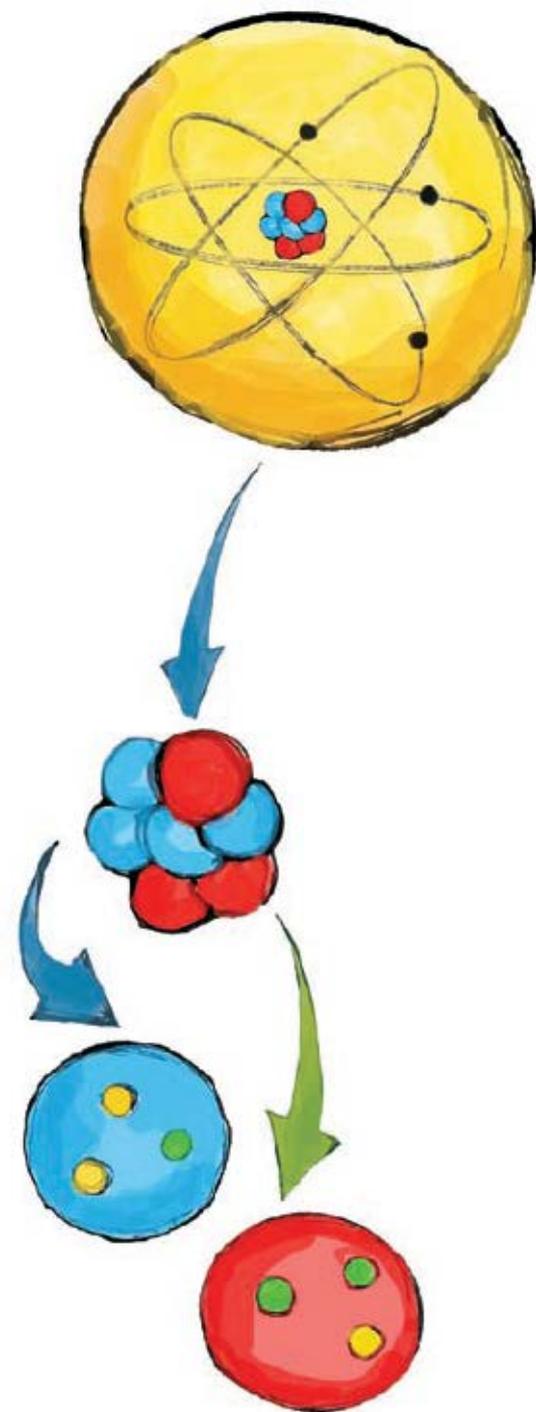


Particules et Interactions

Nikola Makovec
Nicolas Arnaud

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

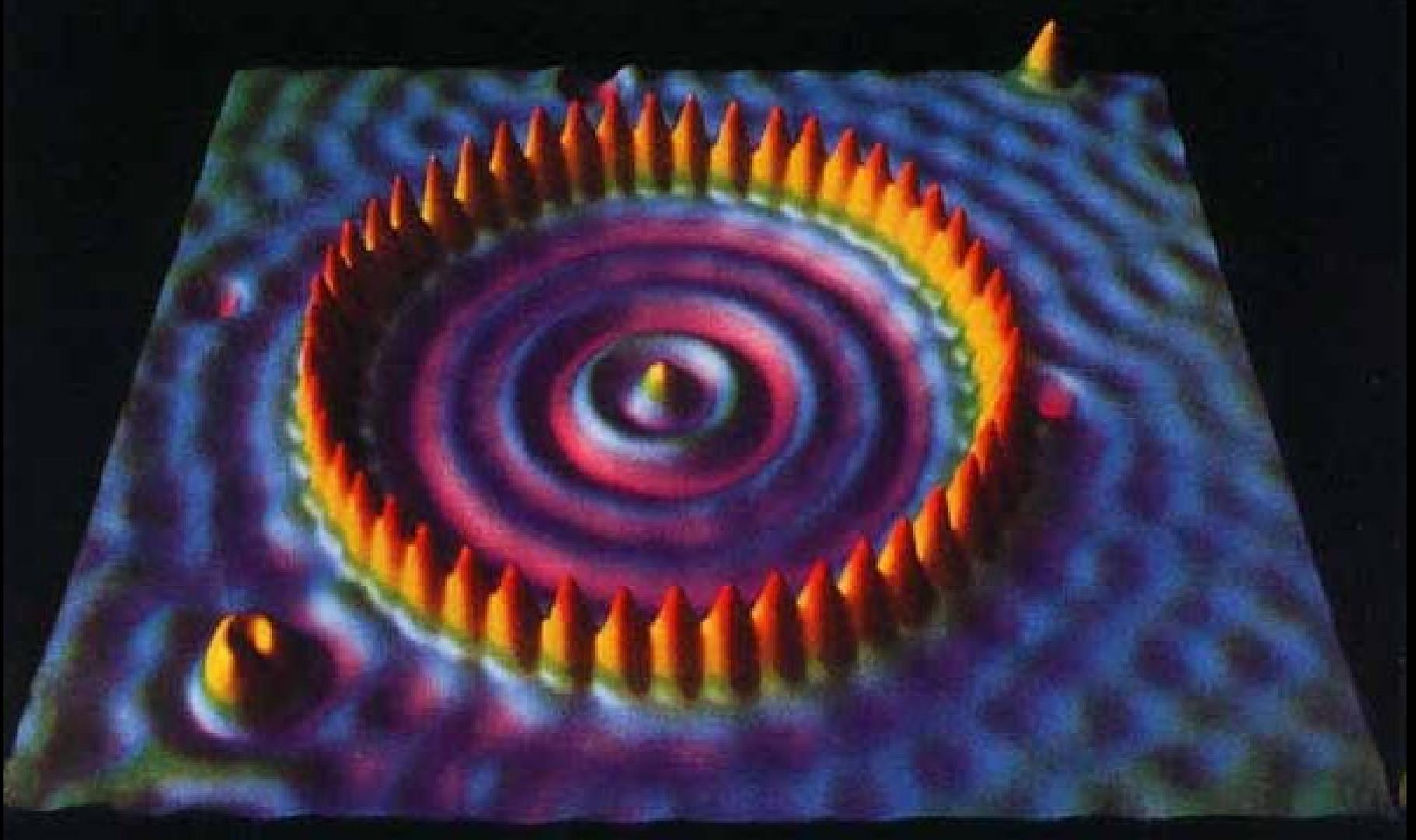
Masterclasses 2016



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



L'atome



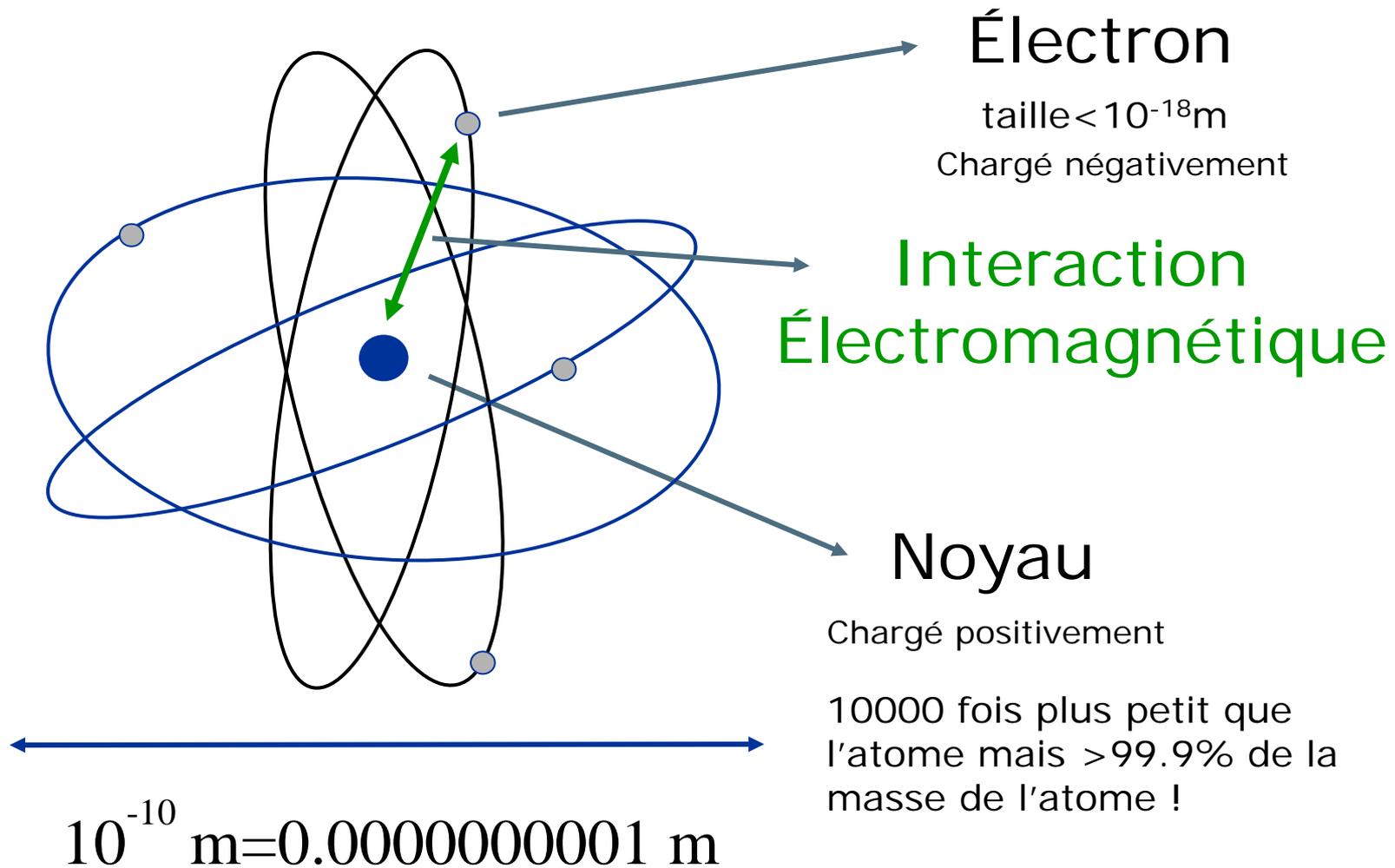
Taille d'un atome: 10^{-10} m = 0.0000000001 m

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

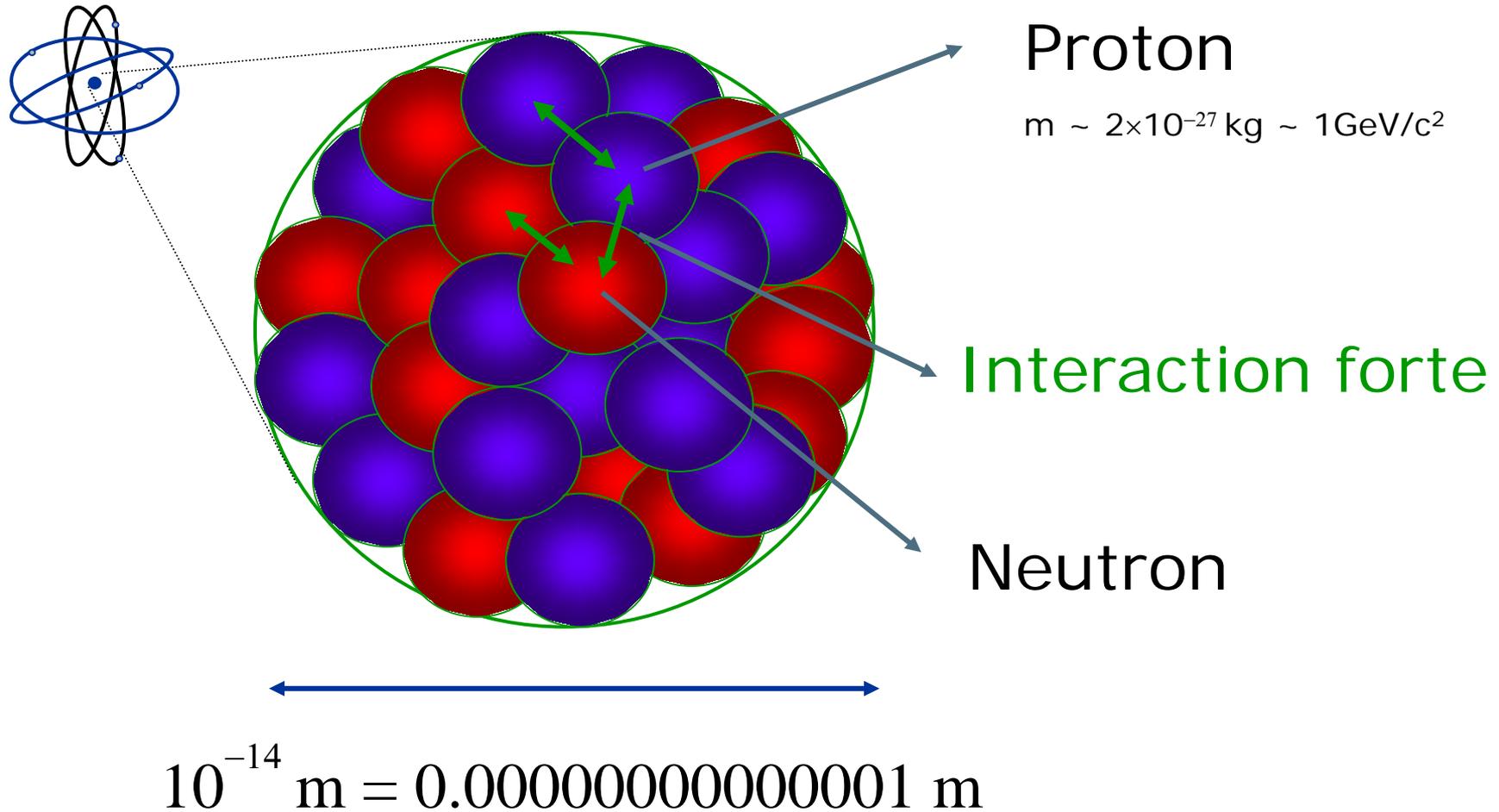


Structure de l'atome

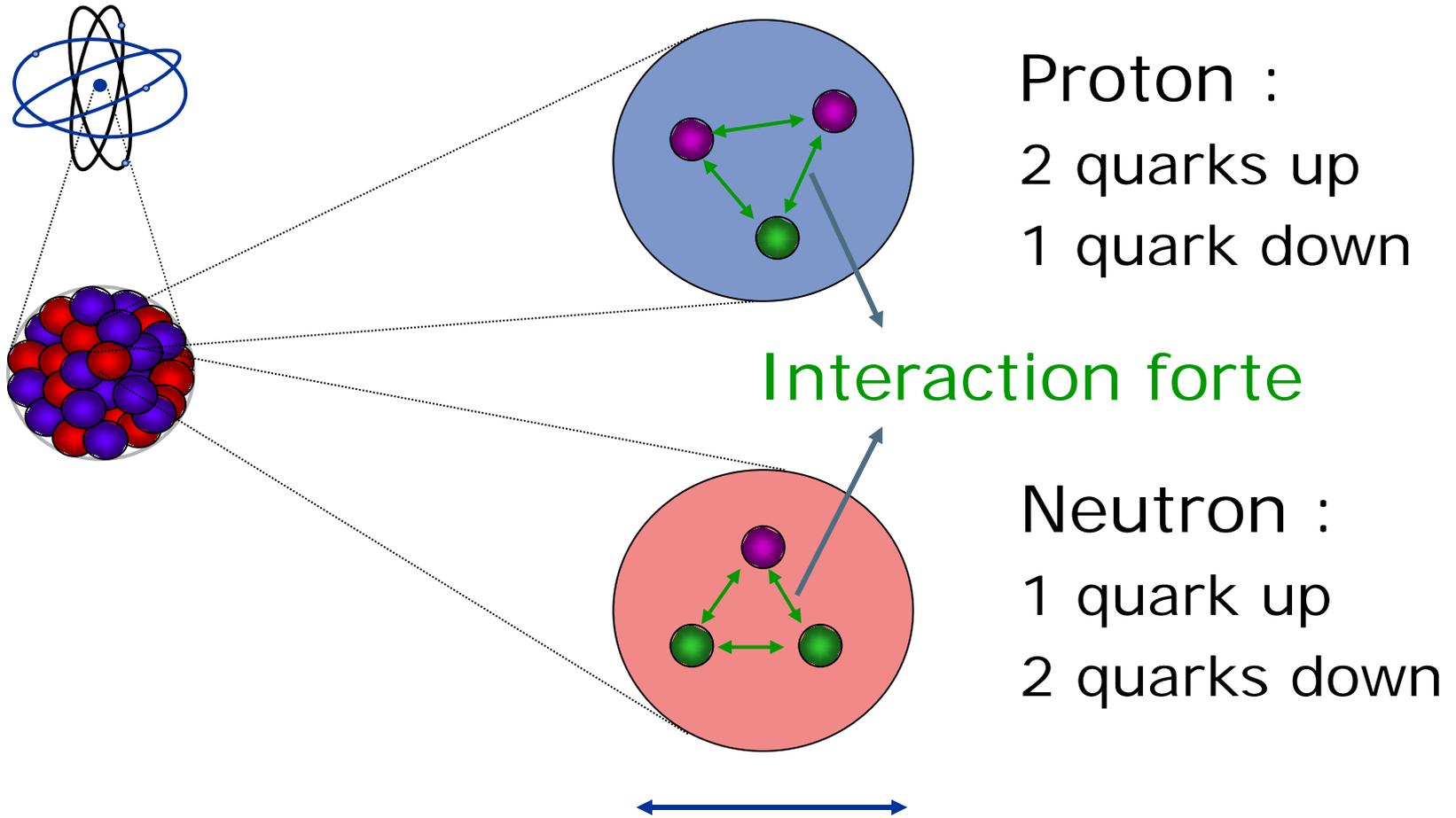
4



Structure du noyau



Structure des protons et des neutrons



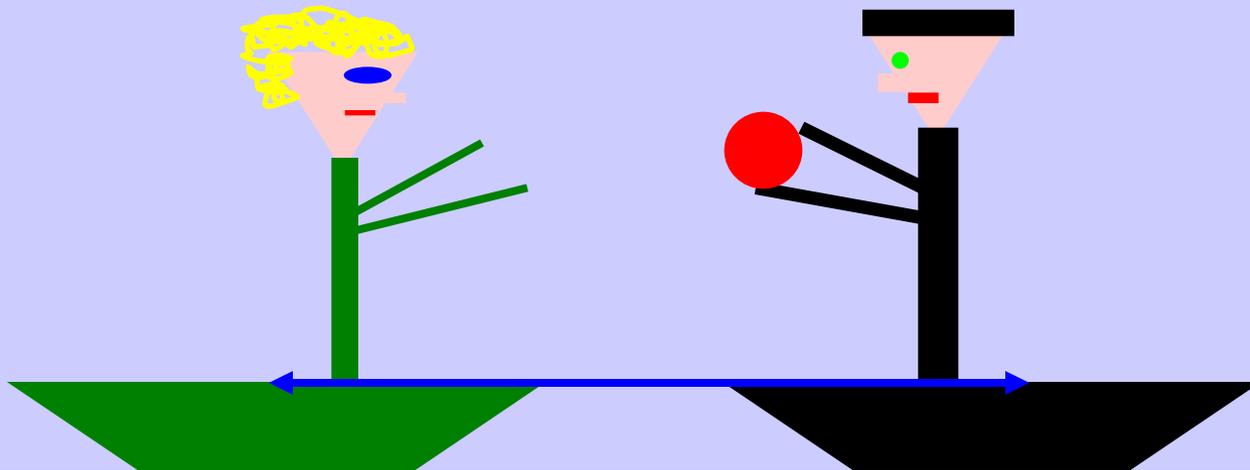
Proton :
2 quarks up
1 quark down

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



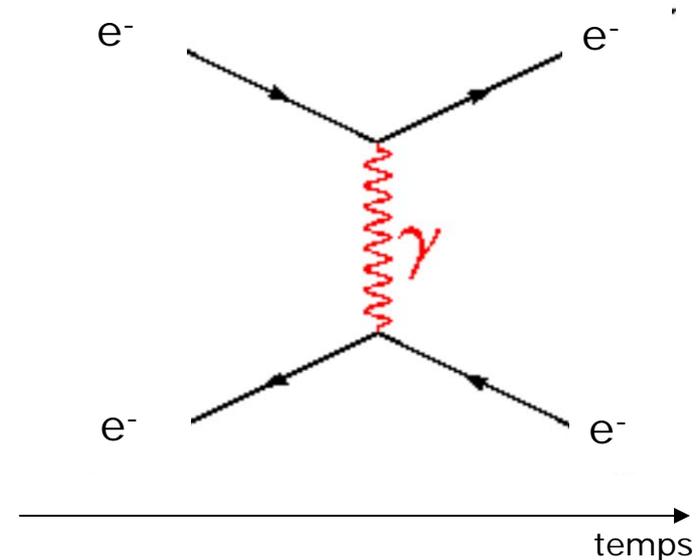
L'interaction électromagnétique

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



Médiateur : **photon**

$m=0$ (vitesse= c)
portée infinie



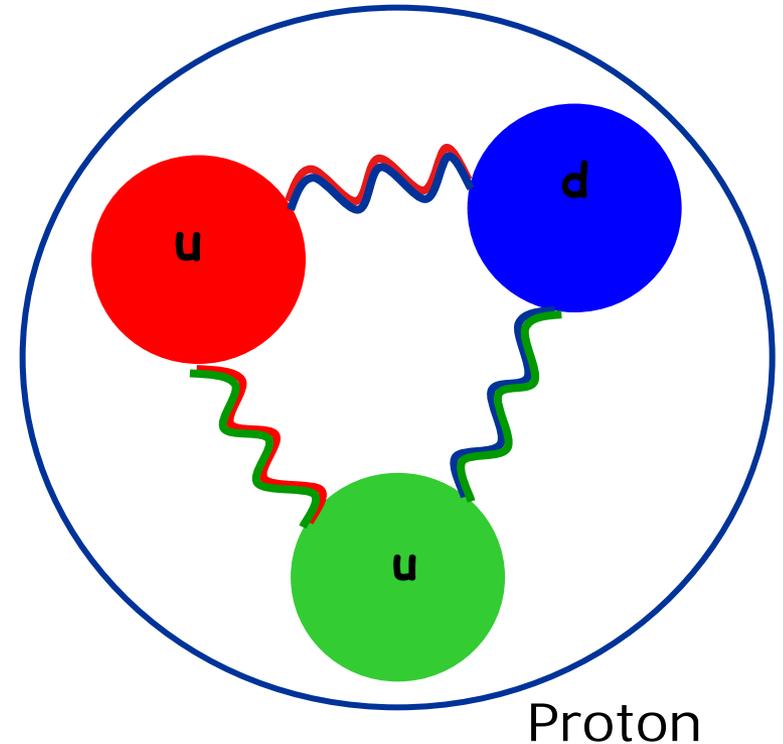
L'interaction nucléaire forte

Responsable de la stabilité des noyaux ainsi que du proton

Médiateurs: **8 gluons**

$m=0$

Portée : 10^{-15} m

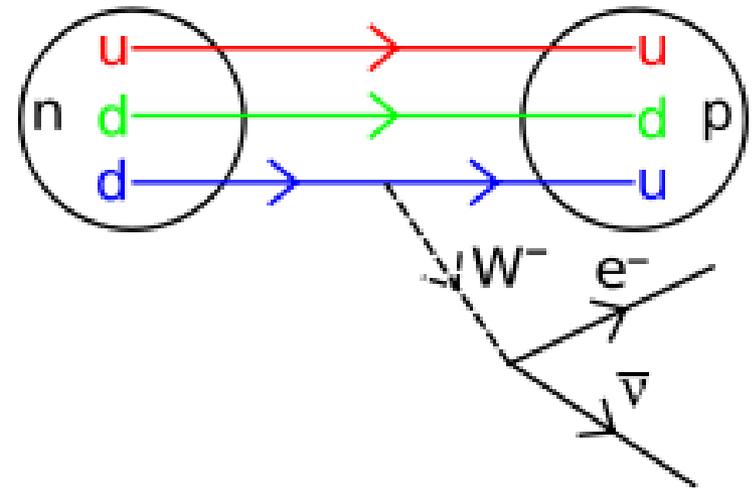


Les quarks n'existent pas à l'état libre: ils sont confinés à l'intérieur de **hadrons** (assemblages de quarks) collés par les **gluons**

L'interaction nucléaire faible

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

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

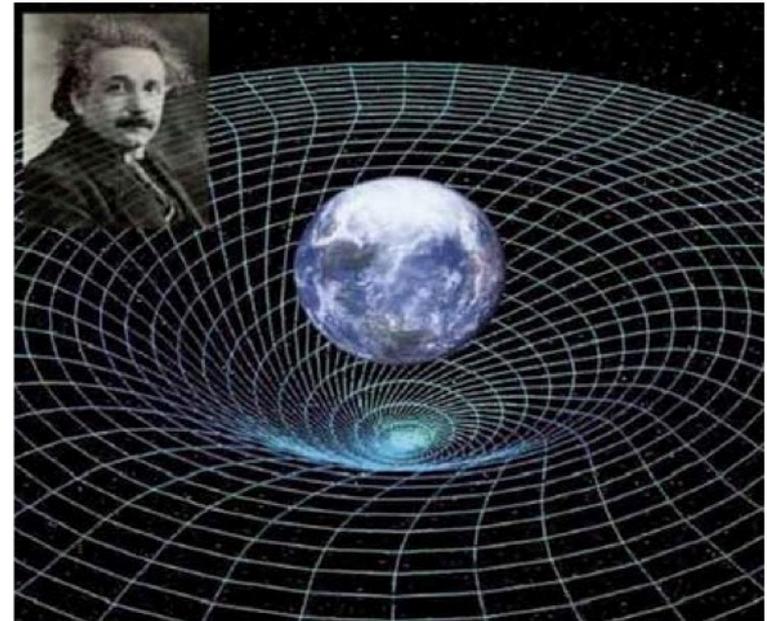


- 10 000 fois plus faible que l'interaction forte
- Portée: 10^{-18} m
 - Expliquée par la grande masse des bosons de jauge de l'interaction faible.



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

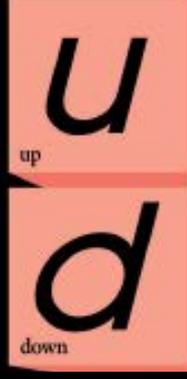
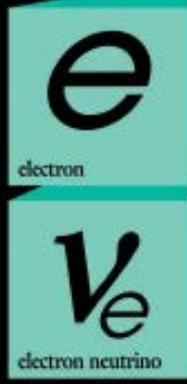
Quarks



Matière

Leptons

Quarks



Matière

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

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

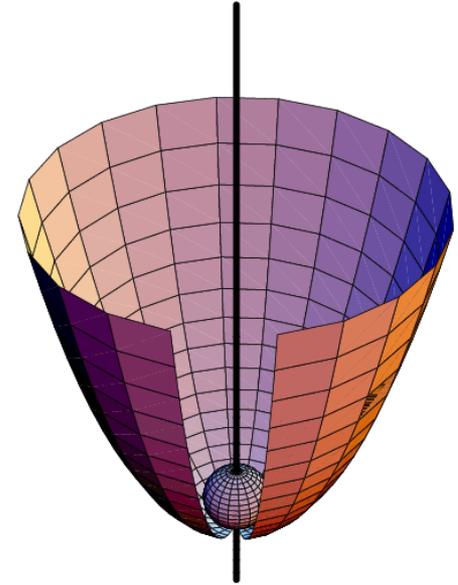
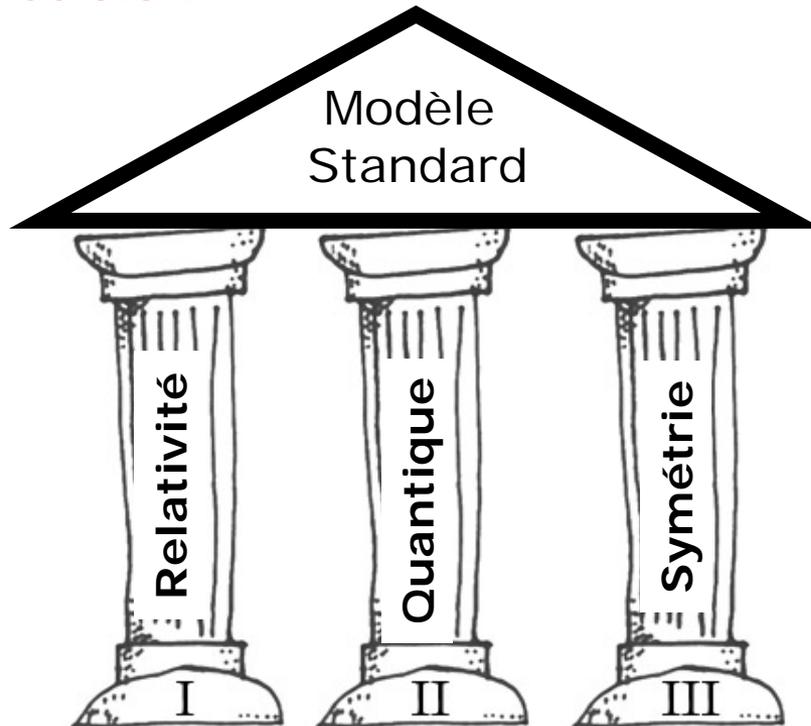
Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

$$\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_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w [\Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\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 \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^- [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 \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_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{\chi}^+ (\partial^2 - M^2) \chi^+ + \bar{\chi}^- (\partial^2 - M^2) \chi^- \\
& +\bar{\chi}^0 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) \chi^0 + \bar{\Upsilon} \partial^2 \Upsilon + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^- - \partial_\mu \bar{\chi}^+ \Upsilon) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^0 - \partial_\mu \bar{\chi}^0 \chi^+) \\
& +igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{\chi}^- \Upsilon - \partial_\mu \bar{\Upsilon} \chi^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) + igs_w \Lambda_\mu (\partial_\mu \bar{\chi}^+ \chi^+ - \partial_\mu \bar{\chi}^- \chi^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{\chi}^+ \chi^+ H + \bar{\chi}^- \chi^- H \\
& +\frac{1}{c_w^2} \bar{\chi}^0 \chi^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{\chi}^+ \chi^0 \phi^+ - \bar{\chi}^- \chi^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-] + igMs_w[\bar{\chi}^0 \chi^- \phi^+ - \bar{\chi}^0 \chi^+ \phi^-] \\
& +\frac{1}{2}igM[\bar{\chi}^+ \chi^+ \phi^0 - \bar{\chi}^- \chi^- \phi^0]
\end{aligned}$$

Le Modèle Standard

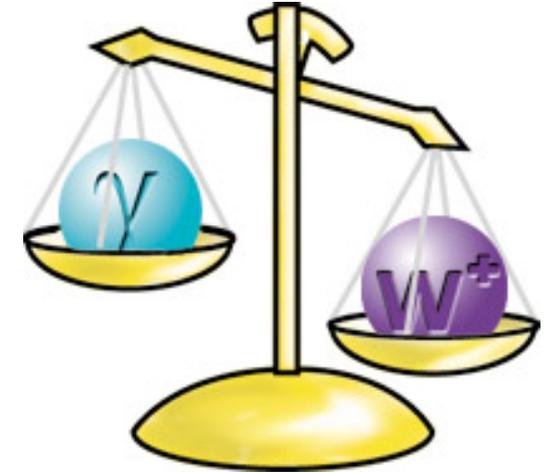
- Elaboré dans les années 1960-70
- Décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et les **interactions forte et électrofaible**
 - Mais pas la gravitation!
- Testé expérimentalement avec **grande précision**



- 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

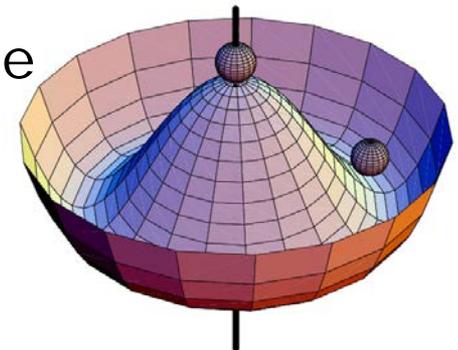
⇒ contradiction avec l'expérience

- 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

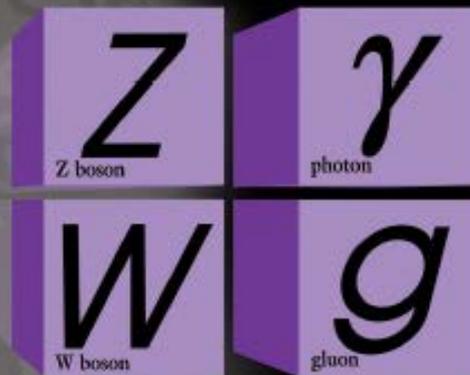
Quarks



Leptons



Forces

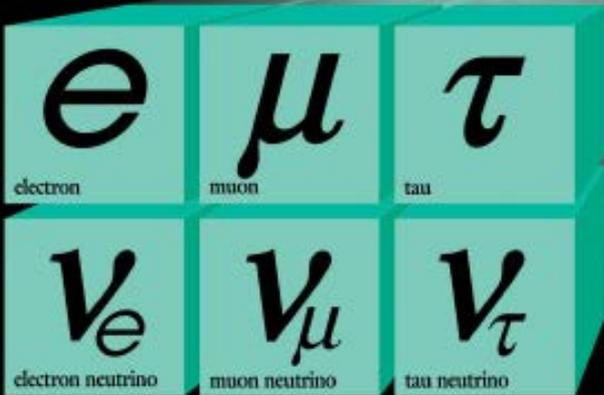


Matière

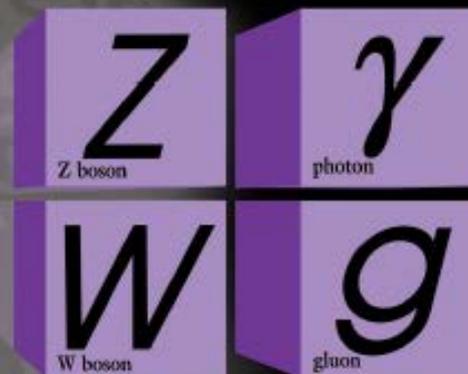
Quarks



Leptons

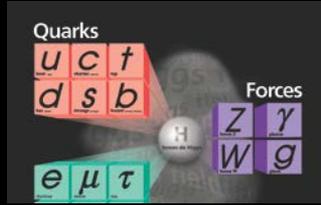


Forces

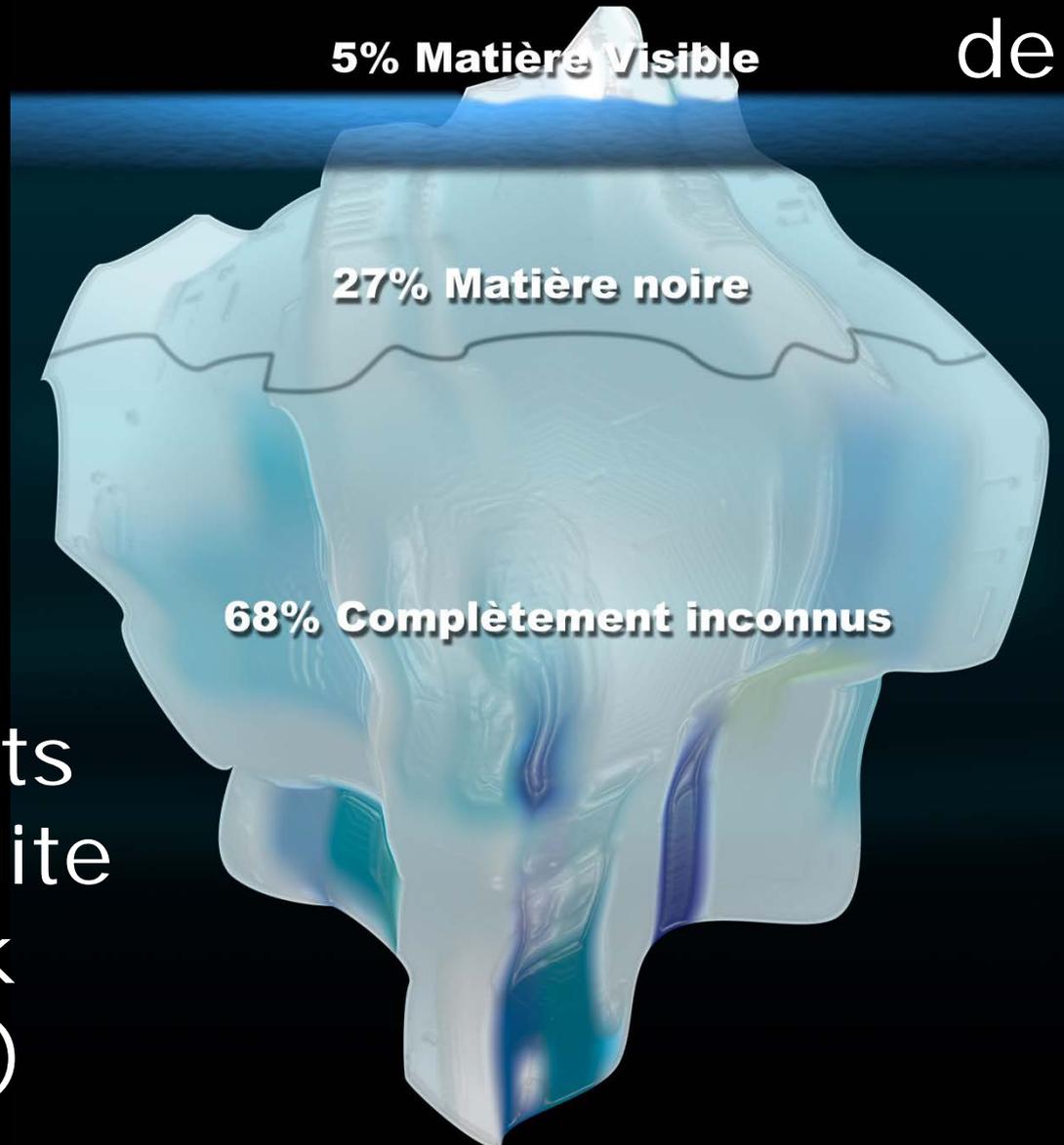


5% Matière Visible





Le contenu énergétique de l'Univers



Résultats
du satellite
Planck
(2013)

Résumé

■ Particules de matières: **fermions**

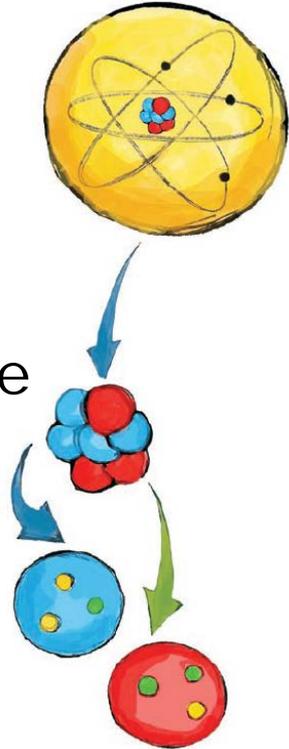
- Particules stables et « utiles » pour bâtir l'univers:
 - électron, quark up et quark down
 - proton = 2 quarks u et un quark d
- Particules instables:
 - muon, tau, quark étrange,...
- A chaque particule est associée une antiparticule

■ 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** 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

