

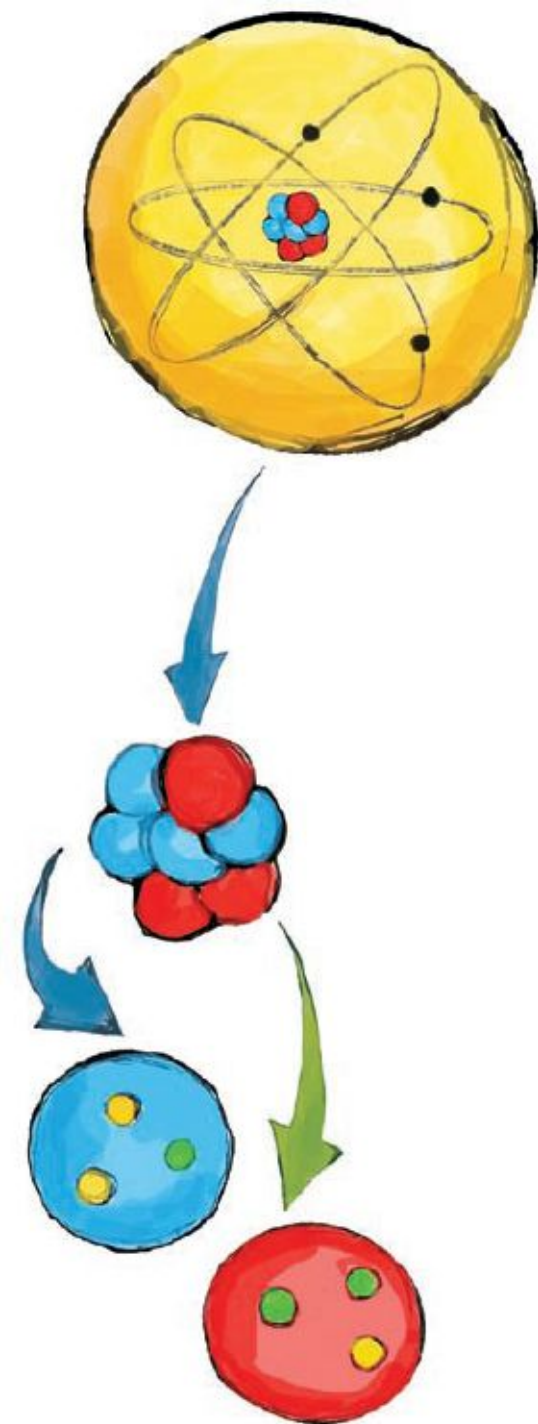
Particules et Interactions

Nikola Makovec
Nicolas Arnaud
Dimitris Varouchas
Corentin Allaire

Laboratoire de Physique des 2 infinis
Irène Joliot-Curie
CNRS/IN2P3, Université Paris-Saclay



Masterclasses 2024



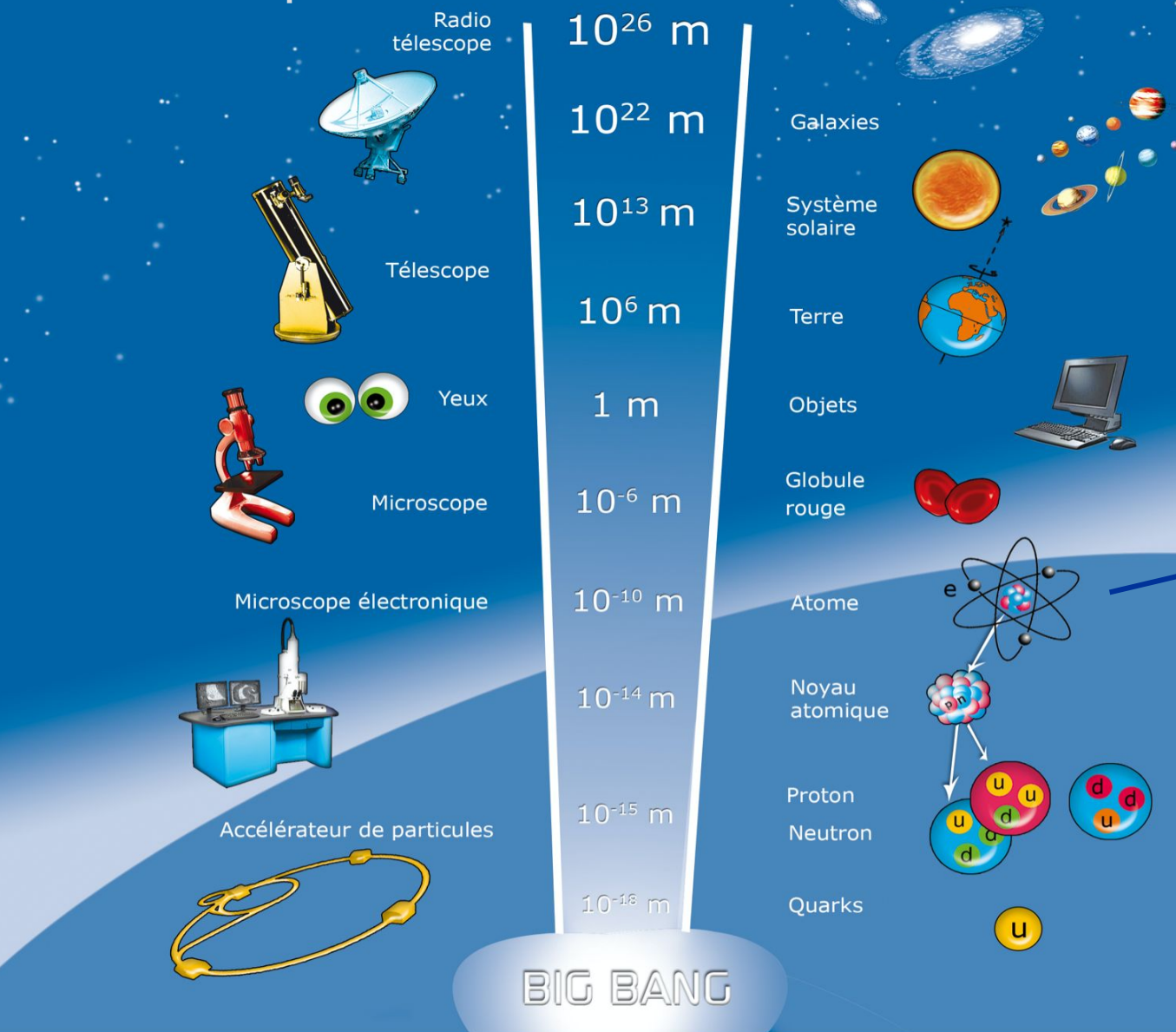
Einstein in the 21st Century

Les particules élémentaires : des blocs fondamentaux (sans structure interne) qui constituent l'ensemble de la matière ordinaire

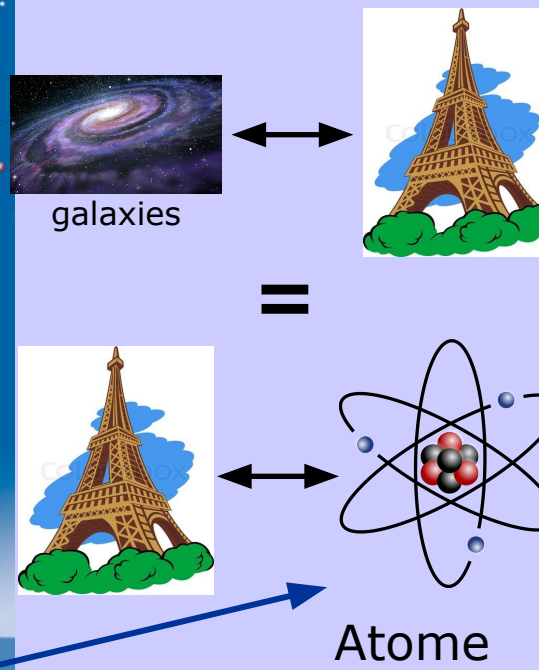


Une plongée dans l'infiniment petit...

UNIVERS

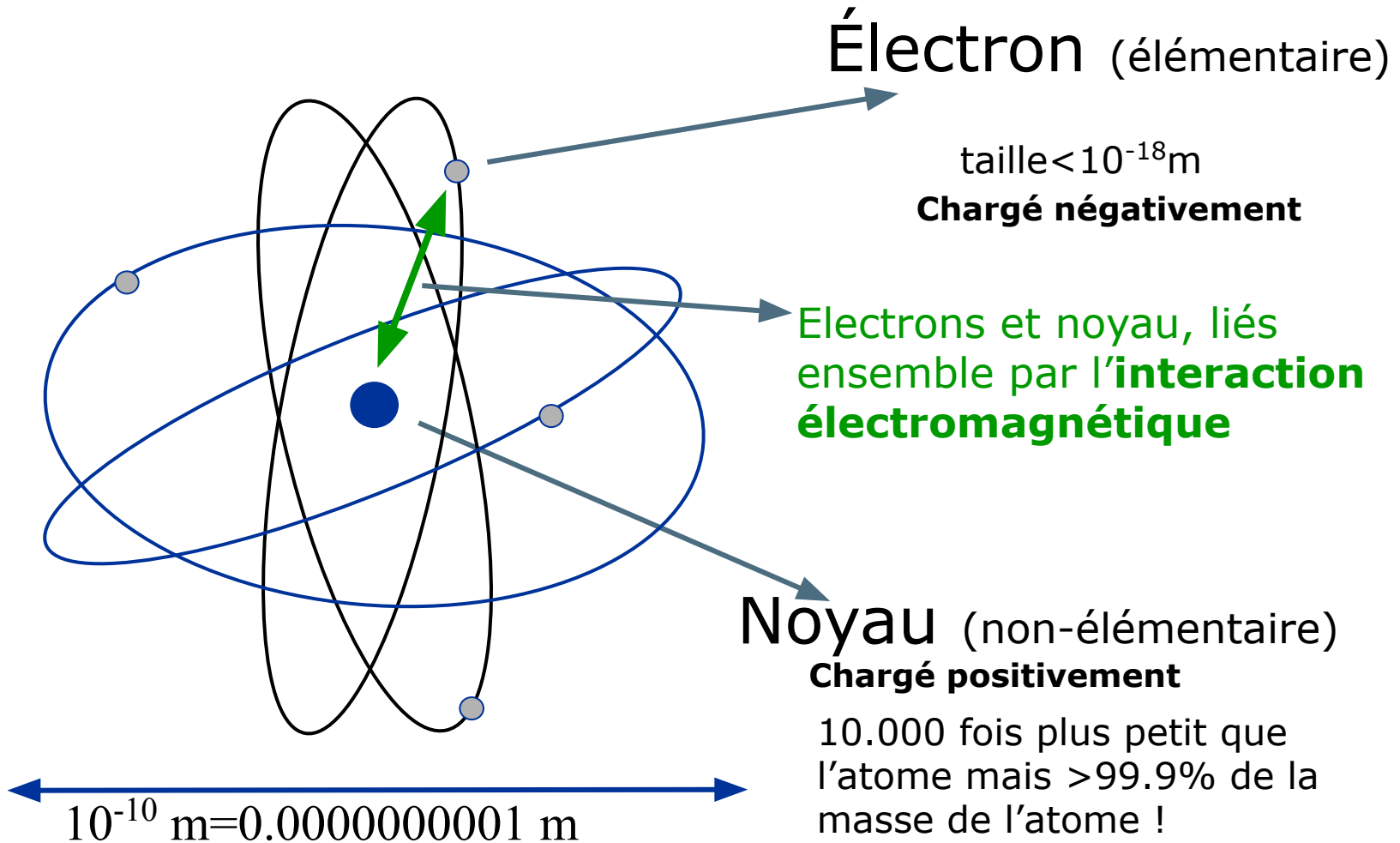


Différence de taille



Structure de l'atome (du grec : indivisible)

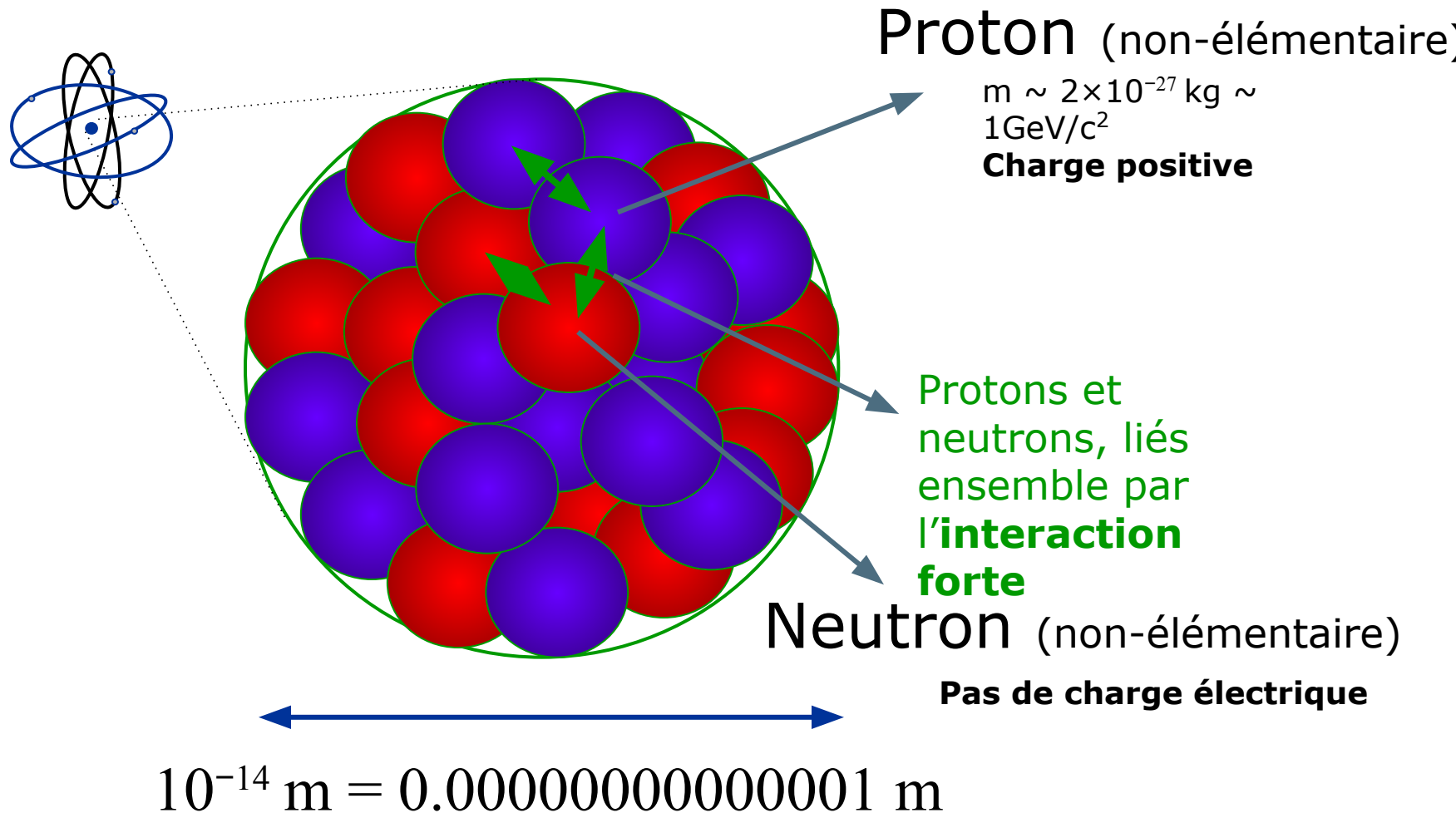
Structure de l'atome (du grec : indivisible)



- 10 millions de fois plus petit qu'une fourmi
- 50 mille fois plus petit qu'une bactérie

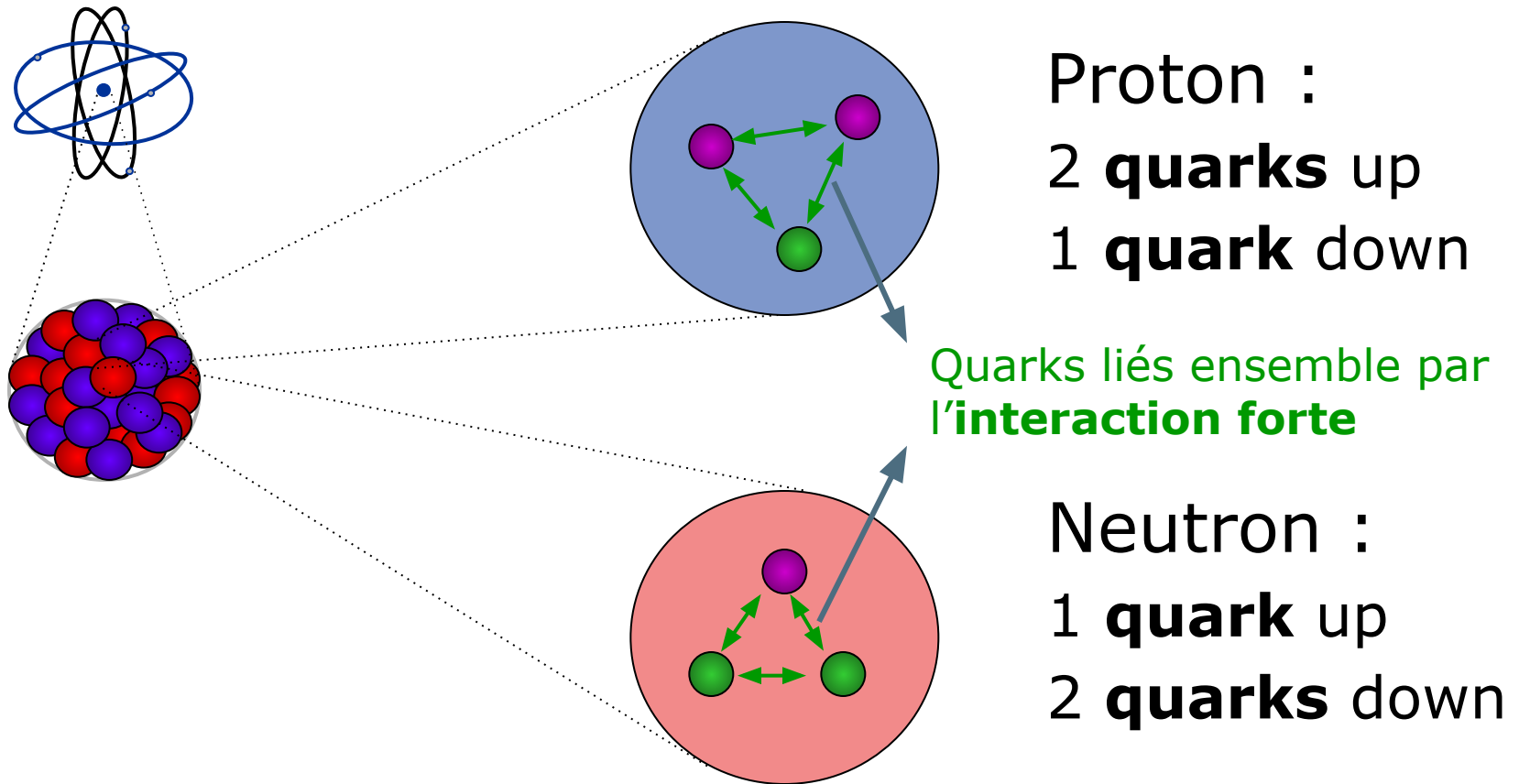


Structure du noyau



Structure des protons et des neutrons

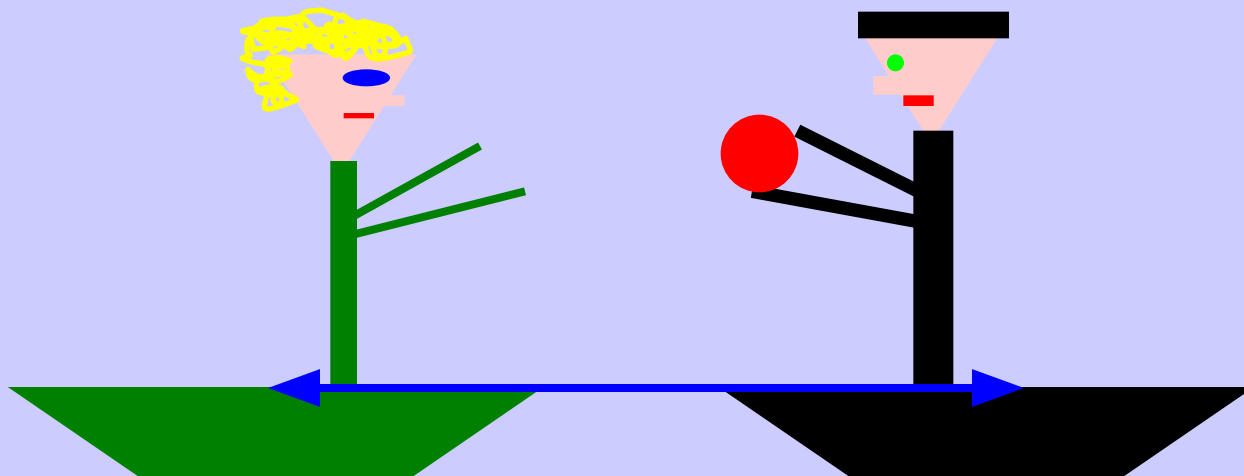
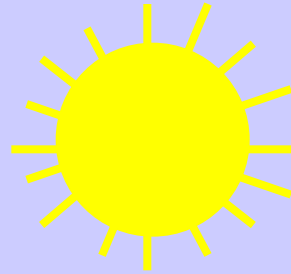
7



10^{-15} m = 0.000000000000001 m

Les quarks **sont** des particules **élémentaires**

Interagir = échanger une particule



- Les **ballons** sont les **médiateurs** de la force qui écarte les 2 bateaux.
- La **portée** dépend de la **masse** du ballon

Bosons de jauge : médiateurs des interactions fondamentales



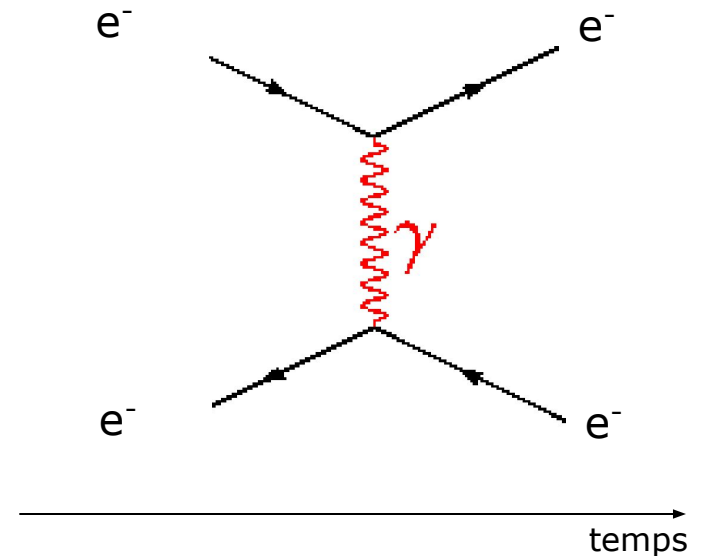
L'interaction électromagnétique

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



Médiateur : **photon**

$m=0$

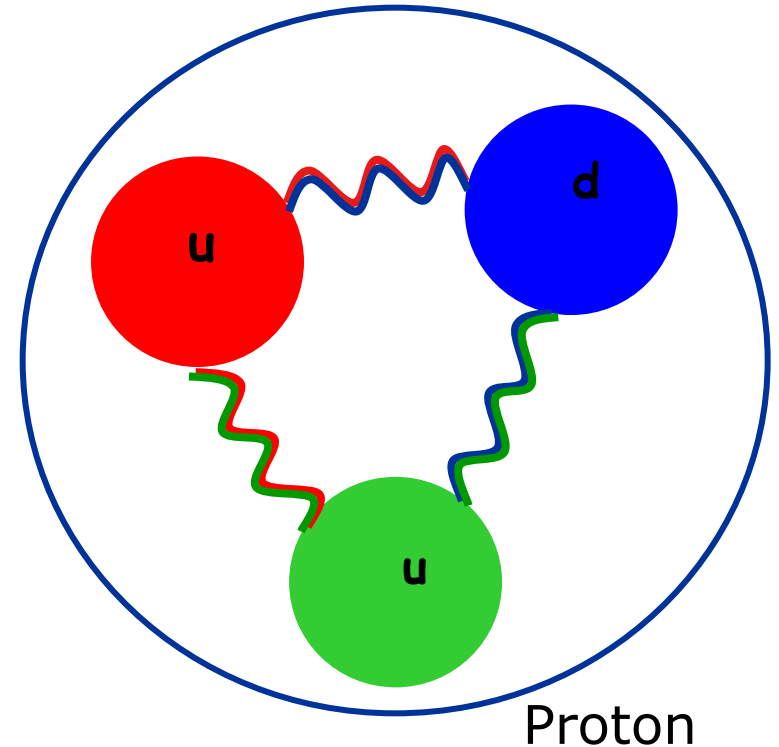


L'interaction nucléaire forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Médiateurs: **8 gluons**

$m=0$



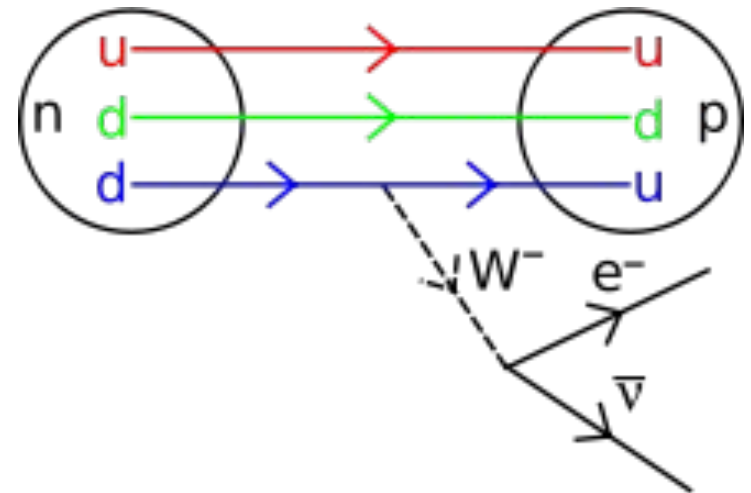
Les quarks n'existent pas à l'état libre : ils ne peuvent pas être isolés, et ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons** (assemblages de quarks) collés par les **gluons**

L'interaction nucléaire faible

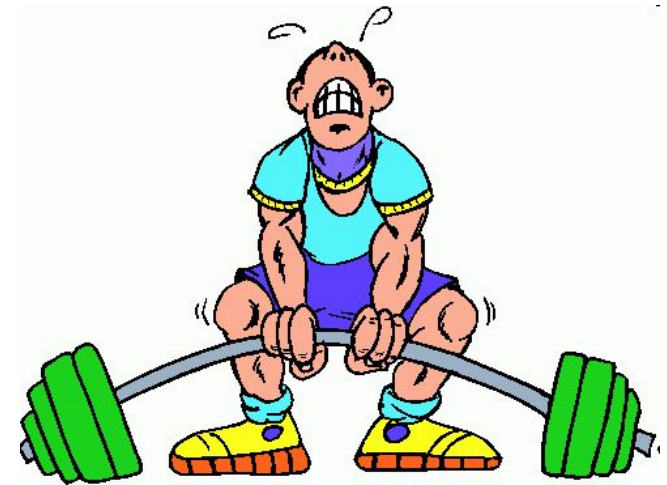
- Responsable de:
 - Radioactivité β
 - Participe aux réactions nucléaires au cœur du Soleil

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

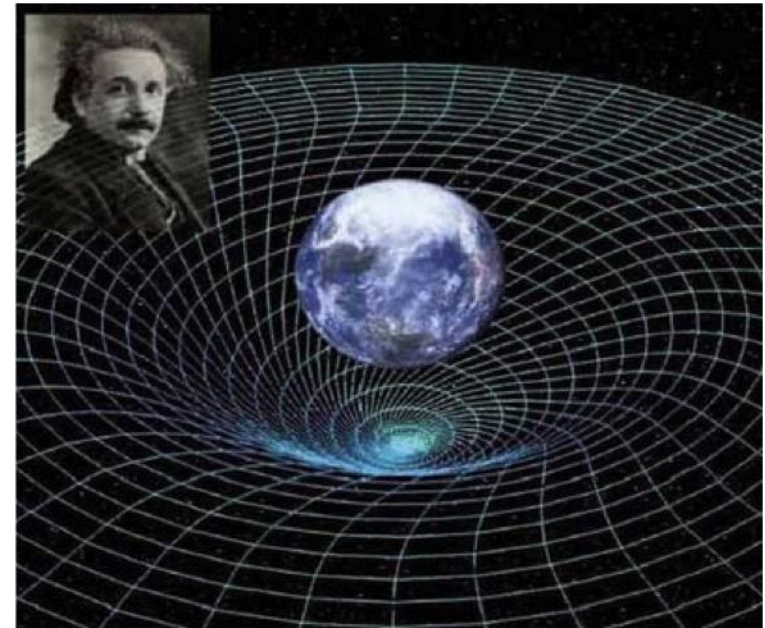
Particules massives



- 10 000 fois plus faible que l'interaction électromagnétique
- 1 000 000 fois plus faible que l'interaction forte



- Responsable de la pesanteur, des marées, des mouvements des planètes, ...
- **Force complètement négligeable à l'échelle du noyau**
 - 10^{-32} fois plus faible que l'interaction faible
 - Interaction uniquement attractive
 - ⇒ dominante à grande échelle
- Décrite par la relativité générale
 - La gravitation est issue d'une déformation de l'espace temps



Médiateur hypothétique : **graviton**

Chimie : tableau périodique des éléments ?

Chimie : tableau périodique des éléments ?

Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe → I A 18 VIII A
Période 1 2 13 14 15 16 17

↓

1 Hydrogène 1 H 1,007975 Hélio 2 He 4,002602

2 Lithium 3 Li 6,9395 Béryllium 4 Be 9,012183 Bore 5 B 10,8135 Carbone 6 C 12,0106 Azote 7 N 14,006855 Oxygène 8 O 15,99940 Fluor 9 F 18,99840316 Néon 10 Ne 20,1797 (6)

← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
← numéro atomique
← symbole chimique
← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]
[CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

3 Sodium 11 Na 22,98976928 Magnésium 12 Mg 24,3055 Aluminium 13 Al 26,9815385 Silicium 14 Si 28,085 (1) Phosphore 15 P 30,97376200 Soufre 16 S 32,0675 Chlore 17 Cl 35,4515 Argon 18 Ar 39,948 (1)

4 Potassium 19 K 39,0983 (1) Calcium 20 Ca 40,078 (4) Scandium 21 Sc 44,955908 (6) Titane 22 Ti 47,867 (1) Vanadium 23 V 50,9415 (1) Chrome 24 Cr 51,9961 (6) Manganèse 25 Mn 54,938044 Fer 26 Fe 55,845 (2) Cobalt 27 Co 58,933194 Nickel 28 Ni 58,6934 (4) Cuivre 29 Cu 63,546 (3) Zinc 30 Zn 65,38 (2) Gallium 31 Ga 69,723 (1) Germanium 32 Ge 72,630 (8) Arsenic 33 As 74,921595 Sélénium 34 Se 78,971 (8) Brome 35 Br 79,904 Krypton 36 Kr 83,798 (2)

5 Rubidium 37 Rb 85,4678 (3) Strontium 38 Sr 87,62 (1) Yttrium 39 Y 88,90584 Zirconium 40 Zr 91,224 (2) Niobium 41 Nb 92,90637 Molybdène 42 Mo 95,95 (1) Technétium 43 Tc [98] Ruthénium 44 Ru 101,07 (2) Rhodium 45 Rh 102,90550 Palladium 46 Pd 106,42 (1) Argent 47 Ag 107,8682 (2) Cadmium 48 Cd 112,414 (4) Indium 49 In 114,818 (1) Étain 50 Sn 118,710 (7) Antimoine 51 Sb 121,760 (1) Tellure 52 Te 127,60 (3) Iode 53 I 126,90447 Xénon 54 Xe 131,293 (6)

6 Césium 55 Cs 132,905452 Baryum 56 Ba 137,327 (7) Lanthanides 57-71 Hafnium 72 Hf 178,49 (2) Tantalum 73 Ta 180,94788 Tungstène 74 W 183,84 (1) Rhénium 75 Re 186,207 (1) Osmium 76 Os 190,23 (3) Iridium 77 Ir 192,217 (3) Platine 78 Pt 195,084 (9) Or 79 Au 196,966569 Mercure 80 Hg 200,592 (3) Thallium 81 Tl 204,3835 Plomb 82 Pb 207,2 (1) Bismuth 83 Bi 208,98040 Polonium 84 Po [209] Astate 85 At [210] Radon 86 Rn [222]

7 Francium 87 Fr [223] Radium 88 Ra [226] Actinides 89-103 Rutherfordium 104 Rf [267] Dubnium 105 Db [268] Seaborgium 106 Sg [269] Bohrium 107 Bh [270] Hassium 108 Hs [277] Meitnérium 109 Mt [278] Darmstadtium 110 Ds [281] Roentgenium 111 Rg [282] Copernicium 112 Cn [285] Nihonium 113 Nh [286] Flérovium 114 Fl [289] Moscovium 115 Mc [289] Livermorium 116 Lv [293] Tennessé 117 Ts [294] Oganesson 118 Og [294]

Lanthane 57 La 138,90547 Cérium 58 Ce 140,116 (1) Praséodyme 59 Pr 140,90766 Néodyme 60 Nd 144,242 (3) Prométhium 61 Pm [145] Samarium 62 Sm 150,36 (2) Europium 63 Eu 151,964 (1) Gadolinium 64 Gd 157,25 (3) Terbium 65 Tb 158,92535 Dysprosium 66 Dy 162,500 (1) Holmium 67 Ho 164,93033 Erbium 68 Er 167,259 (3) Thulium 69 Tm 168,93422 Ytterbium 70 Yb 173,045 Lutécium 71 Lu 174,9668

Actinium 89 Ac [227] Thorium 90 Th 232,0377 Protactinium 91 Pa 231,03588 Uranium 92 U 238,02891 Neptunium 93 Np [237] Plutonium 94 Pu [244] Américium 95 Am [243] Curium 96 Cm [247] Berkélium 97 Bk [247] Californium 98 Cf [251] Einsteinium 99 Es [252] Fermium 100 Fm [257] Mendélévium 101 Md [258] Nobelium 102 No [259] Lawrencium 103 Lr [266]

Métaux Non métaux

Alcalins Alcalino-terreux Lanthanides Actinides Métaux de transition Métaux pauvres Métalloïdes Autres non-métaux Halogènes Gaz nobles Non classés primordial désintégration d'autres éléments synthétique

Représente tous les éléments chimiques, ordonnés par numéro atomique croissant, et organisés en fonction de leur configuration électronique, qui définit leurs propriétés chimiques

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

Leptons

quarks



Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

Leptons

quarks



Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

stable

instable

Fermions

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

Bosons

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

Leptons

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

- Pour chaque **particule**, il y a une **antiparticule**, qui a la **même masse** et qui participe aux **mêmes interactions**, avec une **charge opposée**

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

quarks

Leptons

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

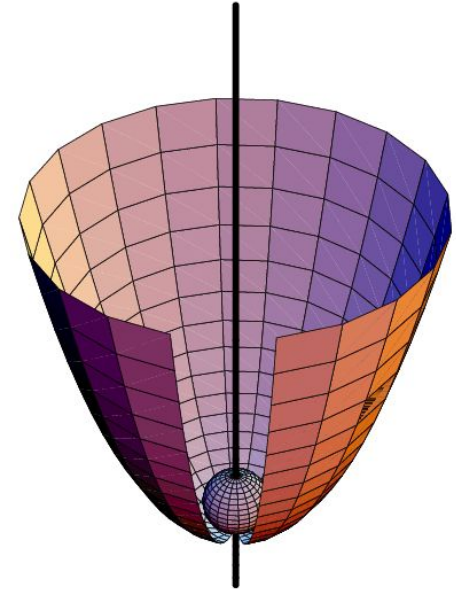
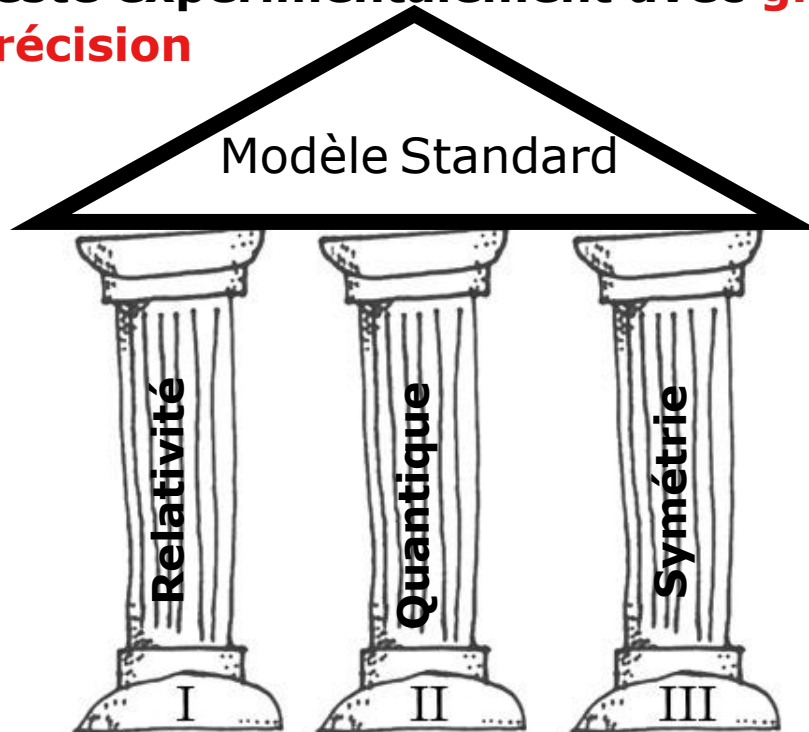
Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

- Le **monde microscopique** est constitué de **particules** de matière, qui interagissent entre elles via des **interactions (forces)**
- La **théorie** décrivant la **matière** et ses **interactions** est le **Modèle**

Le Modèle Standard

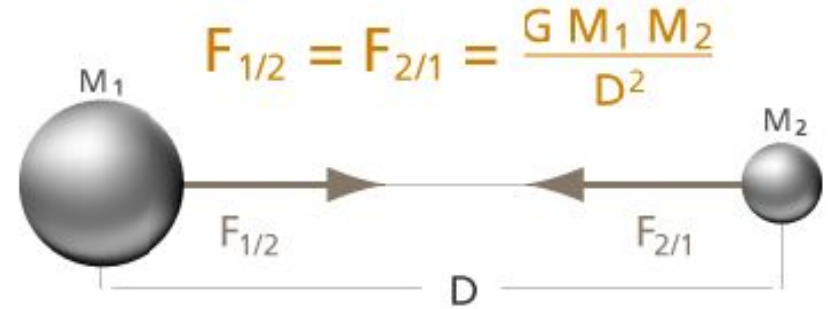
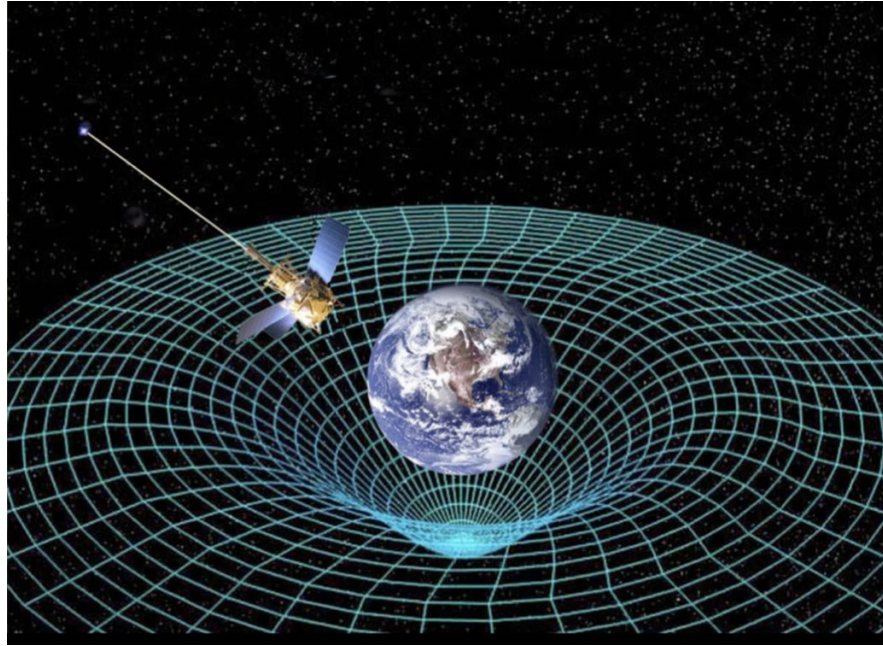
- Elaboré dans les années 1960-70
- Décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et les **interactions forte, faible et électromagnétique**
 - Mais pas la gravitation!
- Testé expérimentalement avec **grande précision**



- Un système est symétrique quand, sa forme reste inchangée issue d'une transformation.
- Groupe de symétrie (Invariance de jauge) est fondamental dans la théorie du Modèle Standard

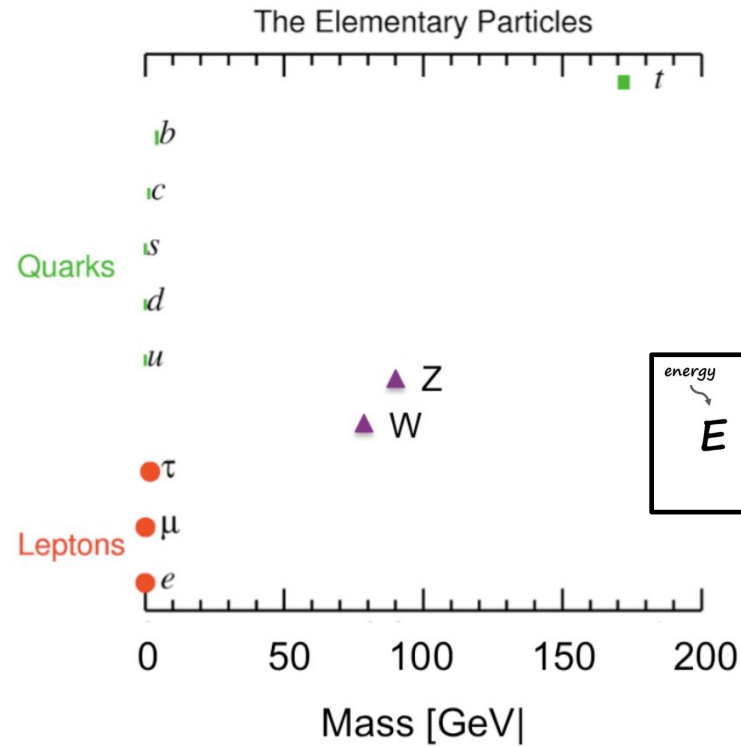
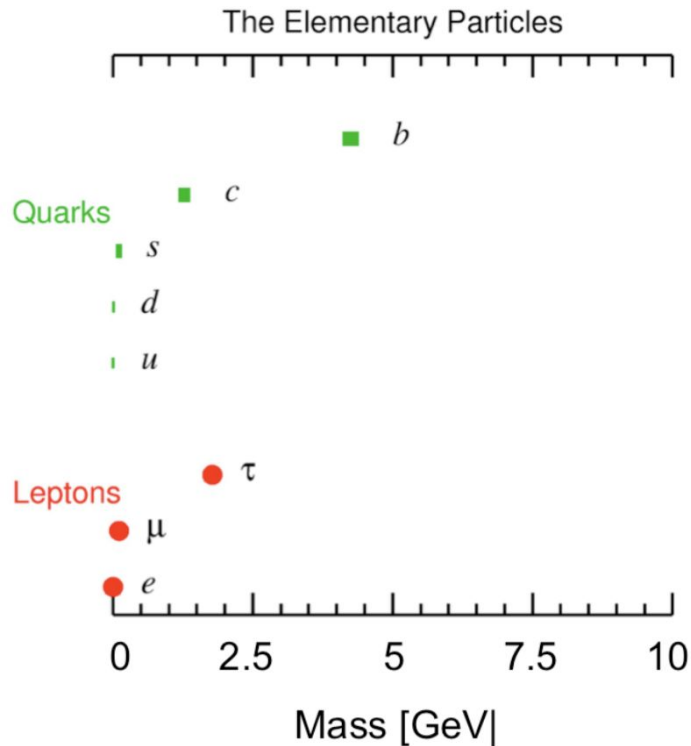
Définition de la masse

Définition de la masse



- La **masse** est la **propriété** d'un objet qui "**s'oppose**" à l'**accélération** selon la loi de Newton, $\mathbf{a} = \mathbf{F}/\mathbf{m}$
- C'est ce qu'on appelle la **masse inertielle**
- En même temps c'est la propriété d'un objet, ce qui lui permet d'**attirer** d'autres **corps** par **gravité** : c'est la **masse gravitationnelle**

Définition de la masse



$$E = mc^2$$

energy mass squared
speed of light (constant)

- Dans le monde subatomique, c'est seulement la **masse inertielle** qui est **considérée**
- Interaction **gravitationnelle** est **trop faible** à cette échelle
- On mesure la masse d'une particule
 - En mesurant l'**énergie** qu'il faut pour la **créer** au **repos**
 - En mesurant la **masse invariante** de ses **produits** de **désintégration**
 - La **masse** est la propriété qui **empêche** les **particules** de **se déplacer** à la **vitesse** de la **lumière**

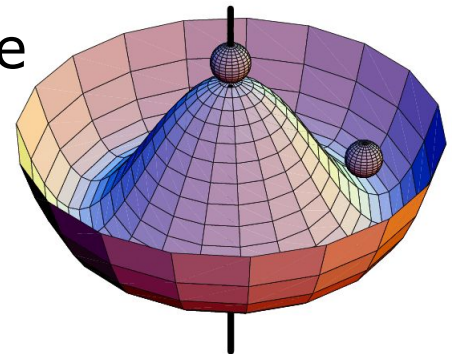
Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- La masse quantifie l'inertie du corps
 - Plus un objet est massif plus il est difficile à mettre en mouvement
- Invariance de jauge
 - ⇒ $\text{masse}=0 \Leftrightarrow v=c$
 - ⇒ contradiction avec l'expérience



■ Mécanisme de Higgs

- La masse n'est pas une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de l'interaction de la particule avec le champ de Higgs
- Découvert en 1964 par:
 - R. Brout and F. Englert
 - P.Higgs
 - G. Guralnik, C. R. Hagen, and T. Kibble





Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Le photon: masse nulle



L'électron: petite masse



Le boson Z: grande masse



Plus difficile à mettre en mvt

L'action du champ de Higgs est équivalent à une sorte de viscosité du vide

Le boson de Higgs

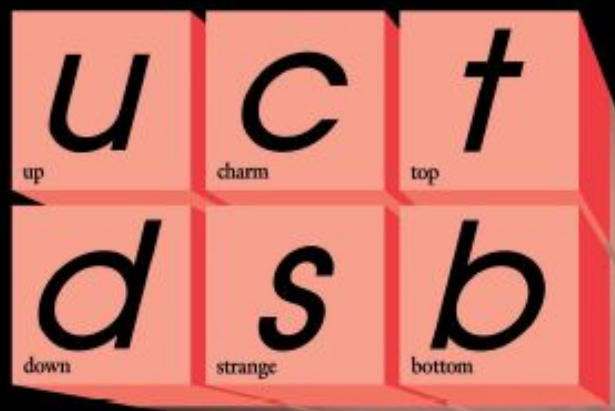
Boson de Higgs = le “composant” du champ de Higgs
Découvert au LHC (CERN) en 2012



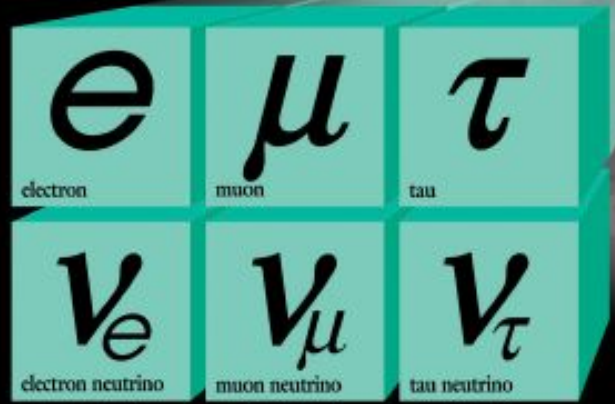
Le boson de Higgs joue un rôle central dans le mécanisme qui explique la masse des particules élémentaires

Matière

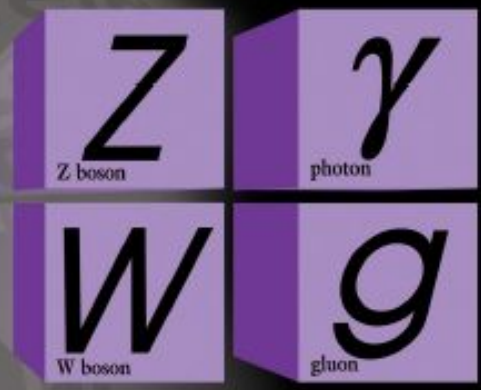
quarks



Leptons

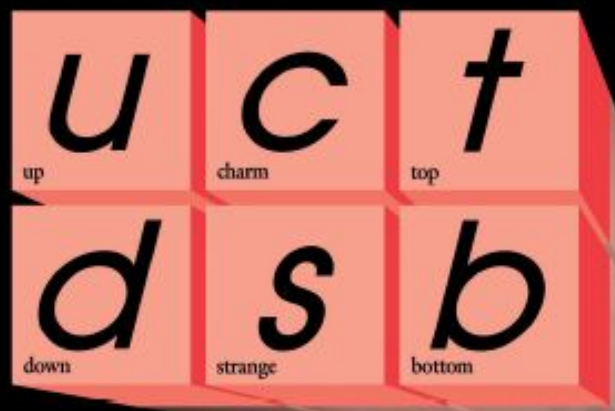


Forces

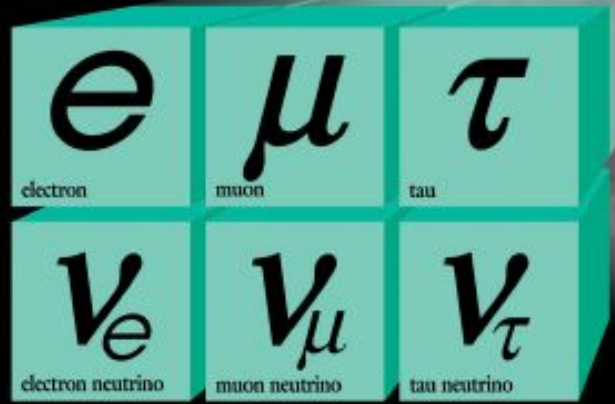


Matière

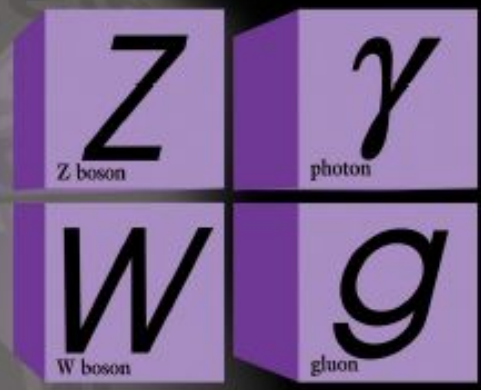
quarks



Leptons

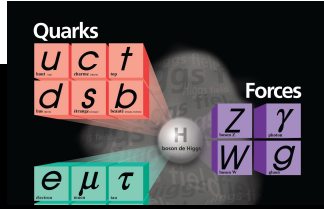


Forces

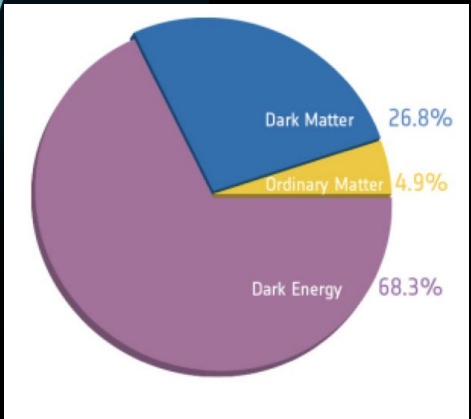
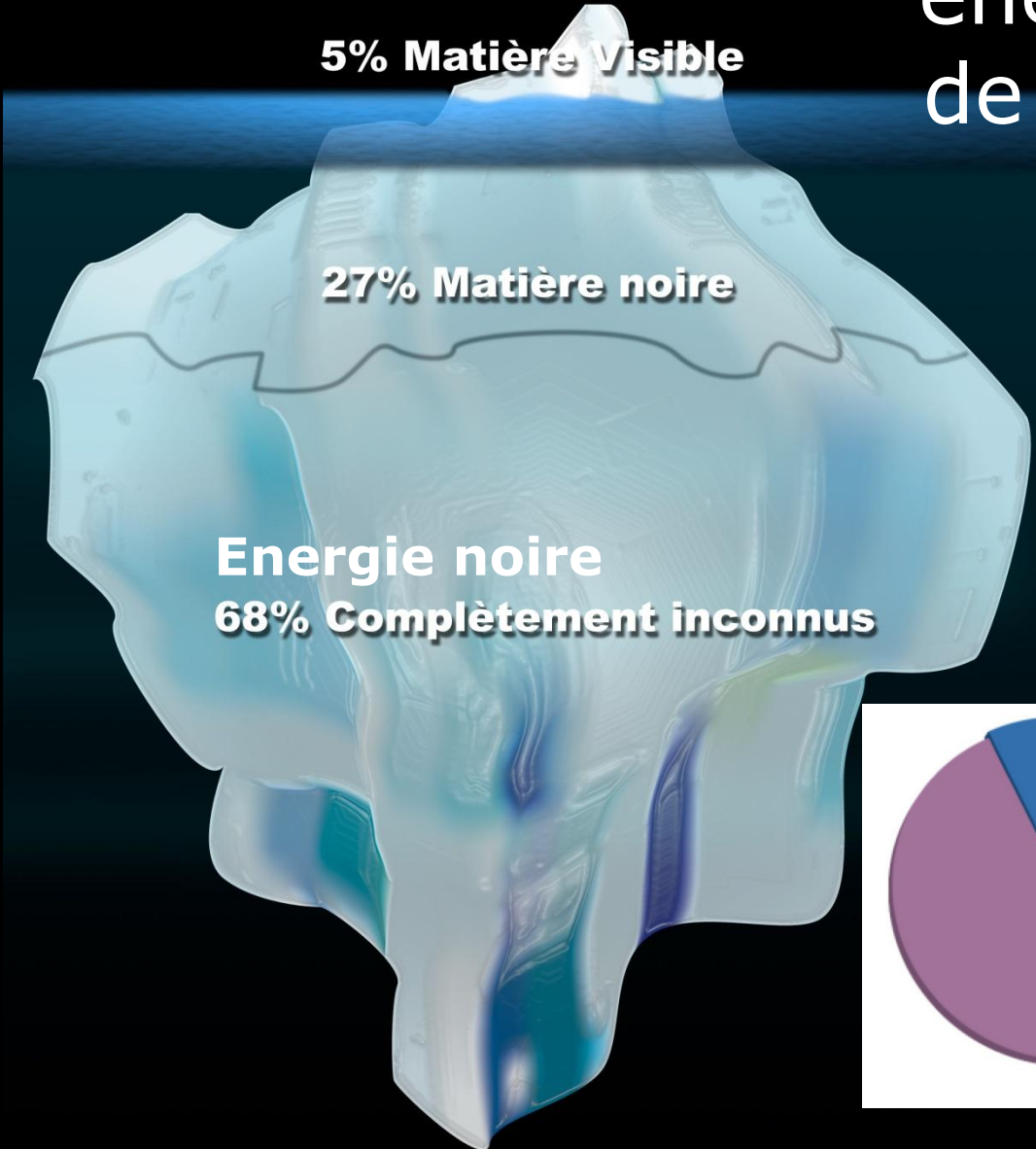


5% Matière Visible





Le contenu énergétique de l'Univers



Résumé

■ Particules de matières : **fermions**

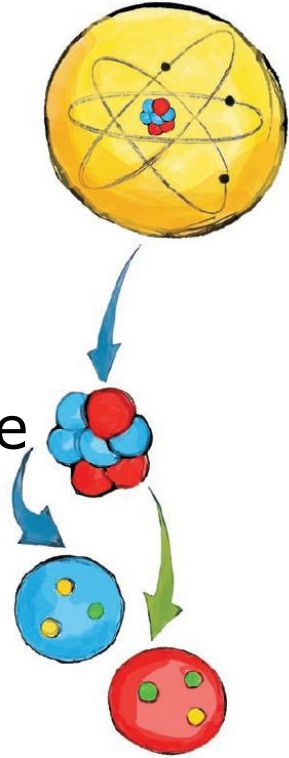
- Particules stables et « utiles » pour bâtir l'univers:
 - électron, quark up et quark down
 - proton = 2 quarks u et un quark d
- Particules instables:
 - muon, tau, quark étrange,...
- A chaque particule est associée une antiparticule

■ Particules d'interactions : **bosons**

- Photon: interaction électromagnétique
- Boson Z/W: interaction faible
- Gluon: interaction forte

- Le **Modèle Standard** est le cadre théorique qui décrit les (anti-)particules et leurs interactions

- La **masse des particules élémentaires** provient de l'interaction avec le **champ de Higgs** qui se manifeste également par l'existence du **boson de Higgs**

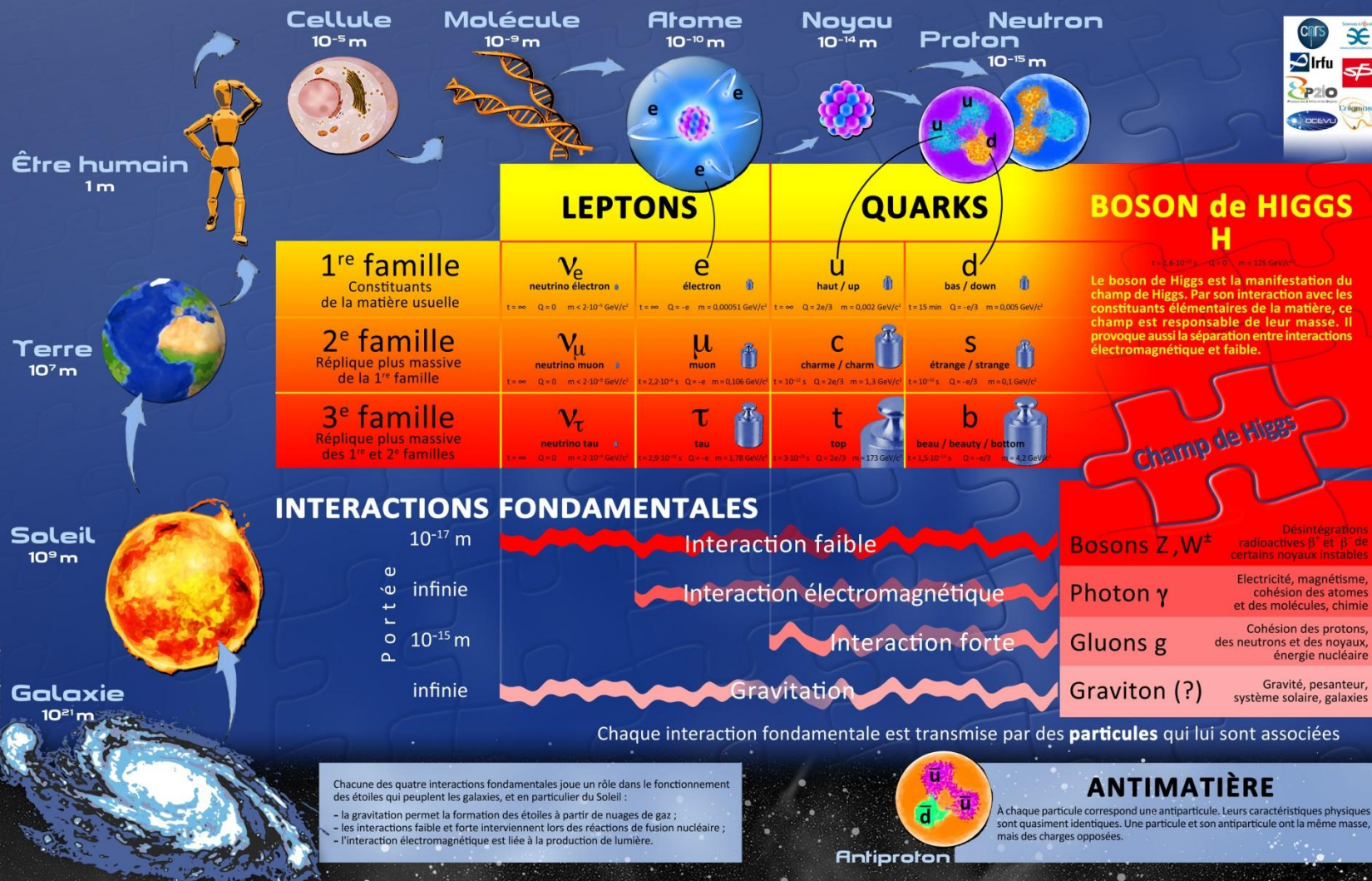


The image features a classic Looney Tunes ending screen. It consists of a series of concentric circles in shades of red and black, creating a tunnel-like effect. In the center, the text "That's all Folks!" is written in a white, elegant cursive font. The text is positioned diagonally across the center of the circles.

That's all Folks!

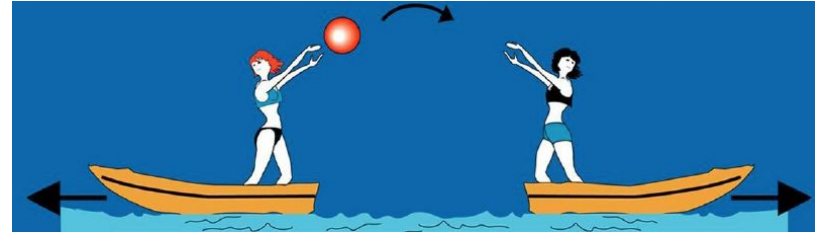
Nouvelle affiche des composants élémentaires (2014)

Composants élémentaires de la matière



Les interactions

● **Quatre interactions** décrivent le monde connu, et se manifestent par l'échange de **particules médiatrices**: les **bosons de jauge**

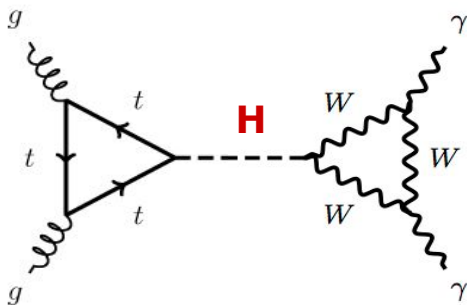
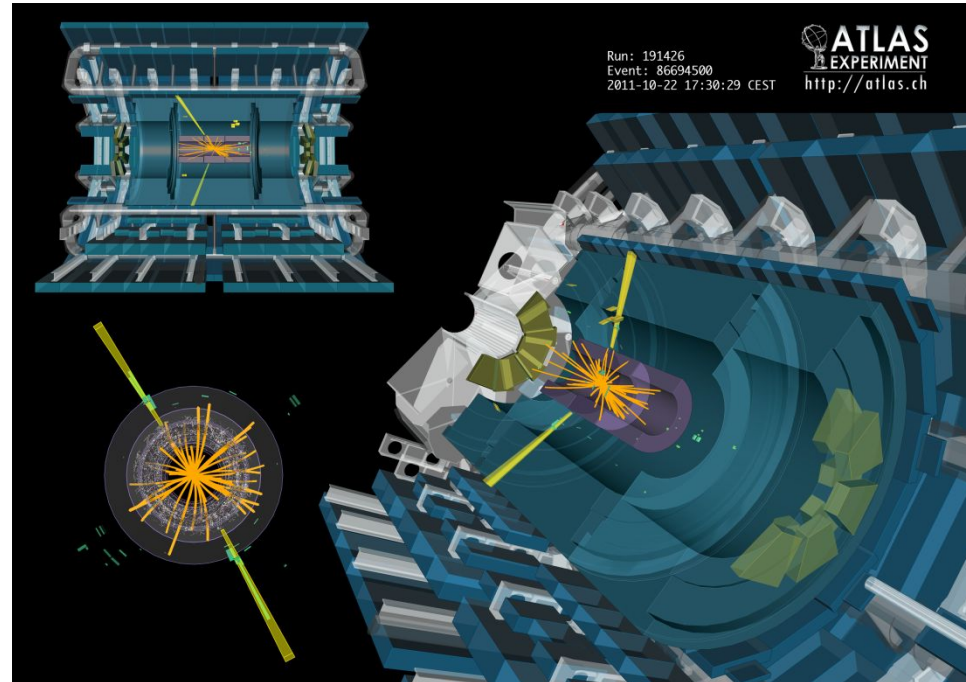
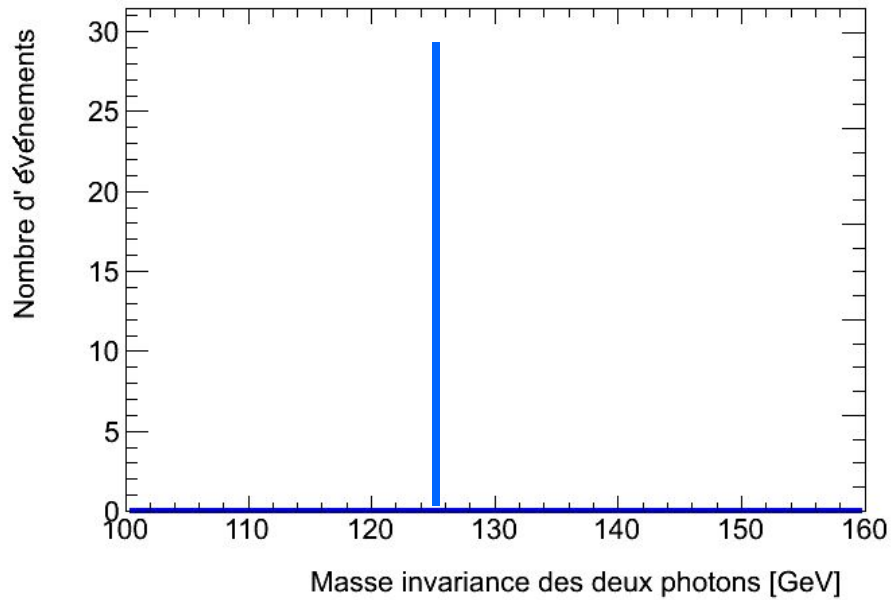


Interaction	Intensité relative
Forte	1
Electromagnétique	10^{-2}
Faible	10^{-6}
Gravité	10^{-38}

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{\left(\frac{E_1 + E_2}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2}{c}\right)^2}$$

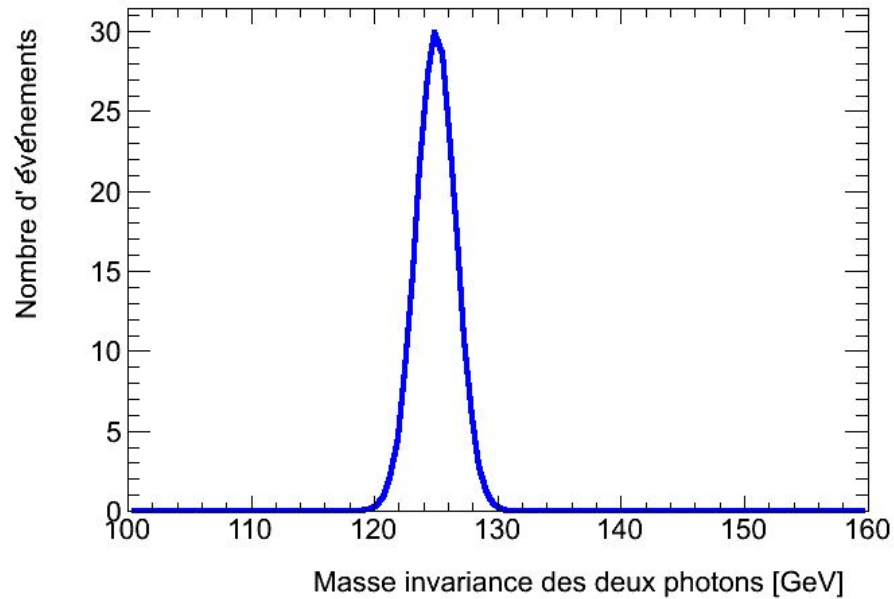
Higgs ($m_H = 125$ GeV)



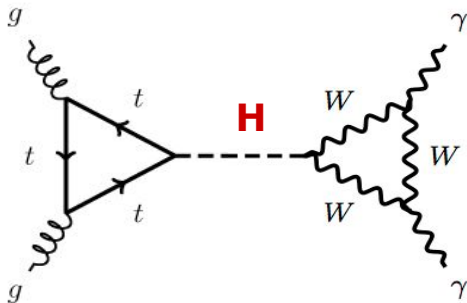
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{\left(\frac{E_1 + E_2}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2}{c}\right)^2}$$

Higgs ($m_H = 125$ GeV)



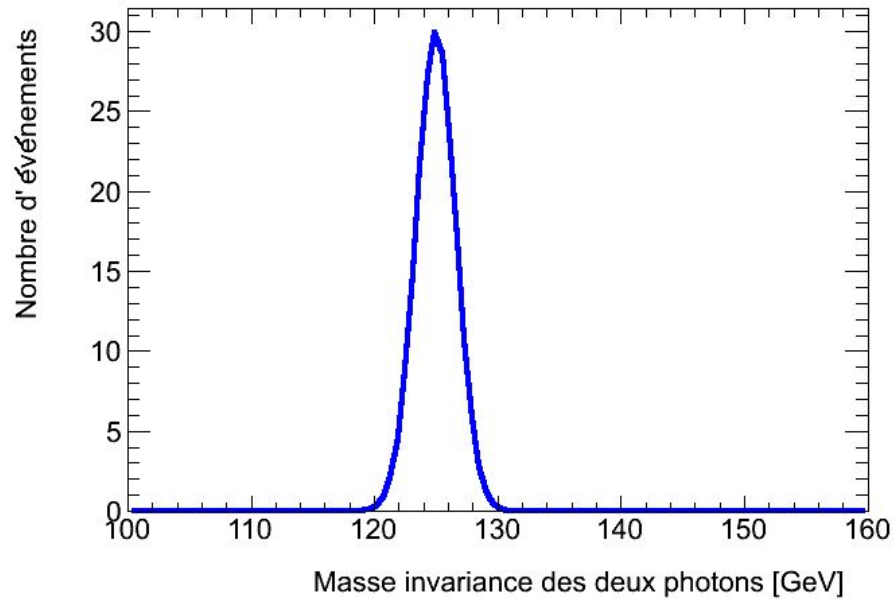
Résolution
du
détecteur



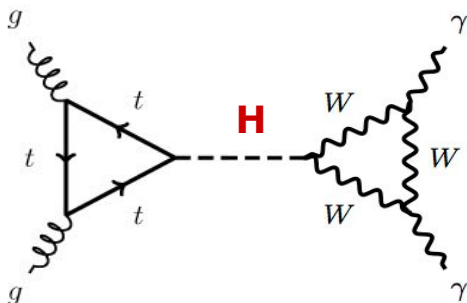
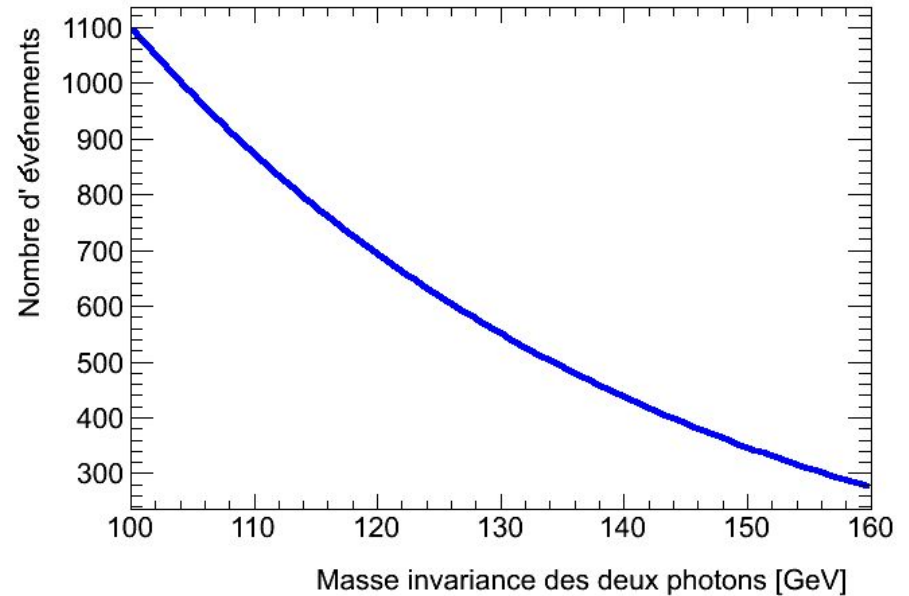
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{\left(\frac{E_1 + E_2}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2}{c}\right)^2}$$

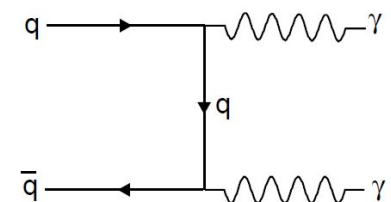
Higgs ($m_H = 125$ GeV)



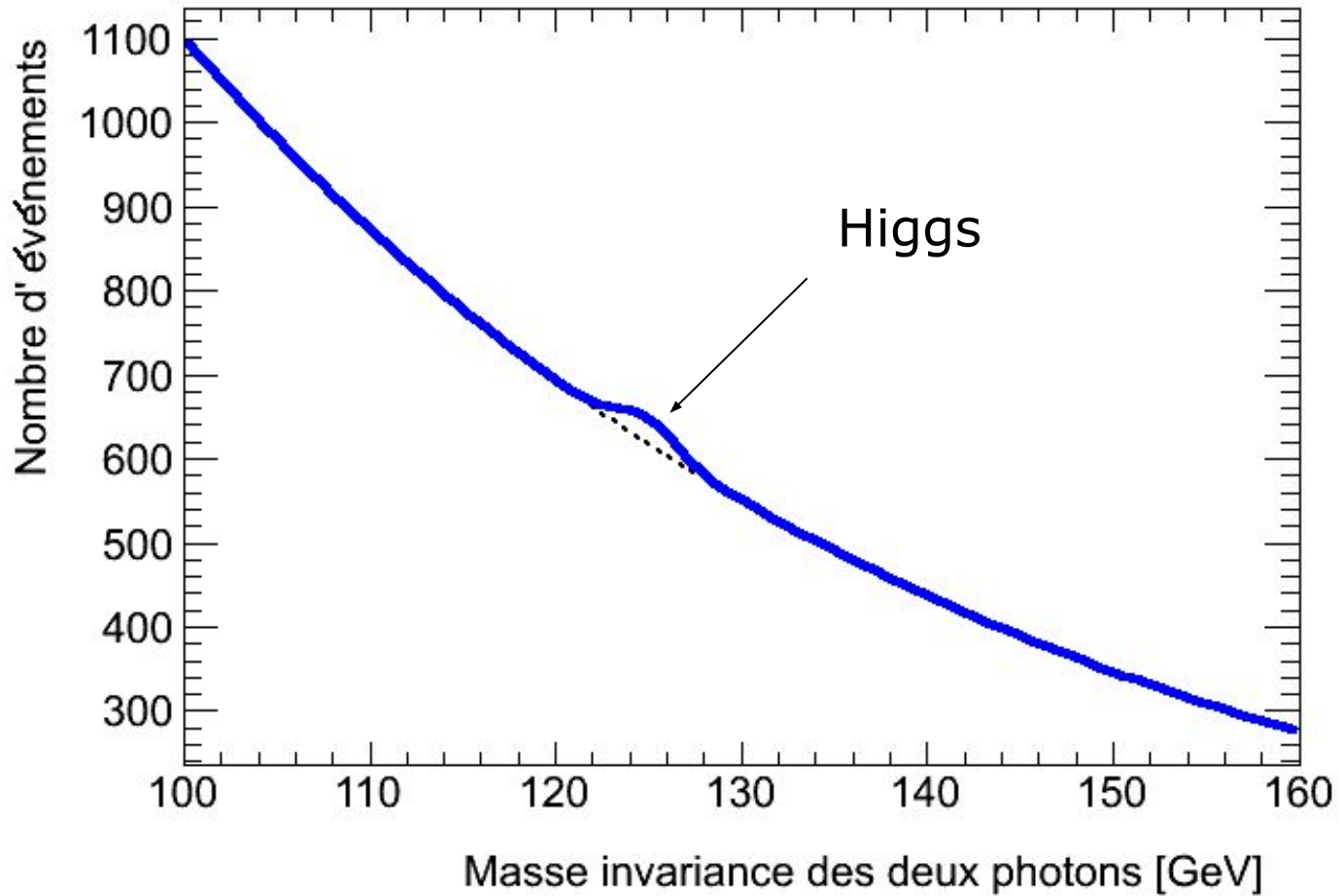
Bruit de fond



Exempl
e:

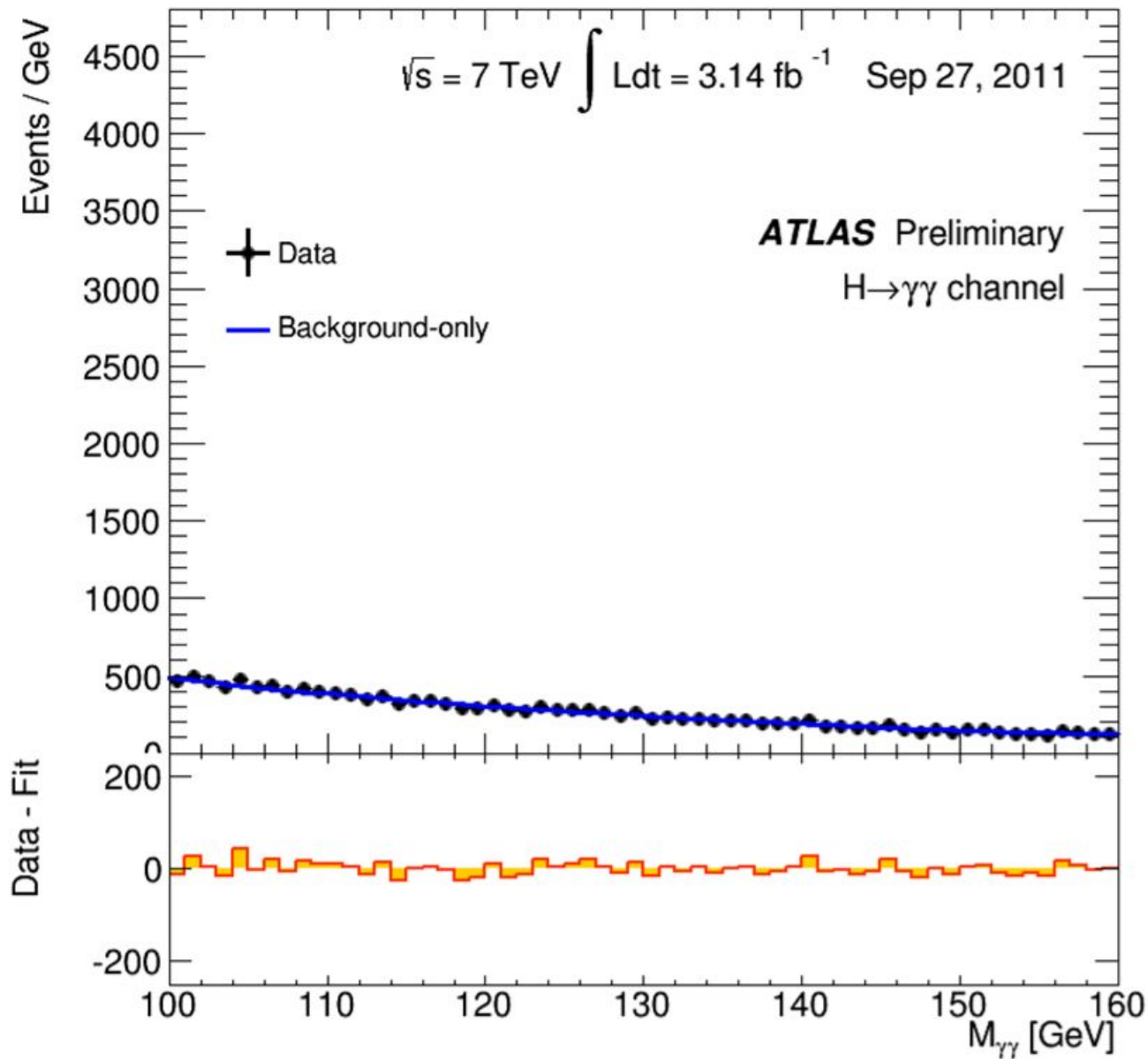


Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: simulation

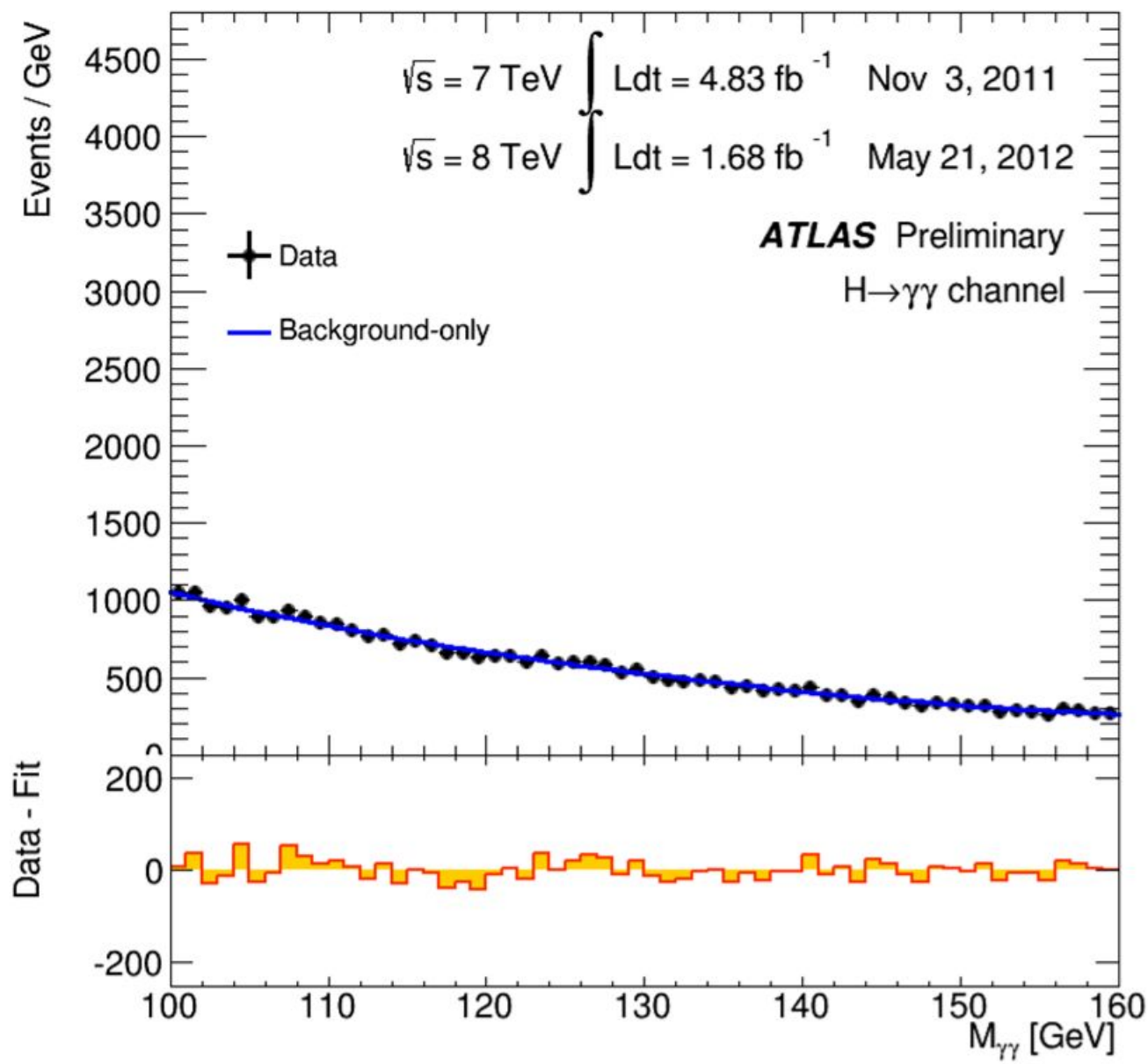


Bosse = signature du boson de Higgs

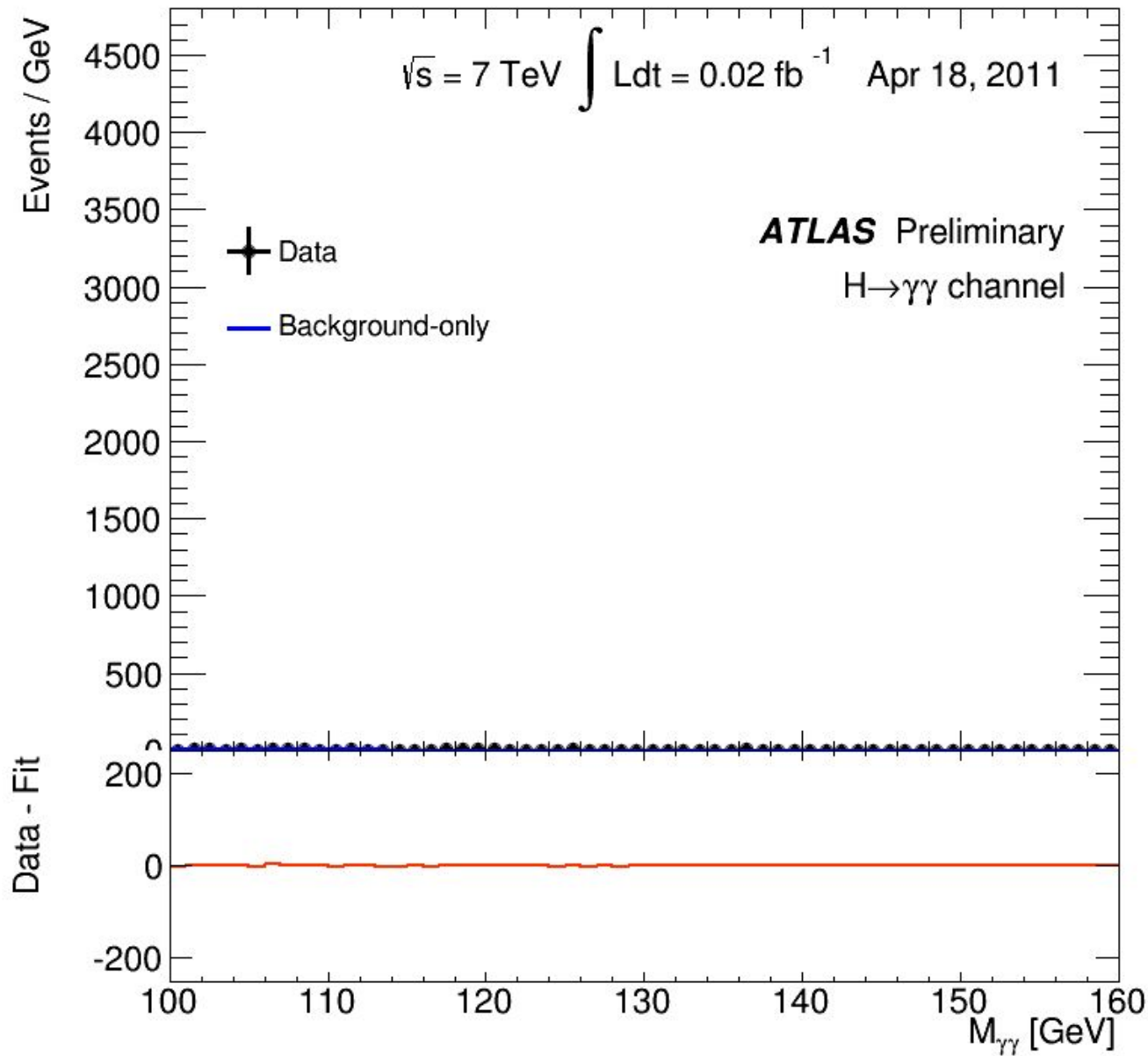
Découverte d'une nouvelle particule au CERN



Découverte d'une nouvelle particule au CERN

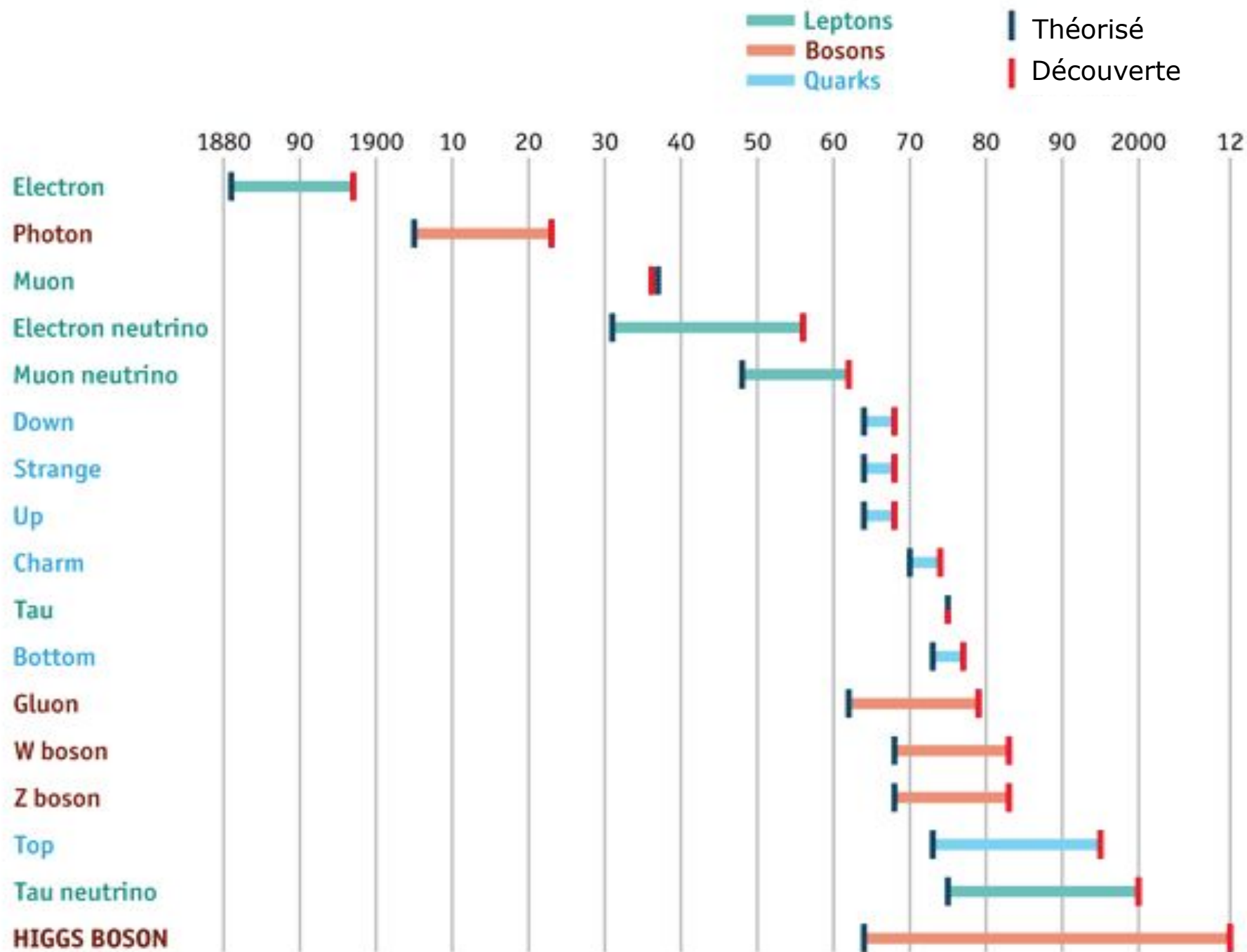


Découverte d'une nouvelle particule au CERN



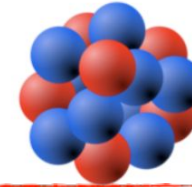
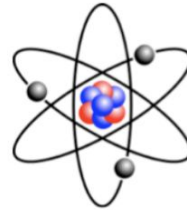
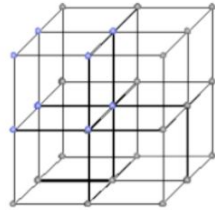
4 Juillet 2012





$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\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} + \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 \left[\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^+) \right] \\
& -igs_w \left[\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^+) \right] \\
& -\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_\mu^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 \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
& -\frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[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 \right] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
& -\frac{1}{2}ig \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& +\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 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^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \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^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \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 \left[-(\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) \right] \\
& +\frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\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) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\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) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\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) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[-m_d^\lambda (\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) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
& -\frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{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 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) 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^2} \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^-] + igM s_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}$$

La masse dans le



$$M \approx \sum M_{\text{atom}}$$

$$M \approx \sum m_{e^-} + M_{\text{nucleus}}$$

$$M \approx \sum M_p + M_n$$

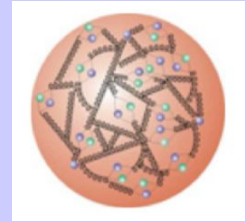
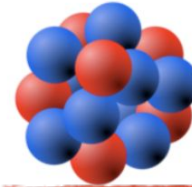
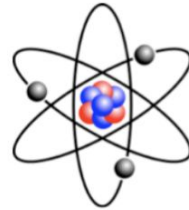
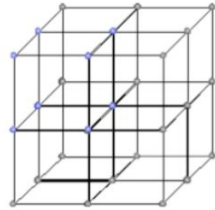
$$1\text{eV} < E_{\text{coh}}/A < 10\text{eV}$$

$$5\text{eV} < E_I/e^- < 25\text{eV}$$

$$E_B/N \approx 8\text{MeV}$$

- Pour la masse, l'approximation est égale à la **somme des masses de leurs atomes**
- L'**énergie cohésive** dans un **crystal**, pour exemple, est entre 1 et 10 eV par atome, **petit par rapport à la masse** des atomes
- La **masse** d'un **atome** est également à peu près **égale** à la **somme des masses** de son les **électrons** et son **noyau**; l'**énergie de liaison** atomique reste **très petite** par rapport à la **masse de l'atome**
- Ce raisonnement continue au niveau nucléaire : la **masse** d'un **noyau** est à peu près **égale** à la **somme des masses** des **protons** et des **neutrons**

La masse dans le



$$M \approx \sum M_{\text{atom}}$$

$$M \approx \sum m_{e^-} + M_{\text{nucleus}}$$

$$M \approx \sum M_p + M_n$$

$$M_N \gg \sum m_q$$

$$1\text{eV} < E_{\text{coh}}/A < 10\text{eV}$$

$$5\text{eV} < E_I/e^- < 25\text{eV}$$

$$E_B/N \approx 8\text{MeV}$$

$$m_u \approx m_d \approx O(\text{MeV})$$

- Pour la matière ordinaire, la **masse** est à une bonne approximation égale à la **somme** des **masses** de **leurs atomes**
- L'**énergie cohésive** dans un **crystal**, pour exemple, est entre 1 et 10 eV par atome, **petit par rapport à la masse** des atomes
- Mais à l'**échelle du nucléon**, ce raisonnement ne fonctionne plus
- Le **proton** et le **neutron** contiennent des **quarks** de masse faible et des **gluons** sans masse
- La **masse** du **nucléon** est **dominée** par leur **énergie de liaison**, elle a une **origine dynamique!**

Le problème de masse

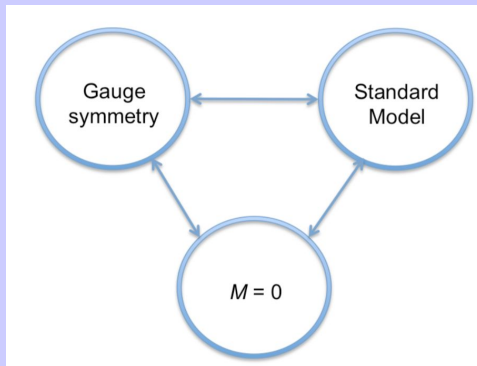
- Théorème de **Noether** : les **symétries** sont **liées** à la **conservation** des **propriétés physiques**
- La **symétrie de jauge** : l'**invariance** des observables par rapport à un **changement de phase** local du **champ**, est la base du Modèle Standard (QED, QCD)
- La **symétrie de jauge** est en effet **nécessaire** pour assurer la **régularisation** des **infinis** dans la théorie des champs, **sans quoi** le Modèle Standard **ne ferait aucune prédiction**



Amalie Emmy Noether (1882–1935)

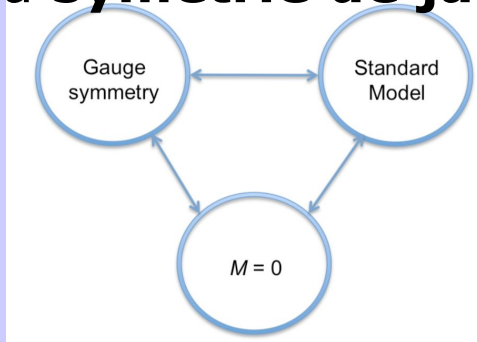
Le problème de masse

- Une **masse intrinsèque** de particules, aussi bien pour la matière que pour les forces, **viole la symétrie de jauge**



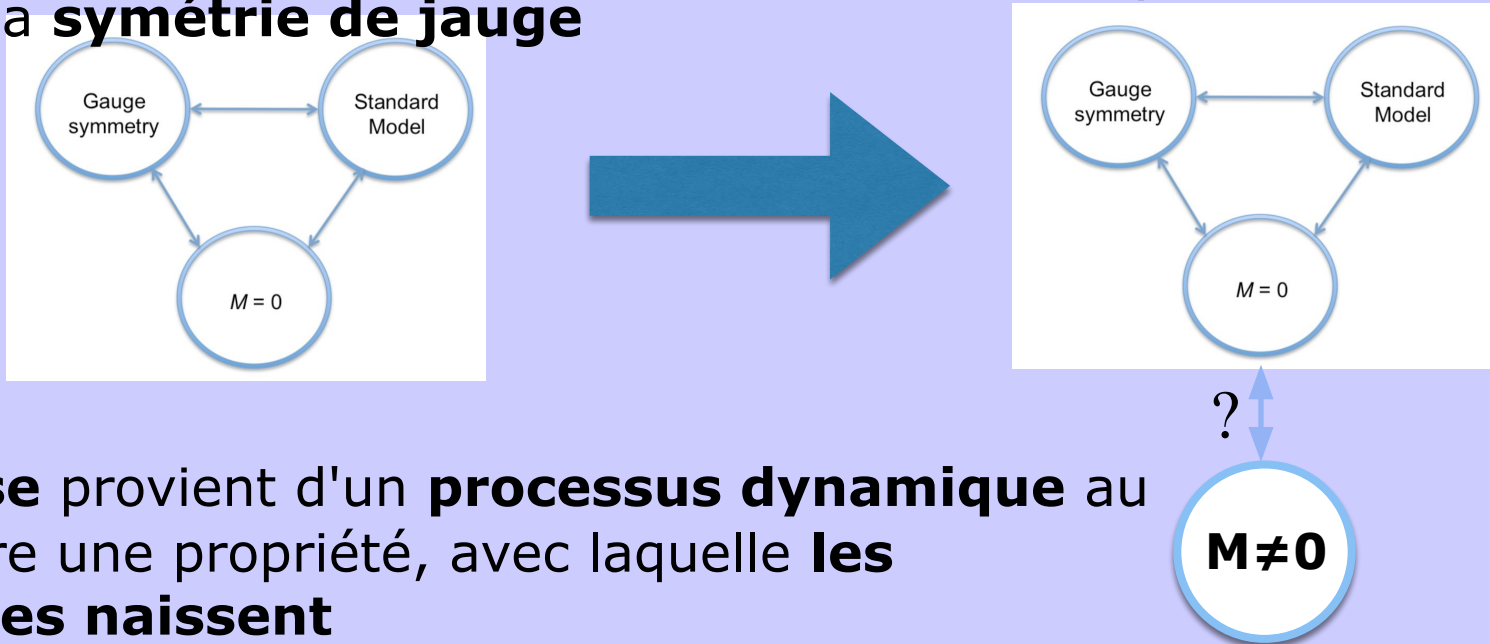
Le problème de masse

- Une **masse intrinsèque** de particules, aussi bien pour la matière que pour les forces, **viole la symétrie de jauge**
- Le fait que toutes les **particules** de la **matière ont une masse différente** et non nulle, et le fait que $m_z, m_w \neq m_y (=0)$ **violent la symétrie de jauge**



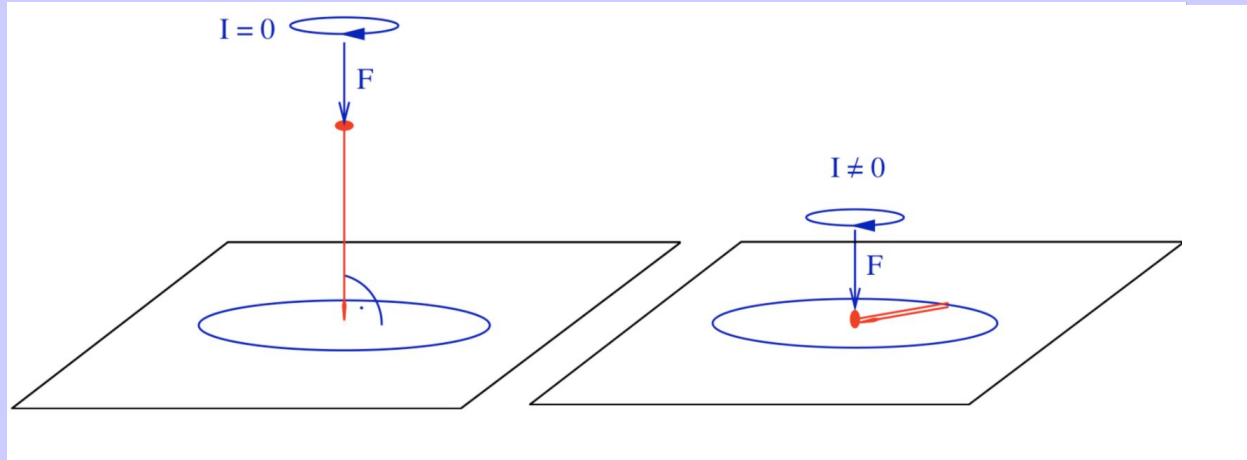
Le problème de masse

- Une **masse intrinsèque** de particules, aussi bien pour la matière que pour les forces, **viole la symétrie de jauge**
- Le fait que toutes les **particules** de la **matière ont une masse différente** et non nulle, et le fait que $m_z, m_w \neq m_\gamma (=0)$ **violent la symétrie de jauge**



➔ La **masse** provient d'un **processus dynamique** au lieu d'être une propriété, avec laquelle **les particules naissent**

La brisure de symétrie



- Les champs **massifs** sont **incompatibles** avec la **symétrie** de **jauge**
 - La **brisure** de **symétrie** devrait donc **rendre massif** un champ **sans masse**
- Une analogie mécanique*
- Imaginons une aiguille infiniment fine. **Pas** de **moment d'inertie** autour de son axe

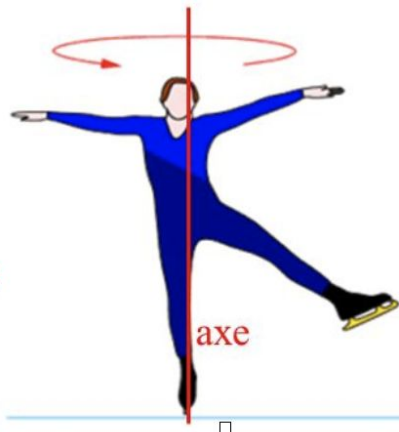
Moment d'inertie "angular mass"

- Le **moment d'inertie** est une grandeur physique qui caractérise la géométrie des masses d'un solide
- La **répartition** de la **matière** en son **sein**
- Il **quantifie** également la **résistance** à une **mise en rotation** de ce solide, ou plus généralement à une **accélération angulaire**
- C'est l'**analogue** pour un **solide** de la **masse inertielle** qui, elle, **mesure** la **résistance** d'un corps **soumis à une accélération**

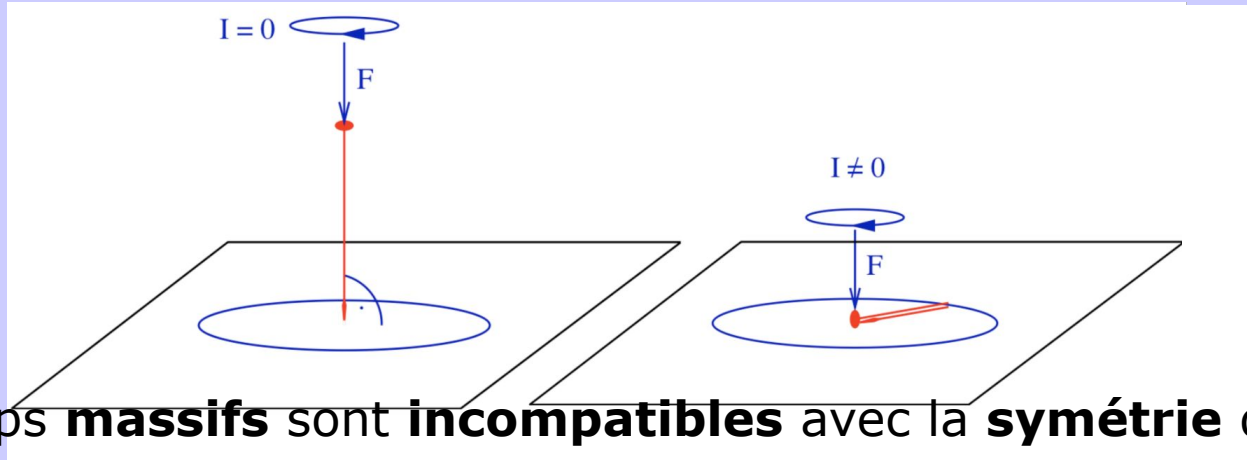
□ Dépend de :

- Taille de l'objet
- Répartition de la masse de l'objet

Le même patineur,
mais deux moments
d'inertie différents.



La brisure de symétrie

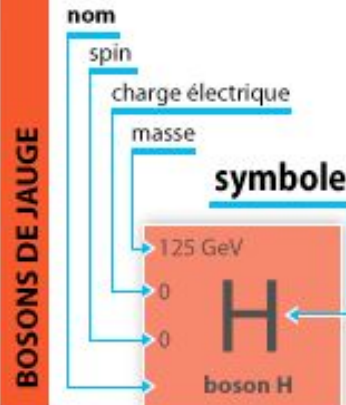


- Les champs **massifs** sont **incompatibles** avec la **symétrie** de **jauge**
- La **brisure** de **symétrie** devrait donc **rendre massif** un champ **sans masse**
- Imaginons une aiguille infiniment fine. **Pas** de **moment d'inertie** autour de son axe

- Appliquons une force coaxiale au-delà de la limite élastique de l'aiguille
- Le tour de cristal de l'aiguille s'affaiblit dans un endroit aléatoire, et l'aiguille **se plie** dans une direction **aléatoire**
- La **symétrie** cylindrique du système a **spontanément disparu**
- Un **moment d'inertie** sur l'original original de l'axe est **apparu**

Neutrinos

Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions		boson de masse
	I	II	III		
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 u up	1.27 GeV +2/3 1/2 c charm	171.2 GeV +2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon	125 GeV 0 0 H boson de Higgs
	4.8 MeV -1/3 1/2 d down	104 MeV -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon	
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z⁰ boson Z	
	511 KeV -1 1/2 e électron	105.7 MeV -1 1/2 μ muon	1.777 GeV -1 1/2 τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] bosons W	



1ere
génération

2eme
génération

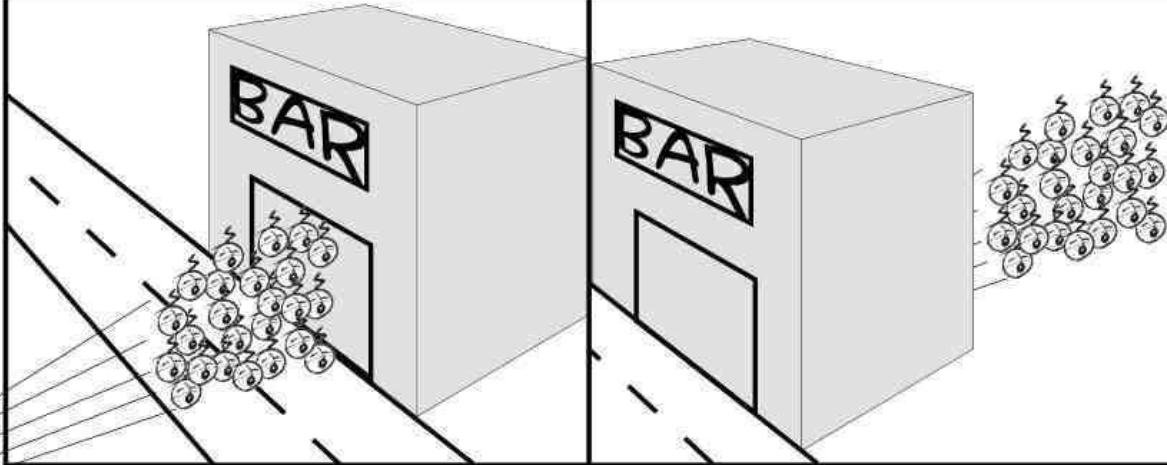
3eme
génération

bosons

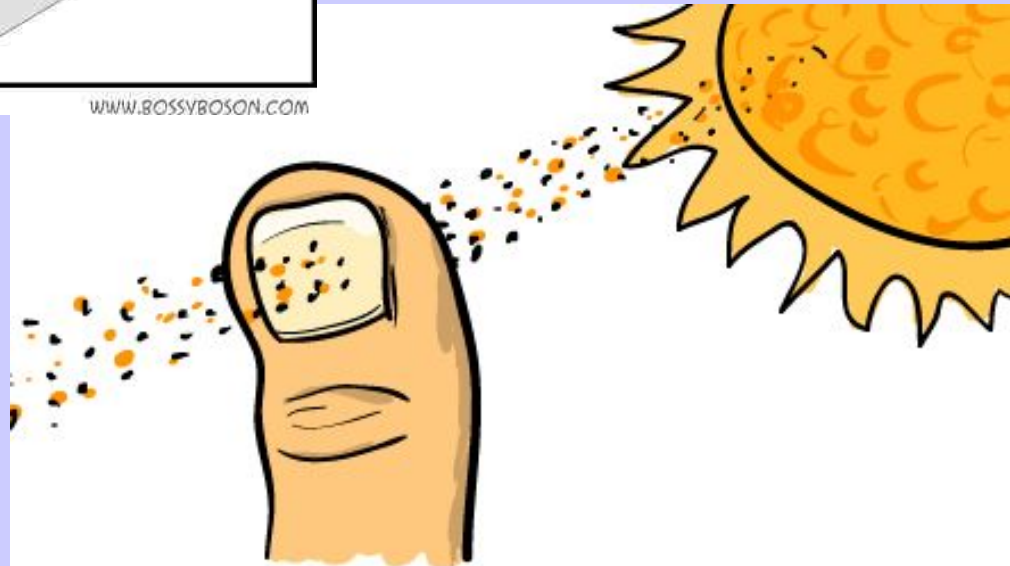
Neutrinos

300 TRILLION NEUTRINOS WALK INTO A BAR

THEN WALK THROUGH THE BAR



WWW.BOSSYBOSON.COM



FACT: about 65 million neutrinos pass through your thumbnail every second.

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: November 2019

