

Particules et Interactions

Nikola Makovec

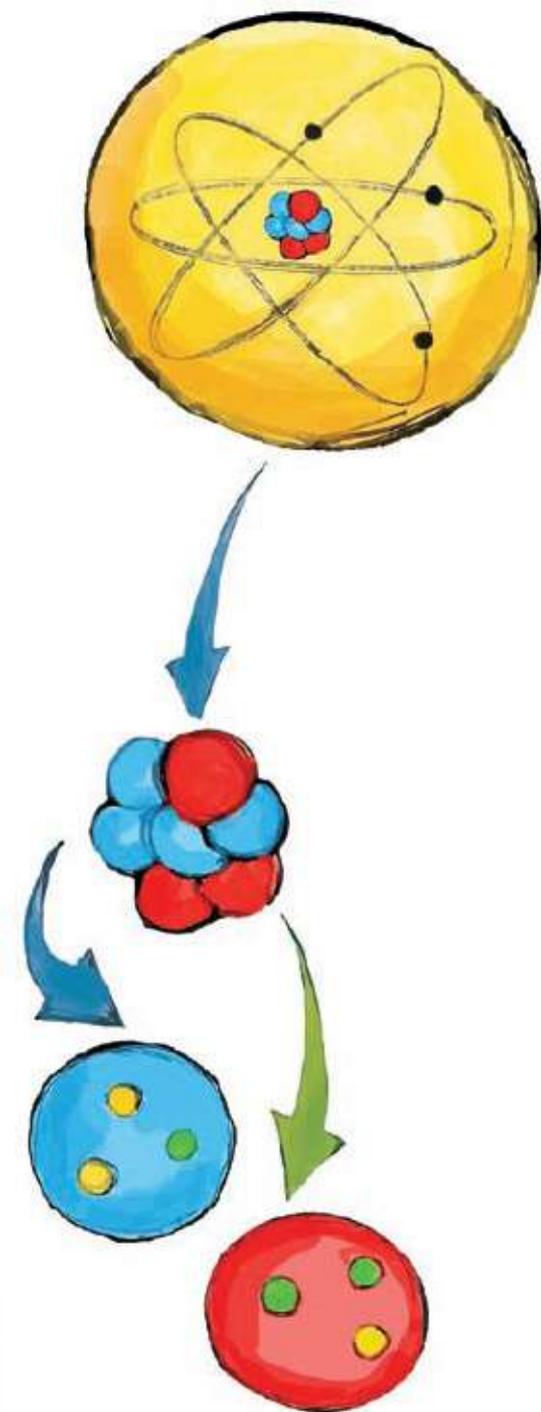
Nicolas Arnaud

Dimitris Varouchas

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



Masterclasses 2023



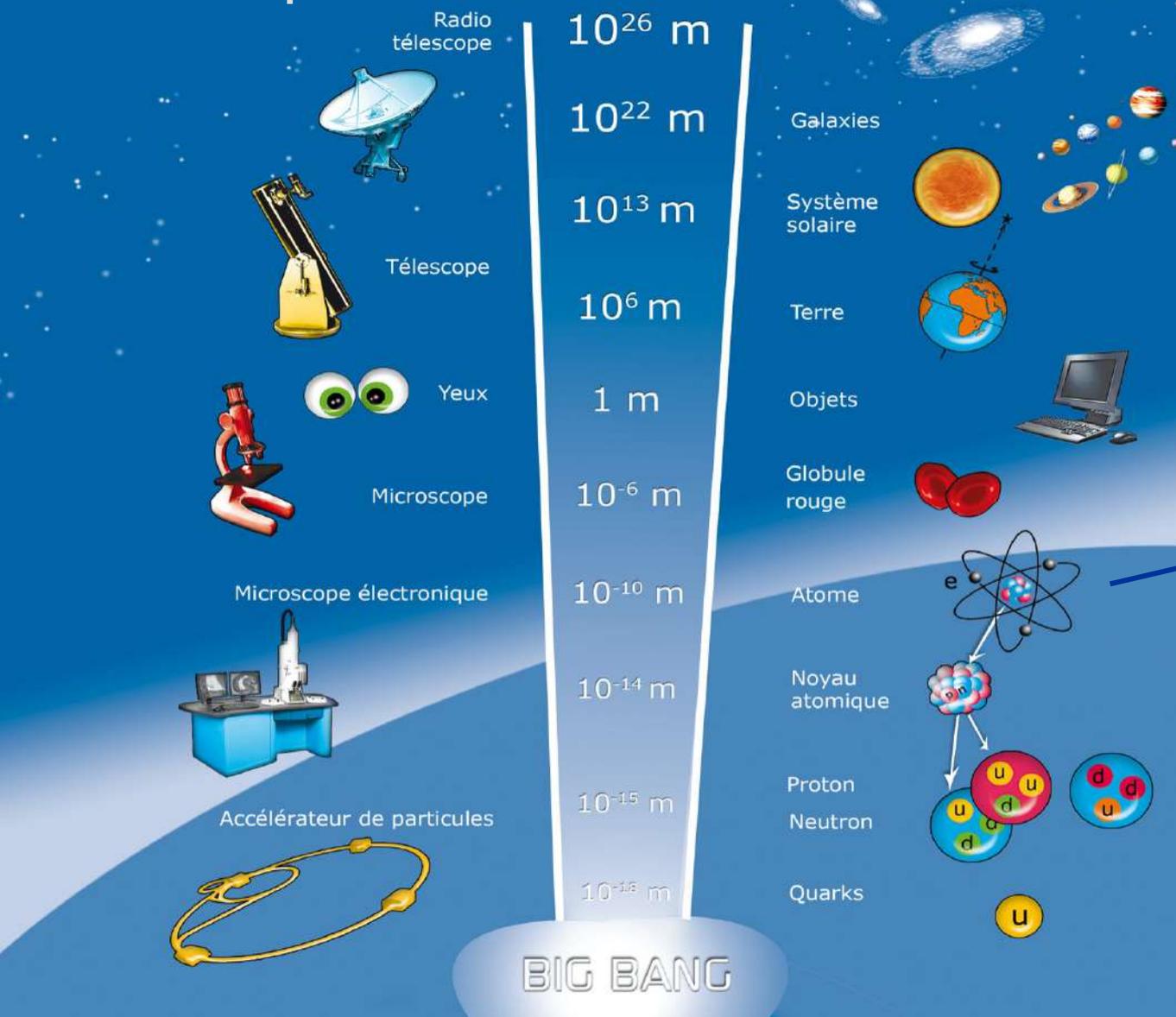
Einstein in the 21st Century

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

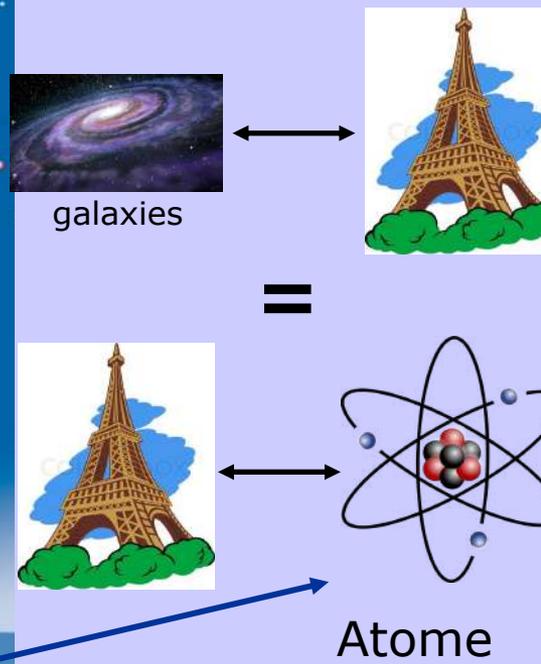


Une plongée dans l'infiniment petit...

UNIVERS

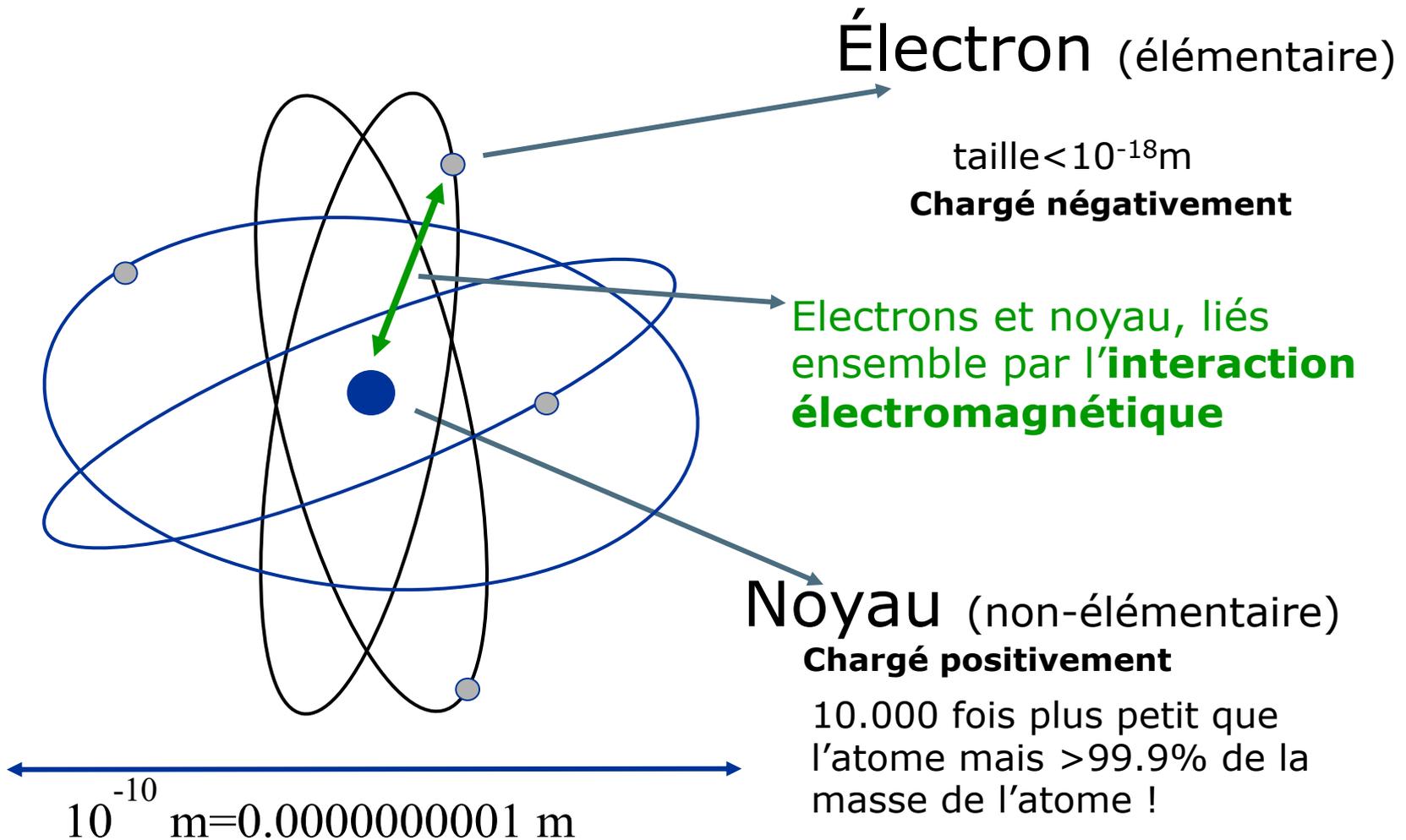


Différence de taille



Structure de l'atome (du grec : indivisible)

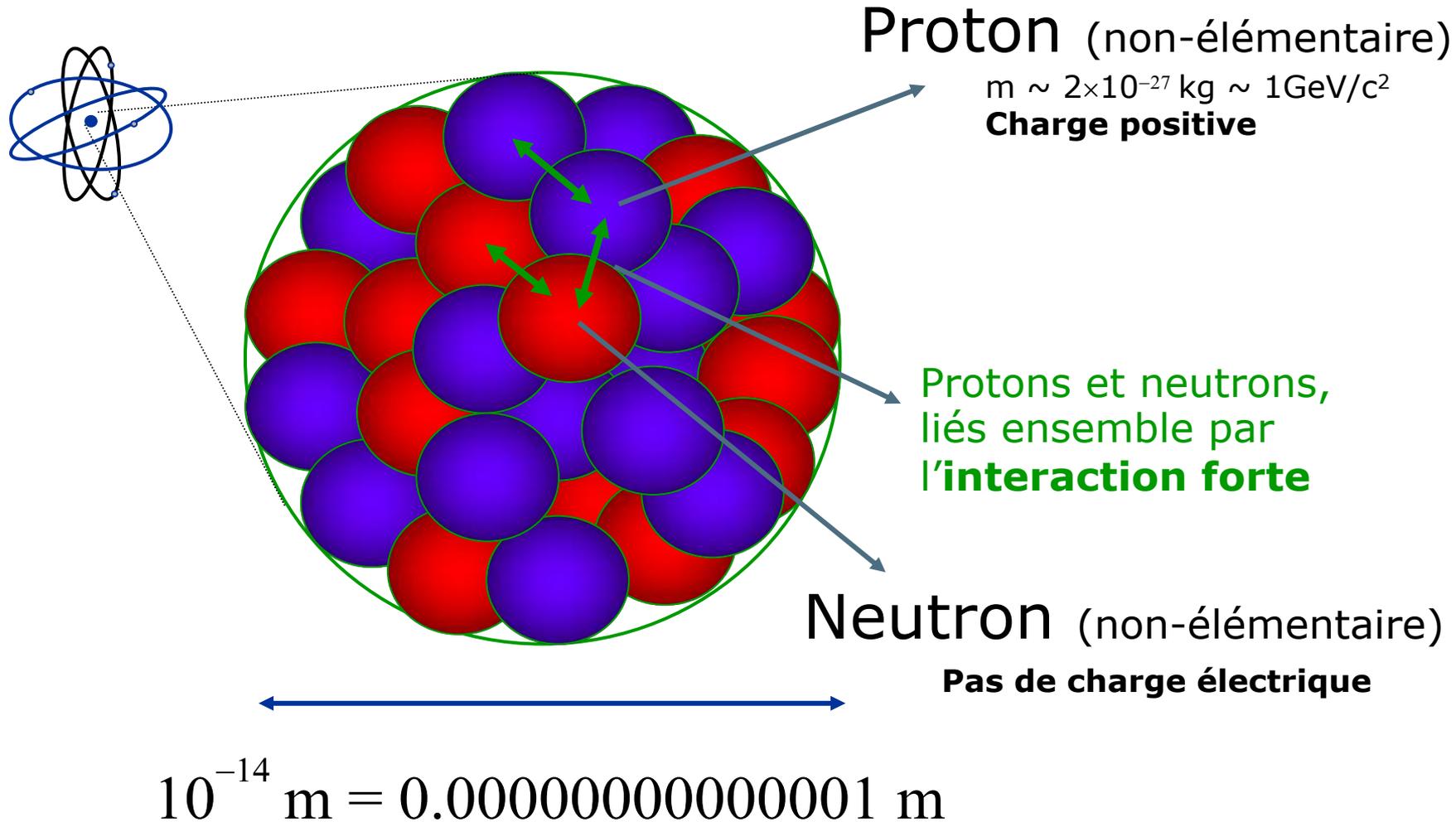
Structure de l'atome (du grec : indivisible)



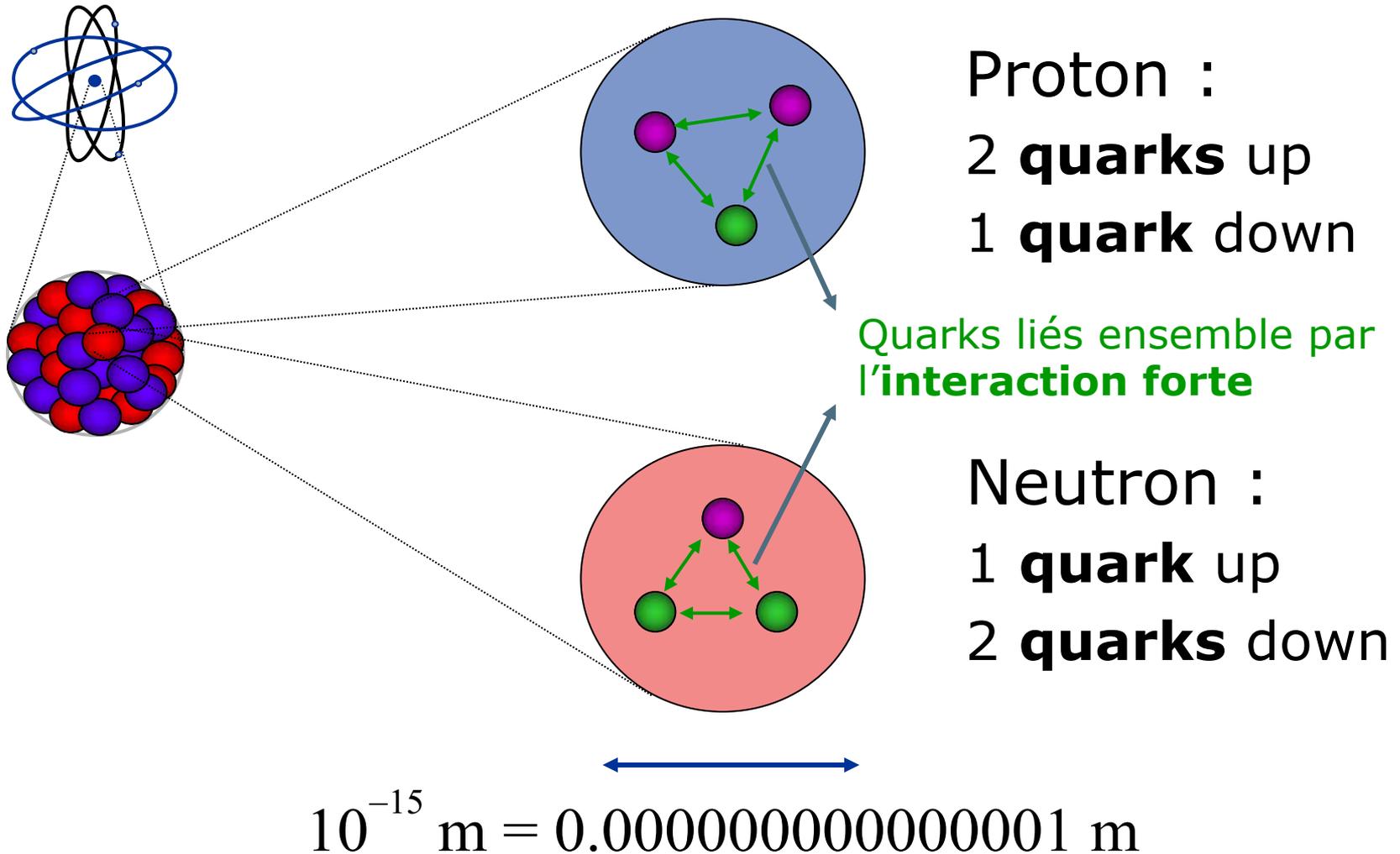
- 10 millions de fois plus petit qu'une fourmi
- 50 mille fois plus petit qu'une bactérie



Structure du noyau

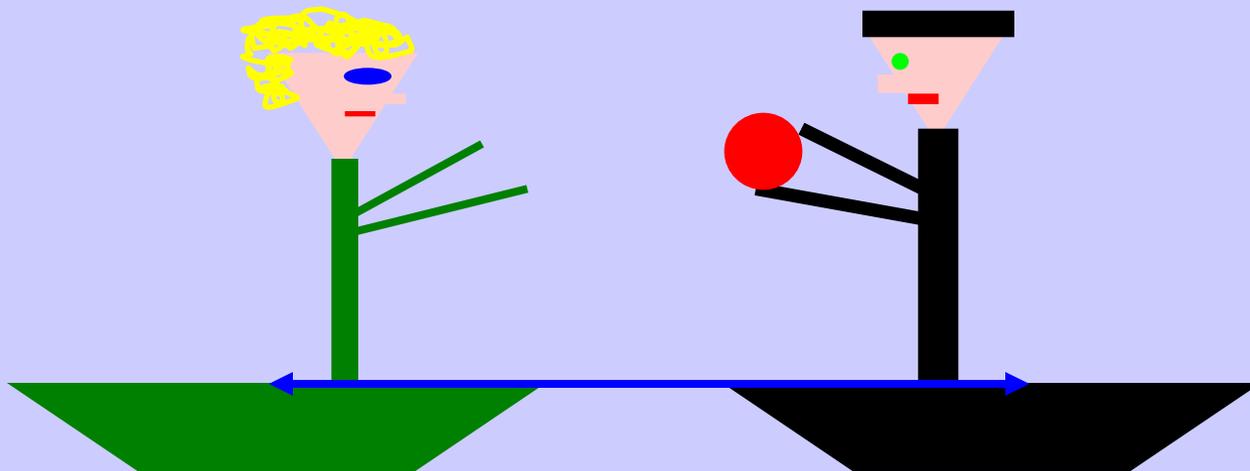


Structure des protons et des neutrons



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



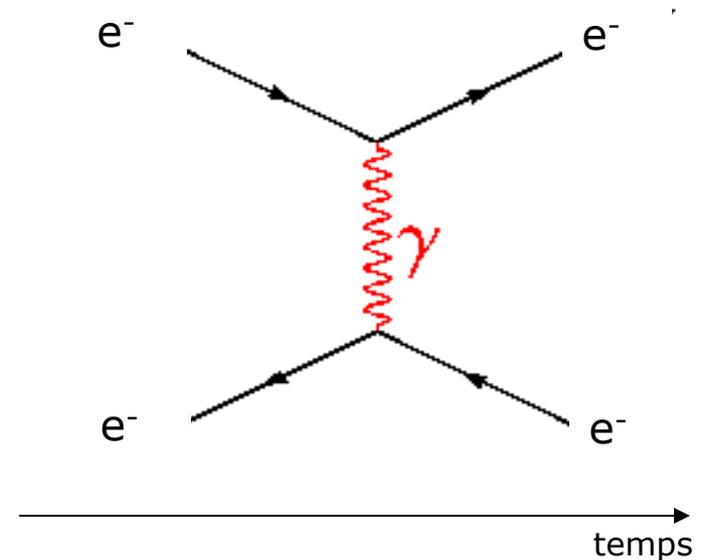
L'interaction électromagnétique

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



Médiateur : **photon**

$m=0$

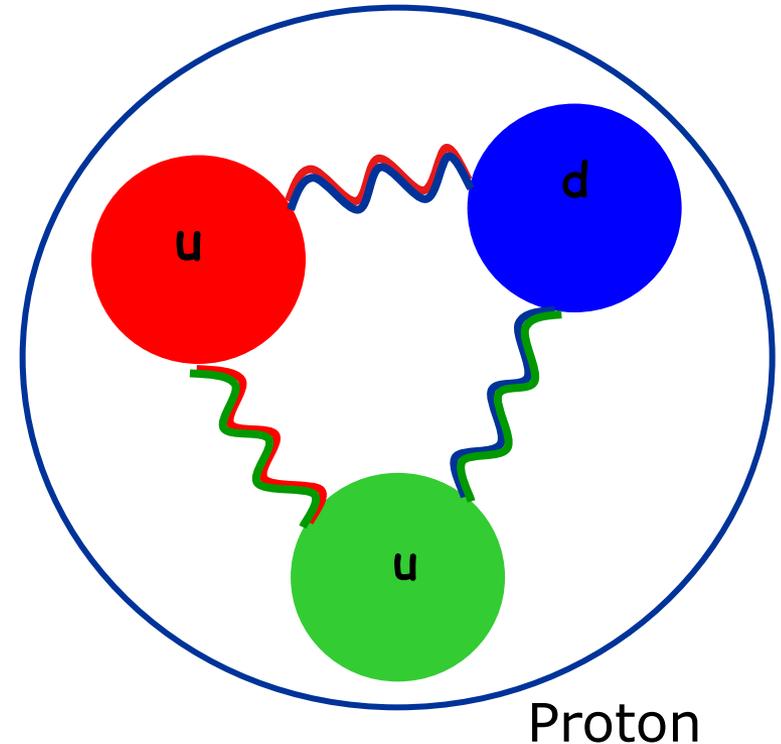


L'interaction nucléaire forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Médiateurs: **8 gluons**

$m=0$



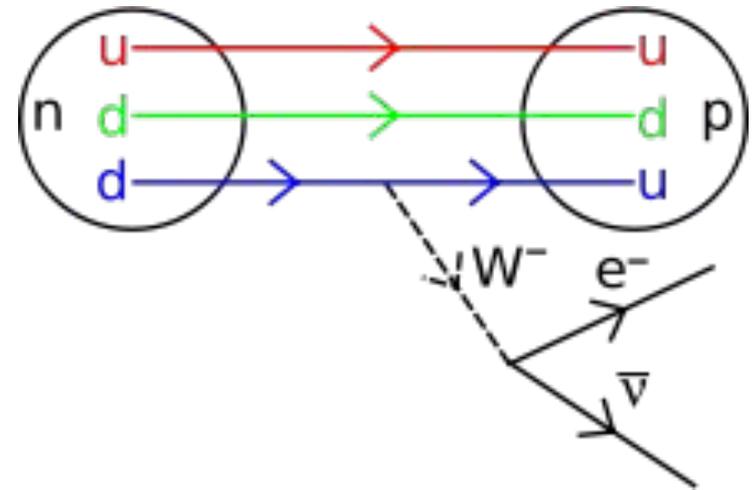
Les quarks n'existent pas à l'état libre : ils ne peuvent pas être isolés, et ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons** (assemblages de quarks) collés par les **gluons**

L'interaction nucléaire faible

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

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

Particules massives

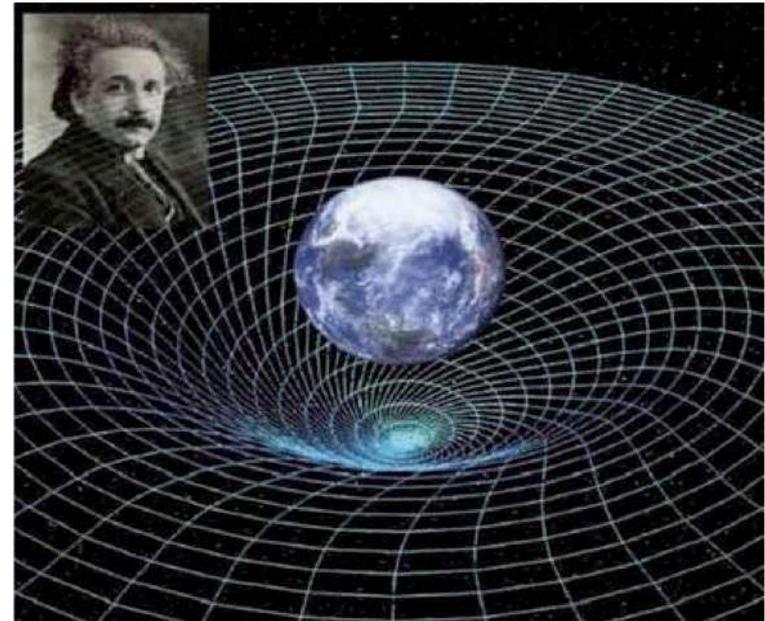


- 10 000 fois plus faible que l'interaction électromagnétique
- 1 000 000 fois plus faible que l'interaction forte



La gravitation

- 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 ?

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

Leptons

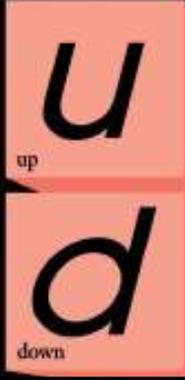
Quarks



Physique des particules : tableau périodique beaucoup plus simple

Matière

Quarks



Leptons



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

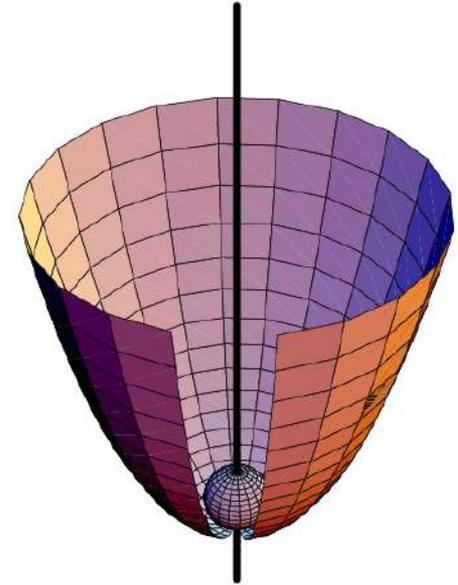
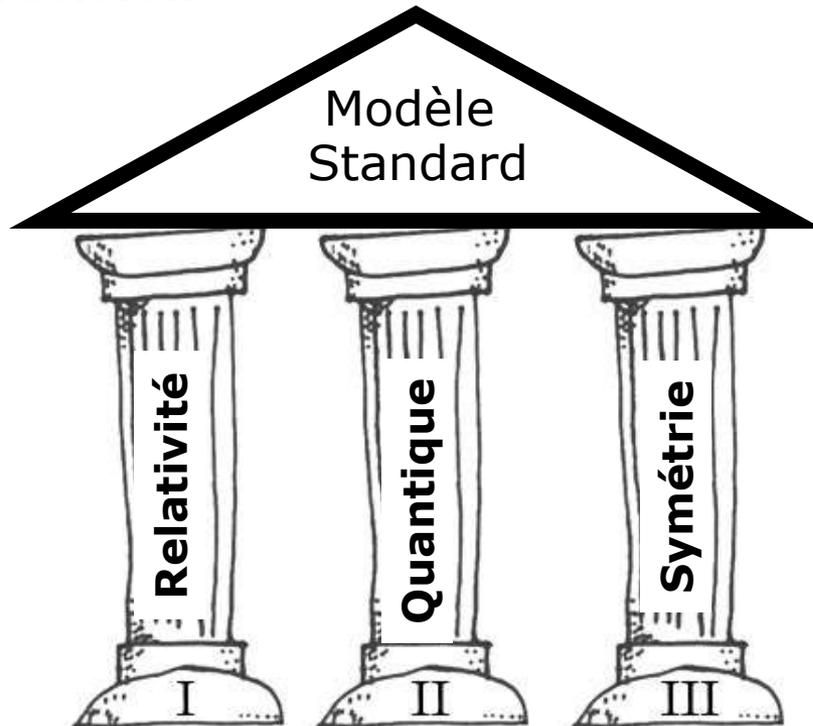
Forces

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

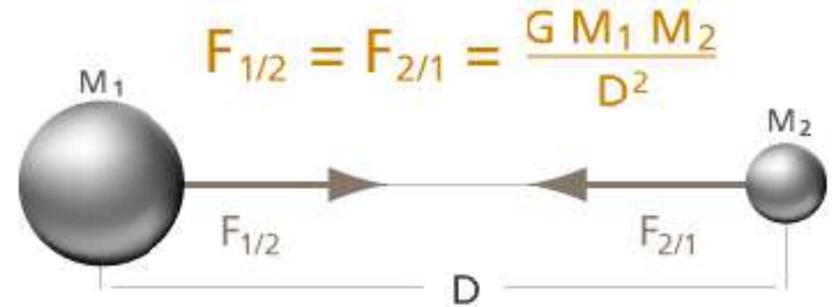
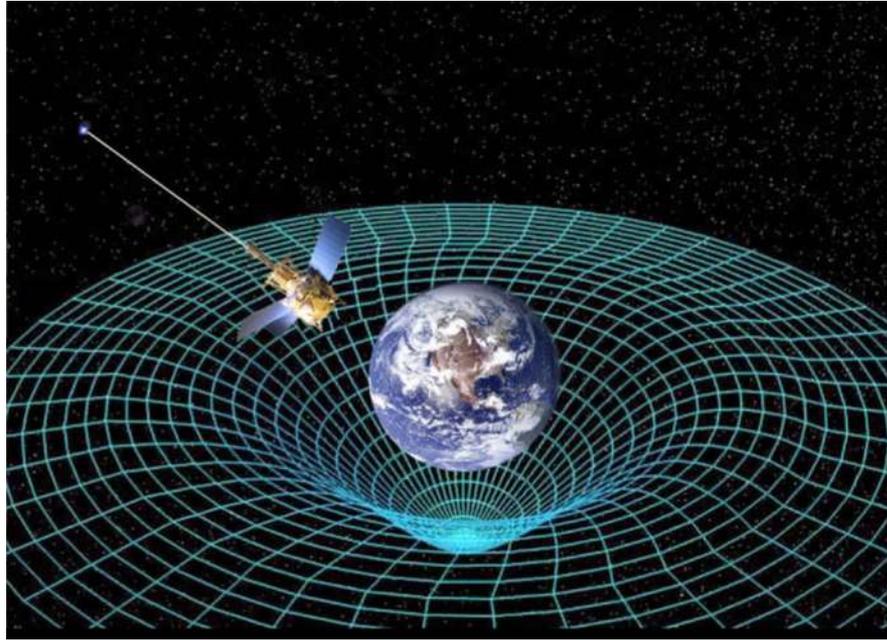
- Elaboré dans les années 1960-70
- Décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et les **interactions forte, faible et électromagnétique**
 - Mais pas la gravitation!
- Testé expérimentalement avec **grande précision**



- 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

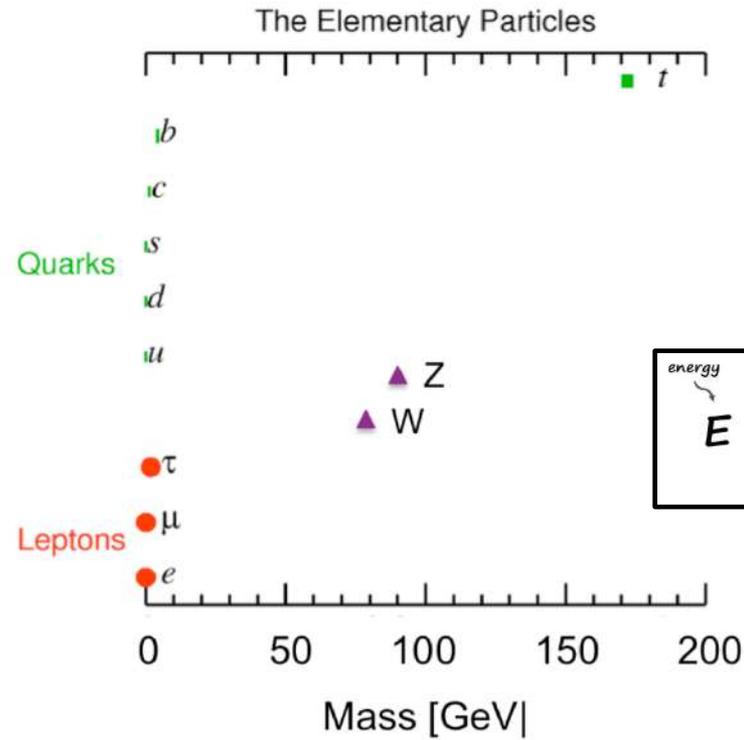
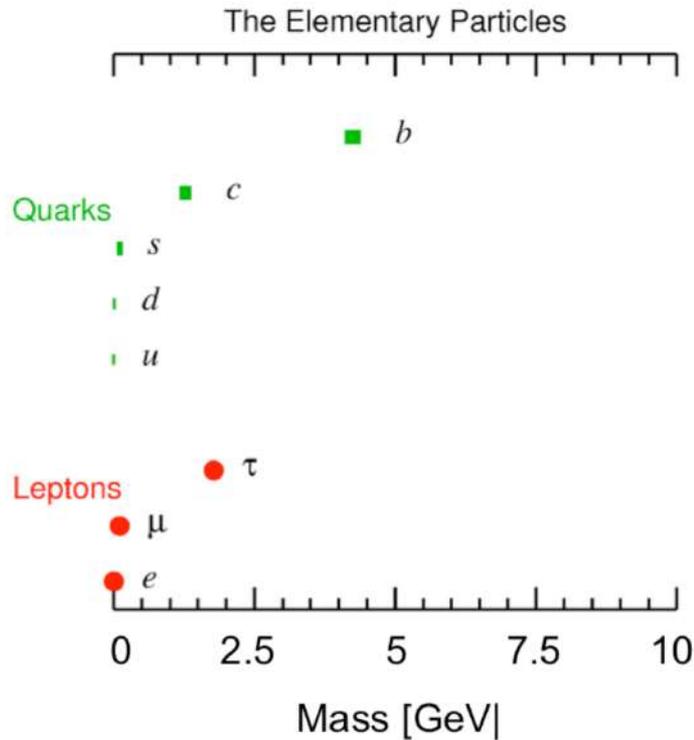
Définition de la masse

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



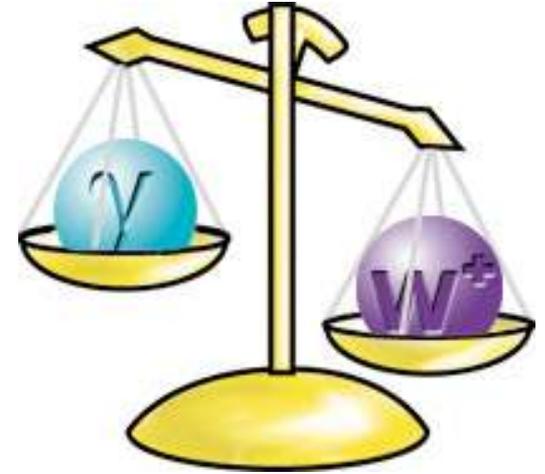
$$E = mc^2$$

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

⇒ $\text{masse}=0 \Leftrightarrow v=c$

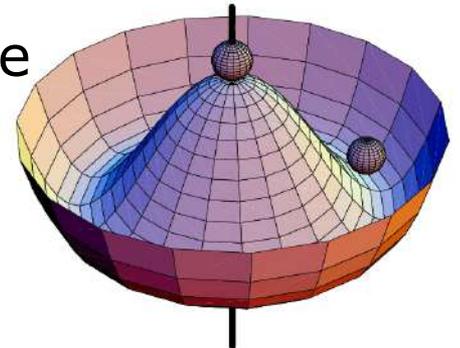
⇒ contradiction avec l'expérience

- 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

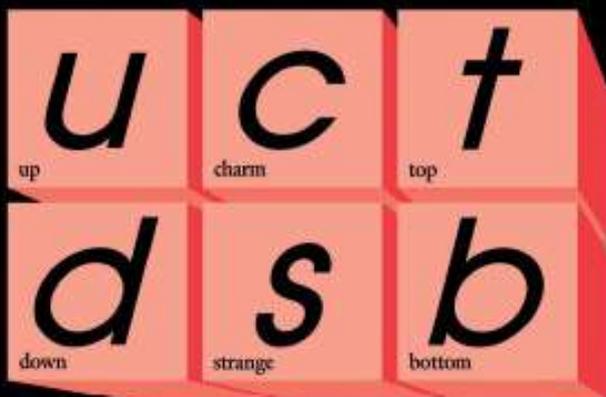
Boson de Higgs = le "composant" du champ de Higgs
Découvert au LHC (CERN) en 2012



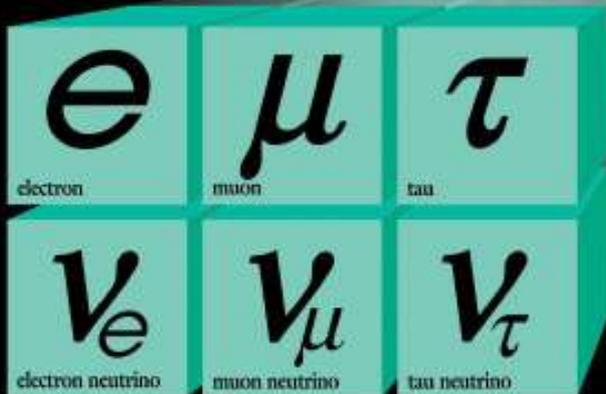
Le boson de Higgs joue un rôle central dans le mécanisme qui explique la masse des particules élémentaires

Matière

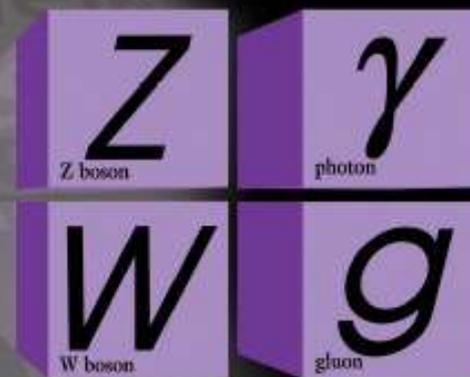
quarks



Leptons

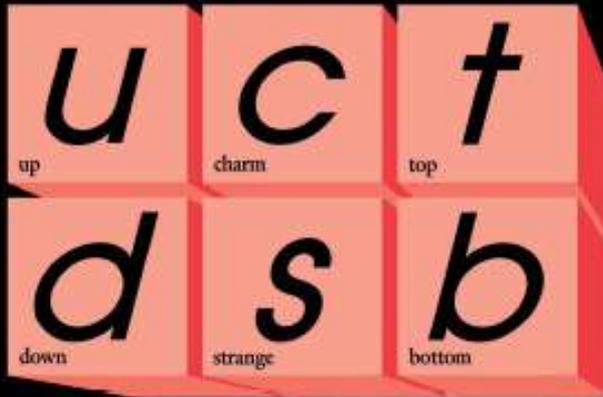


Forces

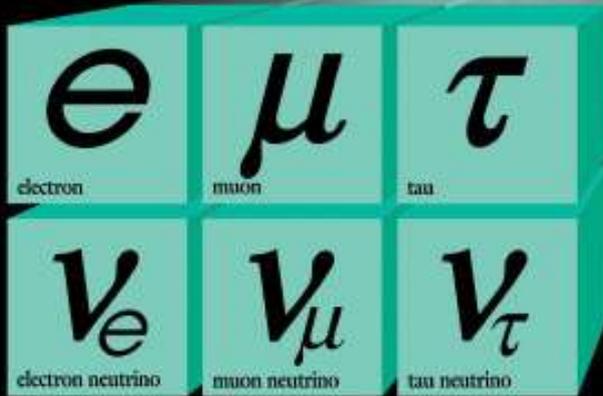


Matière

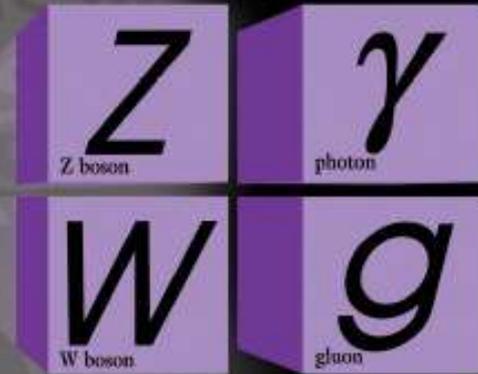
quarks



Leptons

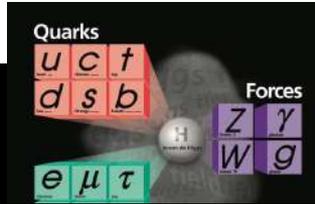


Forces

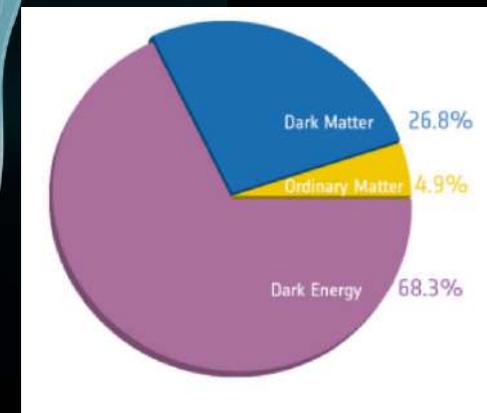
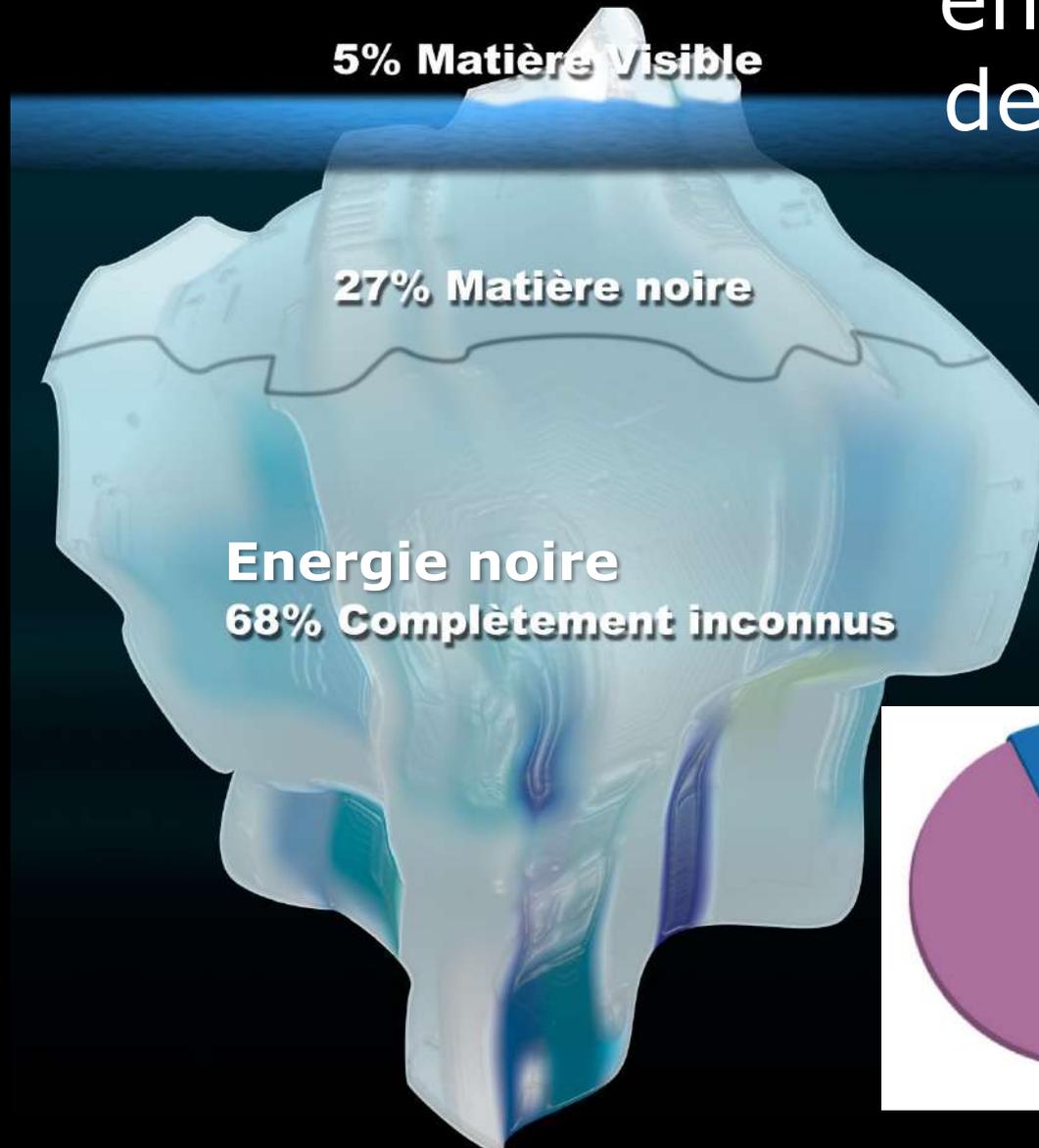


5% Matière Visible





Le contenu énergétique de l'Univers



Résumé

■ Particules de matières : fermions

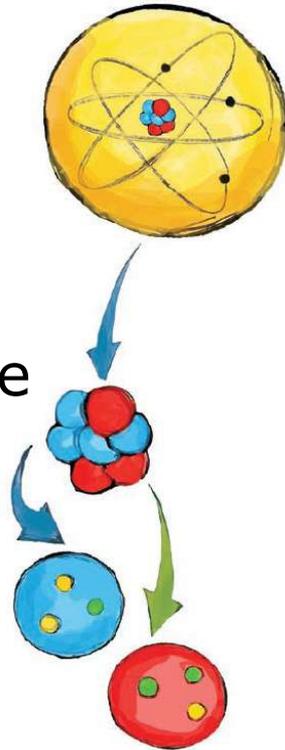
- Particules stables et « utiles » pour bâtir l'univers:
 - électron, quark up et quark down
 - proton = 2 quarks u et un quark d
- Particules instables:
 - muon, tau, quark étrange,...
- A chaque particule est associée une antiparticule

■ 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**

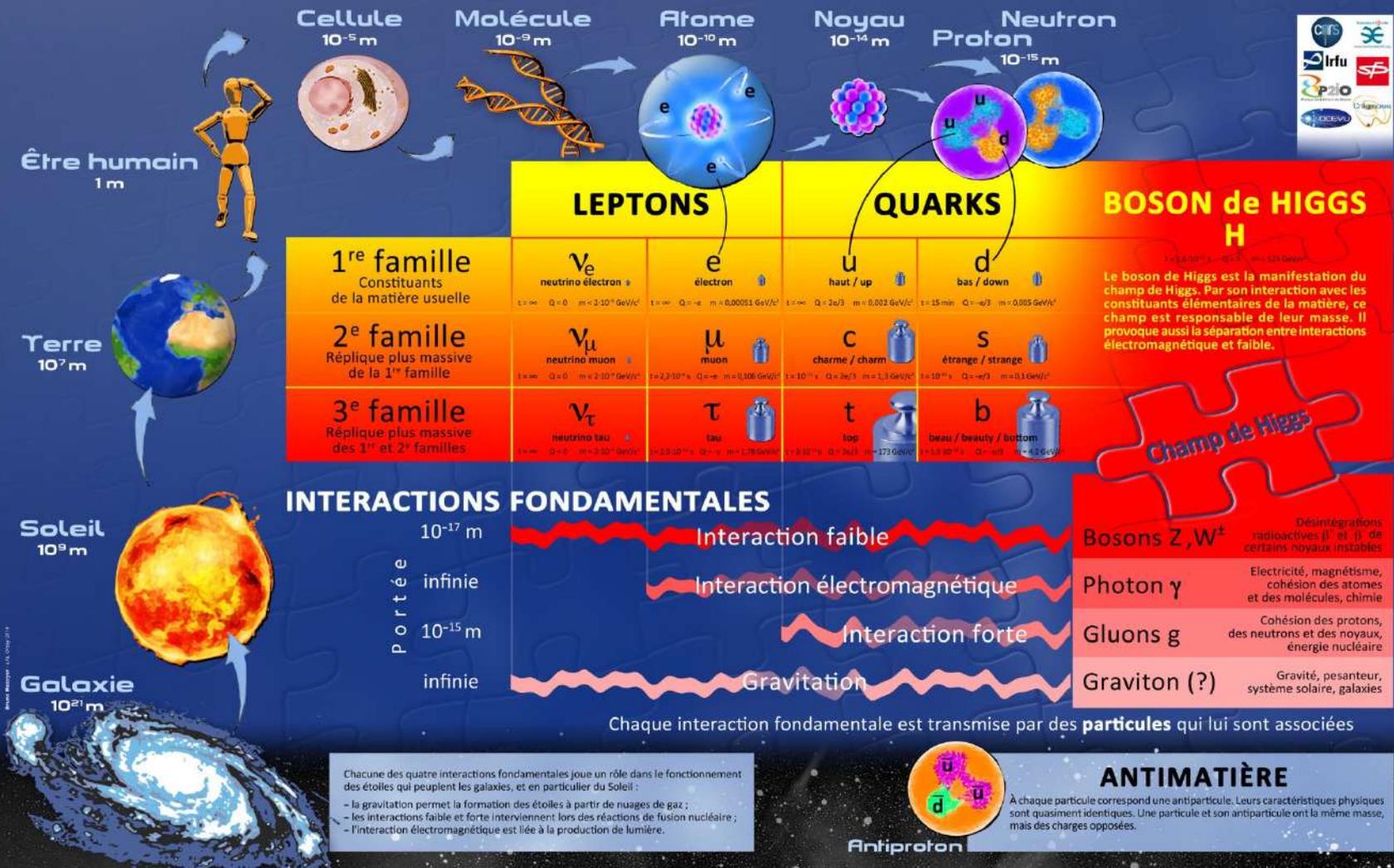




That's all Folks!

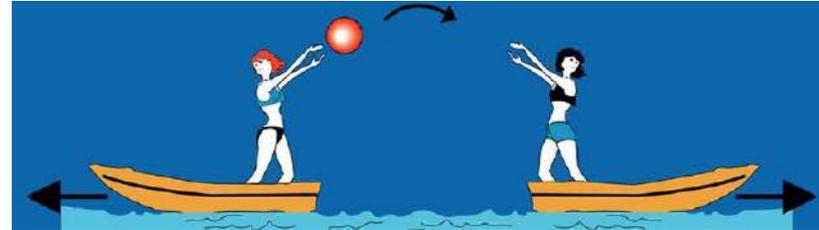
Nouvelle affiche des composants élémentaires (2014)

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**

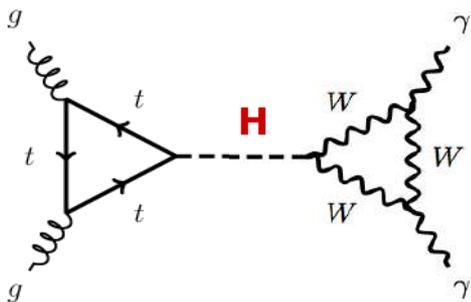
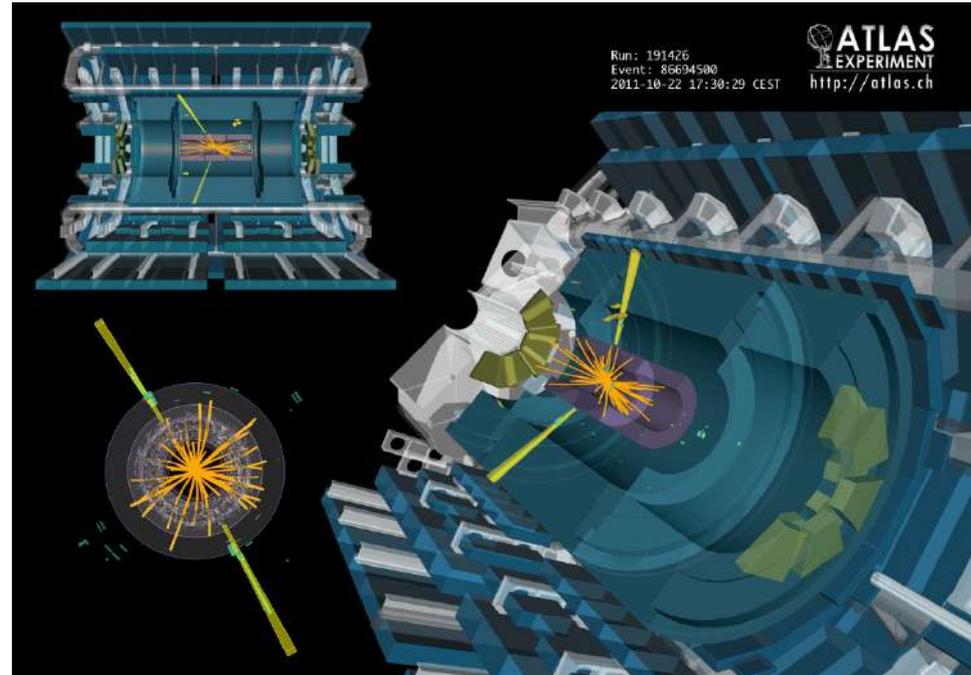
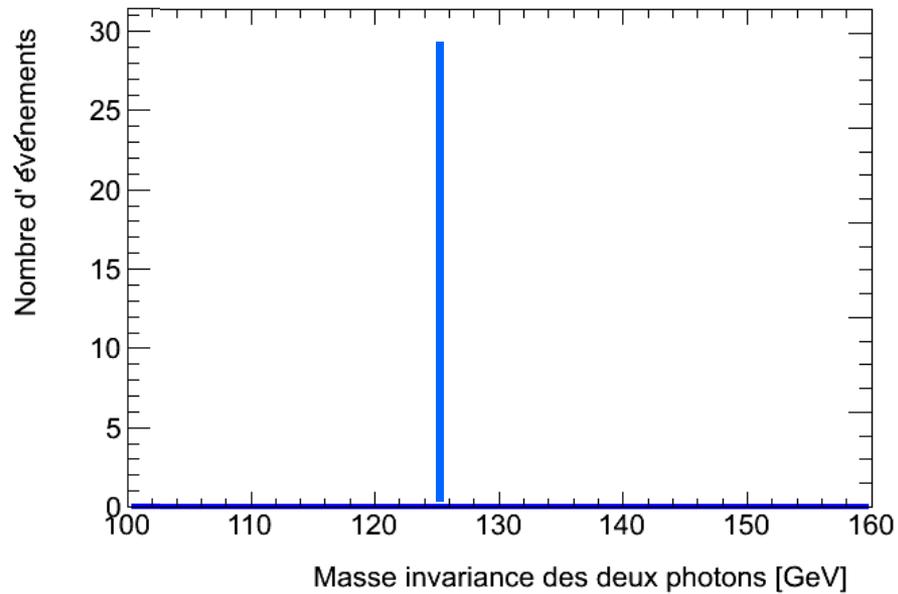


Interaction	Intensité relative
Forte	1
Electromagnétique	10^{-2}
Faible	10^{-6}
Gravité	10^{-38}

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

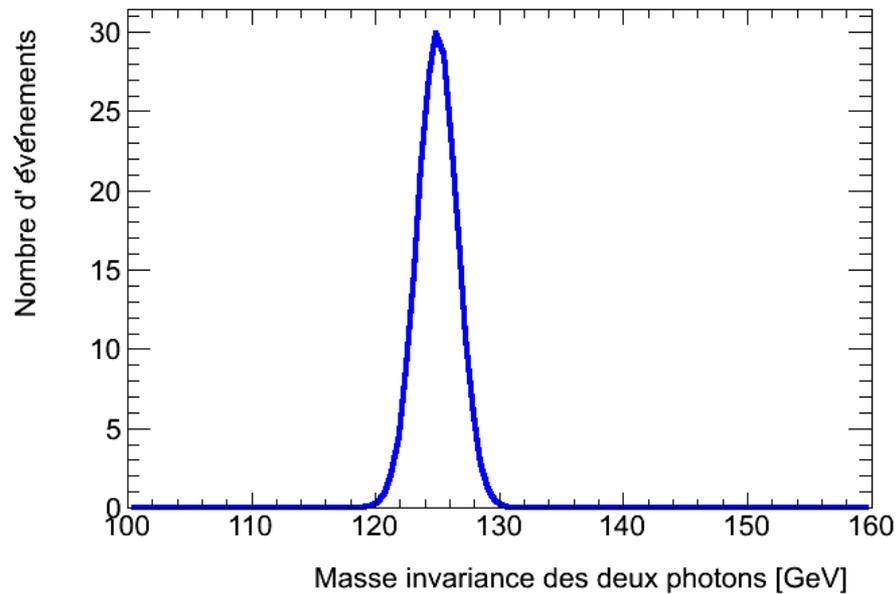
Higgs ($m_H = 125$ GeV)



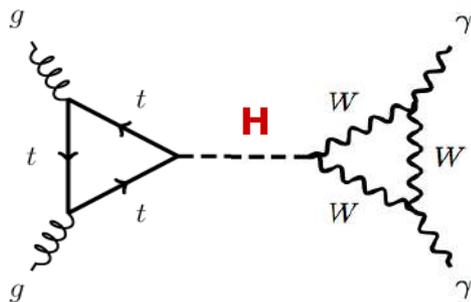
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

Higgs ($m_H = 125$ GeV)



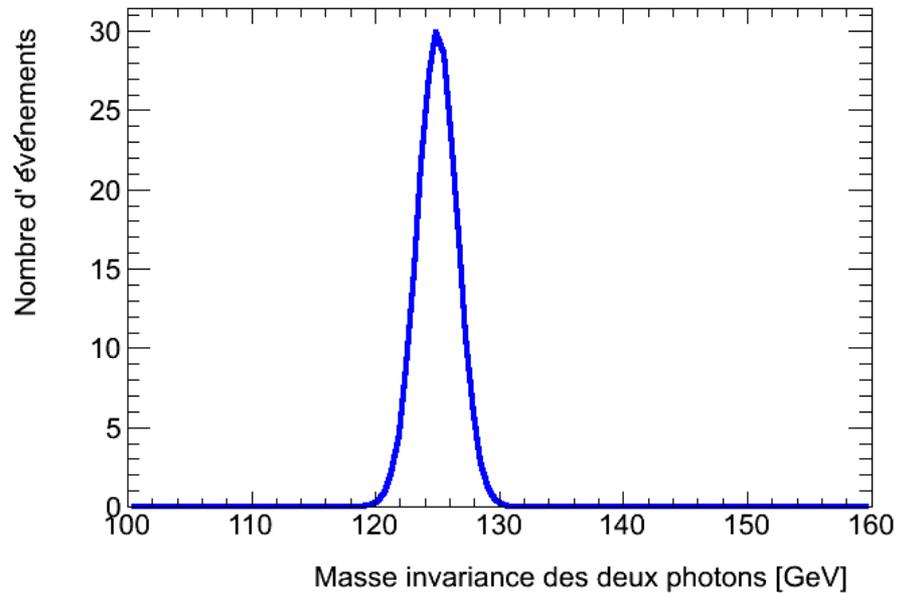
Résolution
du
détecteur



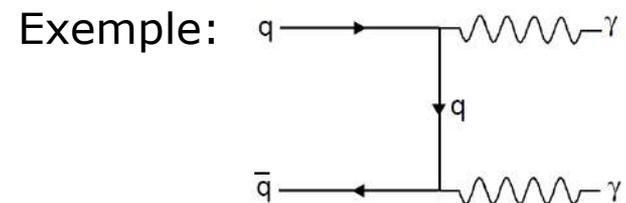
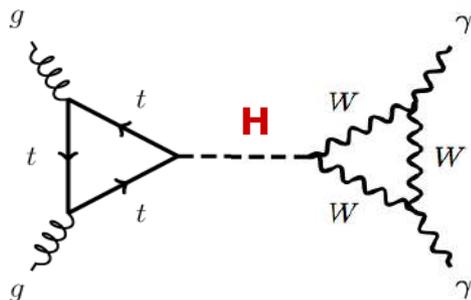
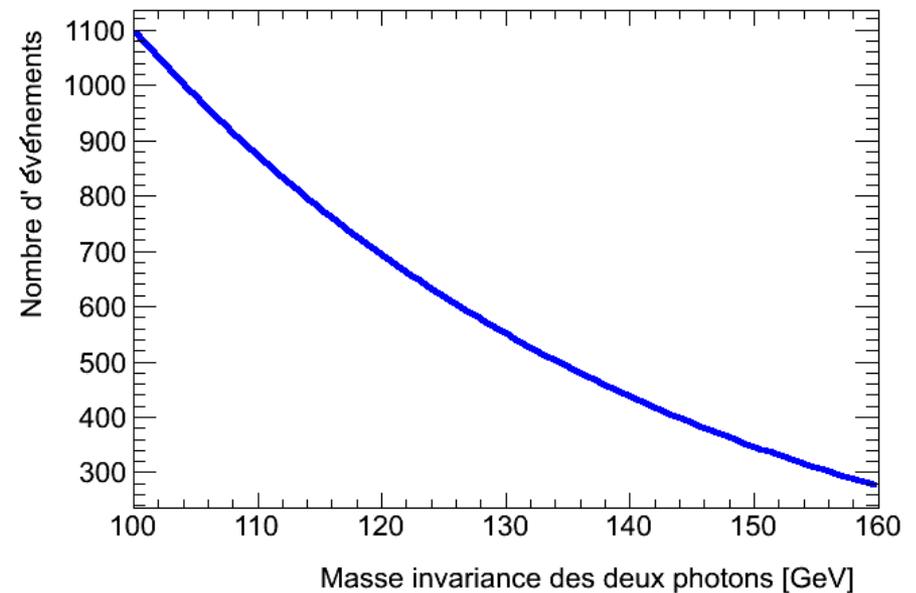
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

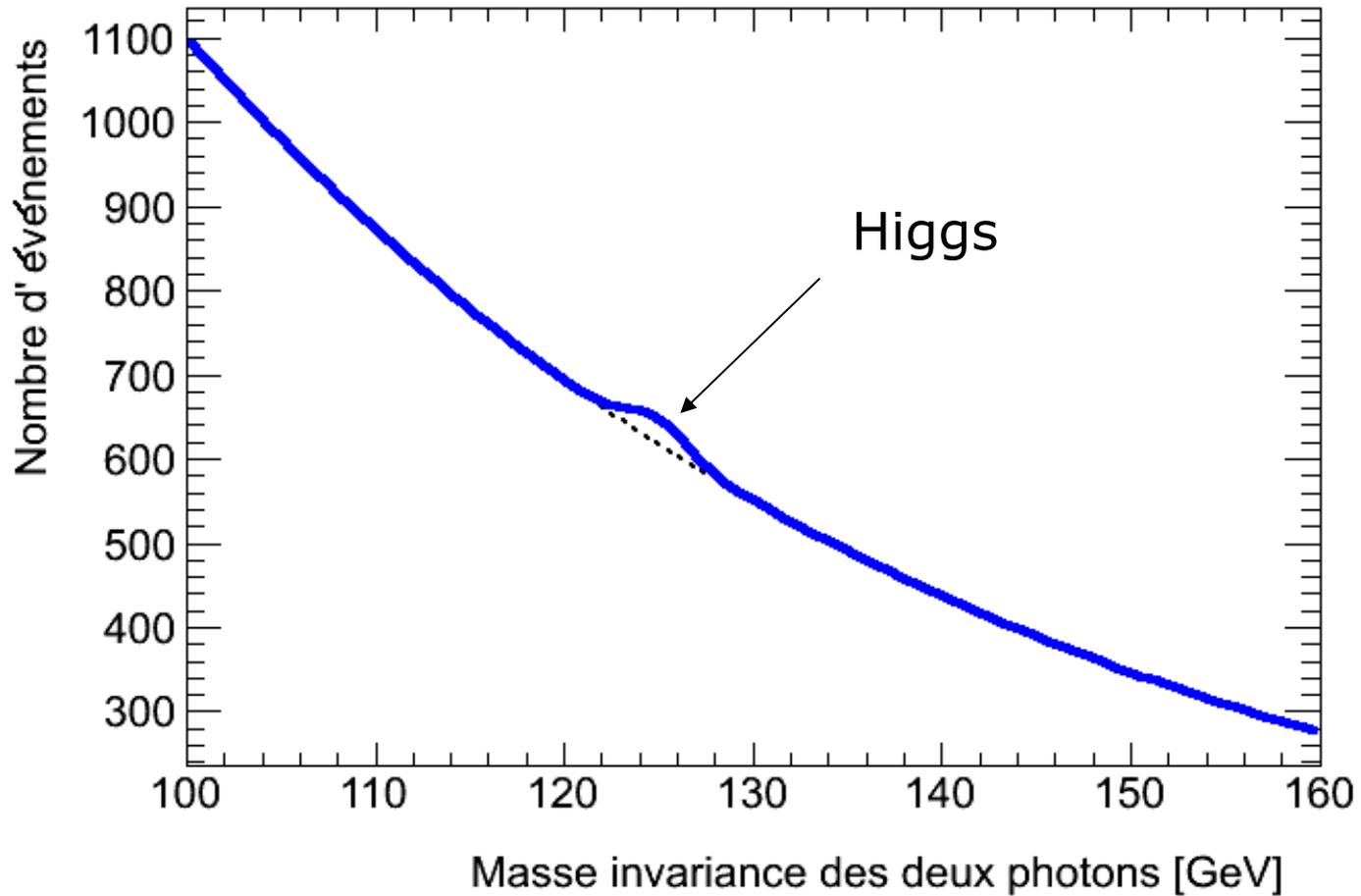
Higgs ($m_H = 125$ GeV)



Bruit de fond

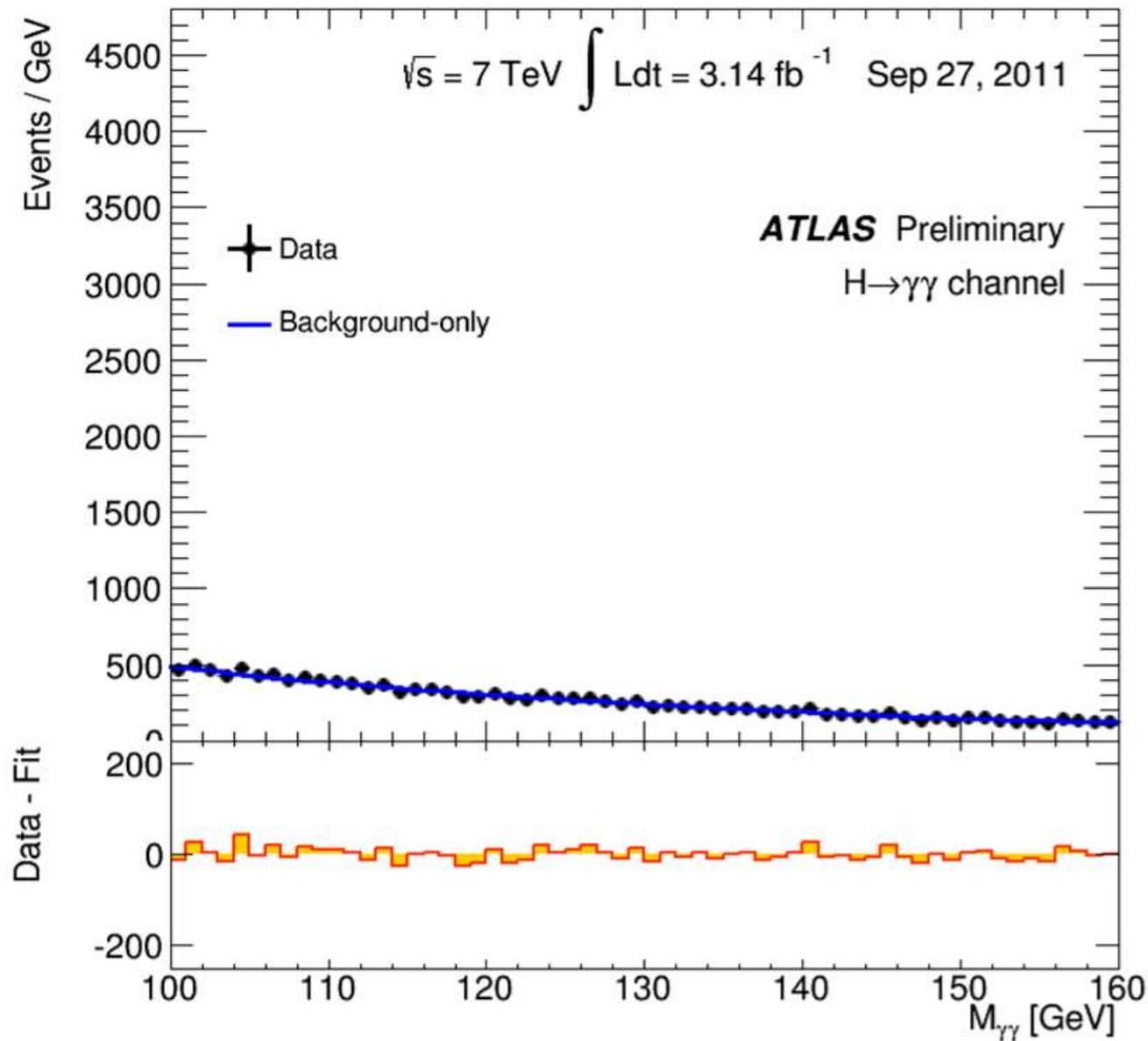


Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$: simulation

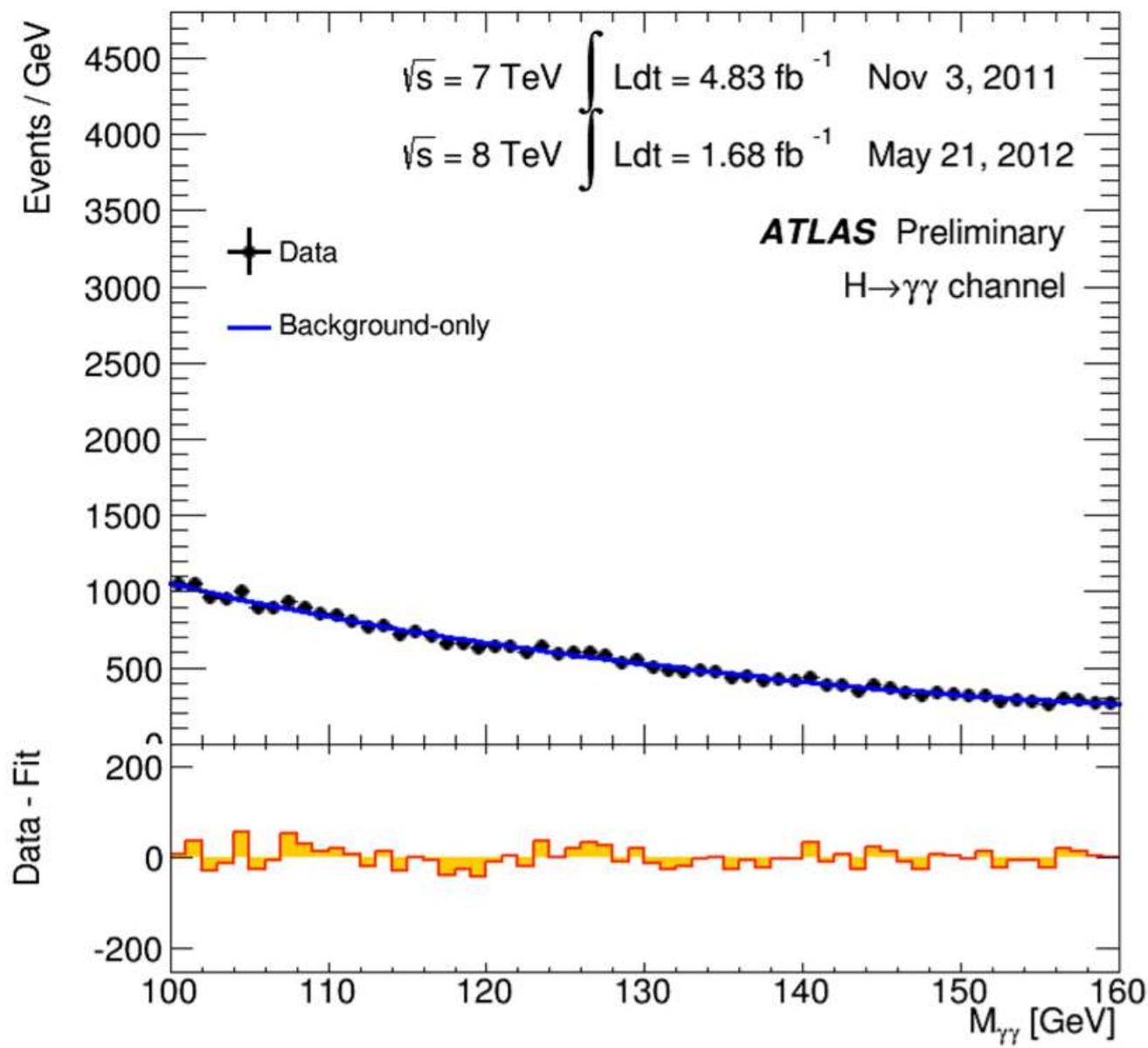


Bosse = signature du boson de Higgs

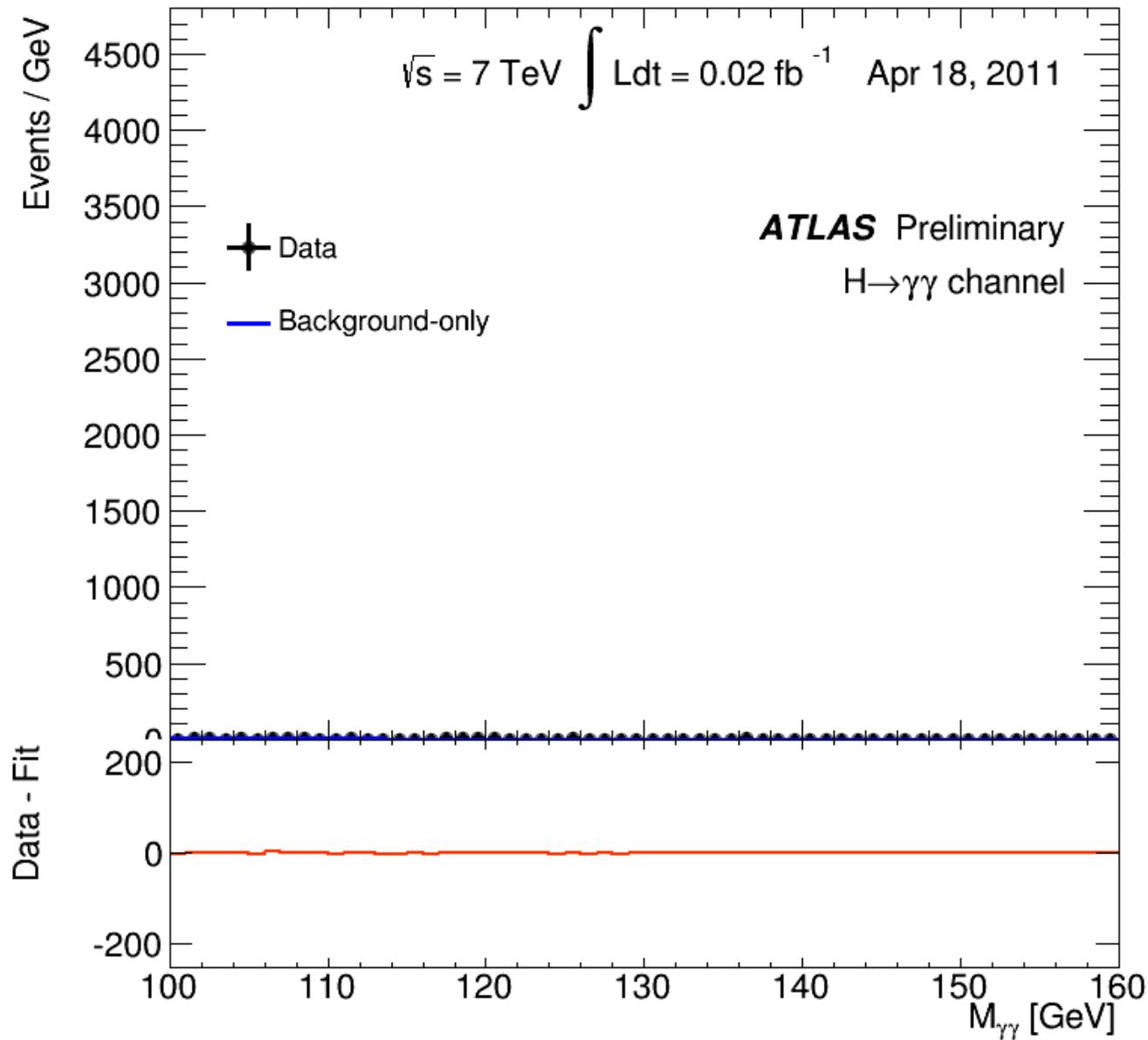
Découverte d'une nouvelle particule au CERN



Découverte d'une nouvelle particule au CERN



Découverte d'une nouvelle particule au CERN

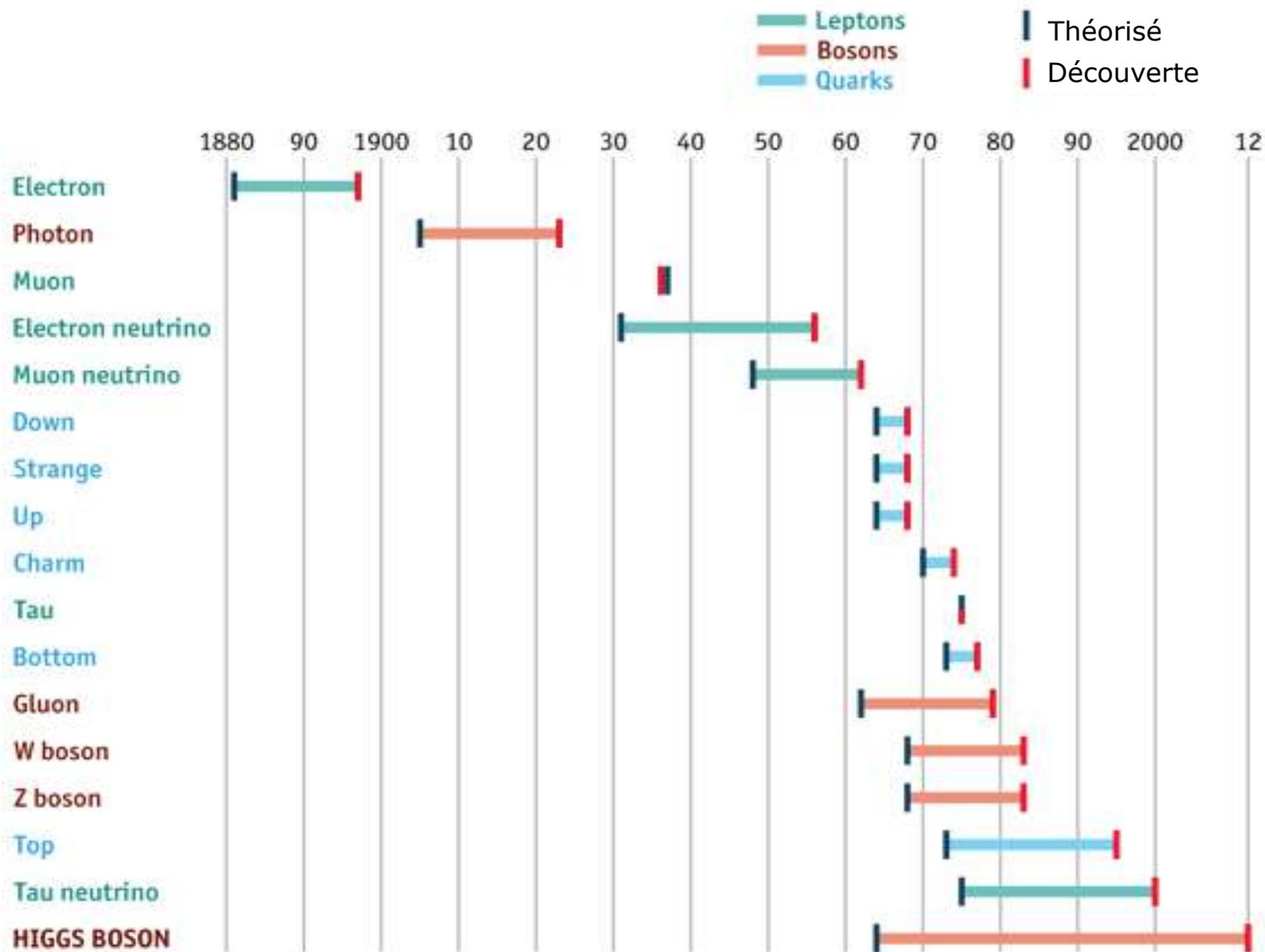


4 Juillet 2012

Libération

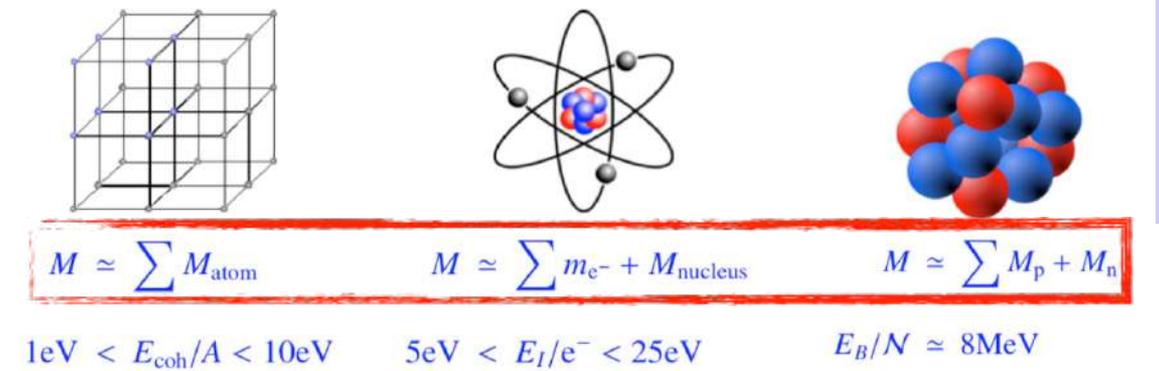
44





$$\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_\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] - 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 [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 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^- [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 \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_c^\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_c^\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^-] + 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}$$

La masse dans le microcosme

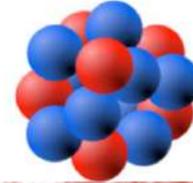
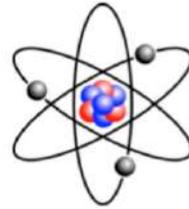
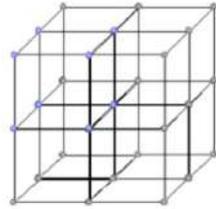


The diagram shows three levels of mass calculation, each with a corresponding illustration and equation:

- Crystal:** A 3D grid of atoms. Equation: $M \approx \sum M_{\text{atom}}$. Energy range: $1\text{eV} < E_{\text{coh}}/A < 10\text{eV}$.
- Atom:** A central nucleus with orbiting electrons. Equation: $M \approx \sum m_{e^-} + M_{\text{nucleus}}$. Energy range: $5\text{eV} < E_I/e^- < 25\text{eV}$.
- Nucleus:** A cluster of protons and neutrons. Equation: $M \approx \sum M_p + M_n$. Energy range: $E_B/N \approx 8\text{MeV}$.

- 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 **cristal**, 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 microcosme



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

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

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

$$M_N \gg \sum m_q$$

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

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

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

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

- 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 **cristal**, 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

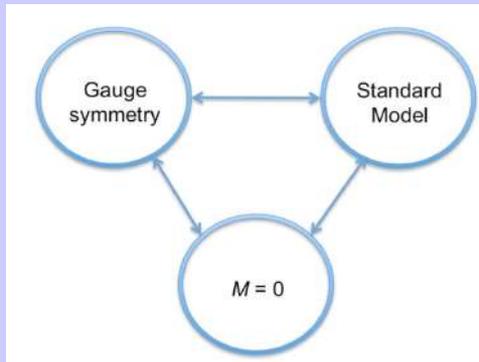
- Théorème de **Noether** : les **symétries** sont **liées** à la **conservation** des **propriétés physiques**
- La **symétrie de jauge** : l'**invariance** des observables par rapport à un **changement de phase** local du **champ**, est la base du Modèle Standard (QED, QCD)
- La **symétrie de jauge** 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 \(1882–1935\)](#)

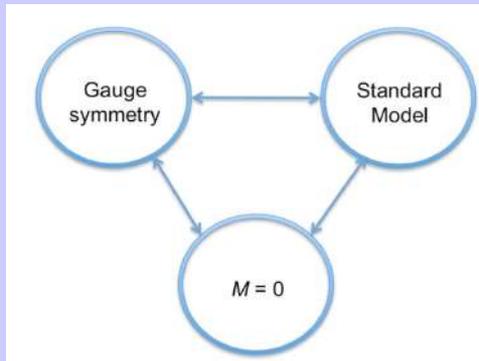
Le problème de masse

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



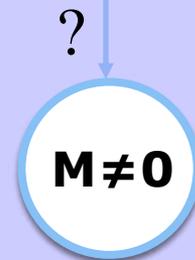
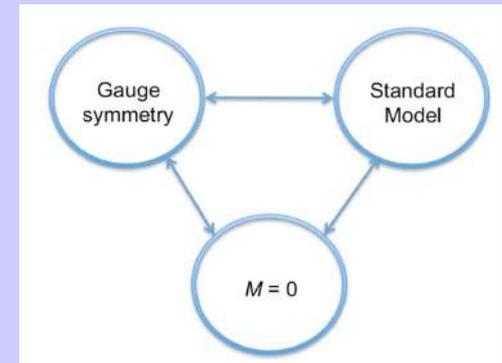
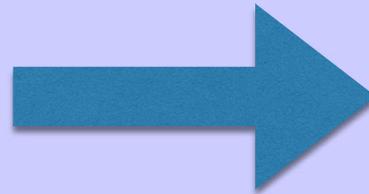
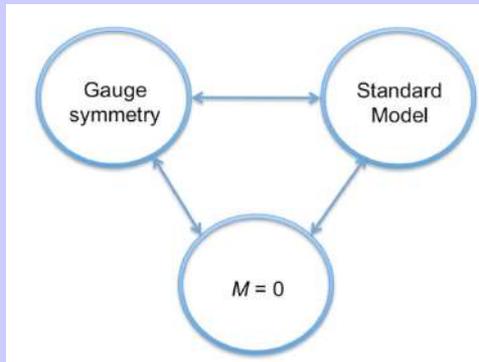
Le problème de masse

- 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 **$m_z, m_w \neq m_\gamma (=0)$** violent la **symétrie de jauge**



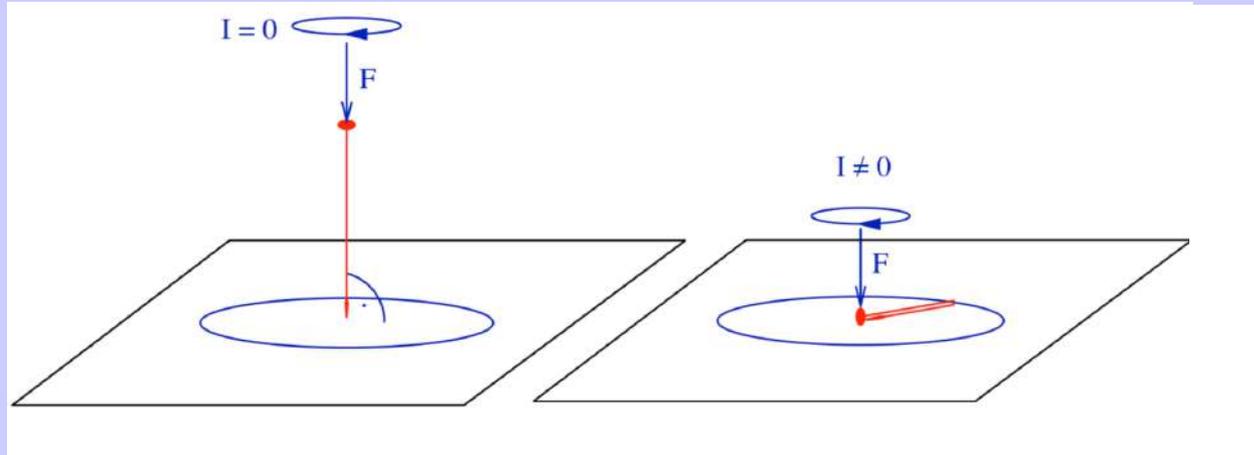
Le problème de masse

- 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

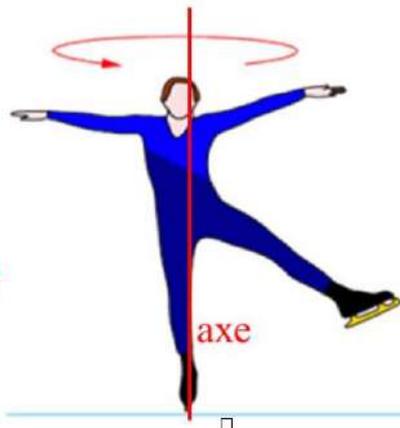
Moment d'inertie "angular mass"

- 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**

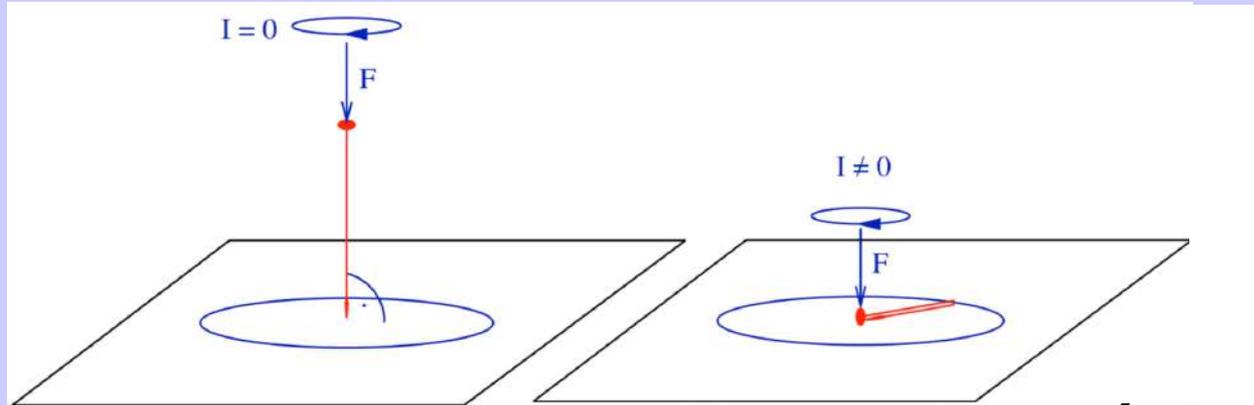
□ Dépend de :

- 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**

Une analogie mécanique

- 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**
- Le **système** a **acquis** une **nouvelle propriété**, une **sorte de masse**

Neutrinos

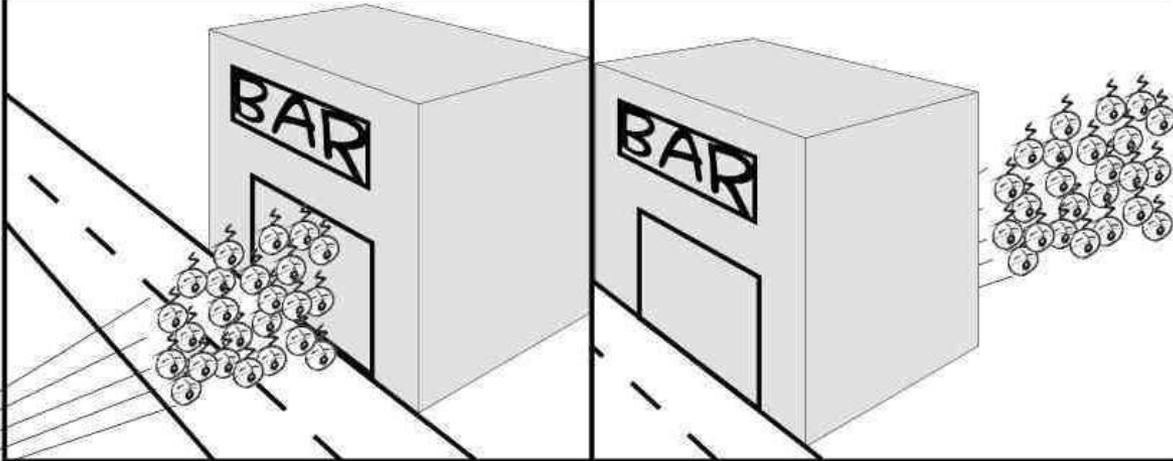
		Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions		boson de masse			
		I	II	III						
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2	u up	1.27 GeV +2/3 1/2	c charm	171.2 GeV +2/3 1/2	t top	0 0 1	γ photon	125 GeV 0 0	H boson de Higgs
	4.8 MeV -1/3 1/2	d down	104 MeV -1/3 1/2	s strange	4.2 GeV -1/3 1/2	b bottom	0 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		
		bosons					BOSONS DE JAUGE			
								nom spin charge électrique masse symbole		
								125 GeV 0 0 0 H boson H		

1ere génération 2eme génération 3eme génération

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.

Learn Something.
New Every Day.
LSNED.com

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: November 2019

