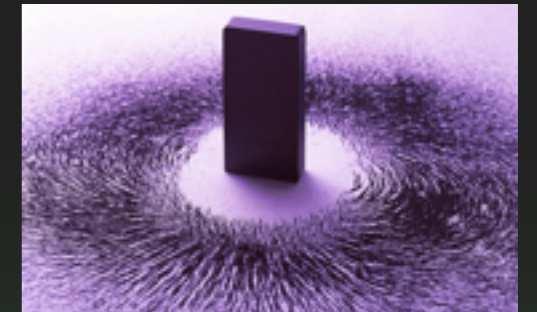
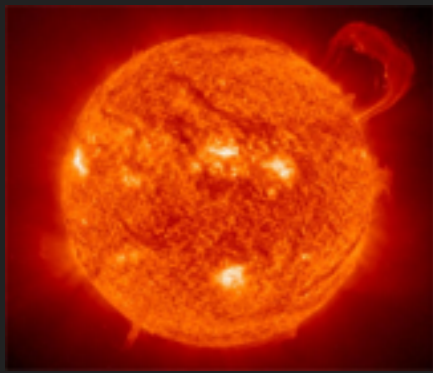


The background of the slide is a dark, grainy image showing numerous white, glowing tracks. These tracks are complex and chaotic, with many loops, spirals, and straight segments, resembling the paths of particles as they interact with a detector. The tracks are most prominent in the center and right side of the image.

Introduction à la physique des particules

Hubert Trépanier
Étudiant à la maîtrise en physique des
particules à l'UdeM, groupe ATLAS

La Physique avec un grand «P»

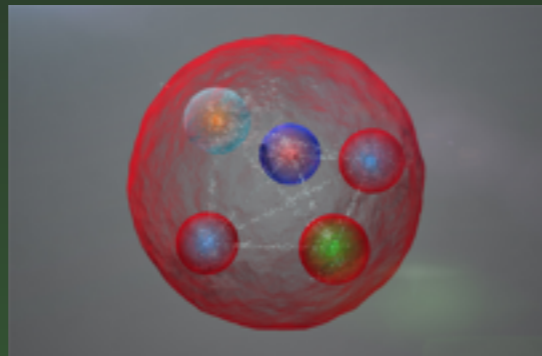


Science tentant de comprendre, de modéliser et d'expliquer les phénomènes naturels de l'univers...



Physique fondamentale

- Étudie les questions les plus élémentaires concernant l'univers:
 - D'où venons-nous? *Création de l'univers*
 - Où allons-nous? *Évolution de l'univers*
 - Quels sont les constituants de la matière?
 - Comment les forces agissent sur eux?



- Contient 2 principaux champs de recherche:
 - Cosmologie, infiniment grand
 - Physique des particules, infiniment petit

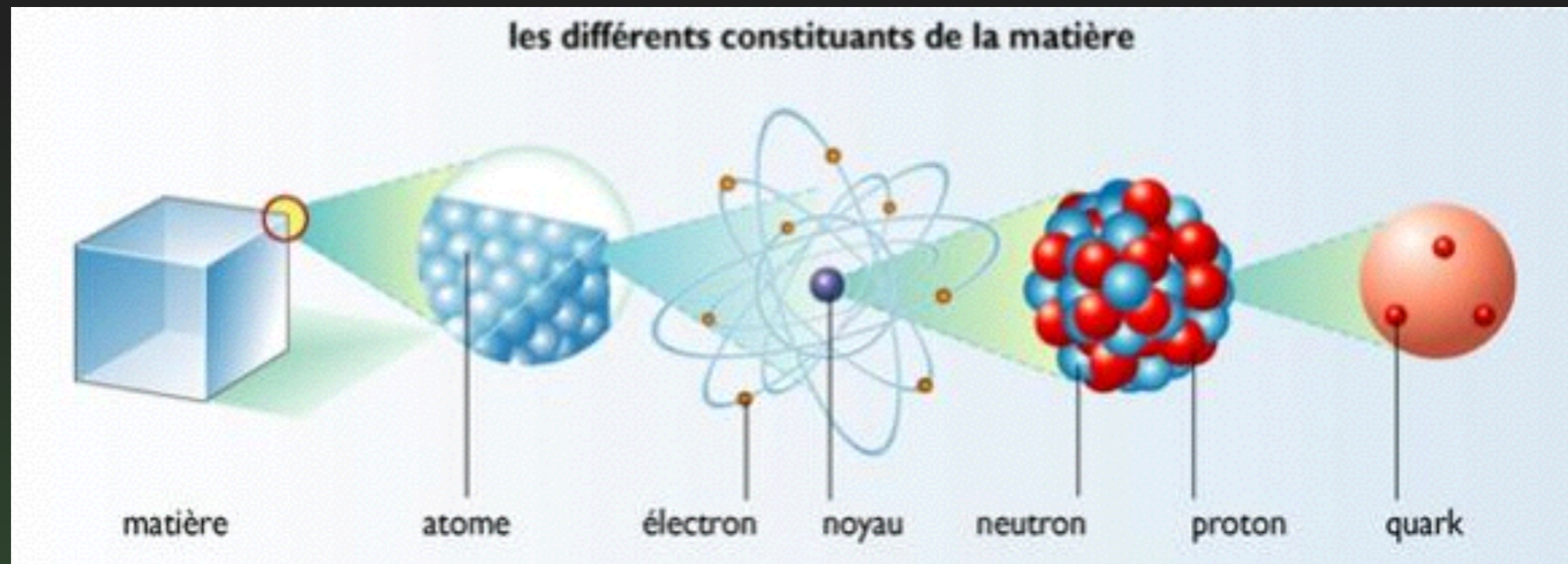


**Que sait-on grâce à la
physique des particules?**

Que sait-on grâce à la physique des particules?



Matière



- Les atomes sont faits d'électrons (-), de protons (+) et de neutrons (0)
- Les protons/neutrons sont eux-même faits de 3 quarks de type «up» et «down»
- L'électron, et les quarks up et down sont des particules élémentaires
- 99% de la masse de l'Univers connu est formée de ces 3 particules !!!

Matière

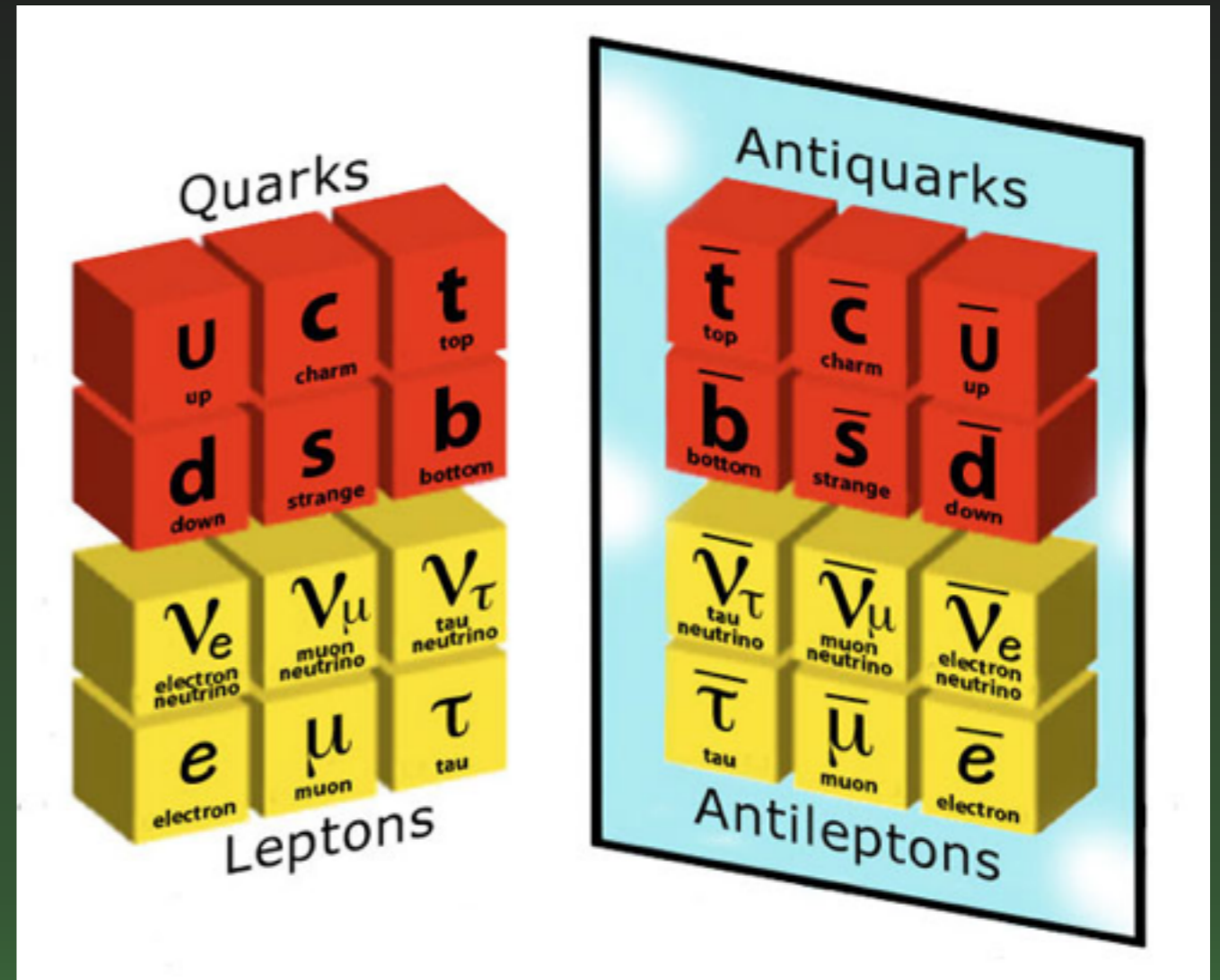
quarks	+2/3	u up (1968)	c charm (1974)	t top (1995)
	-1/3	d down (1968)	s strange (1968)	b beauty (1977)
leptons	0	ν_e neutrino "e" (1956)	ν_μ neutrino "μ" (1962)	ν_τ neutrino "τ" (2000)
	-1	e⁻ électron (1897)	μ^- muon (1936)	τ^- tau (1974)
charge électrique		1^{ère} famille	2^{ème} famille	3^{ème} famille

Matière ordinaire

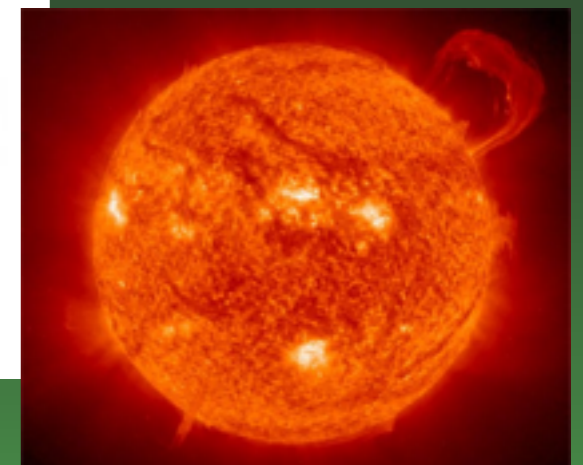
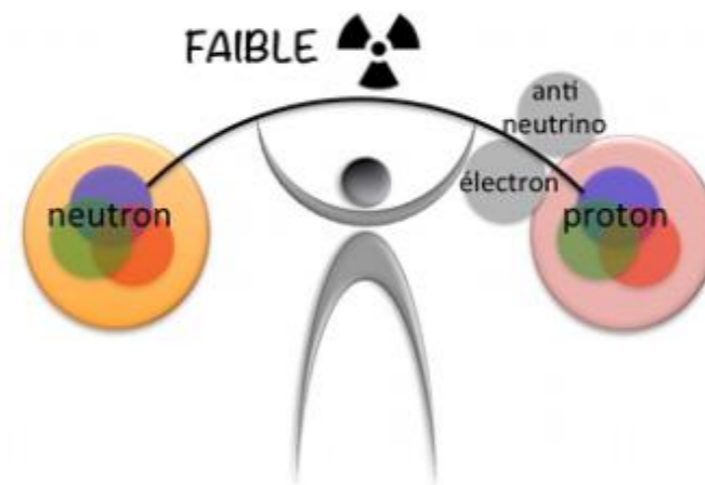
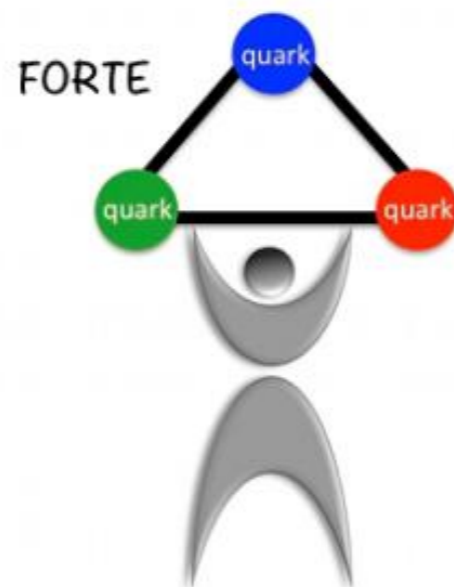
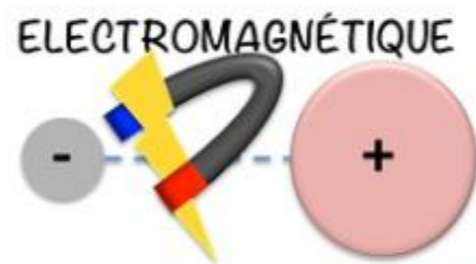
Matière plus lourde
produite dans des collisions
à haute énergie

...et anti-matière

- Pour chacune de ces particules, il existe une anti-particule
- Possède exactement les mêmes propriétés, sauf la charge électrique qui est inversée
- Total de 24 différentes particules de type fermions

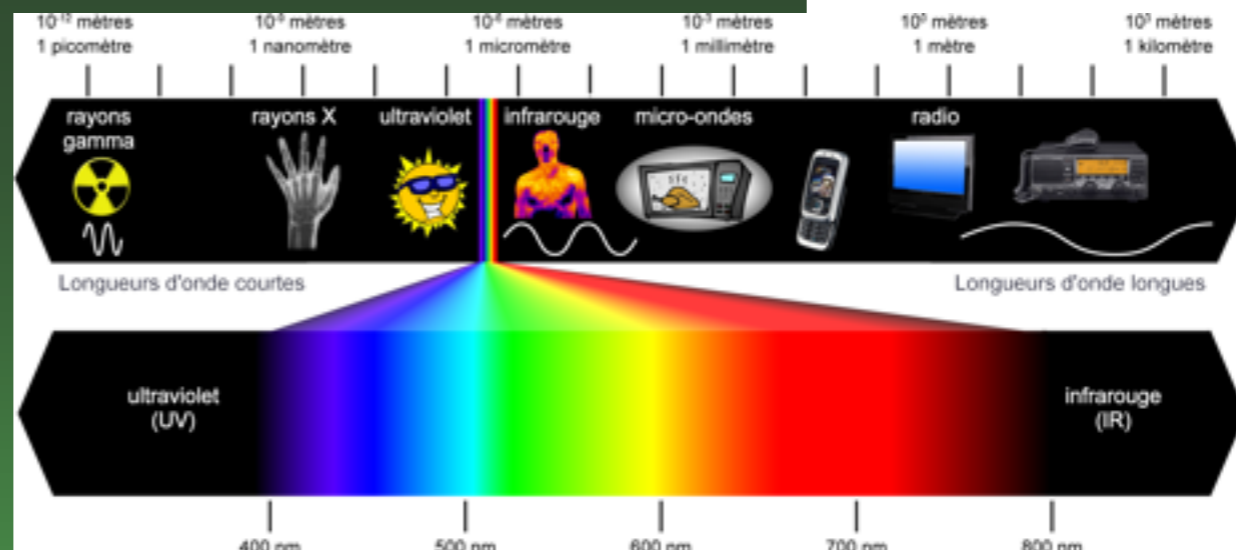
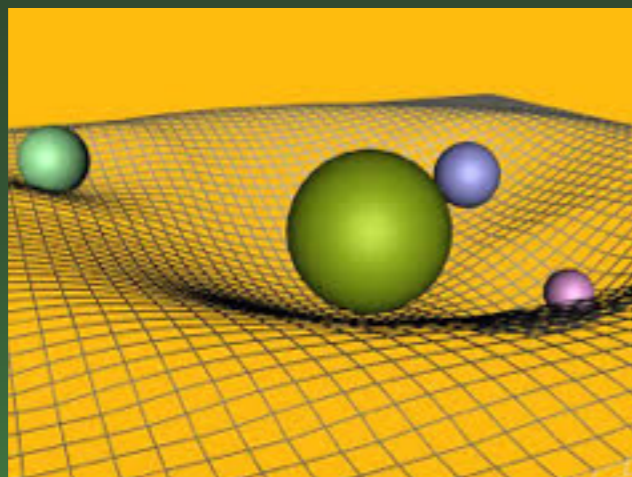
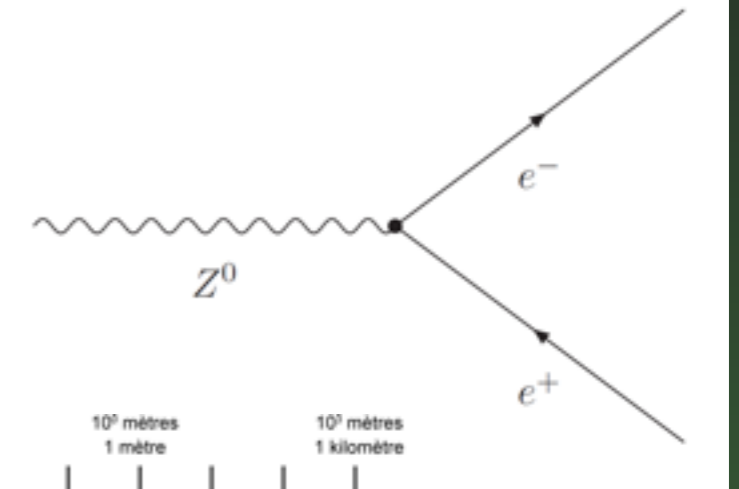
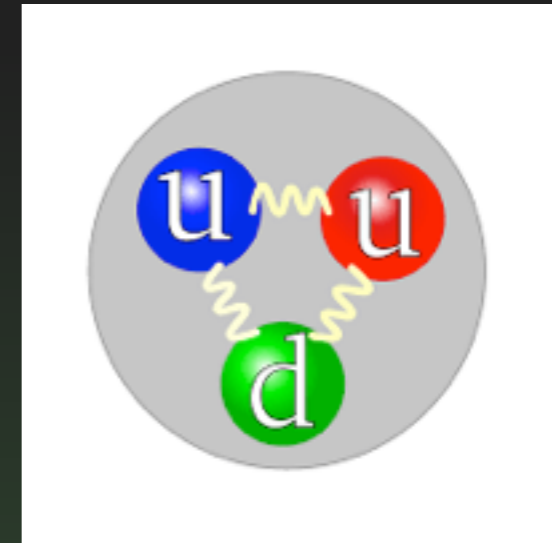


Forces ou interactions



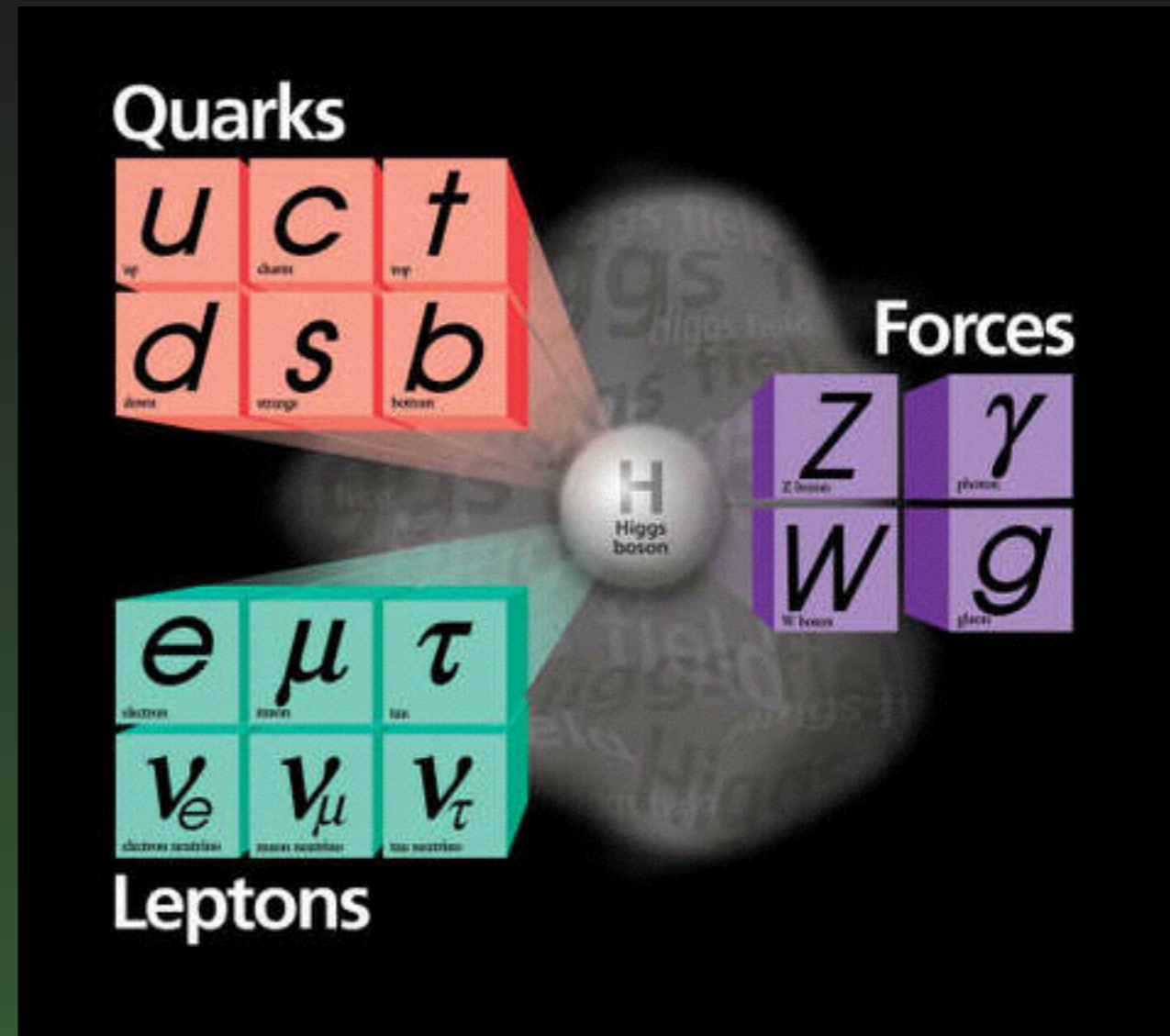
Forces ou interactions

- Les forces sont communiquées par d'autres particules, les vecteurs de force:
 - Forte: 8 gluons (amplitude relative=1)
 - Électromagnétique: photon (10^{-2})
 - Faible: bosons $W^{+/-}$, Z (10^{-14})
 - Gravité: graviton? (hypothétique) (10^{-40})



Le Modèle Standard

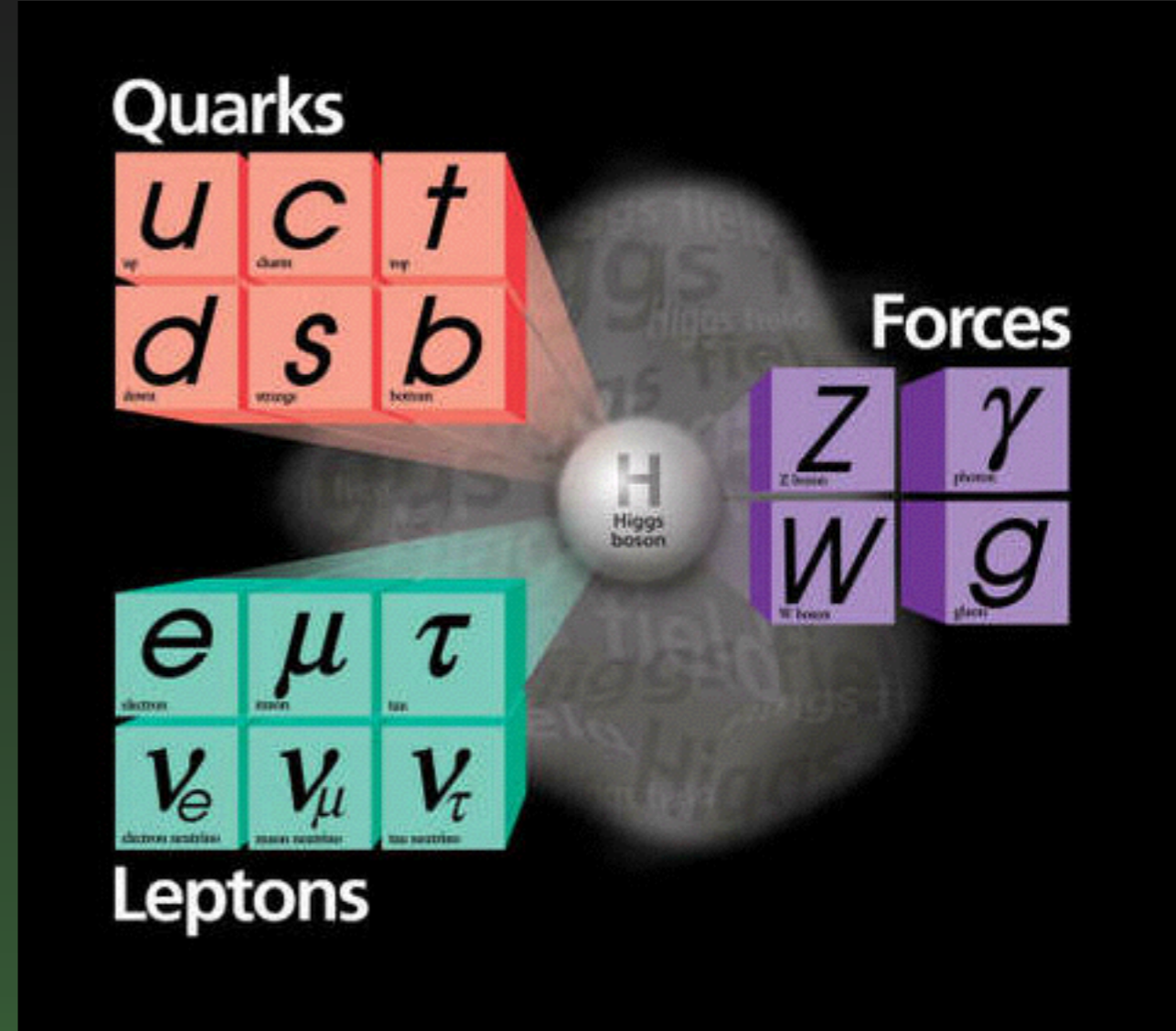
- Magnifique synthèse de nos connaissances en physique des particules
- Classifie les particules (36 au total en excluant le graviton)
- Provient de la théorie des champs quantiques: unification de la mécanique quantique et de la relativité restreinte
- Basé sur des concepts de symétrie
- Prédiction très précises, grand succès depuis son élaboration!



- Fermions, $\text{spin} = 1/2$
- Bosons, $\text{spin} = 1$
- Boson de Higgs, $\text{spin} = 0$

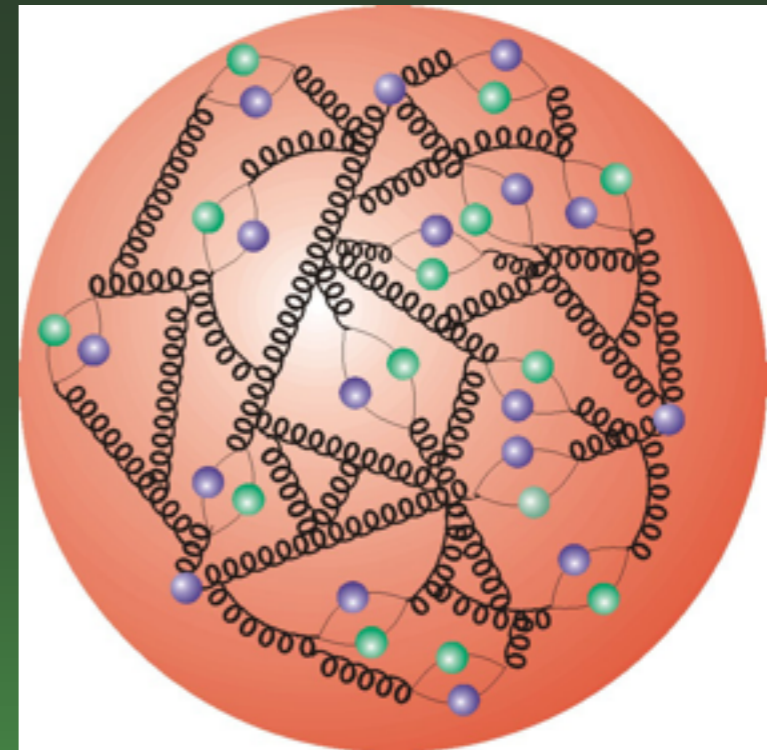
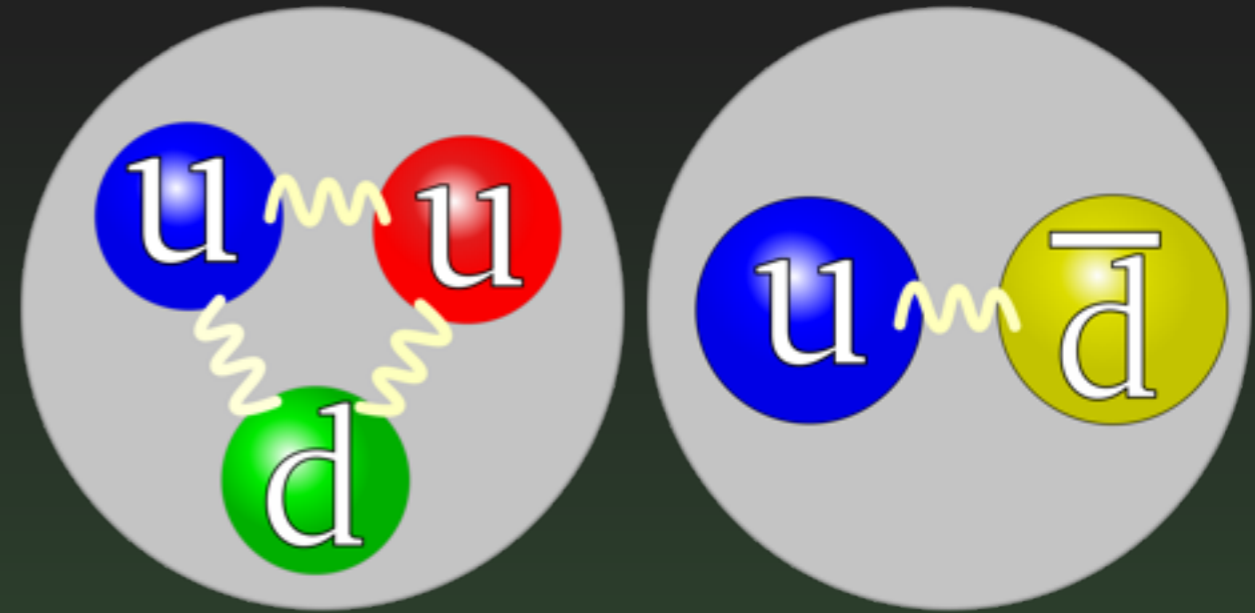
The Standard

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{StandardModel}} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - 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^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^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^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & 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_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - 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^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)] + \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^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & igs_w MA_\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^+) + \\
 & 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}{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} 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^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\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 + 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}{4c_w} 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}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 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) e^\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) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{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^2}{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)] - \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) + igs_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^+) + igs_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^-) + igs_w A_\mu (\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_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igMs_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0].
 \end{aligned}$$



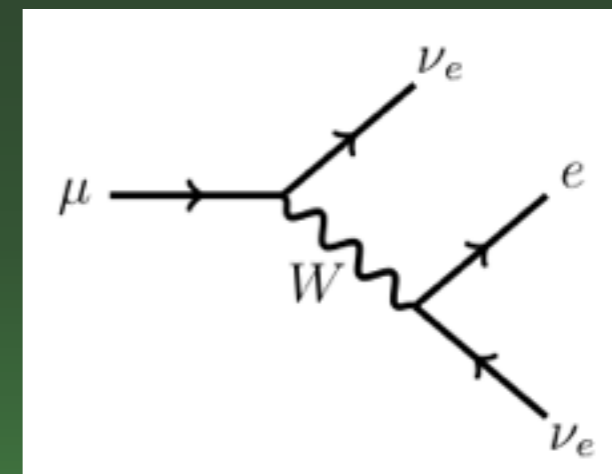
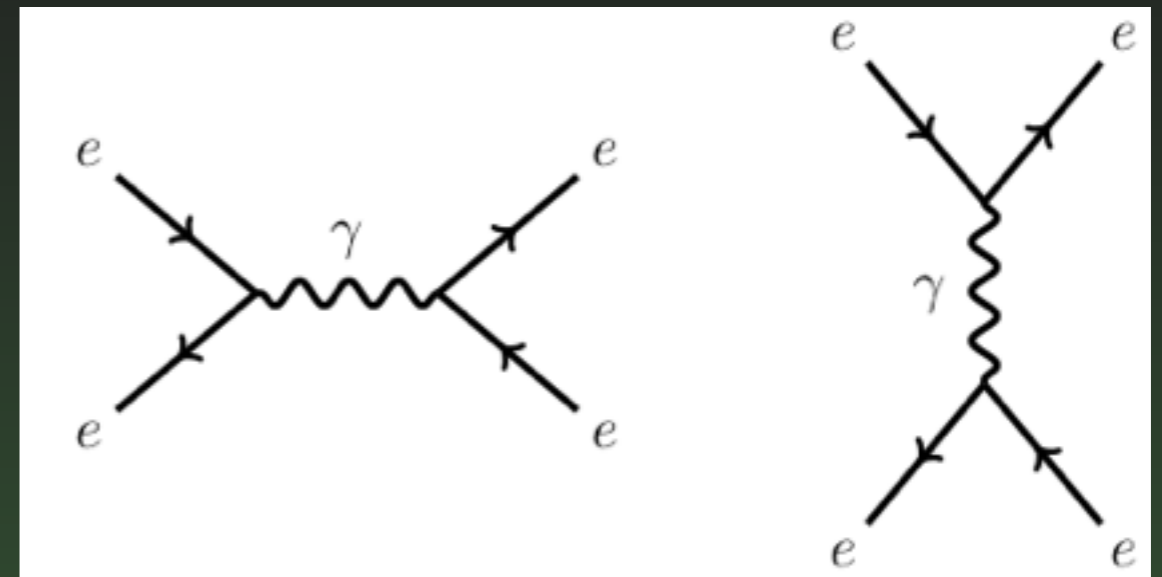
Force forte, quarks et gluons

- Les particules comme les neutrons et protons étant formées de quarks sont les **hadrons** (100M fois < atome)
- proton = 3 quarks (baryons)
- pion = 1 quark + 1 anti-quark
- La force forte tient très solidement les quarks ensemble (équivalent à 14 tonnes)
- Les quarks/gluons n'ont jamais été observés seuls, ils sont toujours accompagnés d'autres quarks/gluons
- Ressentent les 4 forces



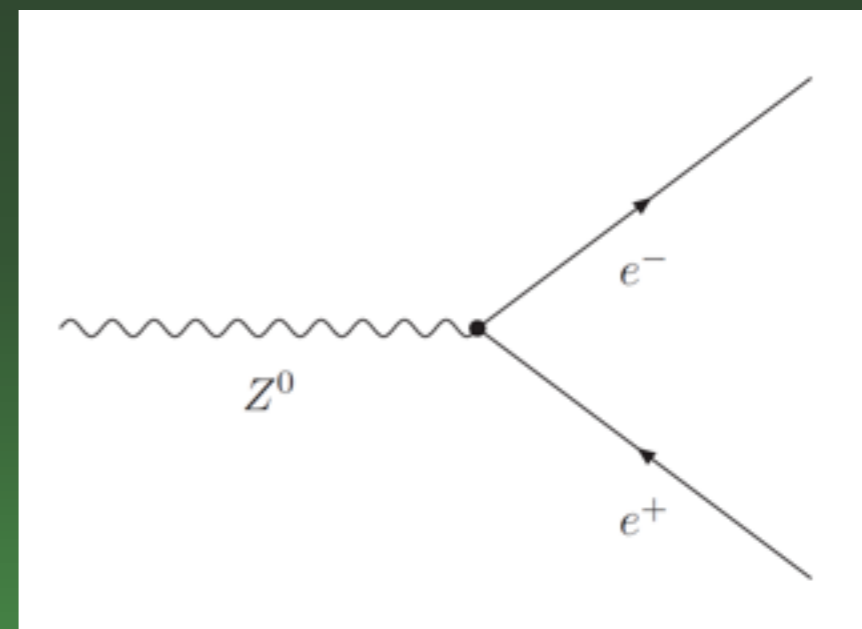
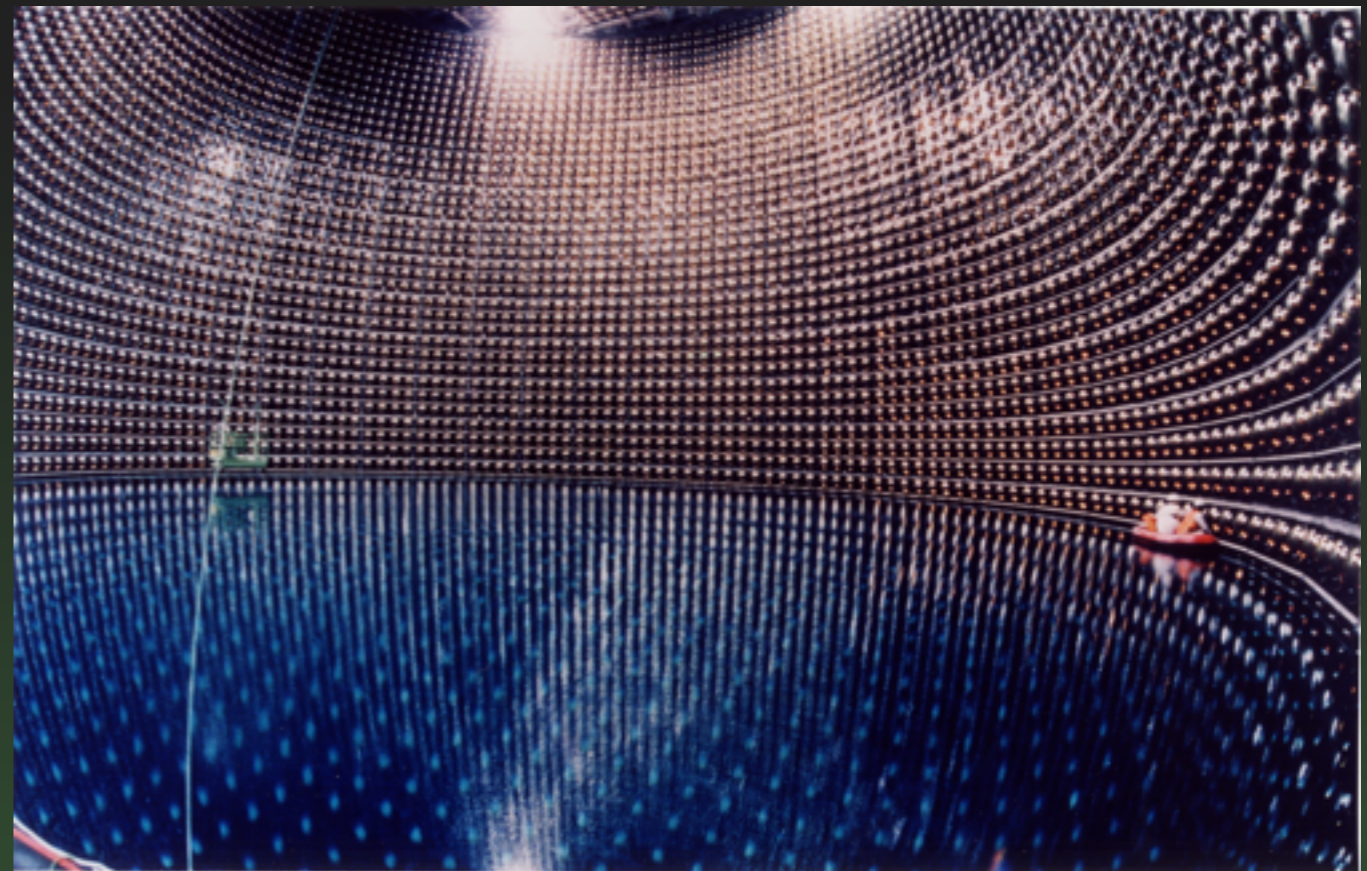
Force électromag., leptons chargés

- Seul l'électron orbite autour de l'atome
- L'électron peut interagir avec le photon de différentes manières
- Le muon (+ lourd) vit assez longtemps pour être observé
- Le tau (++ lourd) se désintègre tout de suite en leptons et quarks
- Ne ressentent pas la force forte



Neutrinos et la force faible

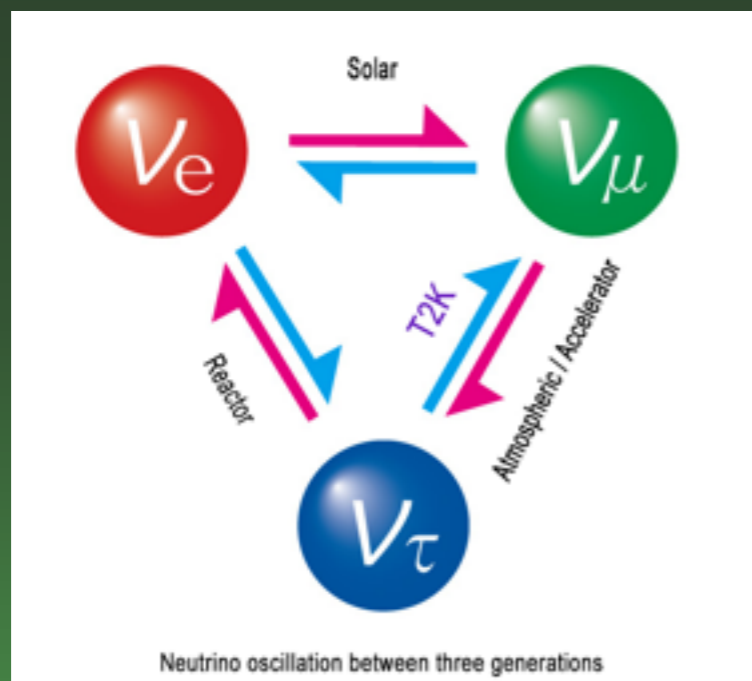
- Les trois autres leptons sont neutres électriquement: les neutrinos
- Ne ressentent que la force nucléaire faible (via boson W, Z), d'où la grande difficulté à les détecter
- Quelle épaisseur de plomb faut-il pour arrêter un neutrino??
- Cet après-midi, vous allez observer de vrais bosons Z



Prix Nobel de physique 2015



- Kajita et McDonald pour la découverte de l'oscillation des neutrinos!
- Prouvant ainsi que les neutrinos ont une masse non-nulle!



Dernier morceau du casse-tête

- Par certaines assumption de symétrie dans le Modèle Standard, les particules seraient toutes sans masse...
- En introduisant un nouveau champ: le **boson de Higgs**, cela a pour effet de briser cette symétrie et les particules acquièrent une masse!
- Ce mécanisme a été prouvé en 2012 avec la découverte expérimentale du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS et CMS au CERN.
- Prix Nobel 2013: Higgs and Englert

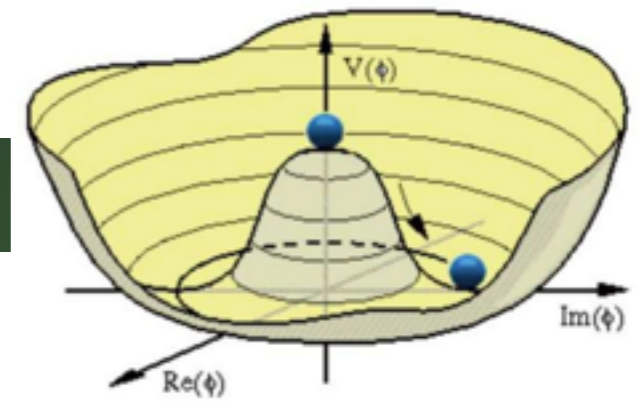
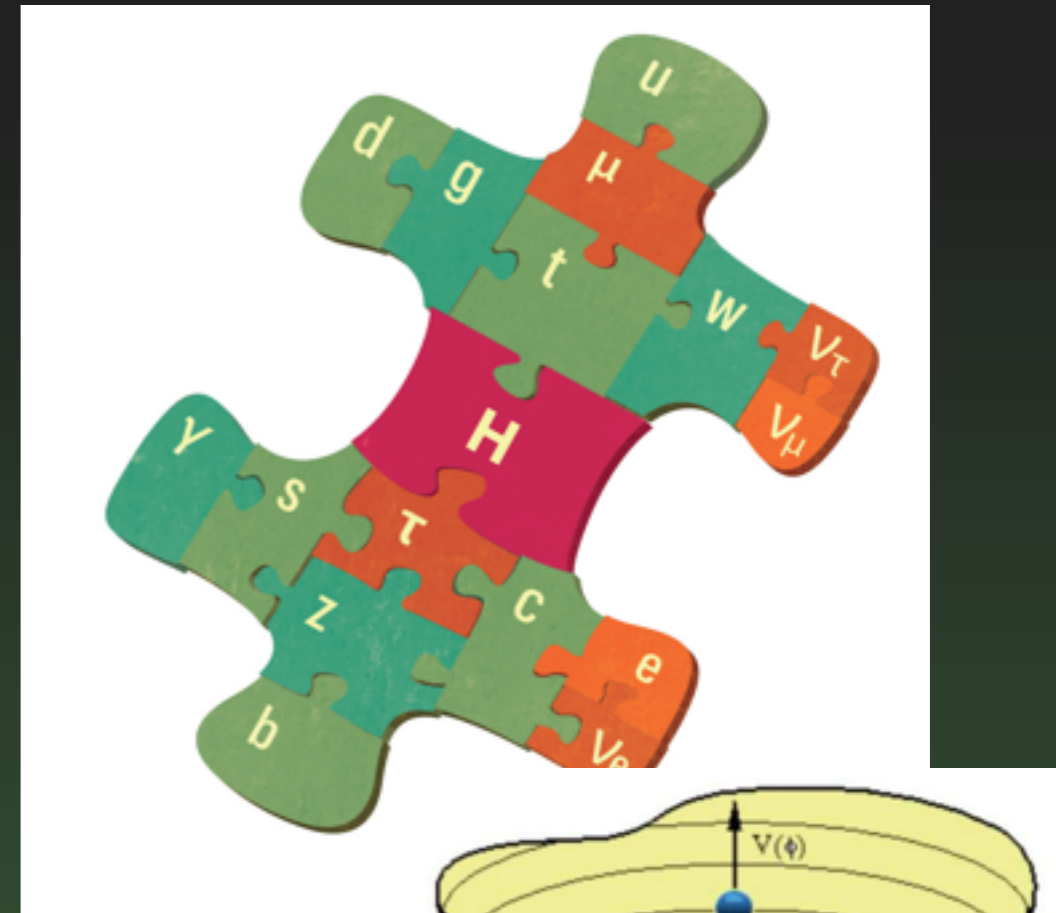


Photo: Prioleat via Wikimedia Commons
François Englert



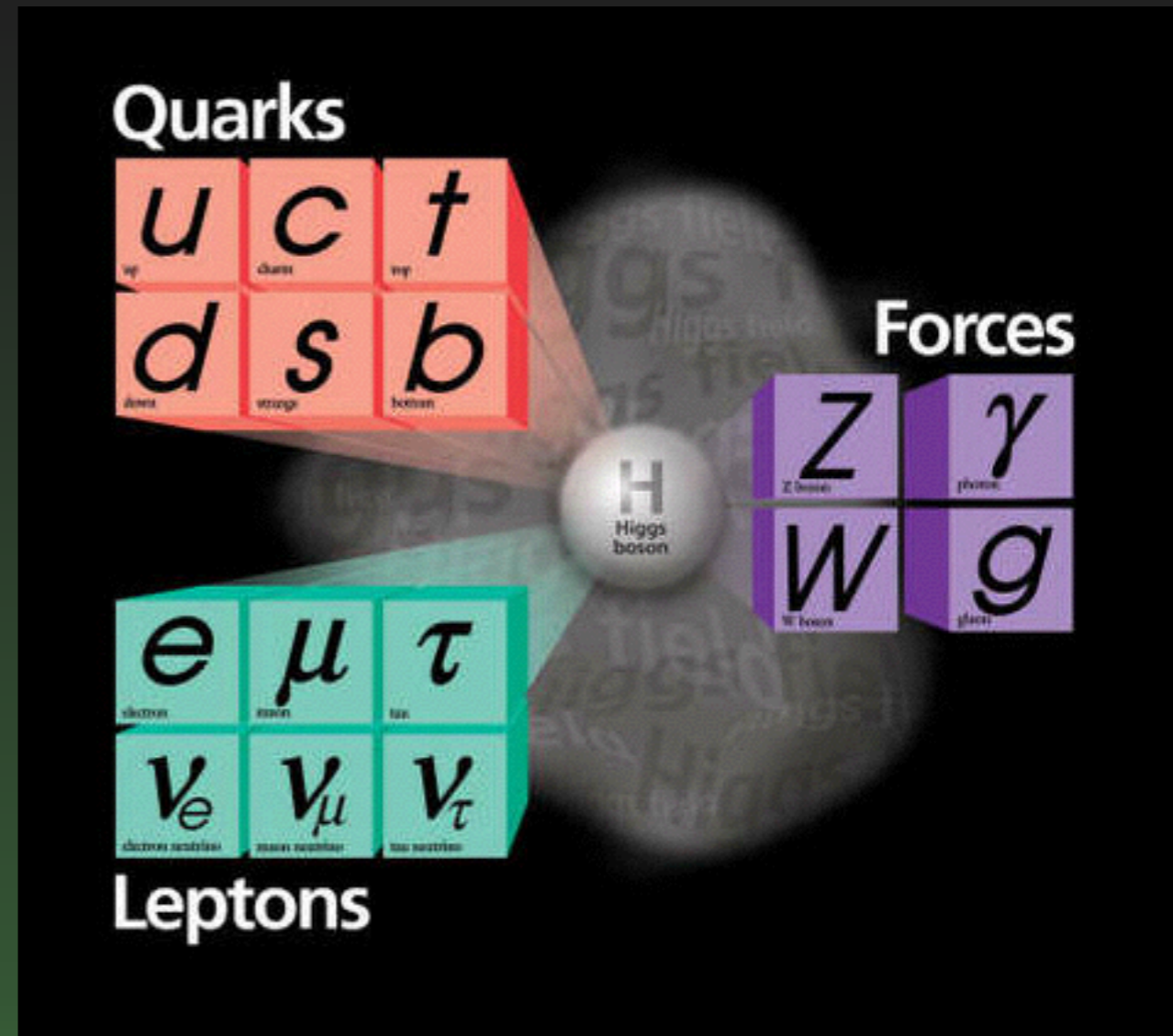
Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons
Peter W. Higgs



The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

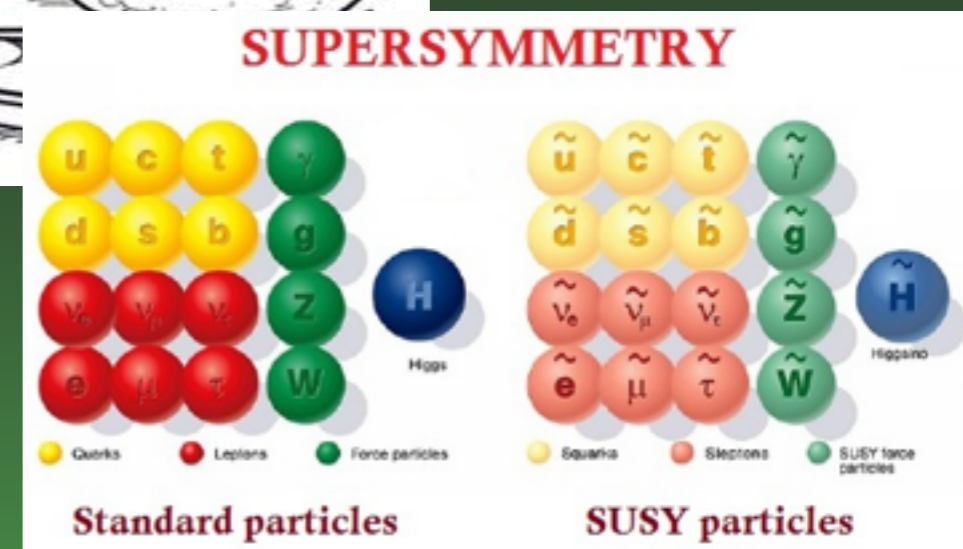
Suite du programme...

- Avec le boson de Higgs en 2012, toutes les particules prédites par le MS sont maintenant découvertes!
- ... Mais c'est loin d'être la fin, plusieurs questions sont sans réponses

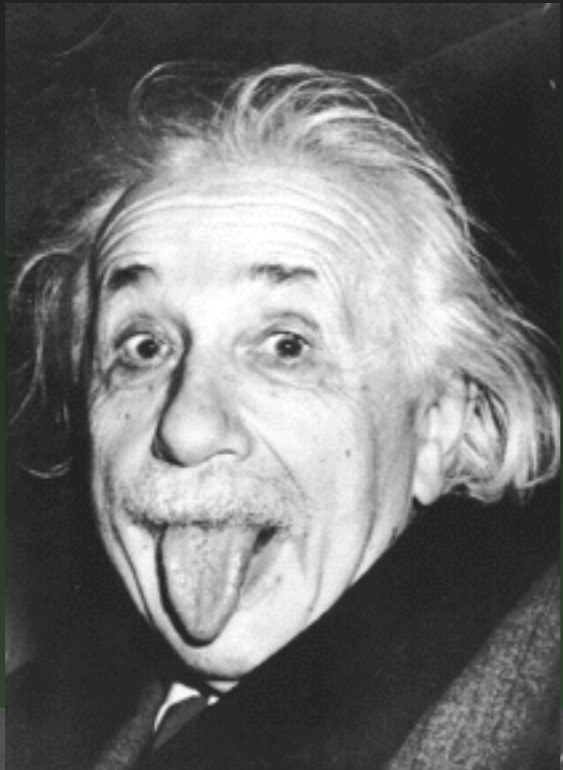


D'autres problèmes...

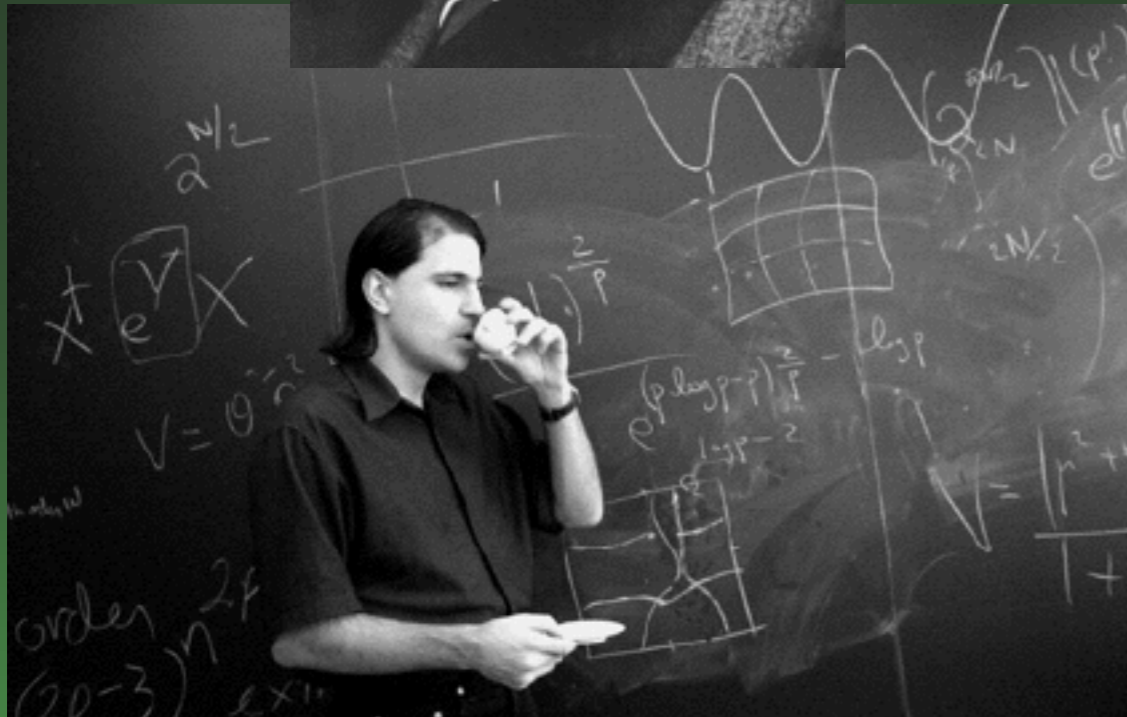
- La masse des neutrinos ne peut être due au boson de Higgs
- Le Modèle Standard décrit seulement 4% de l'univers connu...
 - 73% énergie sombre, accélération des galaxies
 - 23% matière sombre, galaxies plus massives qu'elles paraissent
- Gravité? 3D ou plus?
- Asymétrie matière anti-matière
- 3 familles de quarks/leptons ?
- Le MS comporte beaucoup (trop) de paramètres libres
- etc...



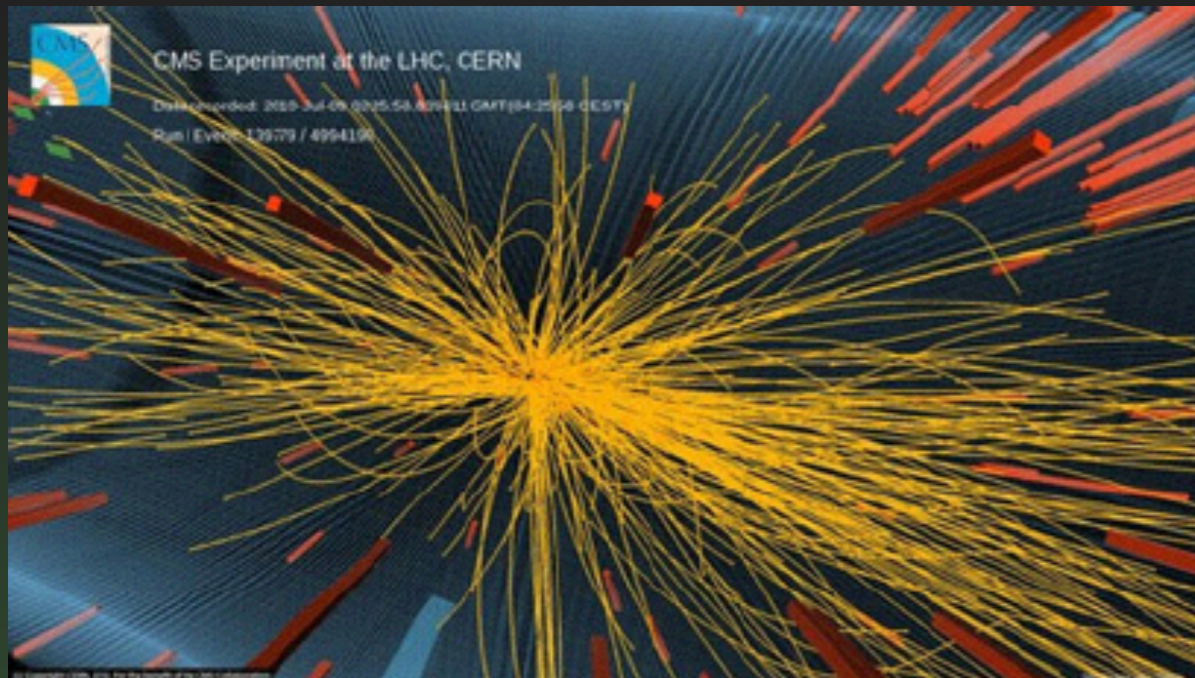
Méthode pour chercher de la nouvelle physique:



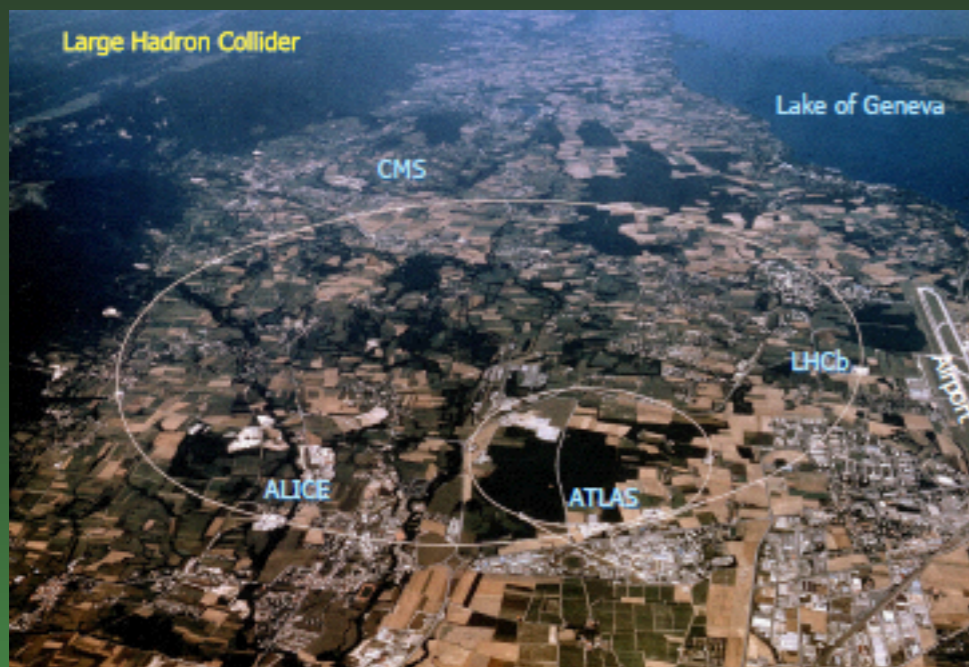
- Travail théorique **et** expérimental:
 - Théorie fait des prédictions... vérifiées par des expériences. Ex: Boson de Higgs
 - Expérience fait une découverte inattendue... expliquée par des théoriciens. Ex: Énergie sombre
- Observations venues de l'espace (rayons cosmiques, neutrinos, matière sombre), sur Terre (radioactivité), observations astrophysiques (satellite)



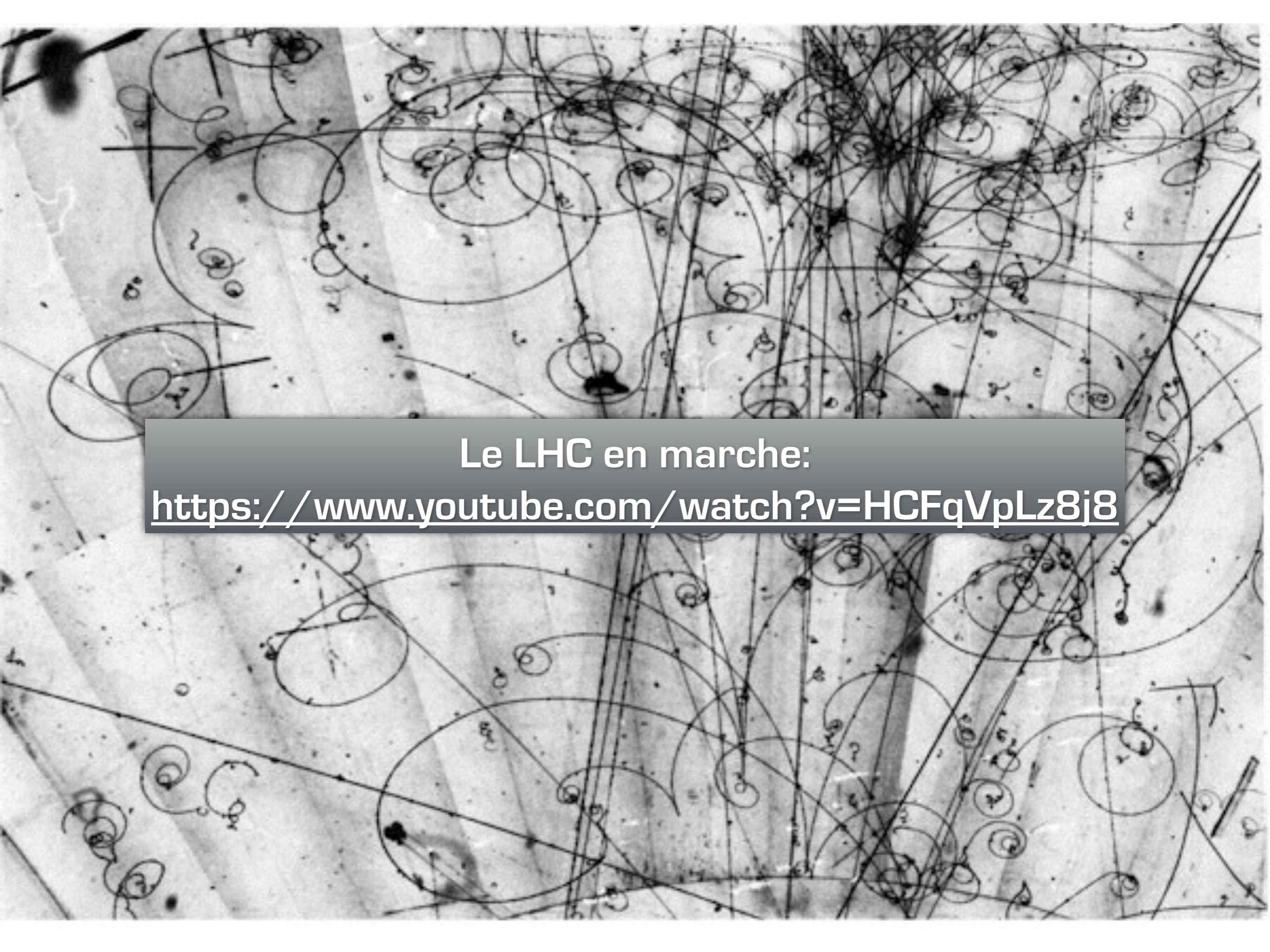
Une des techniques les plus répandues en physique des particules... les collisionneurs!



- Envoyer des particules dans la matière nous permet de voir et de sonder l'intérieur
- Si l'énergie est assez haute, on peut créer de nouvelles particules très massives!
 - On utilise $E=mc^2$
 - C'est le principe du LHC, un accélérateur de protons de 27km de circonférence, qui a permis de créer et mesurer le boson de Higgs!



The image features a large, intricate network of fiber optic connections, represented by a dense web of thin, multi-colored lines (primarily blue, cyan, and green) radiating from a central point. The network is contained within a large, dark octagonal frame. A prominent, semi-transparent red banner with rounded corners is centered horizontally across the middle of the network. On this banner, the word "QUESTIONS?" is written in a bold, white, sans-serif font. The background is black, which makes the vibrant colors of the fiber network stand out. The overall aesthetic is technical and futuristic.



Le LHC en marche:

<https://www.youtube.com/watch?v=HCFqVpLz8j8>



plan

- Intro: utilité, but de la physique fondamentale, qu'est-ce que la physique des particules
- Ce qu'on connaît: matière, forces
- Ce qui connecte tout ça: le Modèle Standard, fermions vs. bosons, quarks et force forte, leptons charge électrique, neutrino et force faible + slide sur le prix nobel 2015
- et le Higgs...!
- suite... ce que le MS ne prédit pas, limite de la théorie, questions ouvertes
- comment y répondre, démarche scientifique expérience vs. théorie
- au-delà du MS, quelques idées