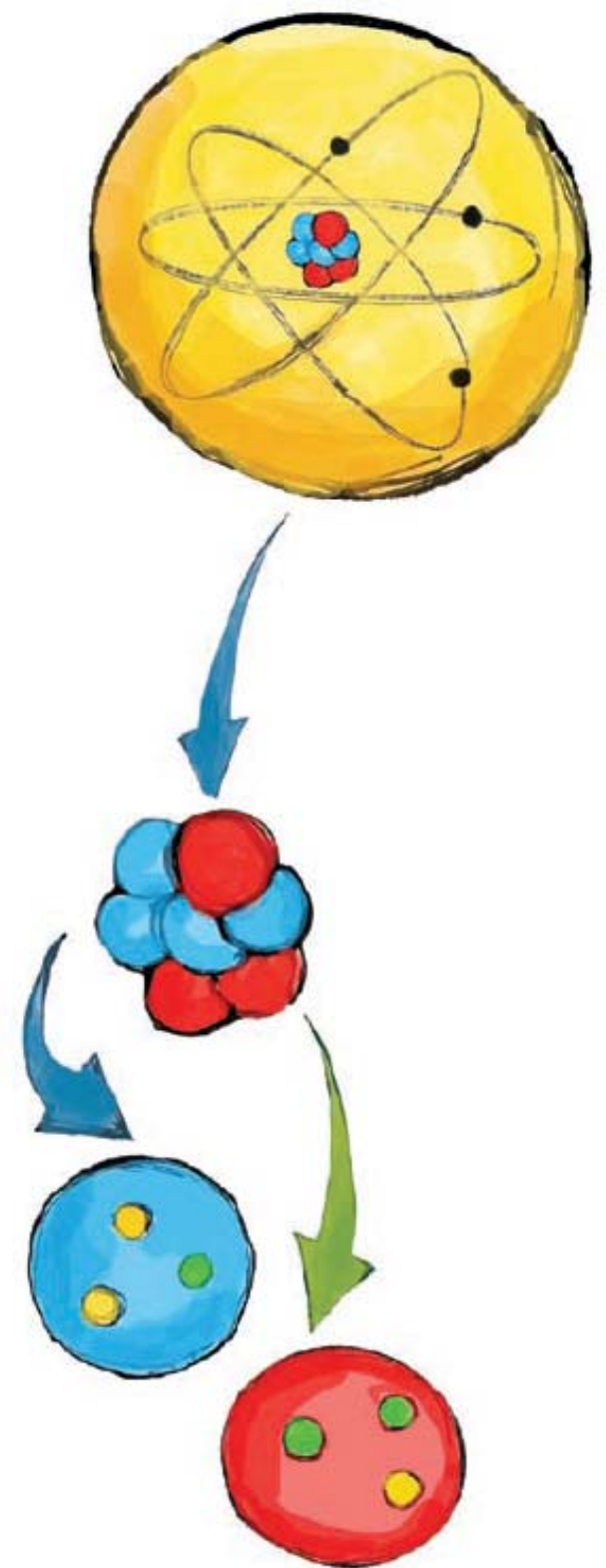


Particules et Interactions

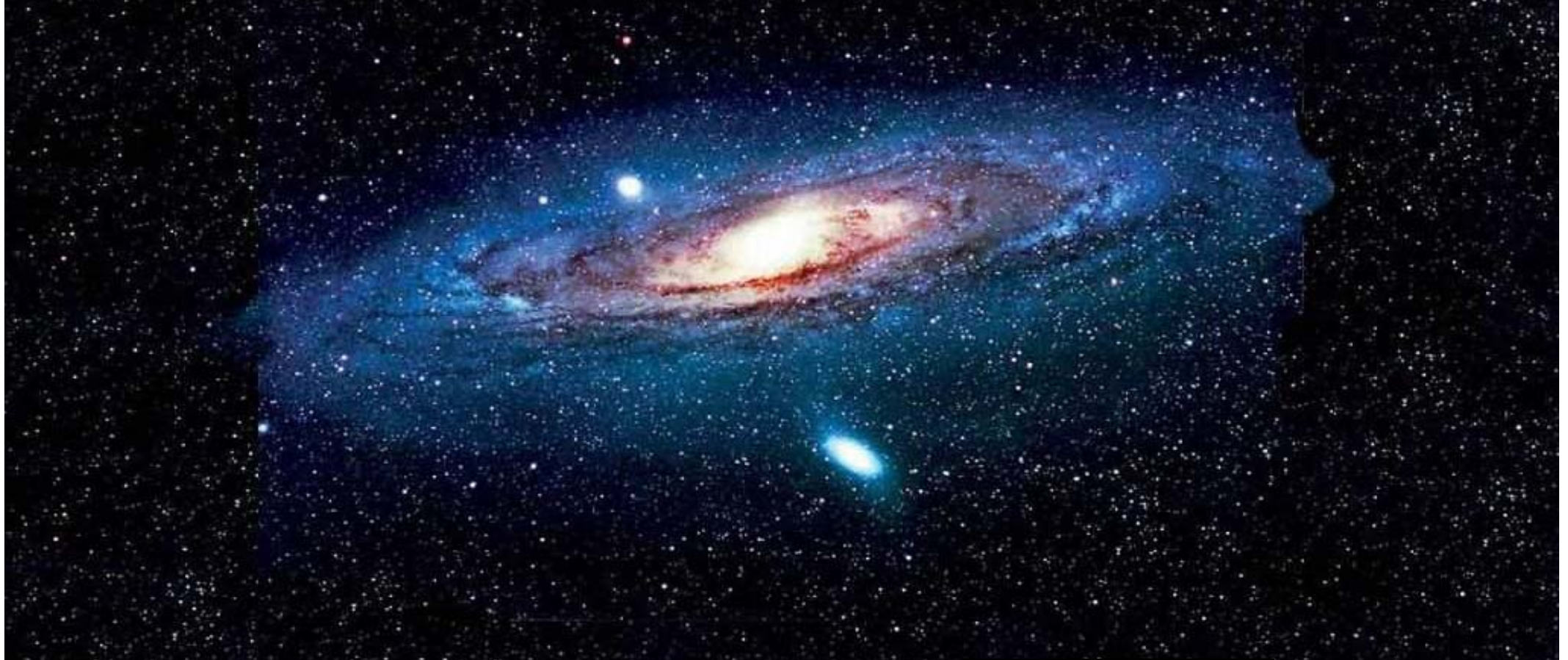
Nikola Makovec
Nicolas Arnaud

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
CNRS/IN2P3, Université Paris-Sud

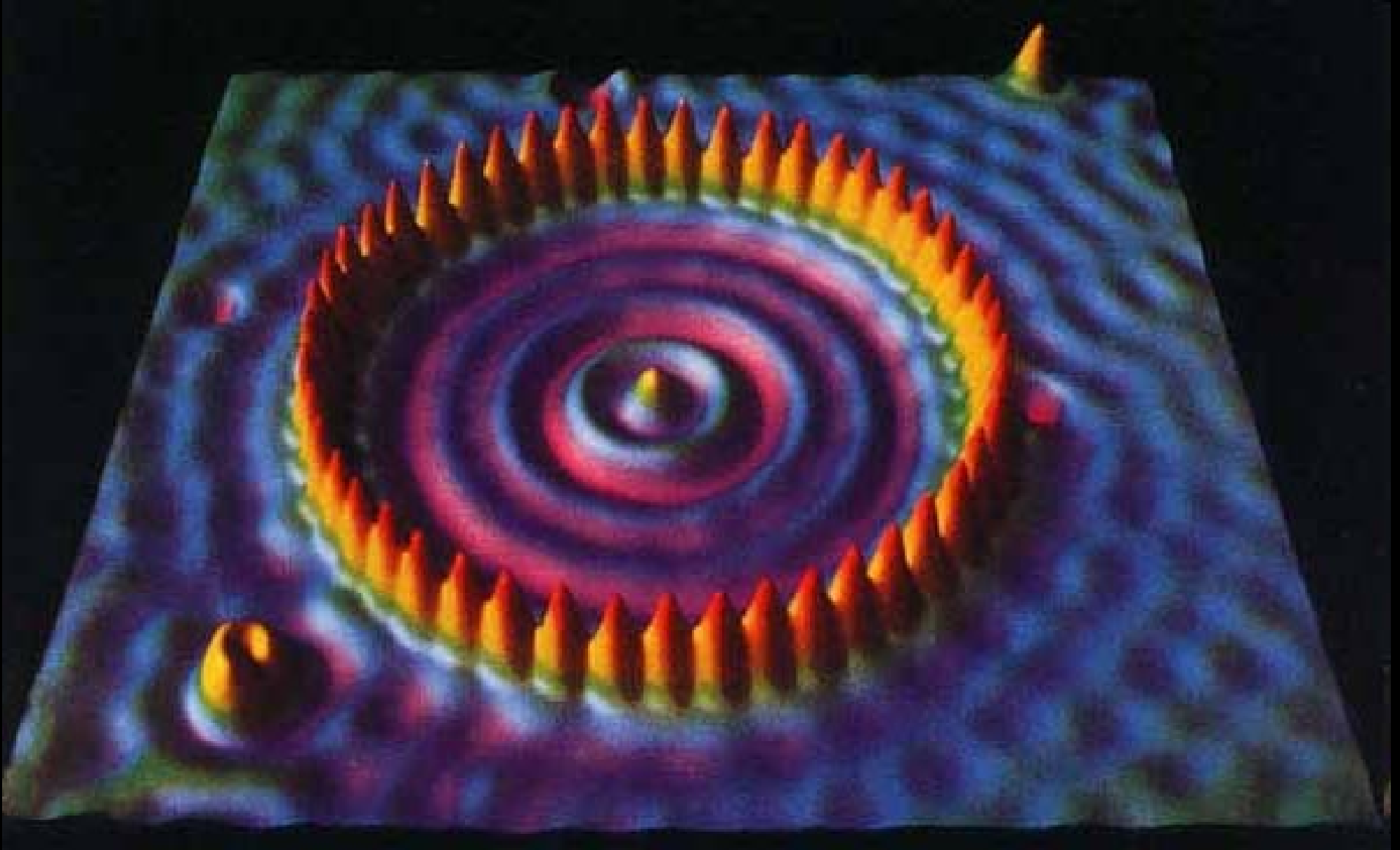
Masterclasses 2015



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



L'atome

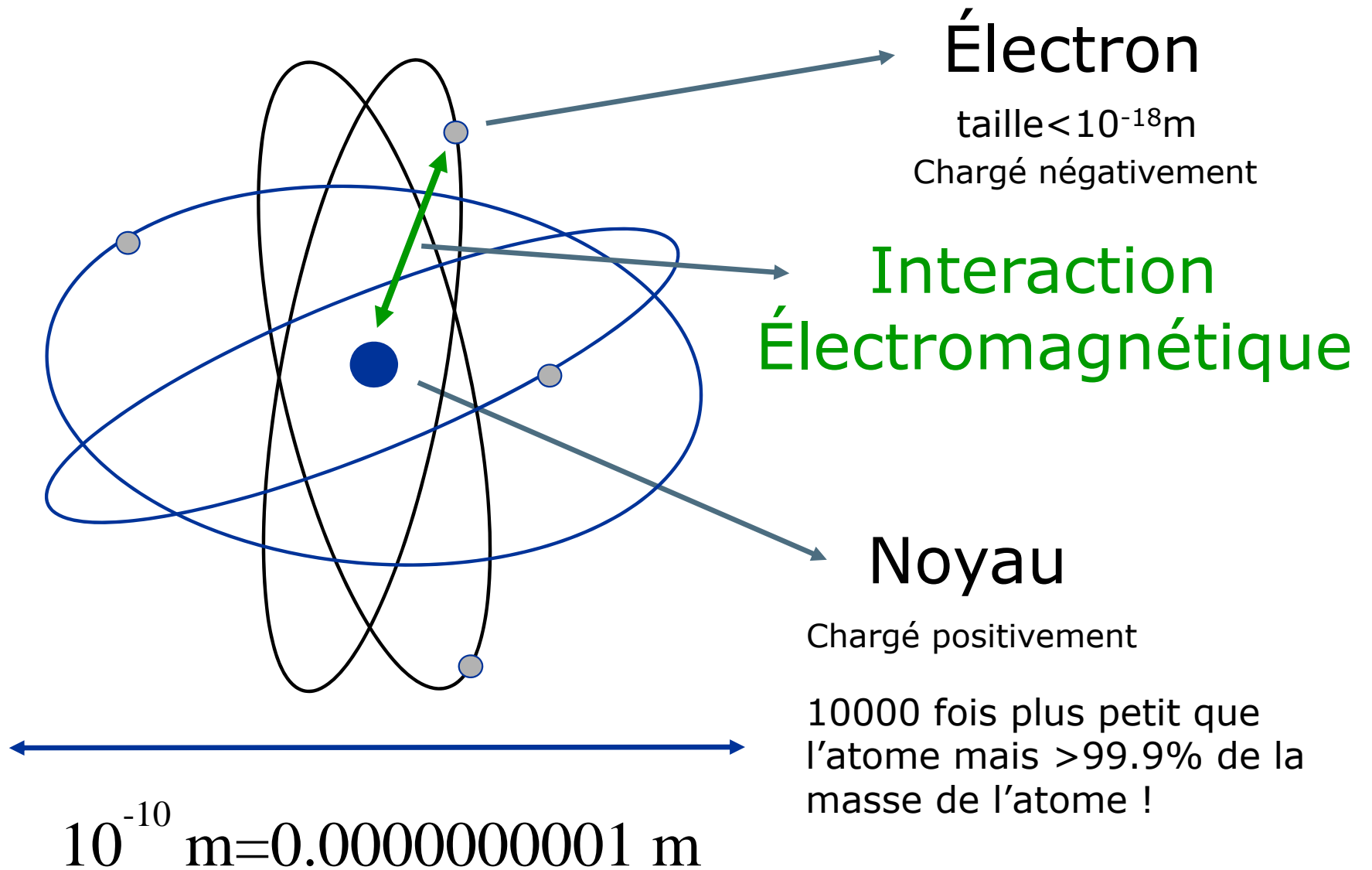


Taille d'un atome: 10^{-10} m = 0.0000000001m

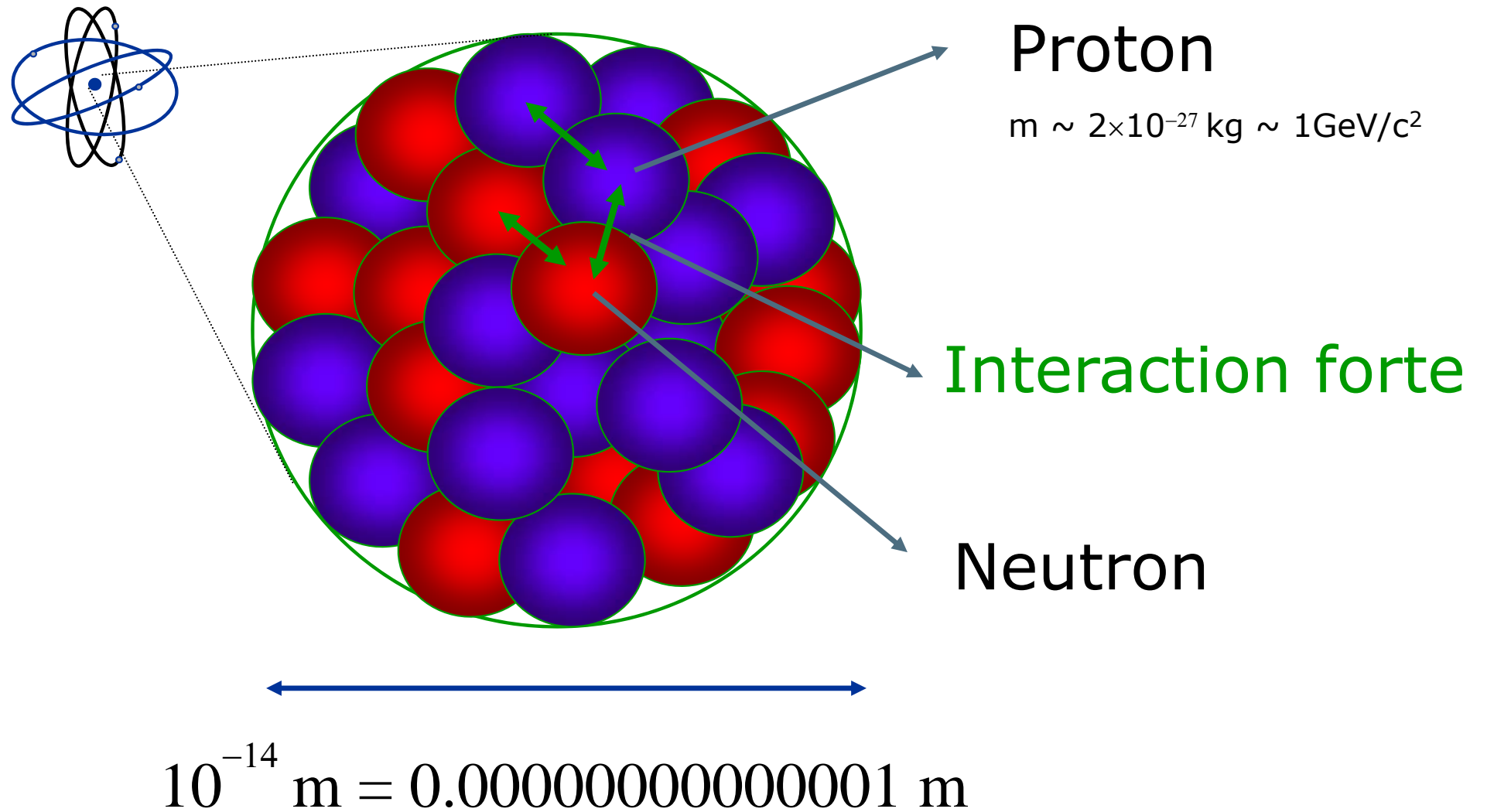
10 millions de fois plus petit qu'une fourmi
Entre 10 et 100 mille fois plus petit qu'une bacterie



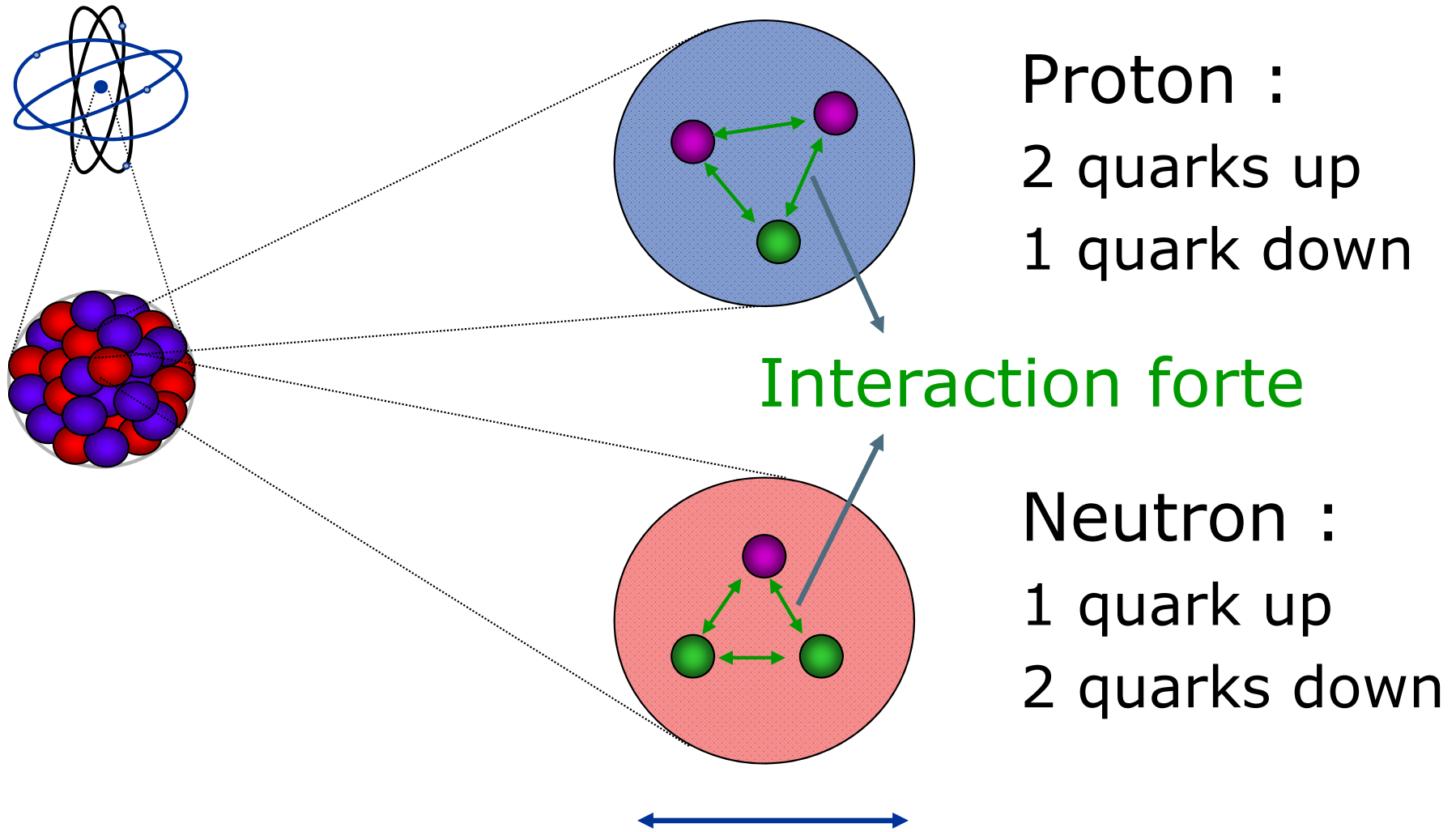
Structure de l'atome



Structure du noyau



Structure des protons et des neutrons



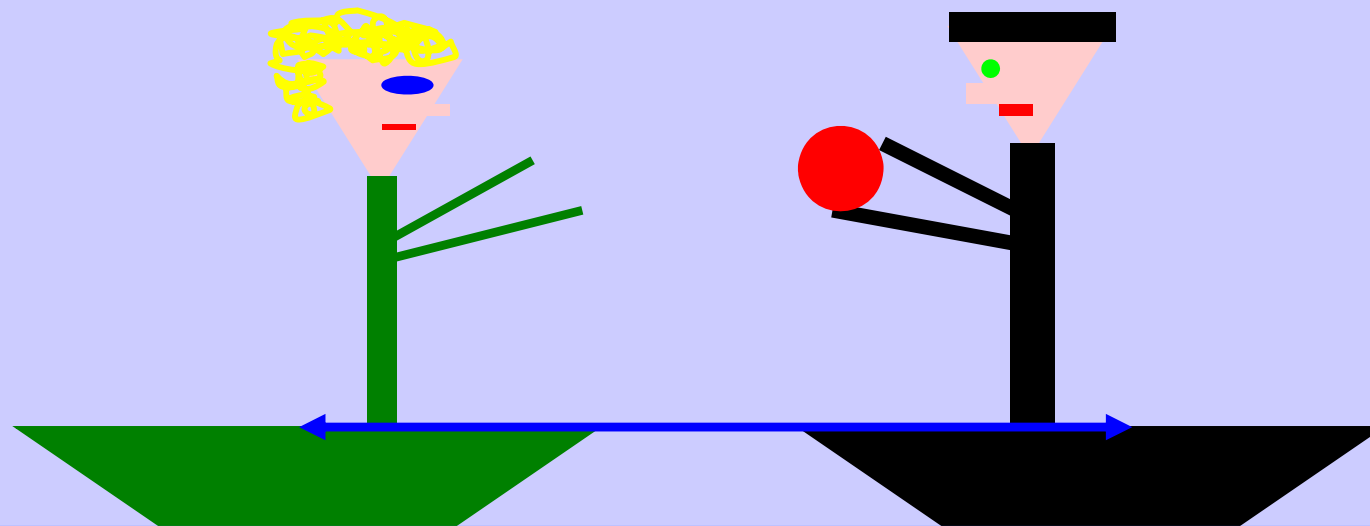
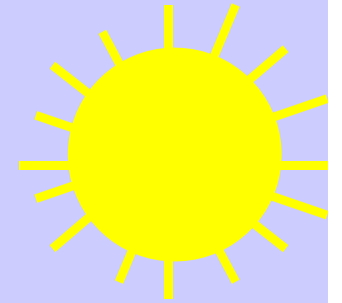
Proton :
2 quarks up
1 quark down

Interaction forte

Neutron :
1 quark up
2 quarks down

$$10^{-15} \text{ m} = 0.0000000000000001 \text{ m}$$

Interagir = échanger une particule



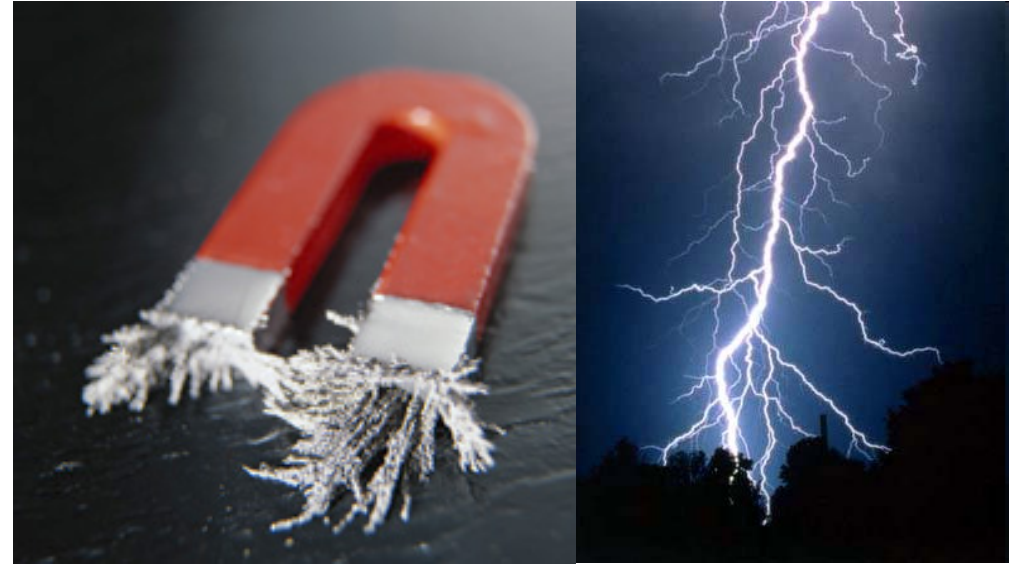
- Les **ballons** sont les **médiateurs** de la force qui écarte les 2 bateaux.
- La **portée** dépend de la **masse** du ballon

Bosons de jauge : médiateurs des interactions fondamentales



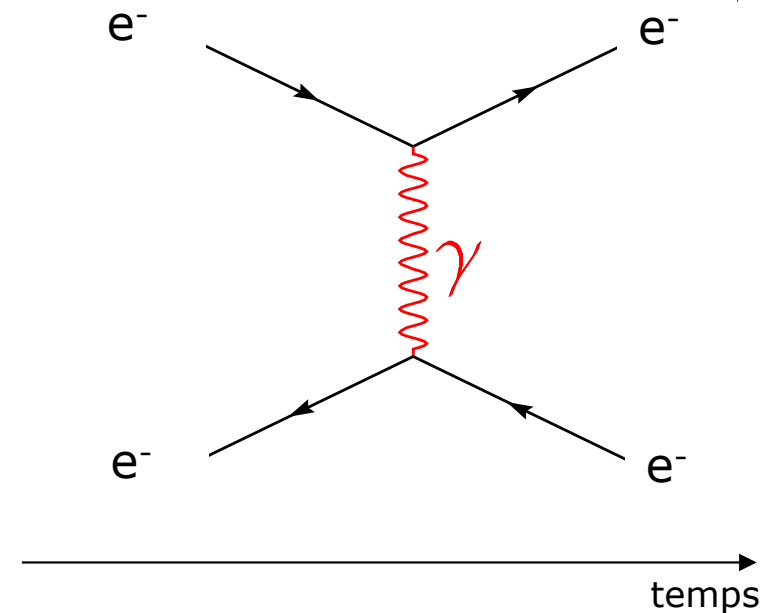
L'interaction électromagnétique

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



Médiateur : **photon**

$m=0$ (vitesse= c)
portée infinie



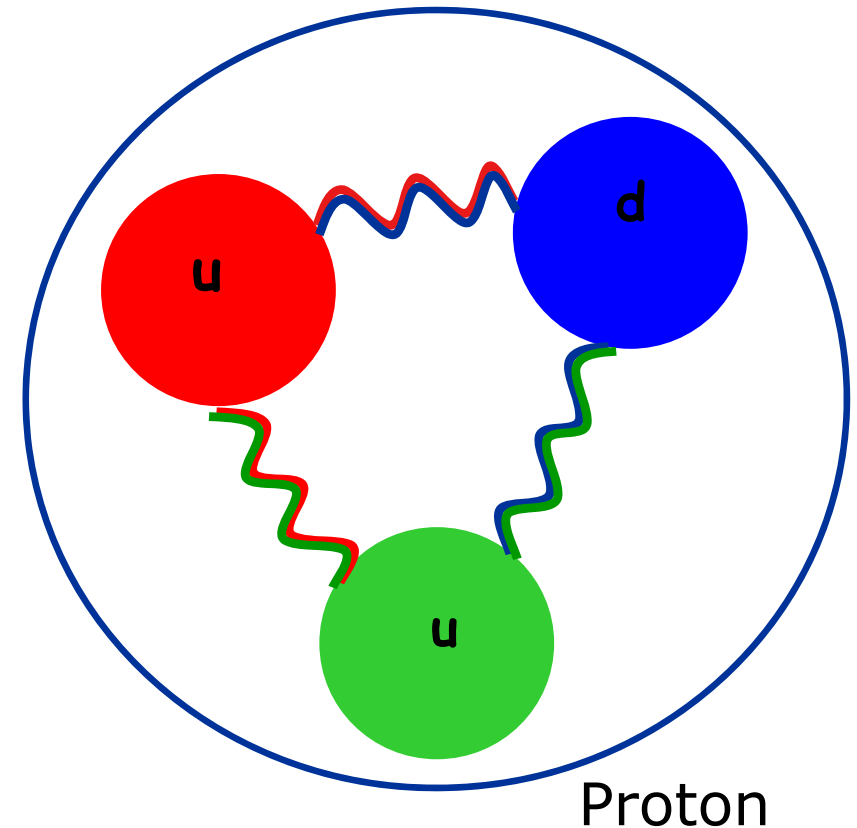
L'interaction nucléaire forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Médiateurs: **8 gluons**

$m=0$

Portée : 10^{-15} m

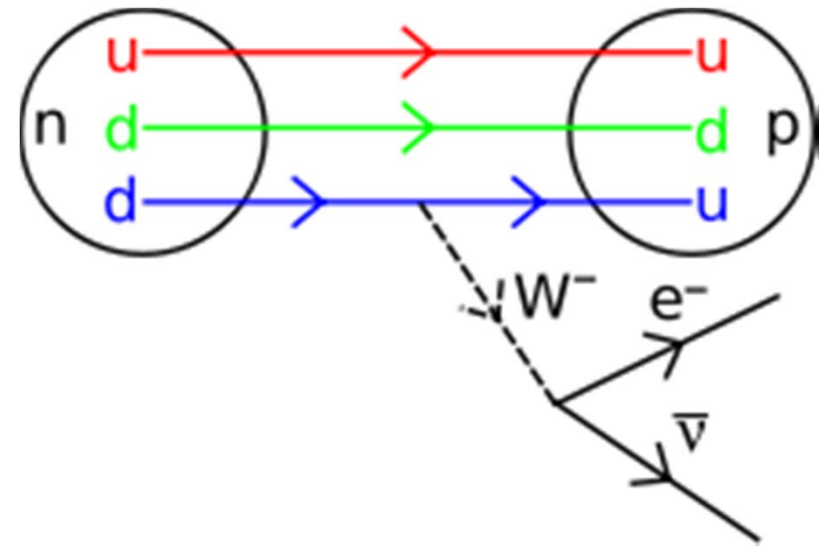


Les quarks n'existent pas à l'état libre: ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons** (assemblages de quarks) collés par les **gluons**

L'interaction nucléaire faible

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

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

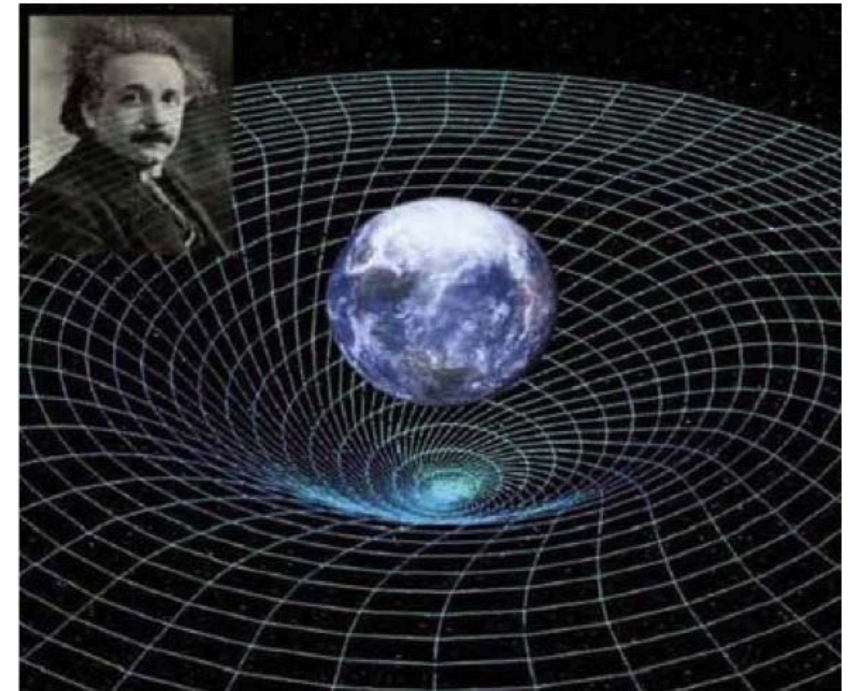


- 10 000 fois plus faible que l'interaction forte
- Portée: 10^{-18} m
 - Expliquée par la grande masse des bosons de jauge de l'interaction faible.



La gravitation

- Responsable de la pesanteur, des marées, des mouvements des astres, ...
- Force complètement négligeable à l'échelle du noyau
 - 10^{-33} fois plus faible que l'interaction faible
 - Mais portée infinie et 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**

Matière

Leptons

Quarks



Matière

Leptons

Quarks



Matière

Leptons

Quarks

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

stable

instable

Matière

Leptons

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

Quarks

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

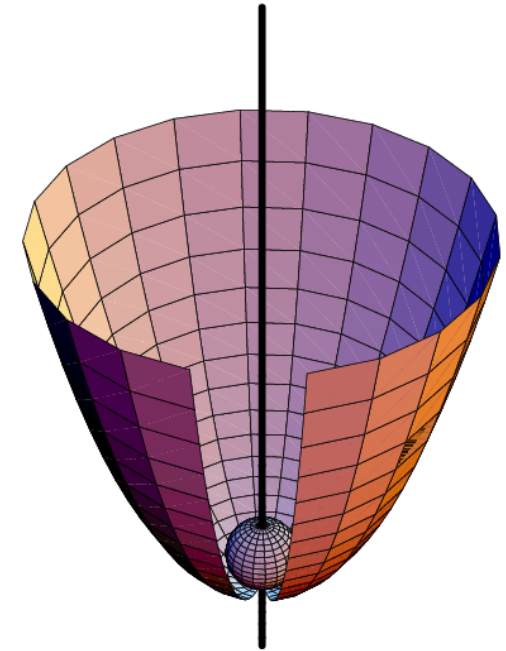
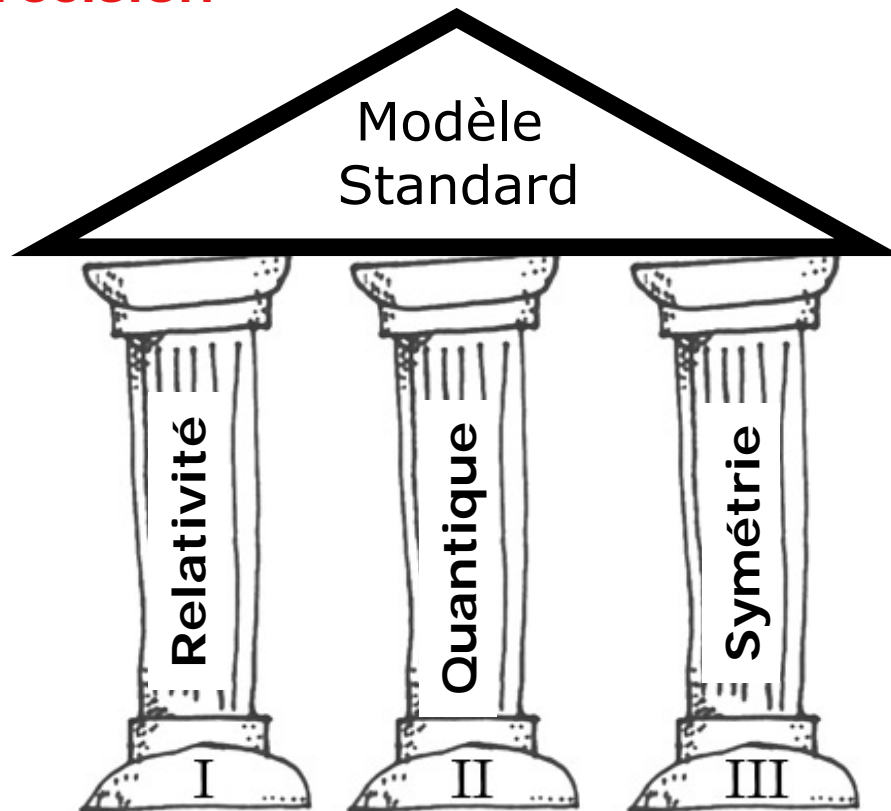
Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{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 \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\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 \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\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 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w \left[\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
& +\frac{1}{2}ig^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\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 \Lambda_\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_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^\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) \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^\kappa (\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 \Lambda_\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}$$

Le Modèle Standard

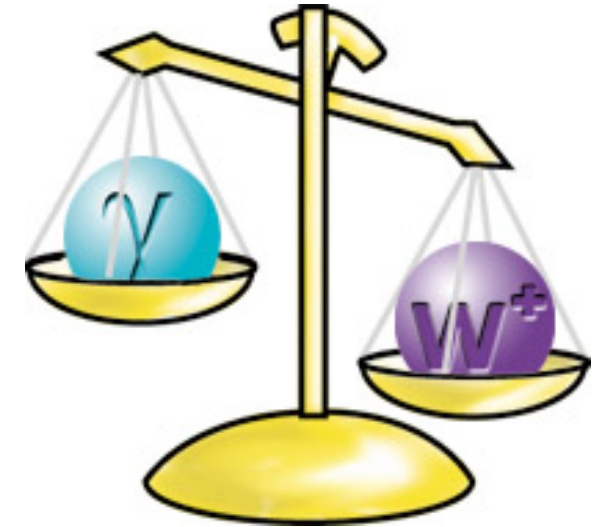
- Elaboré dans les années 1960-70
- Décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et les **interactions forte et électrofaible**
 - Mais pas la gravitation!
- Testé expérimentalement avec **grande précision**



- Un système est symétrique quand on le transforme en laissant sa forme inchangée.
- Groupe de symétrie (Invariance de jauge) détermine complètement la structure de l'interaction!

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

⇒ masse=0 ⇔ v=c

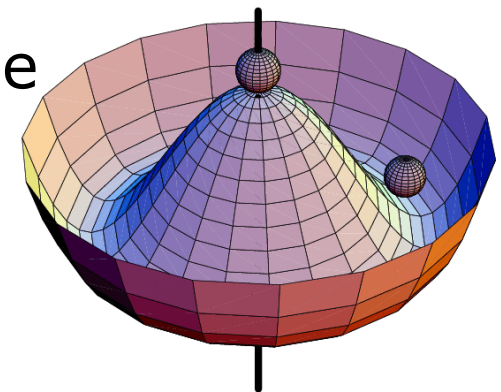
⇒ contradiction avec l'expérience

- Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- La masse n'est pas une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de l'interaction de la particule avec le champ de Brout-Englert-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

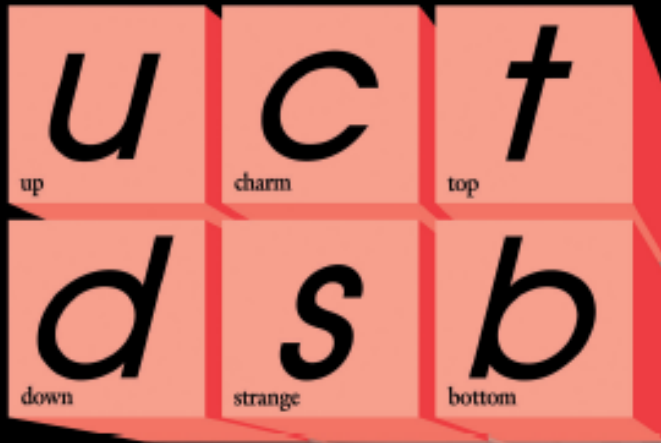
Boson de Higgs = quanta du champ de Higgs



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

Matière

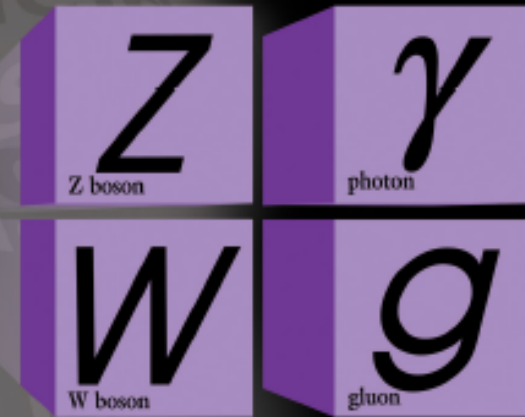
Quarks



Leptons

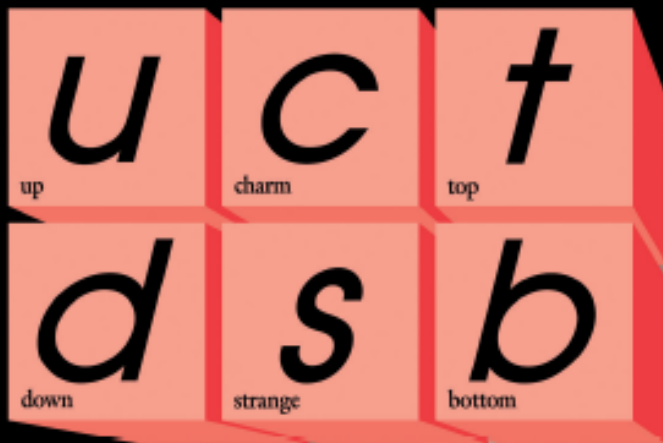


Forces



Matière

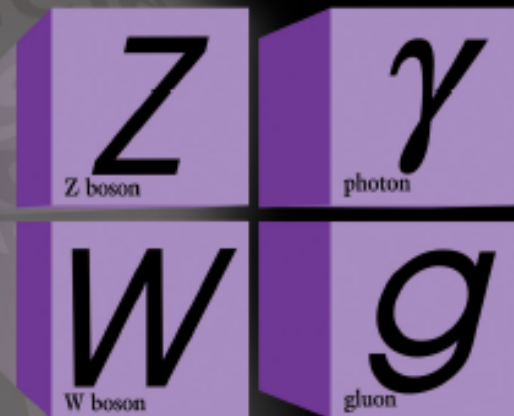
Quarks



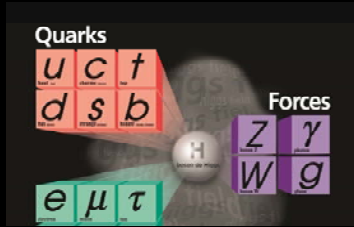
Leptons



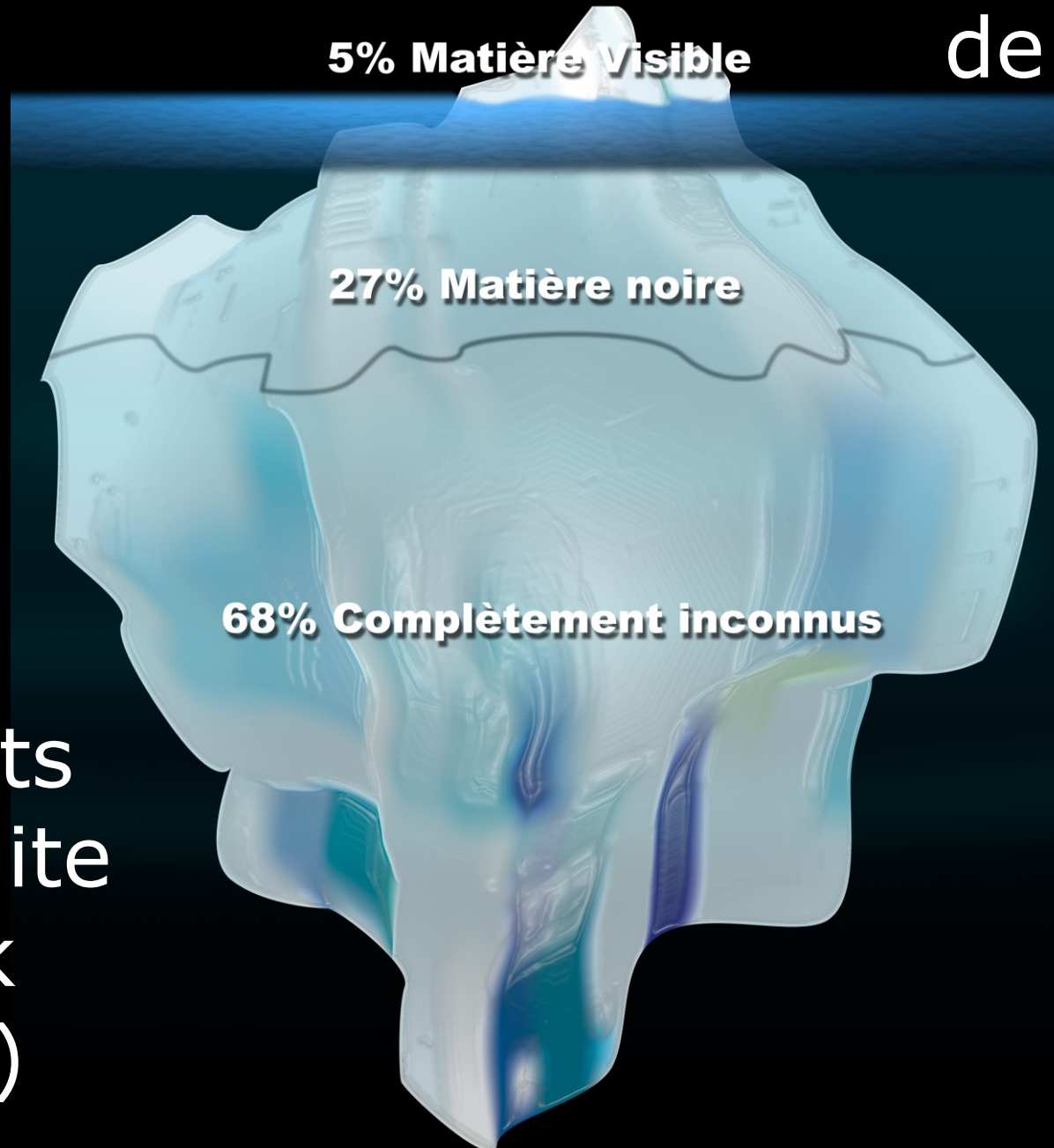
Forces



5% Matière Visible



Le contenu énergétique de l'Univers



Résultats
du satellite
Planck
(2013)

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**

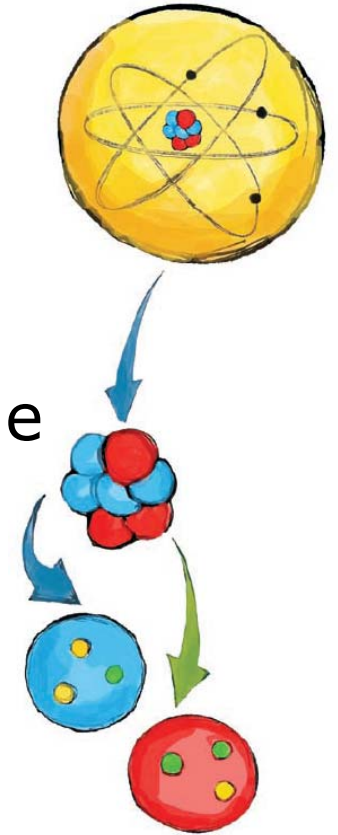
- Photon: interaction électromagnétique
- Boson Z/W: interaction faible
- Gluon: interaction forte

■ Le **Modèle Standard** est le cadre théorique qui permet de décrire les particules et leurs interactions

- La **masse des particules élémentaires** proviendrait de l'interaction avec le **champ de Higgs**

■ Une nouvelle particule a été découverte au CERN

- Est-ce bien le **boson de Higgs** du Modèle Standard?

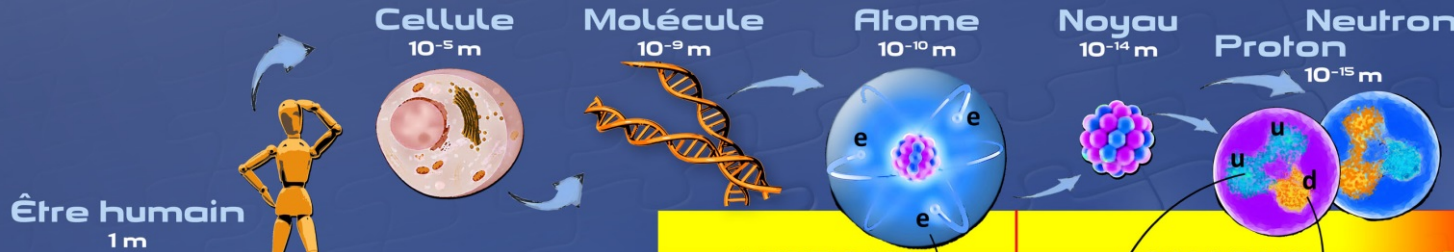




That's all Folks!

Nouvelle affiche des composants élémentaires de la matière (2014)

Composants élémentaires de la matière

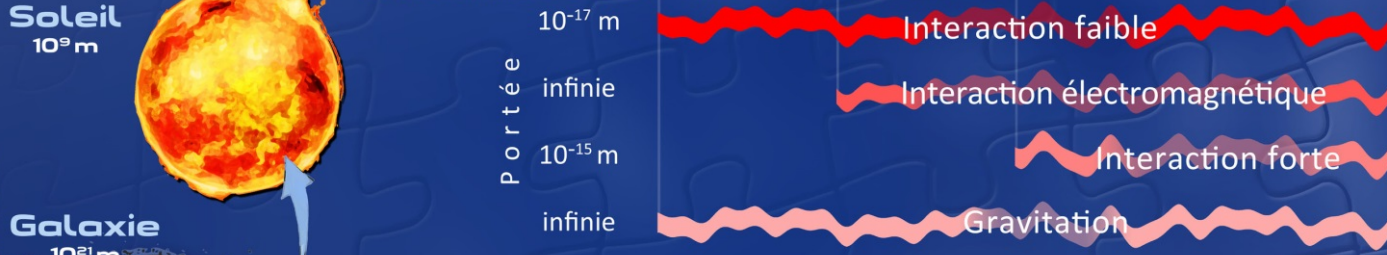


	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	$t = 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ s}$, $Q = 0$, $m = 125 \text{ GeV}/c^2$
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	

BOSON de HIGGS H

Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Bosons Z, W[±]	Désintégrations radioactives β ⁺ et β ⁻ de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

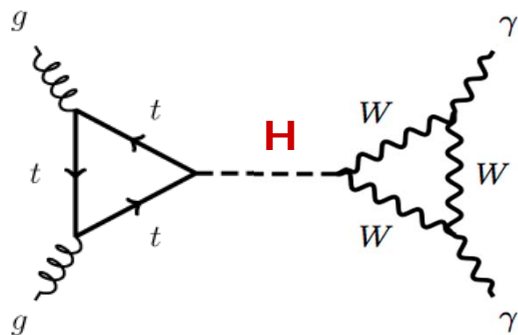
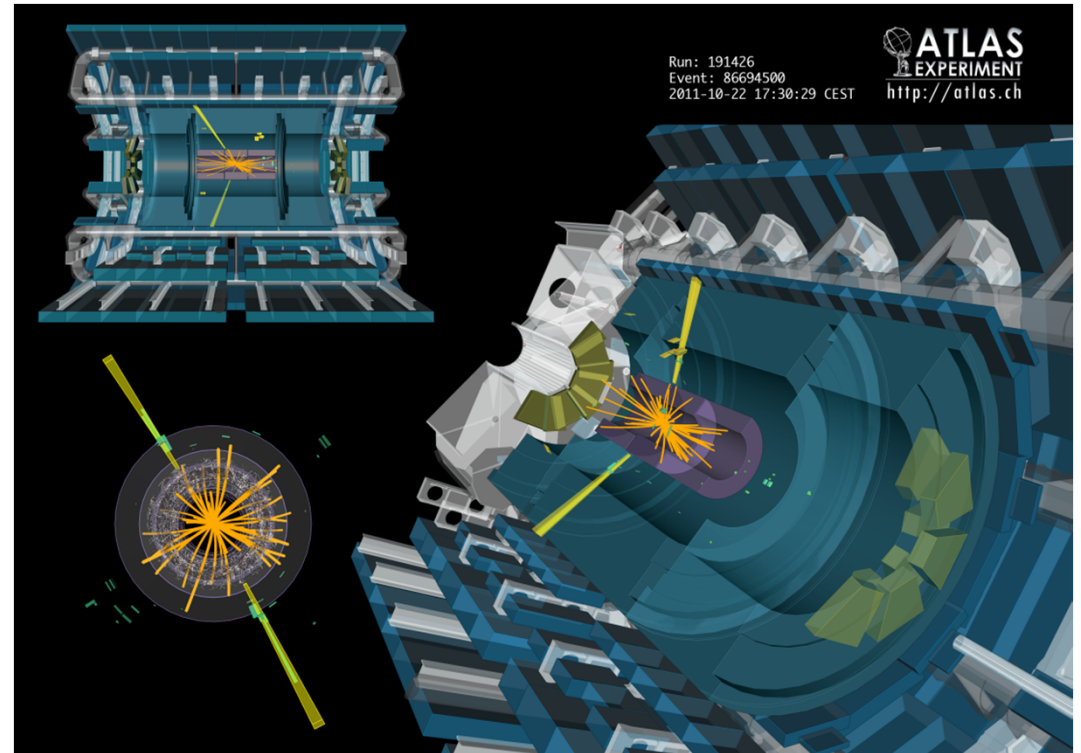
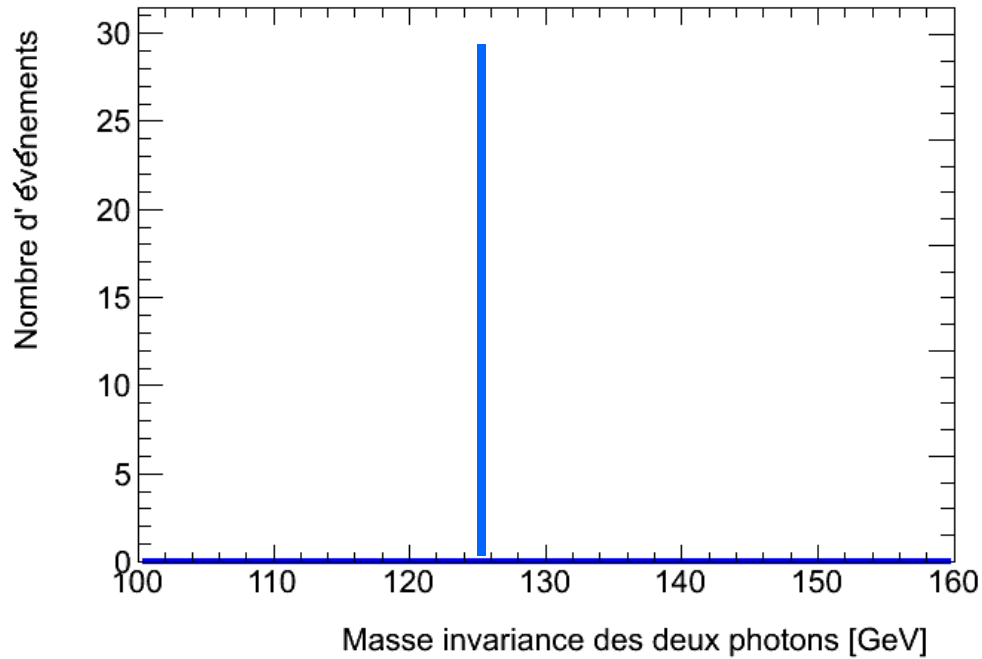
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Boris Malozemov - ILL, CERN, 2014

Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

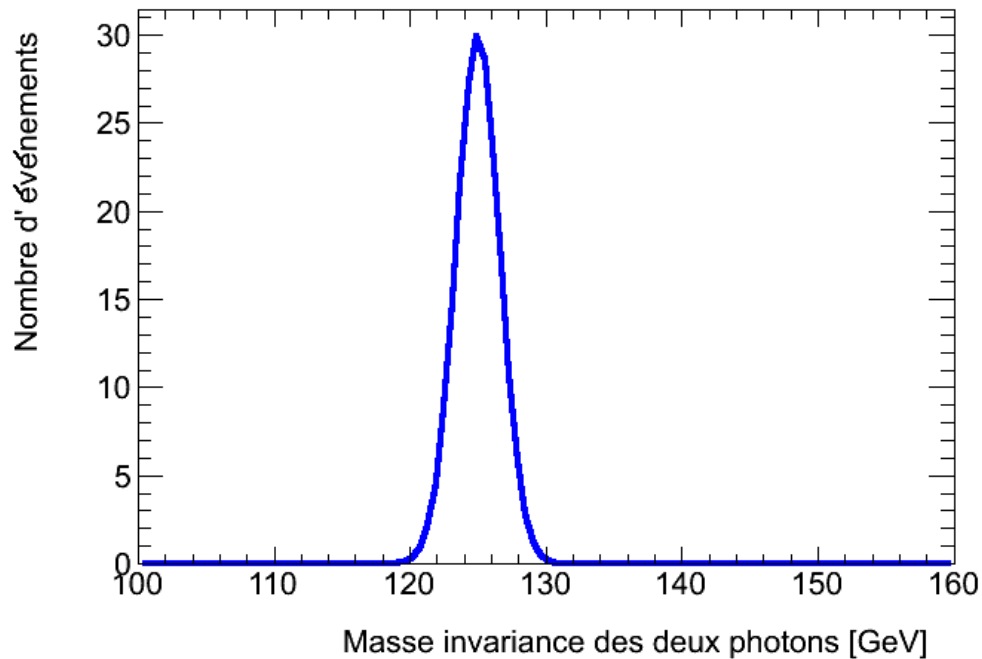
Higgs ($m_H = 125$ GeV)



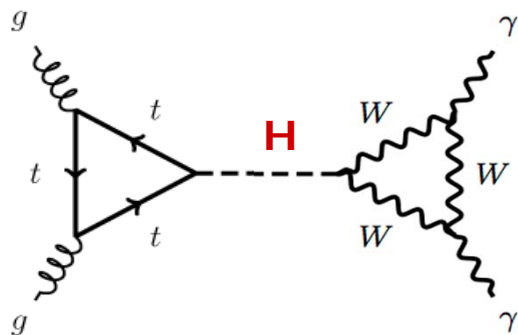
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

Higgs ($m_H = 125$ GeV)



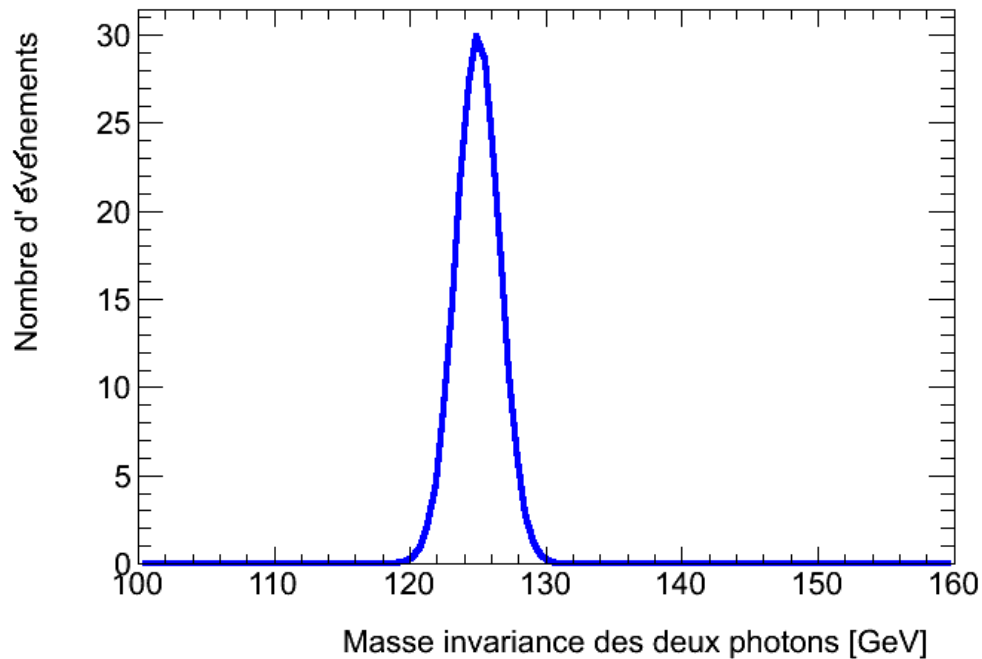
Résolution
du
détecteur



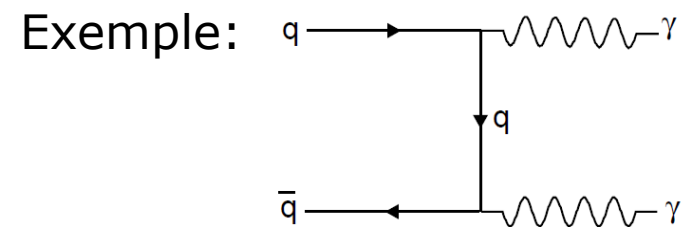
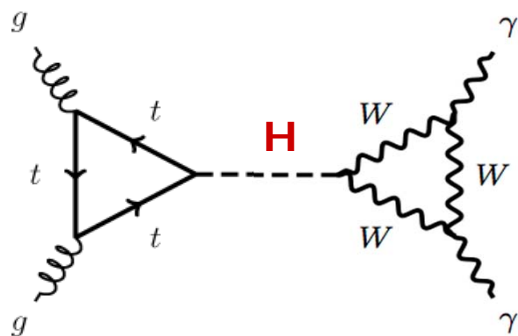
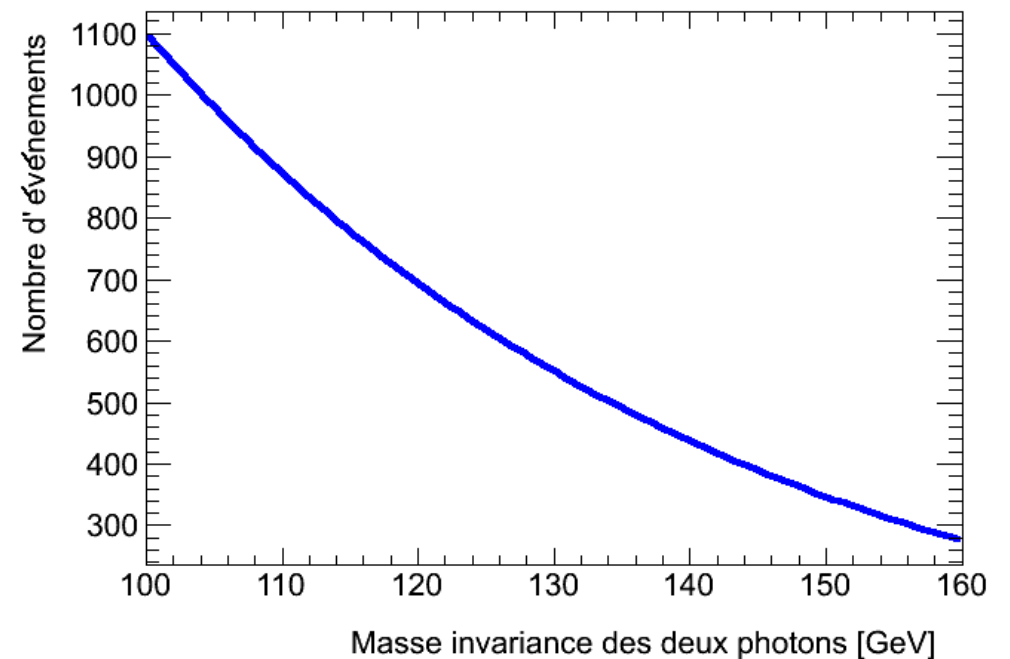
Le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

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

Higgs ($m_H = 125$ GeV)



Bruit de fond



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

⇒ masse=0 ⇔ v=c

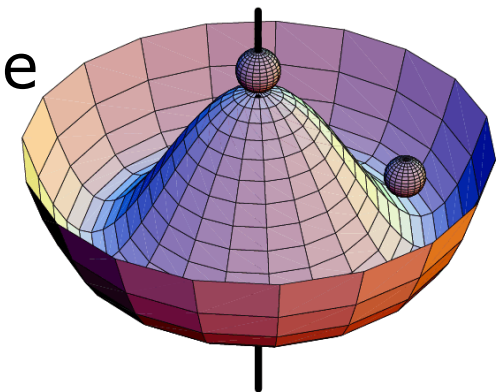
⇒ contradiction avec l'expérience

- Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

- La masse n'est pas une propriété intrinsèque des particules, mais le résultat de l'interaction de la particule avec le champ de Brout-Englert-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

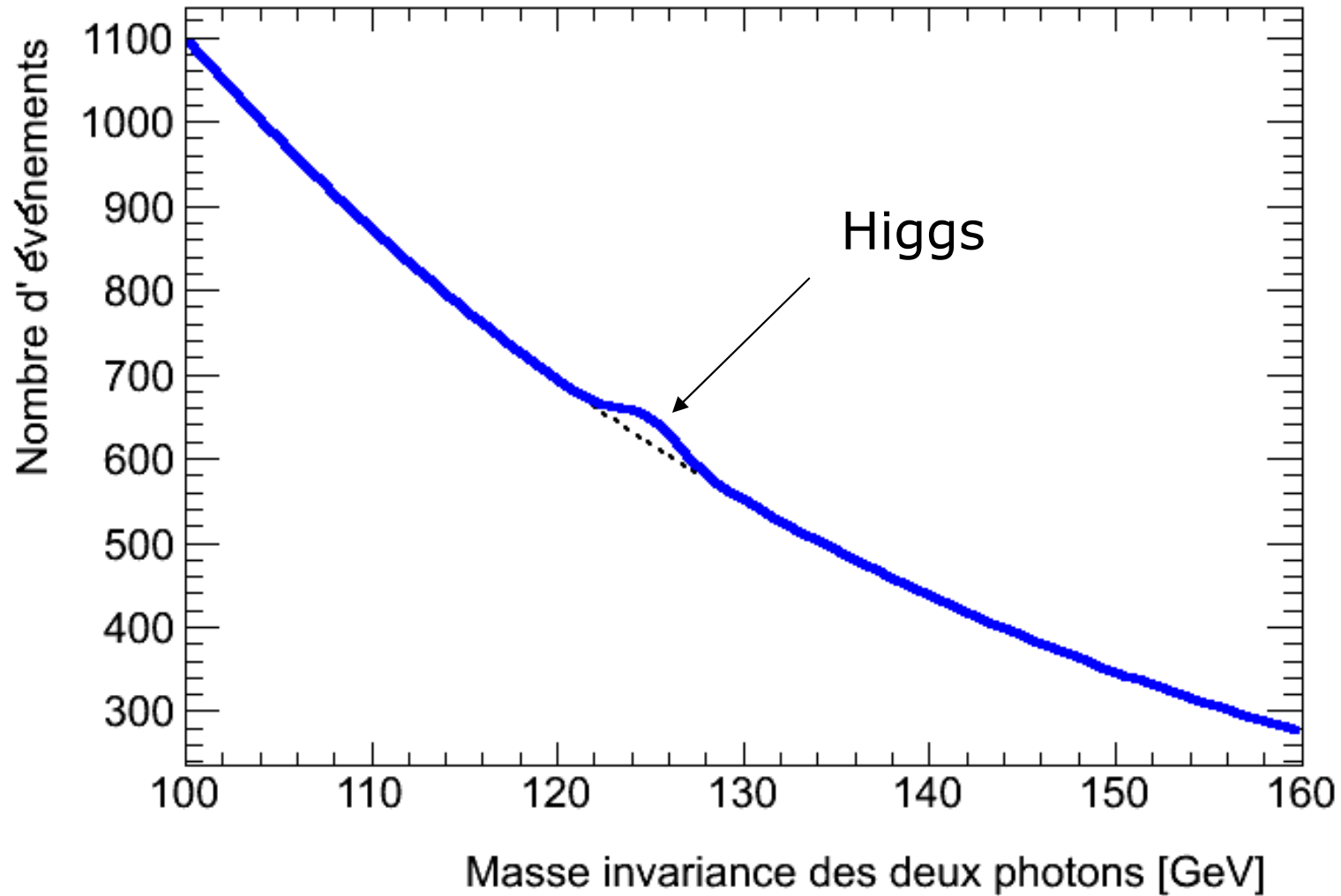
Le boson de Higgs

Boson de Higgs = quanta du champ de Higgs



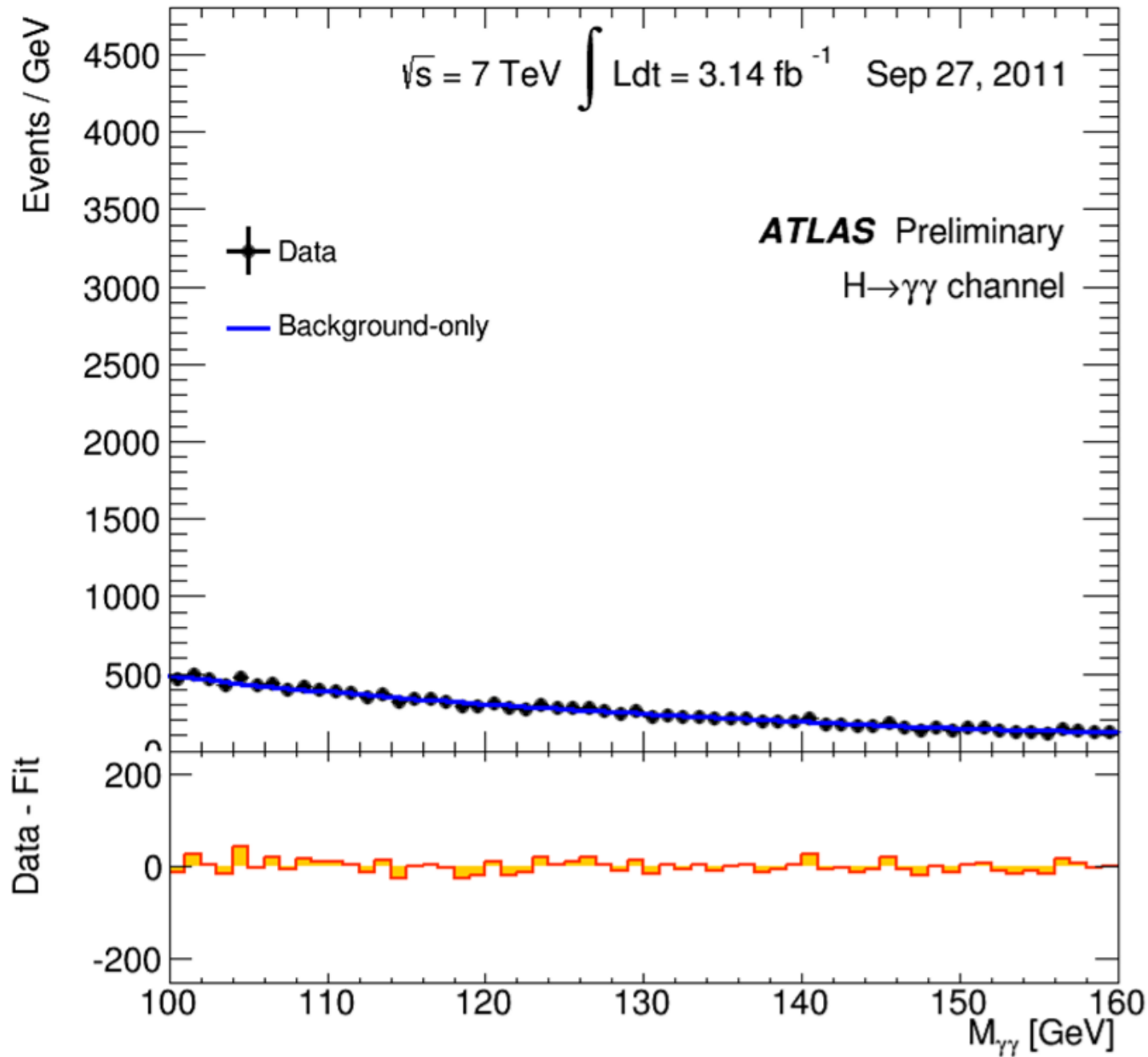
Le boson de Higgs joue un rôle central dans le mécanisme qui explique la masse des particules élémentaires

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

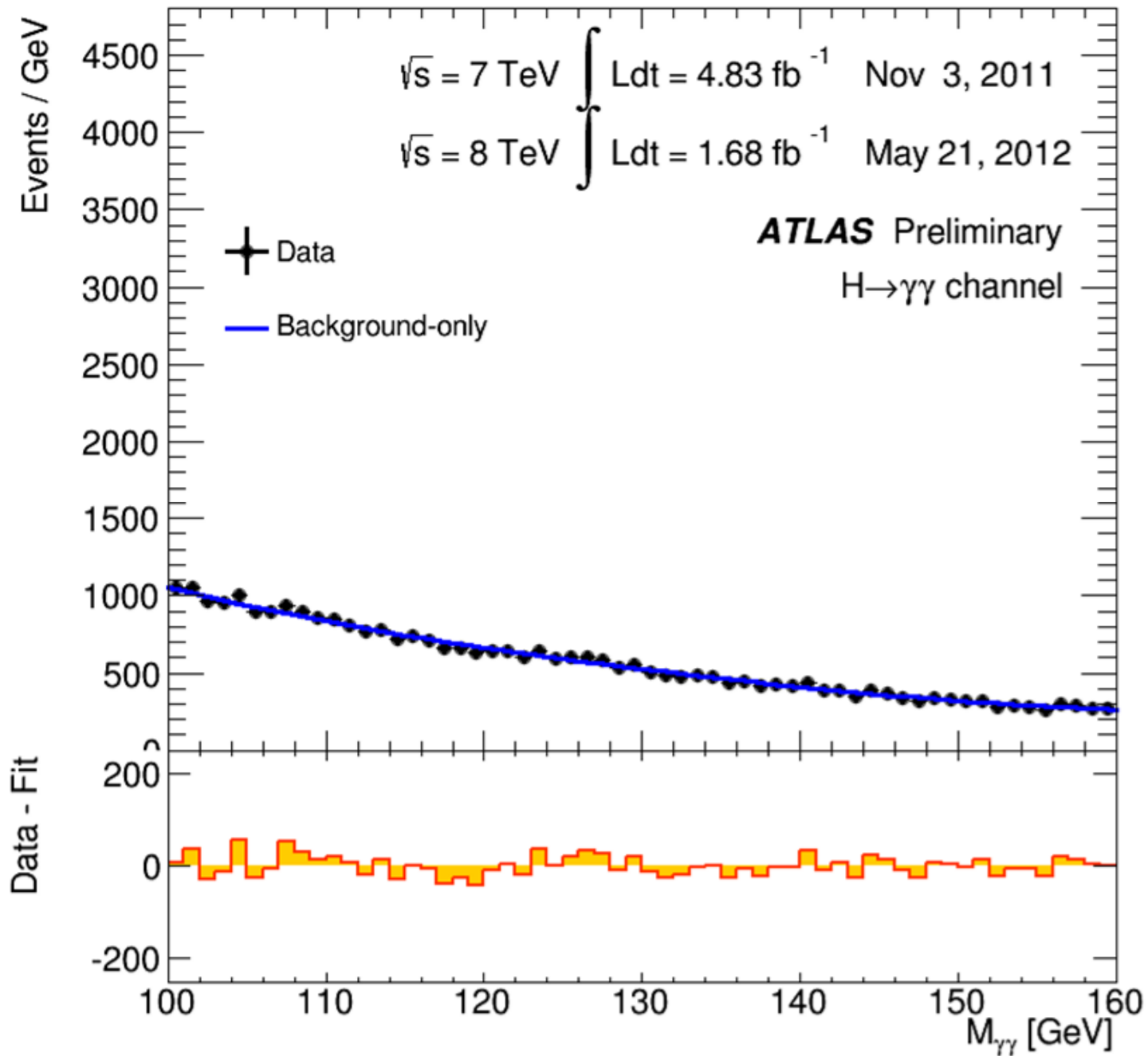


Bosse = signature du boson de Higgs

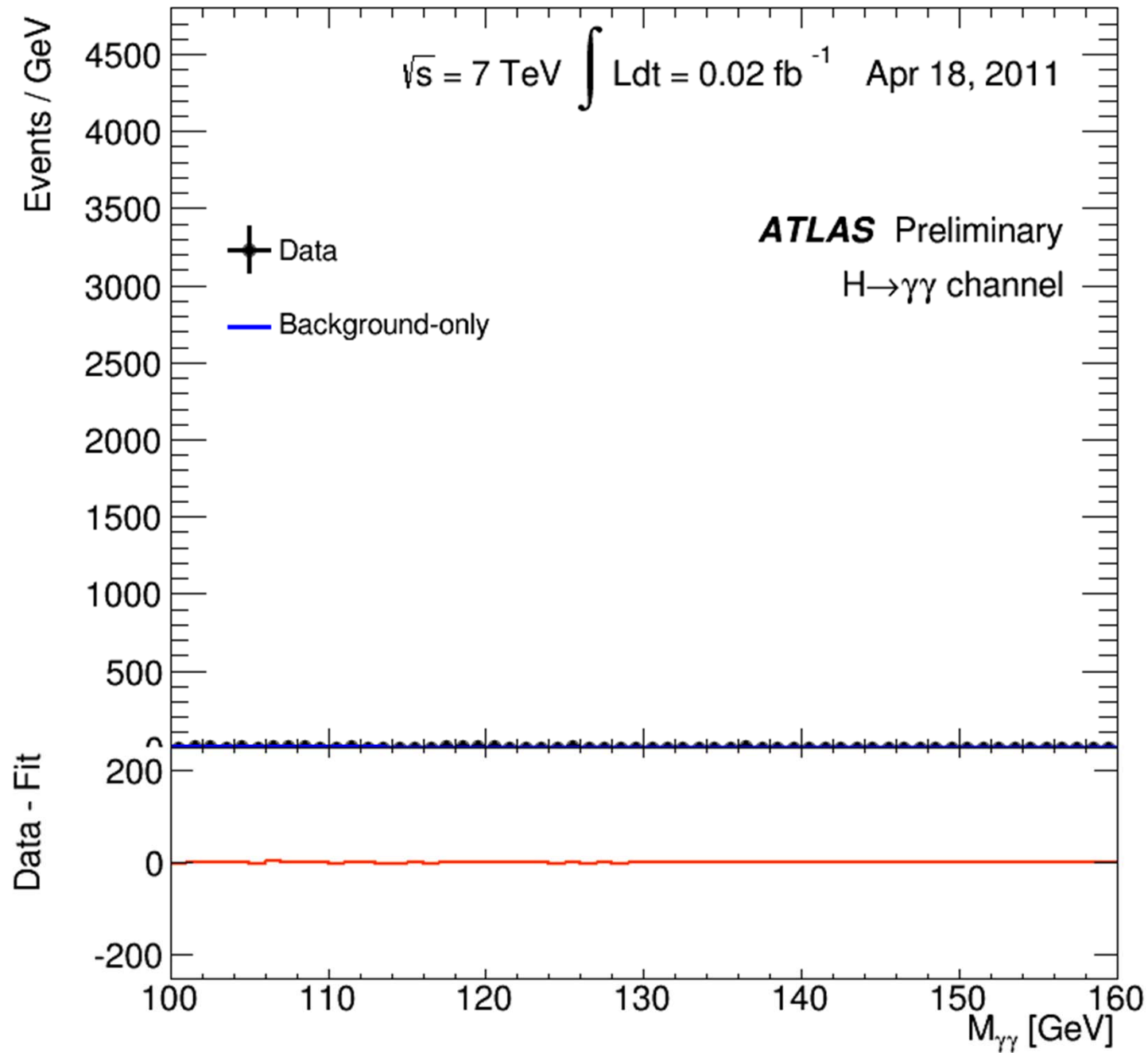
Découverte d'une nouvelle particule au CERN 22



Découverte d'une nouvelle particule au CERN ²⁰



Découverte d'une nouvelle particule au CERN



4 Juillet 2012



Les salpes
Un plancton marin expert de la filtration

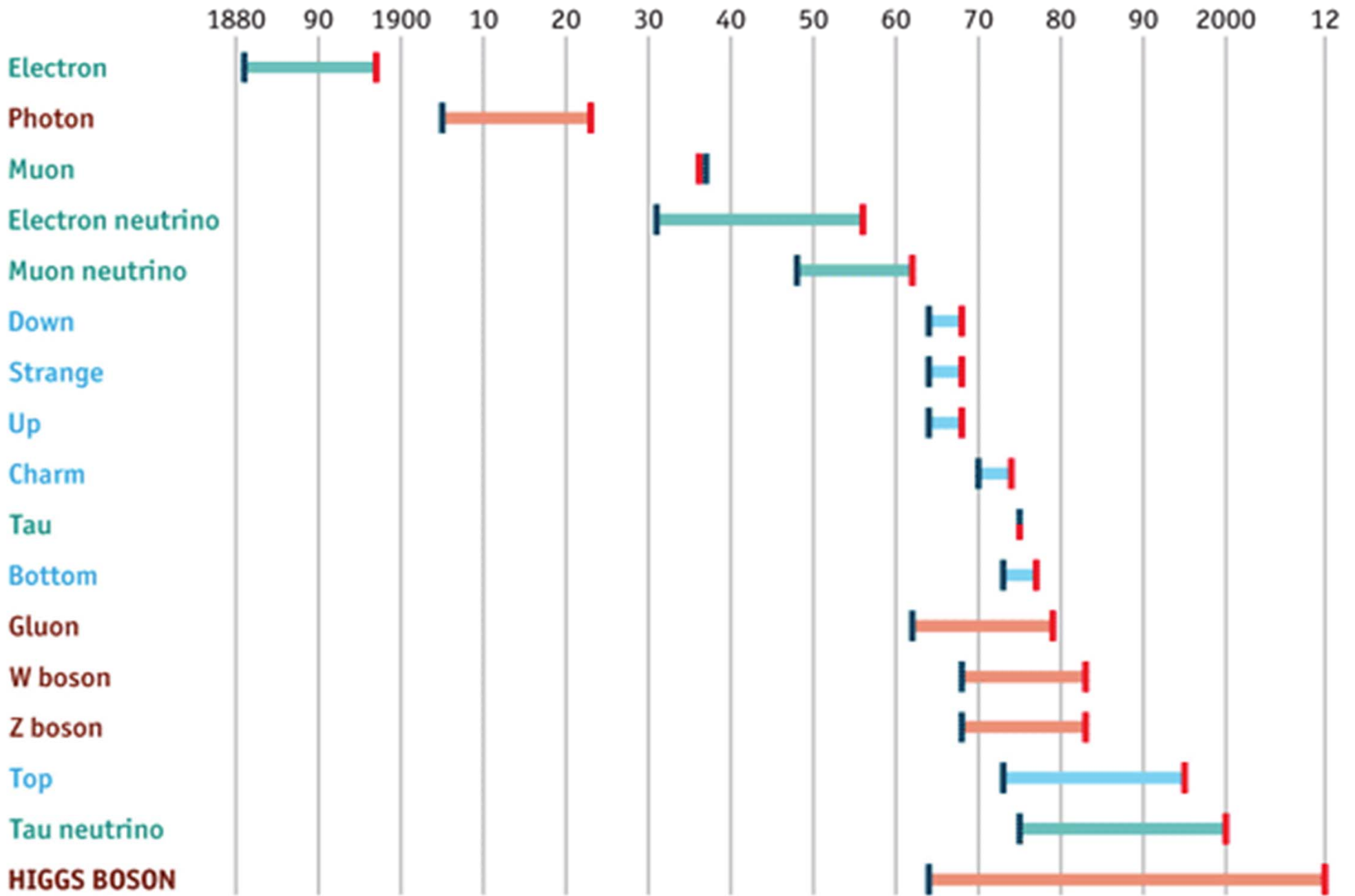
Paver le rectangle
Des puzzles de polyminos

Télescopes en ballon
L'Univers observé depuis la haute atmosphère



Leptons
Bosons
Quarks

Théorisé
Découverte



Source: *The Economist*

Matière

Quarks

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

Leptons

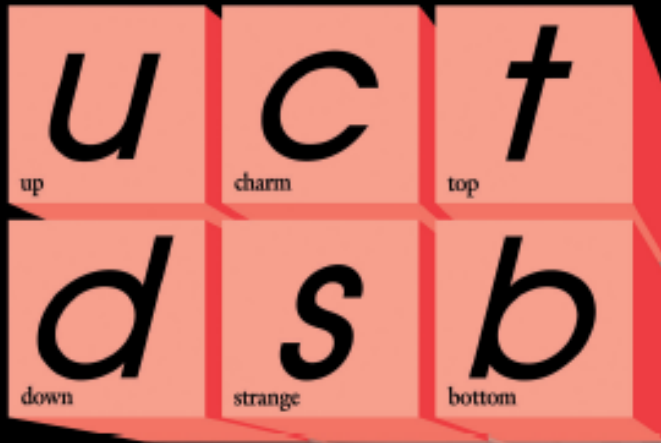
e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

Matière

Quarks



Leptons



Forces

