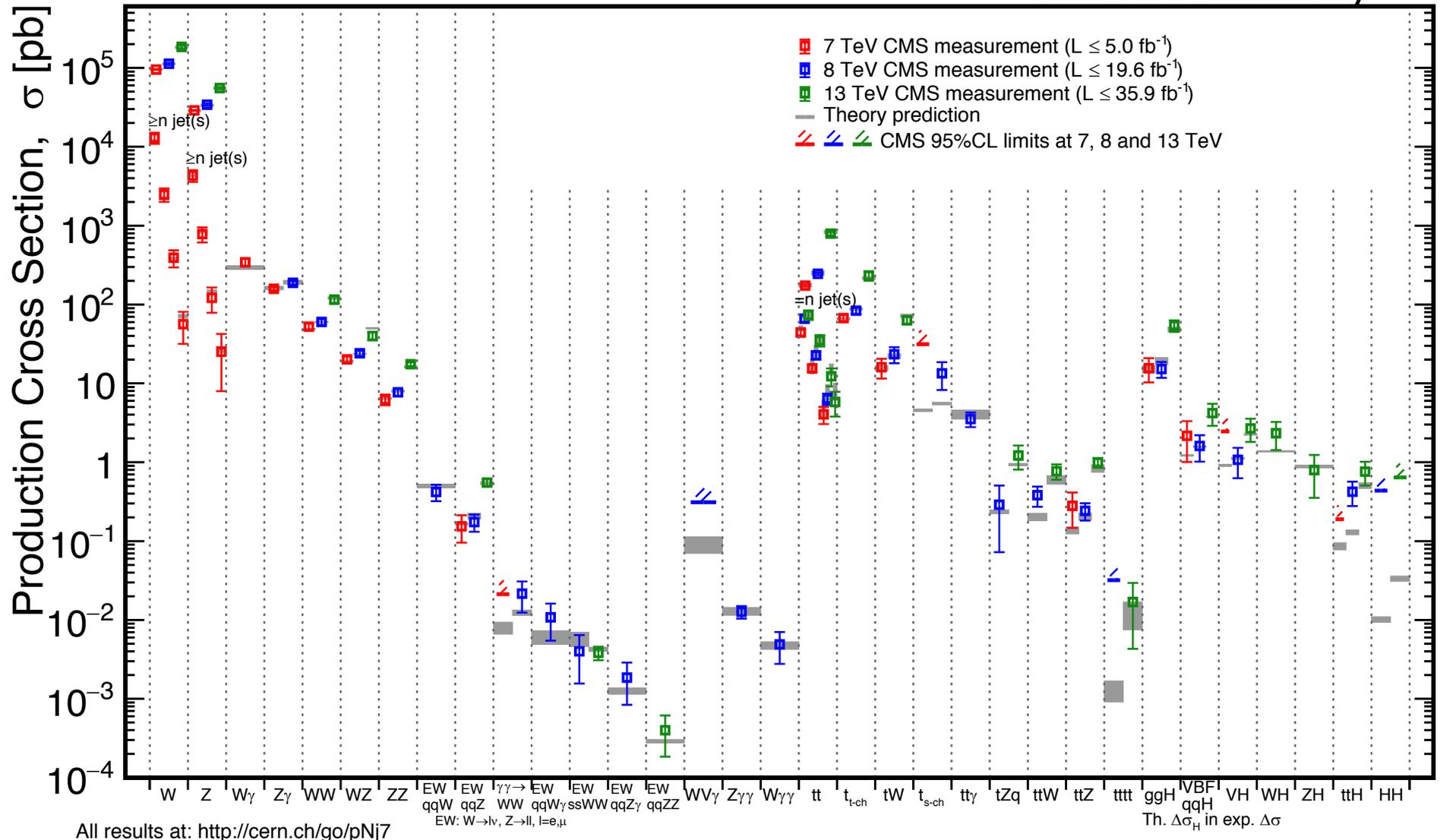
Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit les particules connues et leurs interactions.

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

November 2017

CMS Preliminary



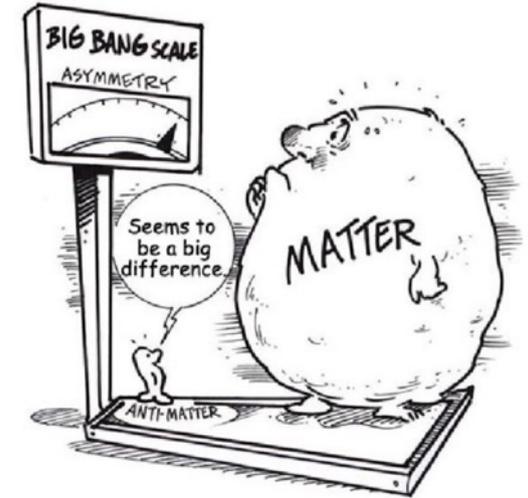
# Cependant, encore beaucoup de questions sans réponses...

→ Pourquoi y a-t-il **trois familles** de constituants ?

→ Pourquoi le **quark top** est-il si lourd ?

→ Où est passé l'**antimatière** ?

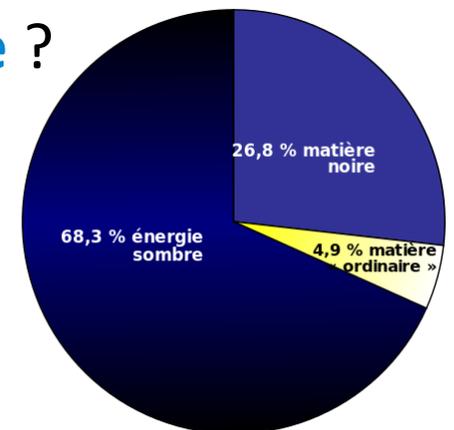
A l'origine, il y devait y avoir autant de matière que d'antimatière.

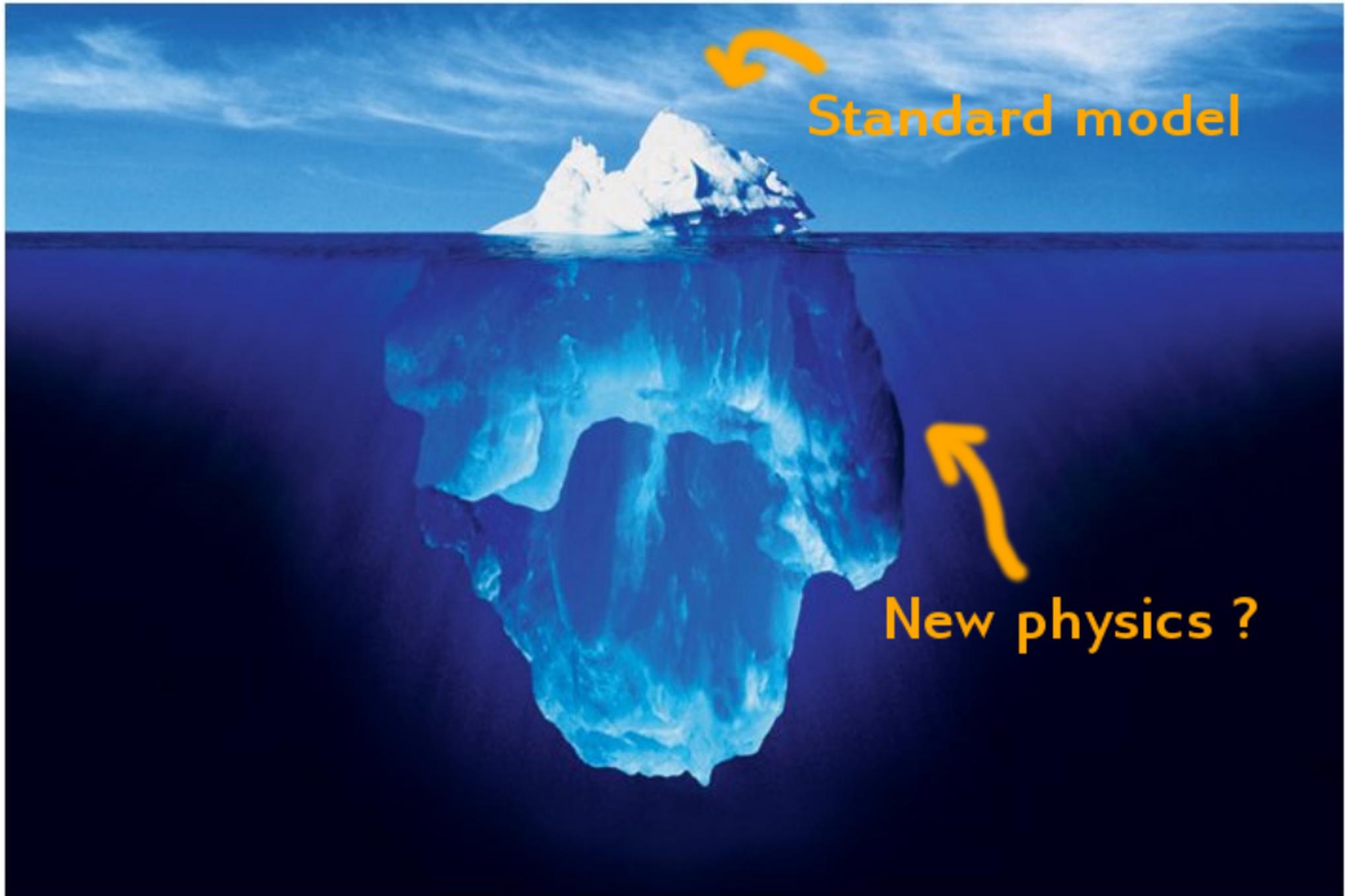


→ La matière ordinaire ne correspond qu'à 5% de ce qui est connu dans l'univers. Qu'est-ce que la **matière noire** et l'**énergie noire** ?

→ Comment inclure la description de la **gravitation** ?

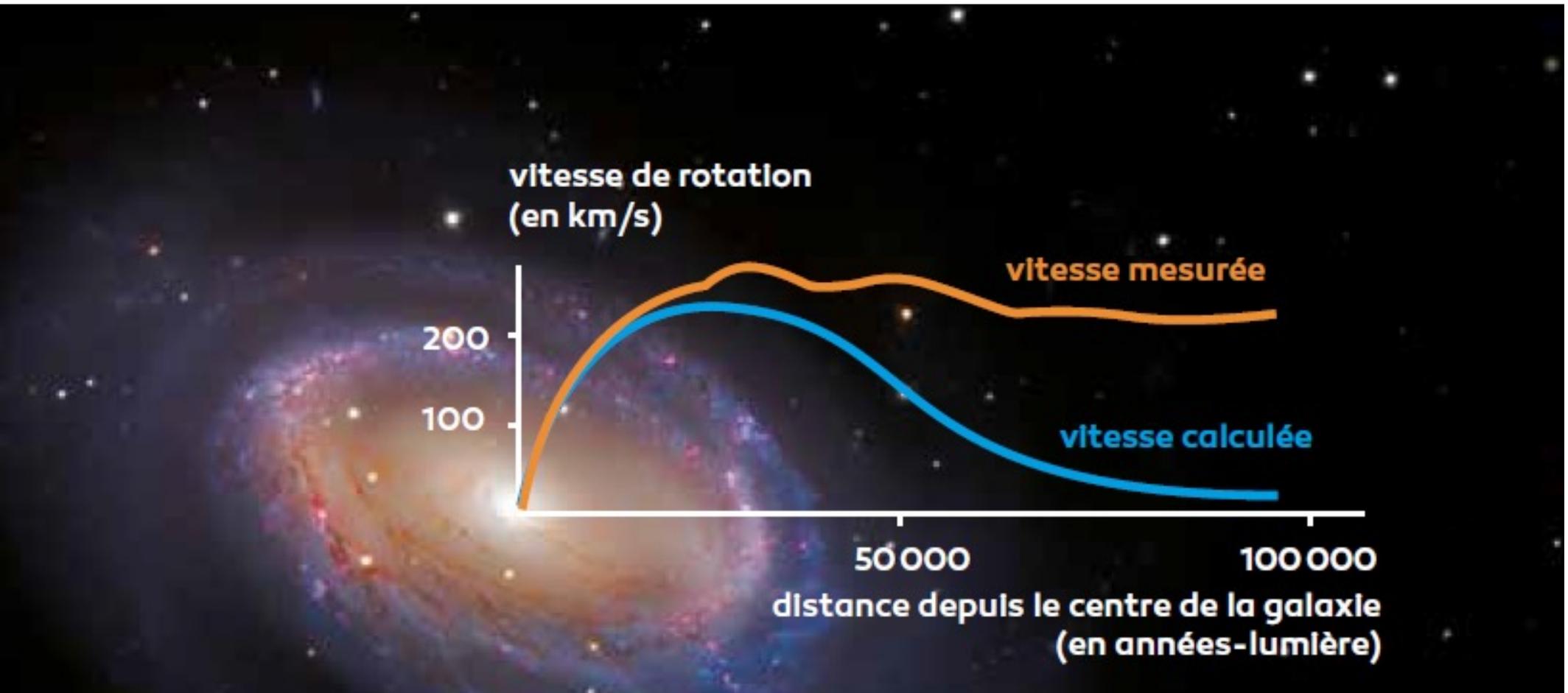
→ Existe-t-il d'**autres particules**, proposées par des théories qui résoudraient ces problèmes ?



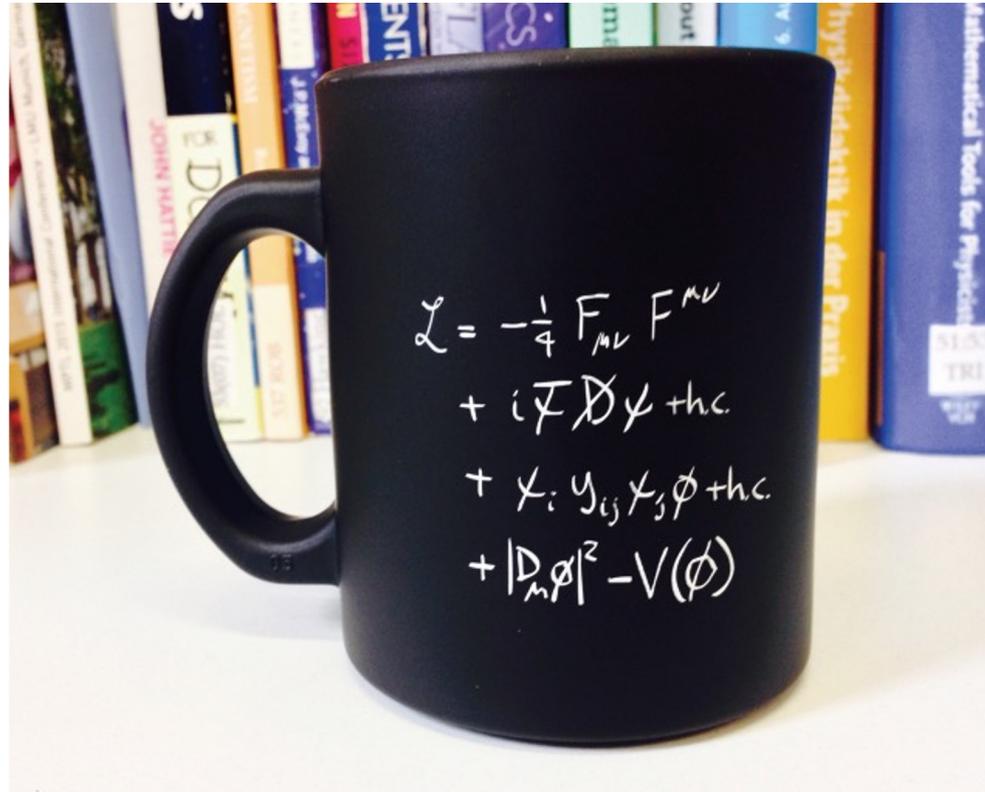


Standard model

New physics ?



# Le lagrangien du Modèle Standard



$\mathcal{L} =$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & +i\bar{\psi}\not{D}\psi \\ & +\bar{\psi}_i y_{ij}\phi\psi_j \\ & +h.c. \\ & +|D^\mu\phi|^2 \\ & +V(\phi) \end{aligned}$$

Propagation des bosons médiateurs, interactions entre gluons, entre bosons faibles

Propagation des fermions, interaction entre fermions et bosons médiateurs

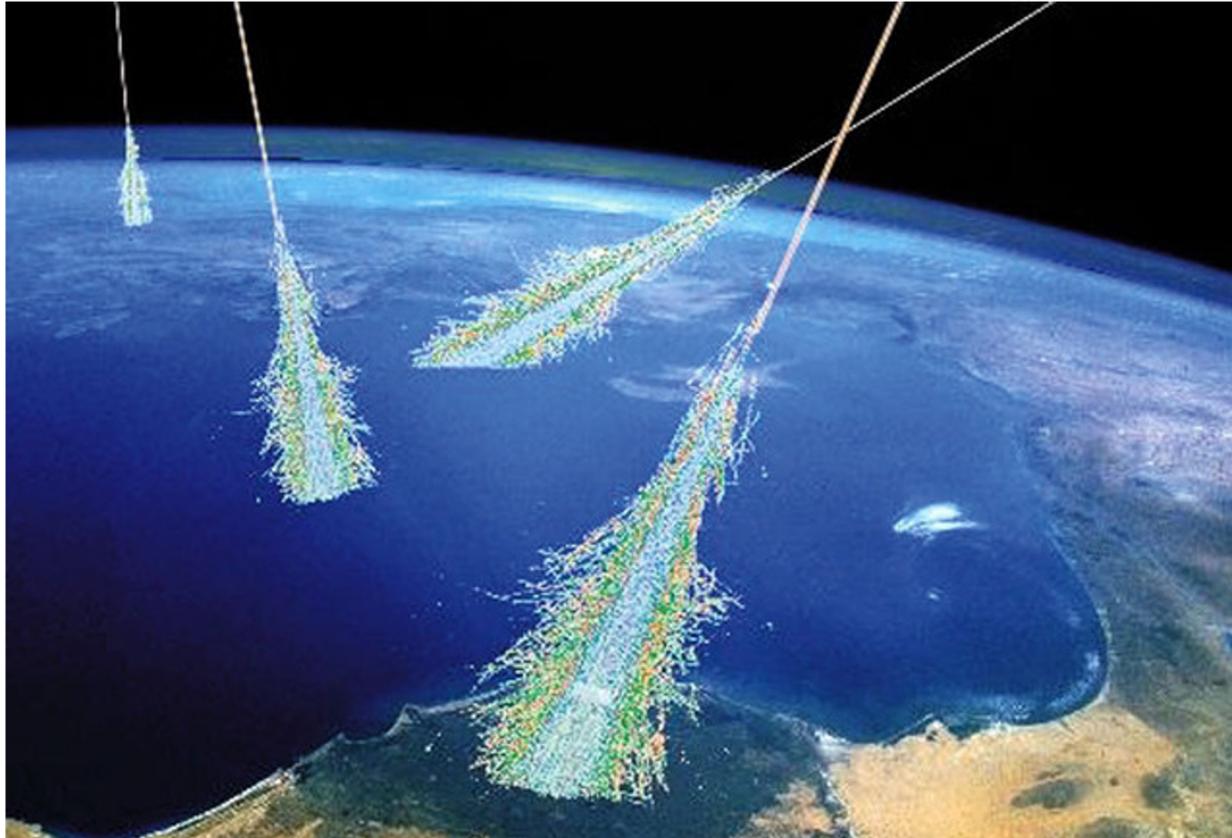
Interaction entre fermions et Higgs, terme de masse des fermions

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

# 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

# Le concept de champ

