

# Particules et Interactions

---

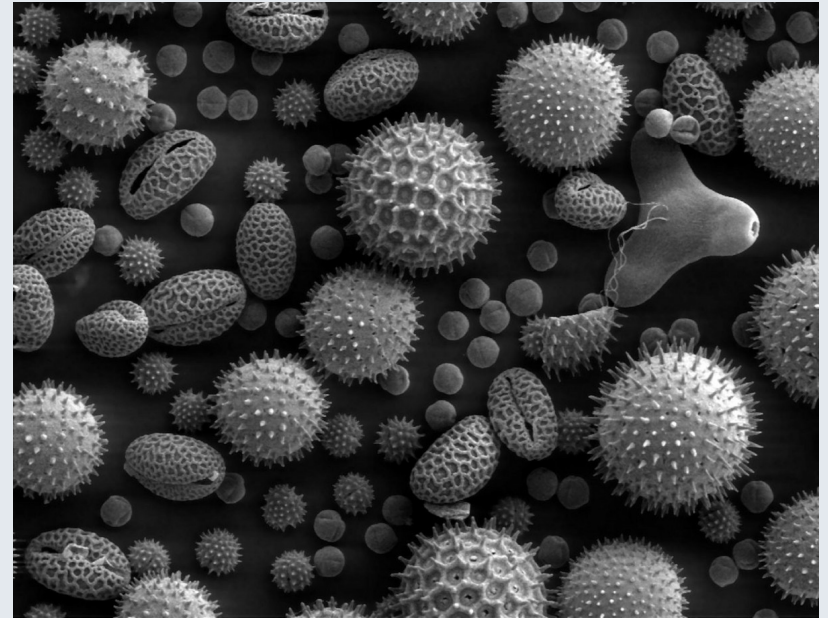
LHCb Masterclass – 17/02/2026

Ménil Reboud (meril.reboud@cnrs.fr)

---

# Particules élémentaires

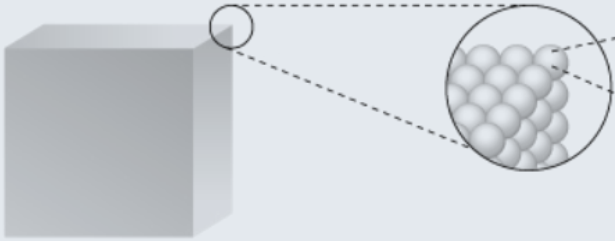
→ Blocs fondamentaux (sans structure interne) qui constituent l'ensemble de la matière



# L'atome

Matière

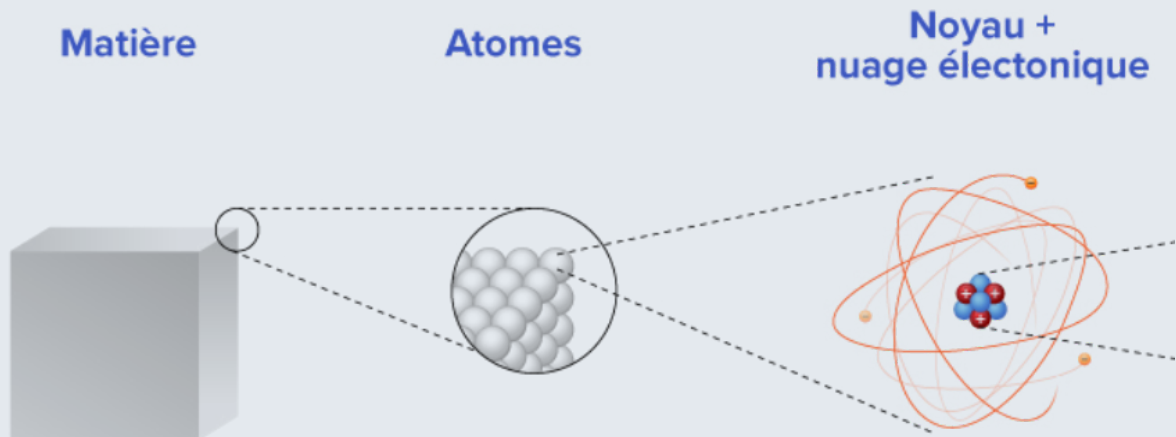
Atomes



Taille d'un **atome** :  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.0000000001 \text{ m}$

- 10 million de fois plus petit qu'une fourmi
- 10 à 100 mille fois plus petit qu'une bactérie

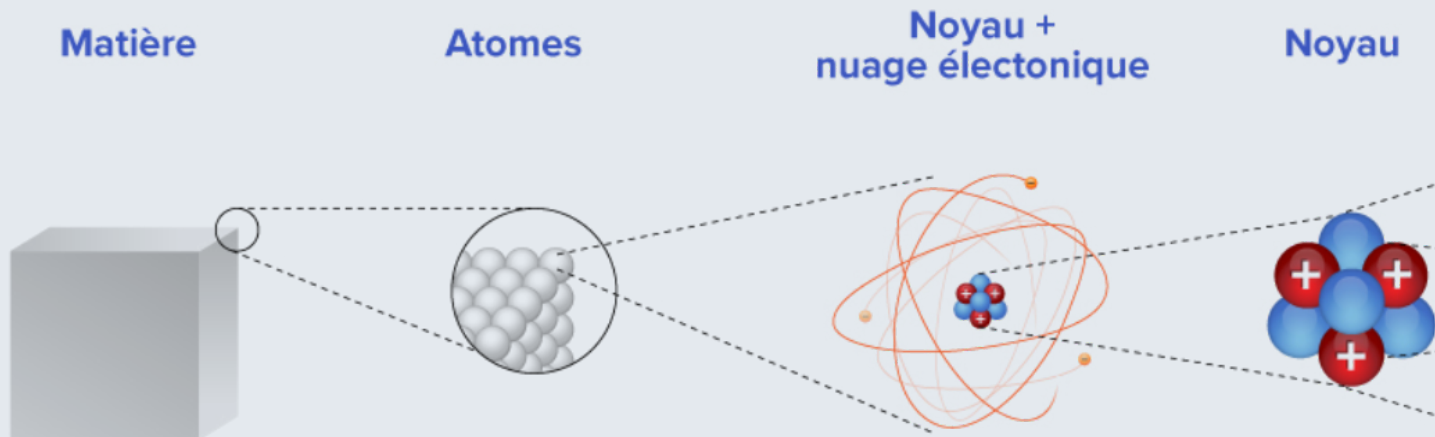
# L'atome



## Structure de l'atome :

- Nuage électronique : interprétation quantique des électrons ( $e^-$ ), charge -
- Noyau : 10 000 fois plus petit que l'atome mais  $> 99,9 \%$  de sa masse !

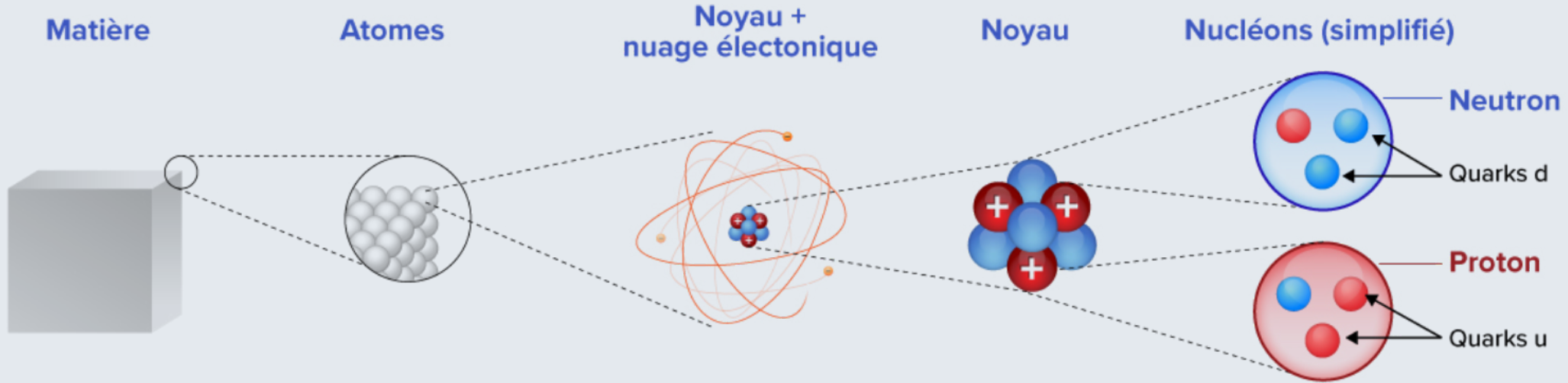
# L'atome



## Structure du **noyau** :

- Protons : masse  $m \sim 2 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \sim 1 \text{ GeV}/c^2$ , charge +
  - Neutrons : masse similaire, électriquement neutre
- } « Nucléons »

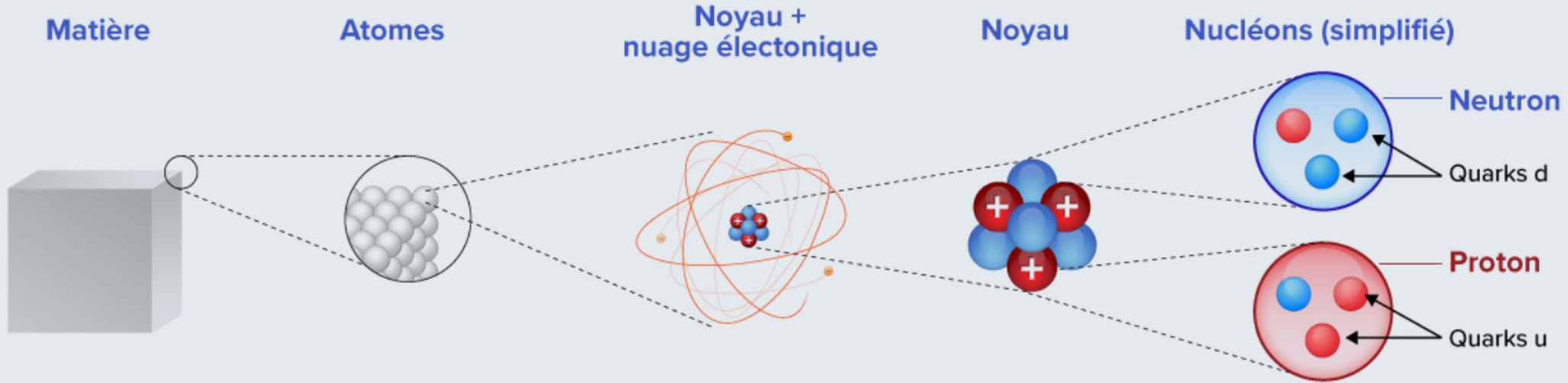
# Les quarks (années '60)



Structure des **nucléons** : (la « taille » ne veut plus dire grand-chose à cette échelle)

- Proton : 2 quarks « up », 1 quark « down »
- Neutron: 1 quarks « up », 2 quark « down »

# Les quarks (années '60)



Petit calcul :

- Masse du up  $\sim 2$  MeV, masse du down  $\sim 4$  MeV
- Masse des nucléons  $\sim 1$  GeV = 1000 MeV



# Interactions

Interagir = échanger une particule

▷ Analogie des bateaux et du ballon :

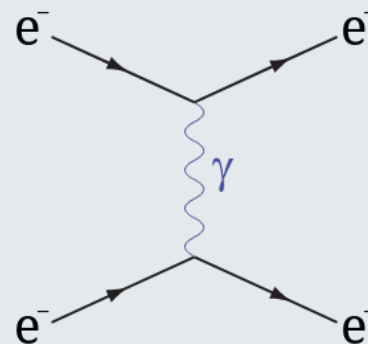
- Les échanges répétés **écartent** les bateaux, ici la force est *répulsive*
- Le ballon est le **médiateur** de la force

▷ Les médiateur des interactions fondamentales sont appelés **bosons de jauge**



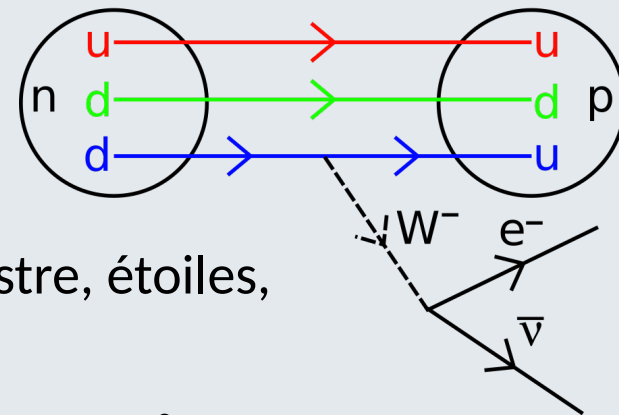
# Interactions fondamentales

- Interaction électromagnétique :
  - Responsable de la **majorité des phénomènes** à notre échelle : lumière, ondes radios, aimantation, cohésion des atomes...
  - Médiateur : **photon** (masse nulle, vitesse  $c$ , portée infinie)



# Interactions fondamentales

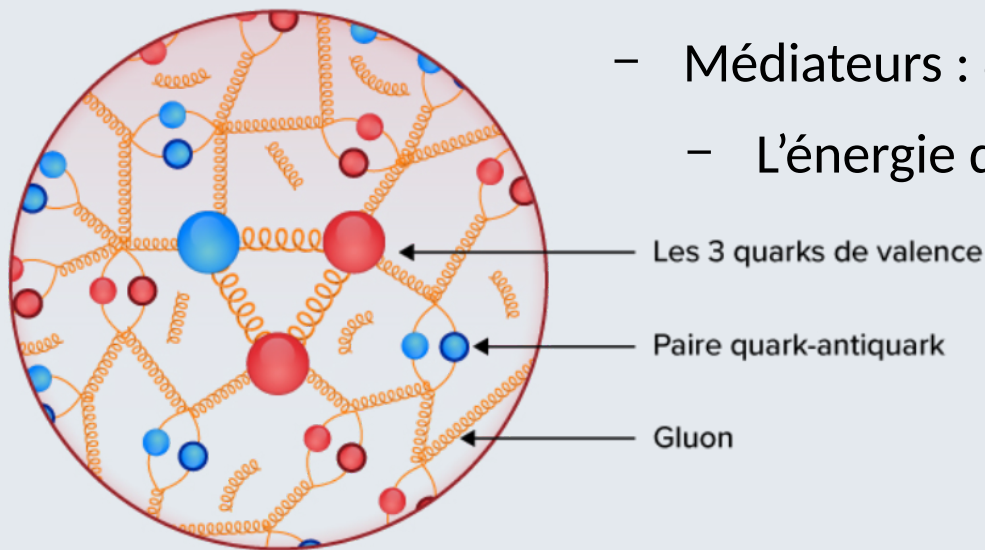
- Interaction électromagnétique
- Interaction nucléaire faible :
  - Responsable de la radioactivité  $\beta$  (noyau terrestre, étoiles, réacteurs, ...)



- Médiateurs : **bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$**  (découverts dans les années '70)
- Masse des médiateurs  $\sim 100$  GeV  
→ interaction à **courte portée** !

# Interactions fondamentales

- Interaction électromagnétique
- Interaction nucléaire faible
- Interaction nucléaire forte :
  - Responsable de la cohésion des noyaux et des nucléons
  - Médiateurs : **8 gluons** (masse nulle)
  - L'énergie de cohésion génère la masse des nucléons
  - Les quarks ne sont visibles que dans les hadrons, **jamais seuls** !

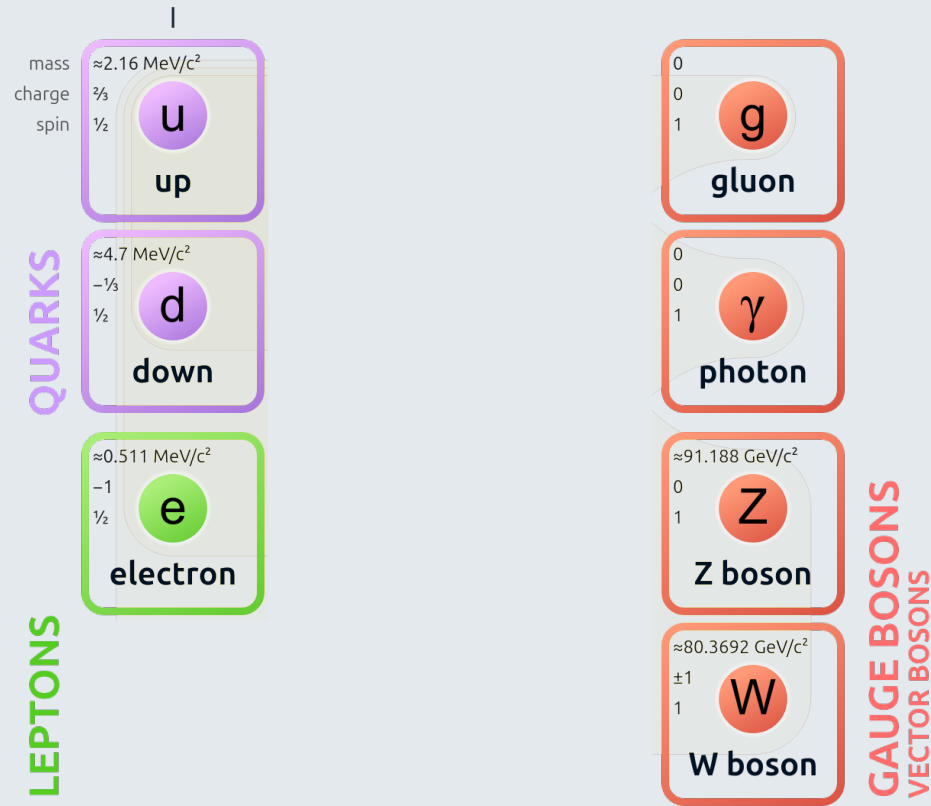


# Interactions fondamentales

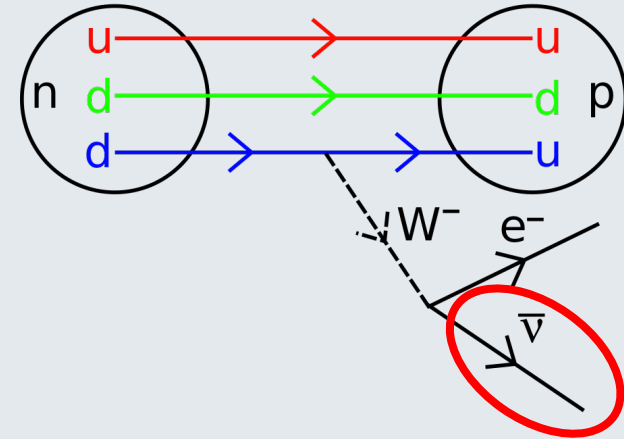
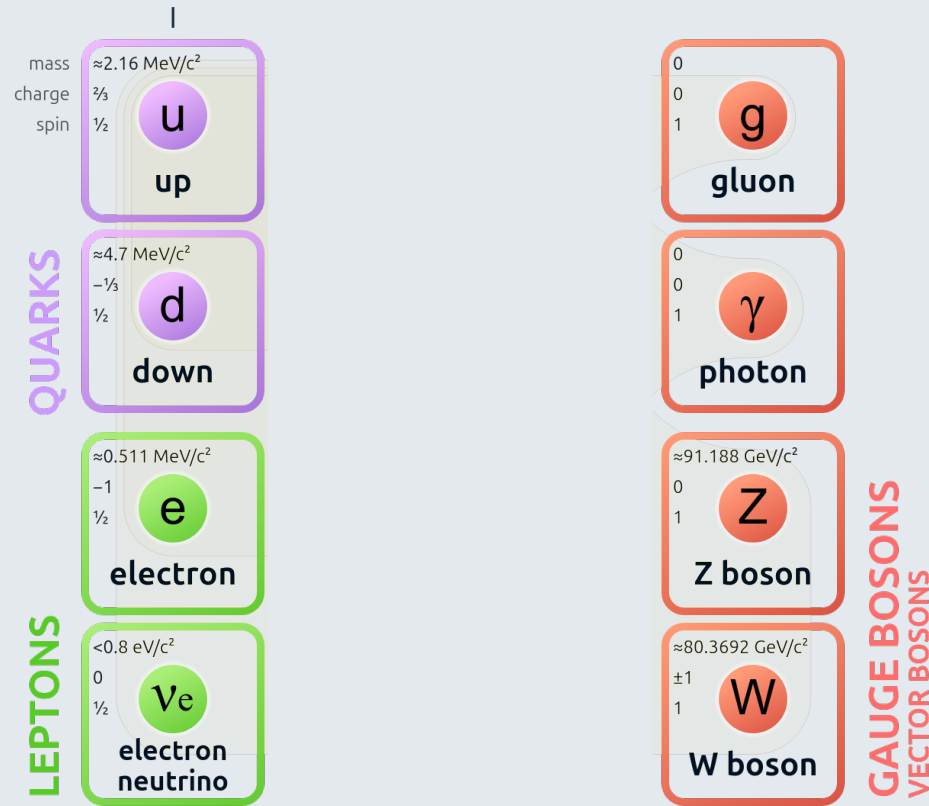
- Interaction électromagnétique
- Interaction nucléaire faible
- Interaction nucléaire forte
- Et la gravité ?
  - La masse des particules joue un rôle inertiel
  - La gravité est **beaucoup plus faible** à cette échelle ( $10^{33}$  fois plus faible que l'interaction faible...)
  - Hors des milieux extrêmes (trous noirs, étoiles à neutrons, ...) la gravité est **négligeable** en physique des particules (vaguelettes à la surface de l'eau)



# Les particules connues



# Les particules connues



- Énergie manquante dans les désintégration  $\beta$
- Observé en 1956 par réaction inverse

# Les particules connues

|         | I                                              | II                                           | III                                          |                                      |
|---------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| mass    | $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$                 | $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$              | $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$             | 0                                    |
| charge  | $\frac{2}{3}$                                  | $\frac{2}{3}$                                | $\frac{2}{3}$                                | 0                                    |
| spin    | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |
| QUARKS  | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b>g</b><br>gluon                    |
|         | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$               | $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$              | 0                                    |
|         | $-\frac{1}{3}$                                 | $-\frac{1}{3}$                               | $-\frac{1}{3}$                               | 0                                    |
|         | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |
|         | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b><math>\gamma</math></b><br>photon |
| LEPTONS | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$                | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$             | $\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$            | $\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$     |
|         | -1                                             | -1                                           | -1                                           | 0                                    |
|         | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |
|         | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>Z</b><br>Z boson                  |
|         | $< 0.8 \text{ eV}/c^2$                         | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$                     | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$                     | $\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$    |
|         | 0                                              | 0                                            | 0                                            | $\pm 1$                              |
|         | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |
|         | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                  |
|         |                                                |                                              |                                              |                                      |

- Le quark strange est connu depuis ~1947
- Les générations II et III sont plus lourde et moins stables

# Les particules connues

|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|--------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|        | I                                              | II                                           | III                                          |                                      |                                 |
| mass   | $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$                 | $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$              | $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$             | 0                                    | $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | $\frac{2}{3}$                                  | $\frac{2}{3}$                                | $\frac{2}{3}$                                | 0                                    | 0                               |
| spin   | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    | 0                               |
|        | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b>g</b><br>gluon                    | <b>H</b><br>higgs               |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$               | $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$              | 0                                    |                                 |
|        | $-\frac{1}{3}$                                 | $-\frac{1}{3}$                               | $-\frac{1}{3}$                               | 0                                    |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b><math>\gamma</math></b><br>photon |                                 |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$                | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$             | $\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$            | $\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$     |                                 |
|        | -1                                             | -1                                           | -1                                           | 0                                    |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>Z</b><br>Z boson                  |                                 |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $< 0.8 \text{ eV}/c^2$                         | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$                     | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$                     | $\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$    |                                 |
|        | 0                                              | 0                                            | 0                                            | $\pm 1$                              |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                  |                                 |

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

- Le quark strange est connu depuis ~1947
- Les générations II et III sont plus lourde et moins stables
- Le Higgs complète le tableau (enfin vu en 2012)

# Le Modèle Standard (années '60-'70)

|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|--------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
|        | I                                              | II                                           | III                                          |                                      |                                 |
| mass   | $\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$                 | $\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$              | $\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$             | 0                                    | $\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$ |
| charge | $\frac{2}{3}$                                  | $\frac{2}{3}$                                | $\frac{2}{3}$                                | 0                                    | 0                               |
| spin   | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    | 0                               |
|        | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b>g</b><br>gluon                    | <b>H</b><br>higgs               |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$                  | $\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$               | $\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$              | 0                                    |                                 |
|        | $-\frac{1}{3}$                                 | $-\frac{1}{3}$                               | $-\frac{1}{3}$                               | 0                                    |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b><math>\gamma</math></b><br>photon |                                 |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$                | $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$             | $\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$            | $\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$     |                                 |
|        | -1                                             | -1                                           | -1                                           | 0                                    |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>Z</b><br>Z boson                  |                                 |
|        |                                                |                                              |                                              |                                      |                                 |
|        | $< 0.8 \text{ eV}/c^2$                         | $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$                     | $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$                     | $\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$    |                                 |
|        | 0                                              | 0                                            | 0                                            | $\pm 1$                              |                                 |
|        | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                    |                                 |
|        | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>W</b><br>W boson                  |                                 |

QUARKS

LEPTONS

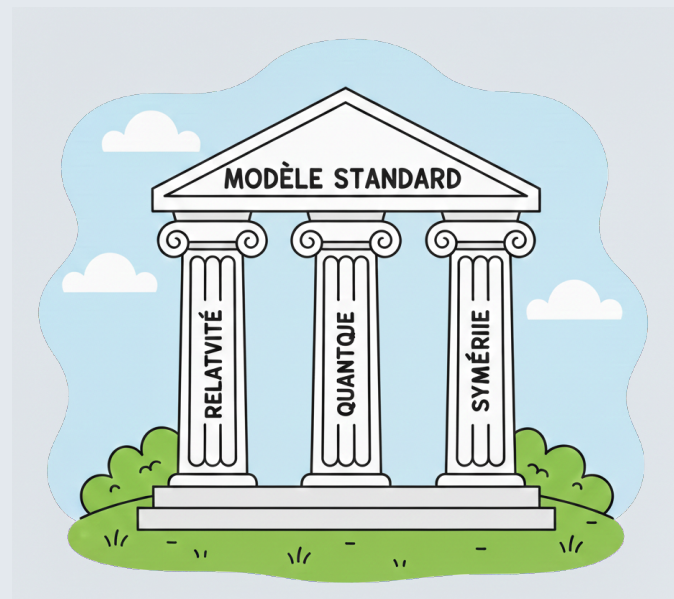
SCALAR BOSONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

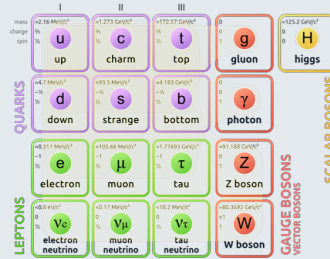
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{\psi}_i^c \gamma^\mu g_j^c) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu 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}{c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig_{cw} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) - ig_{sw} [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\partial^0 \phi^0 \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [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}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{sw} 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^+) + \\
 & ig_{sw} 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 Z_\mu^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^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - 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 + ig_{sw} A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_\kappa^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} M [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} M [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_\kappa^\lambda) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} M H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} M H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} M \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} M \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_{sw} 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}$$

# Le Modèle Standard (années '60-'70)

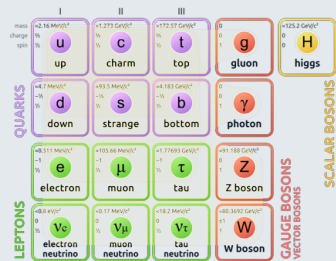
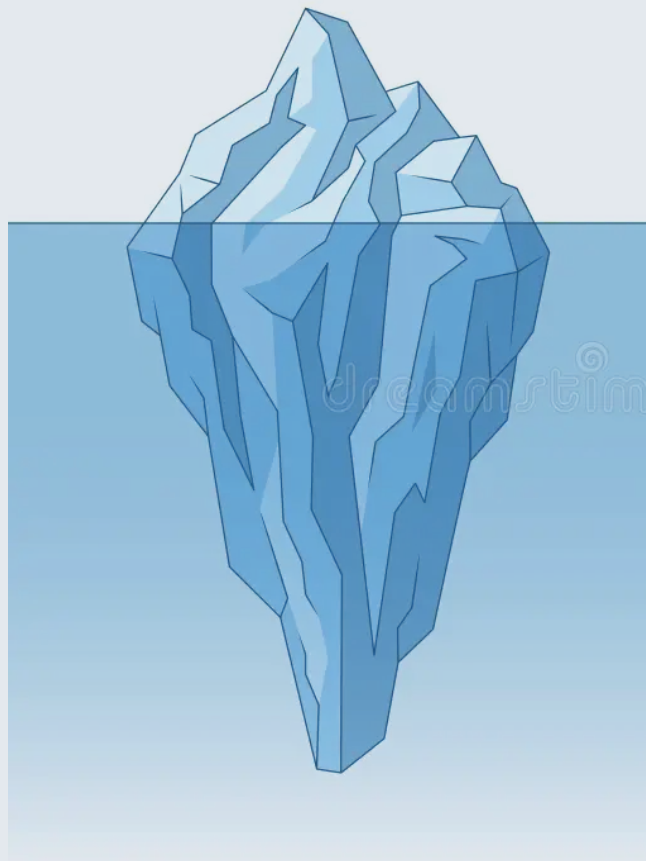
- Modèle basé sur :
  - La théorie des champs
  - La relativité restreinte
  - Les groupe de symétries
- Testé avec une **précision extrême** dans de nombreux processus
  - (g-2) du muon testé à  $1.4 \cdot 10^{-7}$  près !
- N'inclue pas la relativité générale



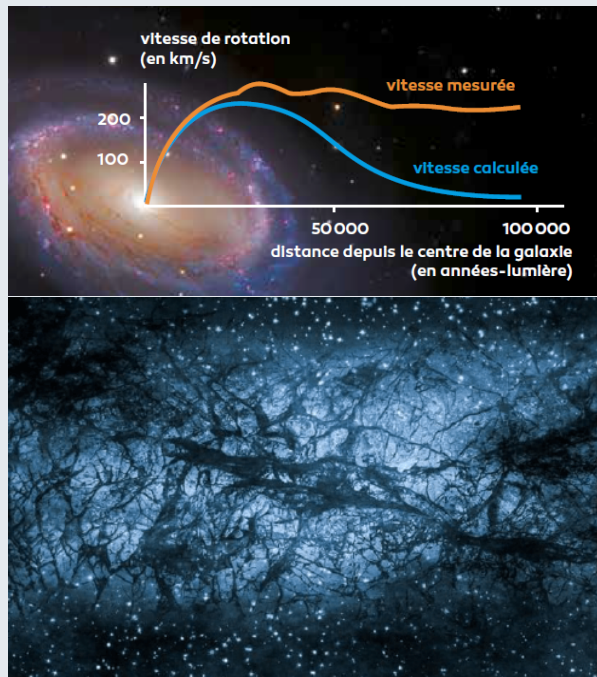
# Fin de l'histoire ?



# Fin de l'histoire ?



5 % matière visible



27 % matière noire

68 % énergie sombre ?

La physique des particules aujourd'hui c'est :

- **Tester le Modèle Standard** encore plus précisément
- Construire et tester des modèles pour **répondre aux grandes questions** :
  - Qu'est ce que la matière noire ? L'énergie sombre ?
  - Pourquoi ne voit-on que de la matière et pas d'antimatière ?
  - Pourquoi 3 générations de fermions ?
  - ...