

# La physique des particules



Origines, Constituants et EVolution de l'Univers

Summer Camp

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

16 juin 2016



# Yann Coadou

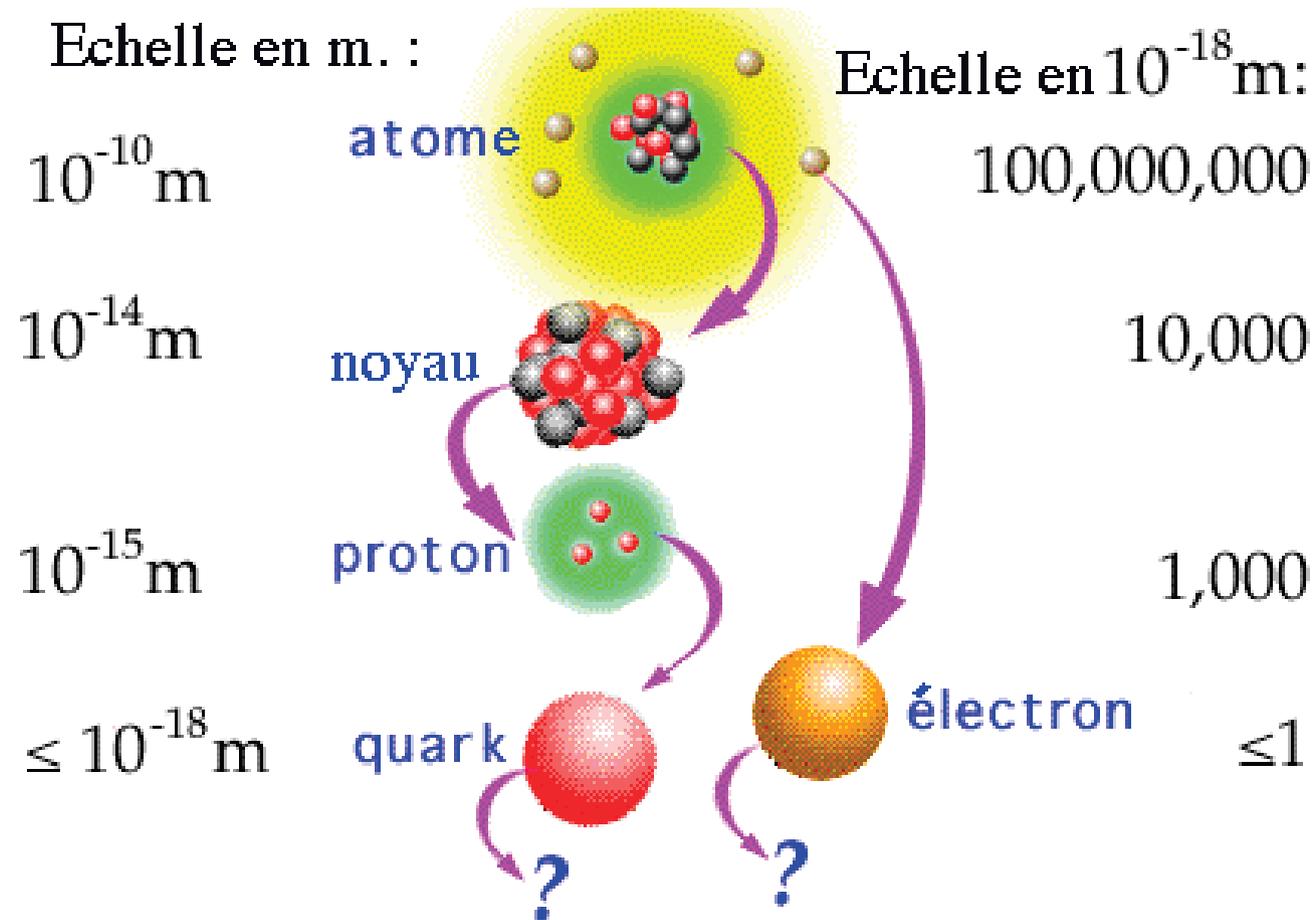


- Chercheur au CPPM (IN2P3/CNRS) depuis octobre 2009 sur l'expérience ATLAS
- Avant ça :
  - ▶ Classes préparatoires à Orléans
  - ▶ Double diplôme Ecole Centrale Paris/Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm, Suède
  - ▶ Projet de fin d'études sur ATLAS au Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Californie
  - ▶ Doctorat sur ATLAS et D0, université d'Uppsala, Suède (basé un an et demi à Chicago, USA)
  - ▶ Postdoctorat dans D0, Simon Fraser University, Vancouver, Canada
  - ▶ CERN fellow dans ATLAS, Genève, Suisse

# De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



# Échelle des distances en physique des particules



Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

# La physique des particules

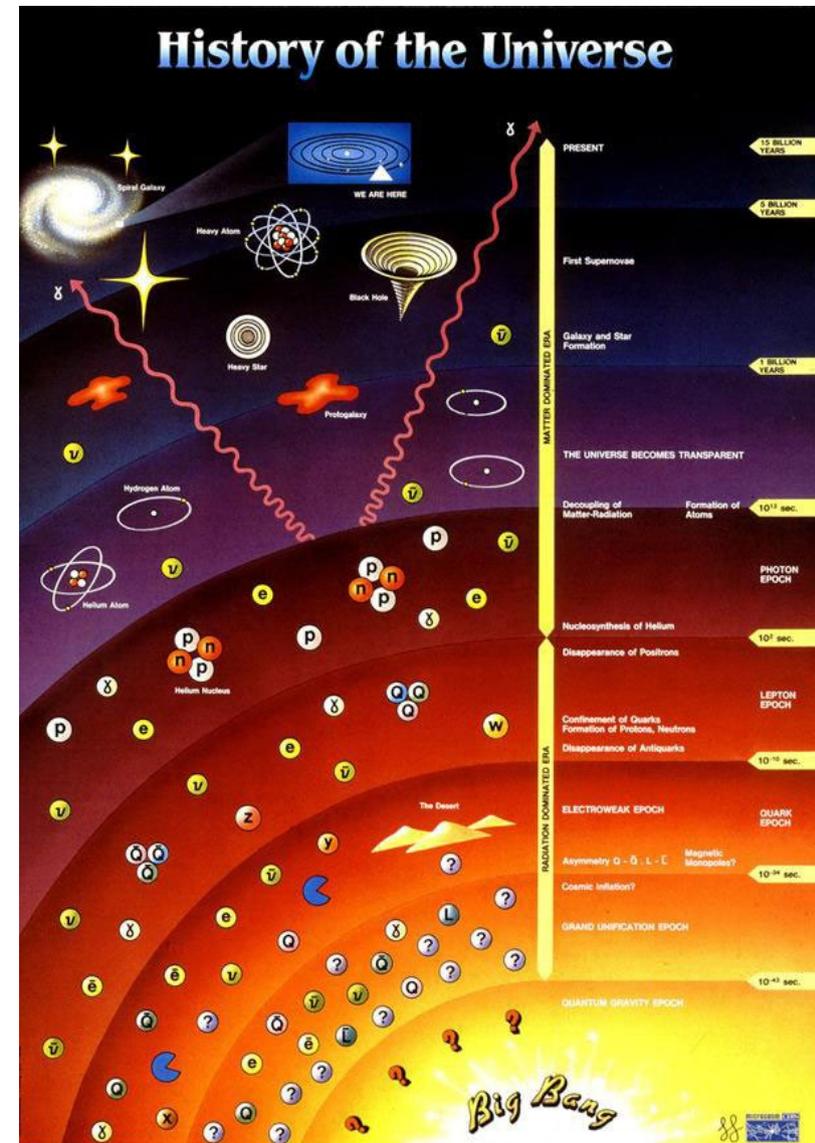
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

- ▶ **constituants élémentaires** : « particules » sans structure interne
- ▶ **interactions** : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires

Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

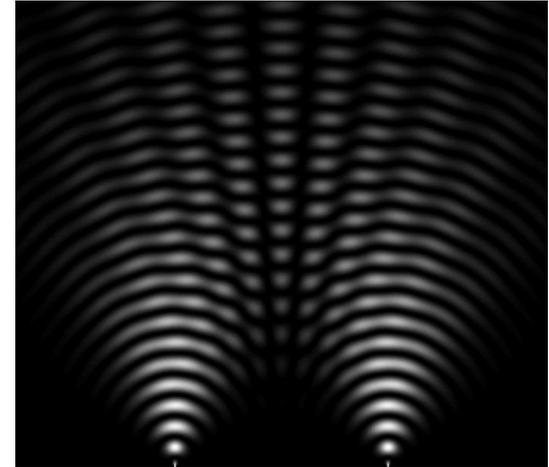
Dans l'univers « froid » d'aujourd'hui, la plupart de ces particules ont maintenant disparu

- ▶ **créées artificiellement dans des accélérateurs (collisionneurs) de particules qui reproduisent les conditions existant aux premiers instants de l'univers**
  - plus on accélère les particules, plus on met d'énergie en jeu, plus on remonte dans le temps



# État des lieux à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle

- Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]
  - ▶ principe d'inertie
  - ▶ loi de la dynamique
  - ▶ gravitation universelle
- Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]
  - ▶ principe de moindre action
- Optique ondulatoire [Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)]
  - ▶ nature ondulatoire de la lumière
- Électromagnétisme [Maxwell (1831-1879)]
  - ▶ unification électricité - magnétisme
- Existence des atomes : pas prouvée – en débat
- Lumière : onde électromagnétique se propageant dans un *éther*



# Révolutions conceptuelles

- D'après Lord Kelvin en 1900 (British Association for the advancement of Science) :
  - «There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.»
- Pourtant, deux théories fondamentales voient le jour au début du XX<sup>e</sup> siècle
  - ▶ La relativité restreinte
  - ▶ La mécanique quantique

# Relativité restreinte : espace-temps

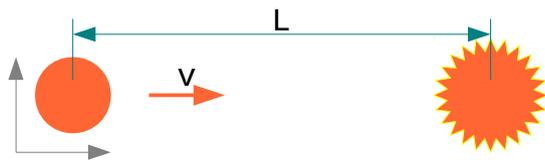
- Contraction des longueurs et dilatation du temps

- ▶ L'écoulement du temps dépend du référentiel

- temps propre ( $t_0$ ): temps mesuré dans le référentiel lié à l'objet considéré
- temps mesuré par un observateur (fixe) pour qui l'objet se déplace à une vitesse  $v$  :

$$t = \gamma t_0 \text{ où } \gamma = 1/\sqrt{(1-v^2/c^2)} > 1 \text{ (d'autant plus grand que } v \text{ est grand)}$$

- ▶ Exemple : bombe programmée pour exploser après 1 s



1) $v =$	300 km/s (0,1 % $c$ )	$\rightarrow L =$	300 km (t= 1s)
2) $v =$	29 979 km/s (10 % $c$ )	$\rightarrow L =$	30 130 km (t= 1s)
3) $v =$	269 813 km/s (90 % $c$ )	$\rightarrow L =$	618 994 km (t= 2s)
4) $v =$	296 794 km/s (99 % $c$ )	$\rightarrow L =$	2 103 921 km (t= 7s)
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % $c$ )	$\rightarrow L =$	6 698 534 km (t=22s)

A prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse limite ( $c$ , la vitesse de la lumière dans le vide)

# Relativité restreinte : masse et énergie

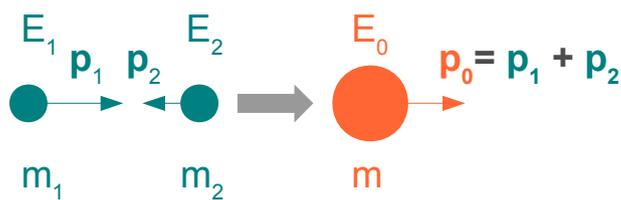
- Équivalence masse-énergie

- ▶ La masse est une forme d'énergie

- Si un corps perd une quantité d'énergie  $E$ , sa masse diminue de  $\Delta m = E/c^2$
- $E_0 = m c^2$  : énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)

- ▶ Énergie totale d'un système :  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$  ( $p$  : quantité de mouvement)

- ▶ Transformation de l'énergie cinétique en masse

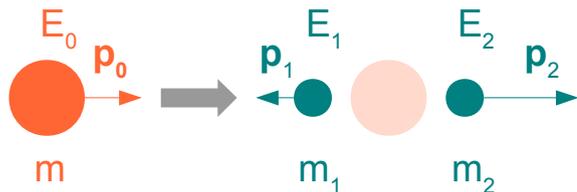


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

exemple : collision de protons avec  $E = 7 \text{ TeV}$   
 → énergie disponible :  $E_0 = 14 \text{ TeV}$

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

- ▶ Transformation de la masse en énergie cinétique



$$m^2 = E_0^2 - p_0^2$$

$$= [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 - [p_1 + p_2]^2$$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.

En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

# Les unités

- Unités usuelles souvent inadaptées à la physique des particules
- On utilisera :
  - ▶ Energie : eV (*électron-volt*)
    - $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
    - énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V
- En vertu de l'équivalence masse-énergie ( $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ) :
  - ▶ Impulsion : eV/c
  - ▶ Masse : eV/c<sup>2</sup>
    - $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$
  - ▶ Souvent, utilisation des unités « naturelles » :
    - $c = 1$
    - énergie, impulsion et masse en eV
- Multiples usuels : keV ( $10^3$ ), MeV ( $10^6$ ), GeV ( $10^9$ ), TeV ( $10^{12}$ )

# Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

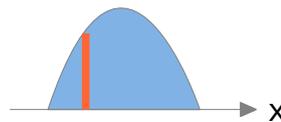
- Aux échelles microscopiques, les objets ont une nature à la fois *corpusculaire* et *ondulatoire*

$$E = h\nu \quad p = h/\lambda$$

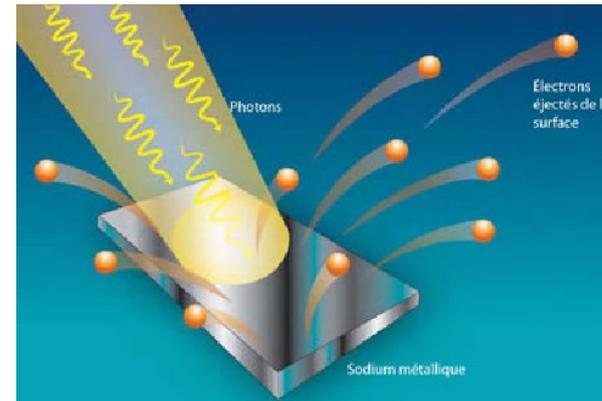
constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s

- ▶ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !
- Deux descriptions antagonistes !
  - **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
  - **onde** : objet étendu pouvant interférer
- ▶ **objet quantique** : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

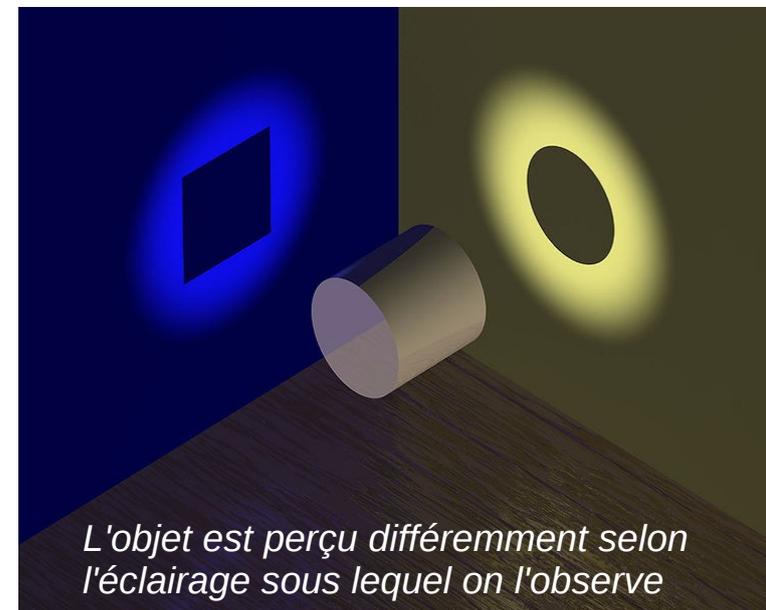
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905

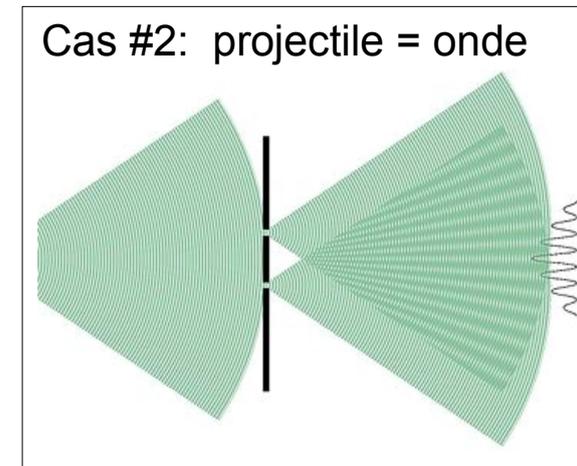
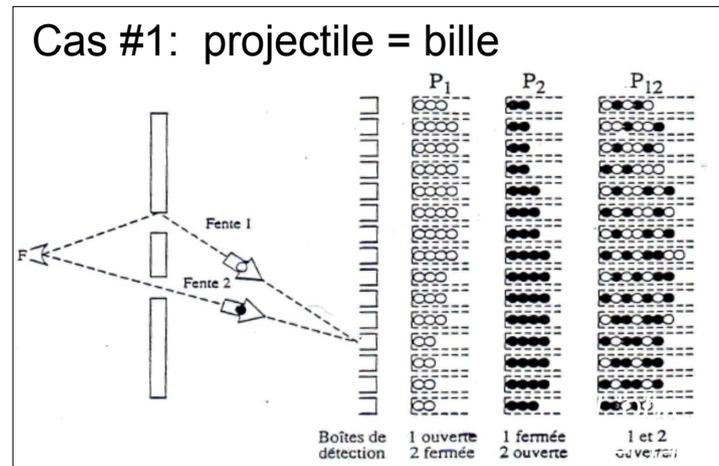
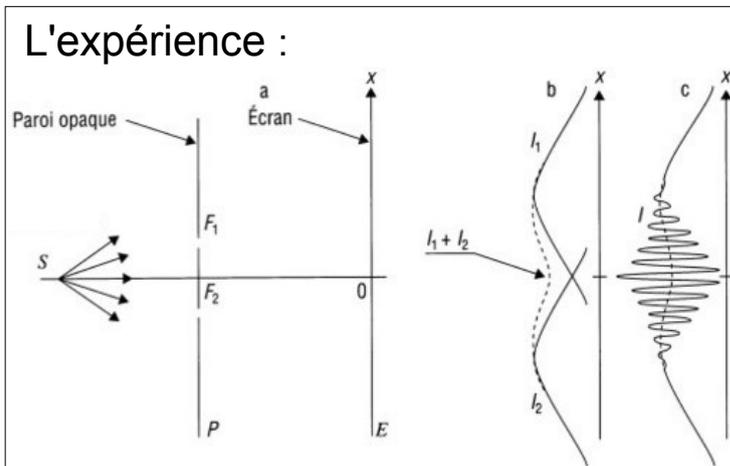


L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon



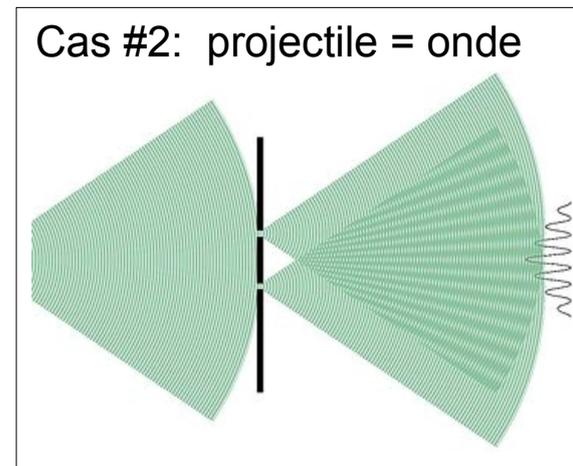
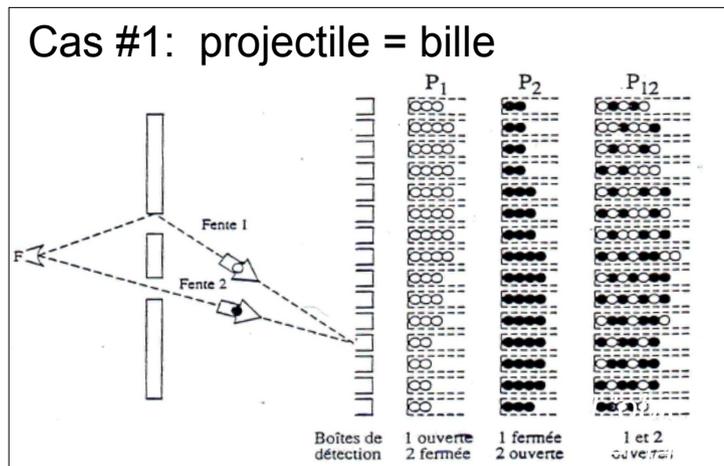
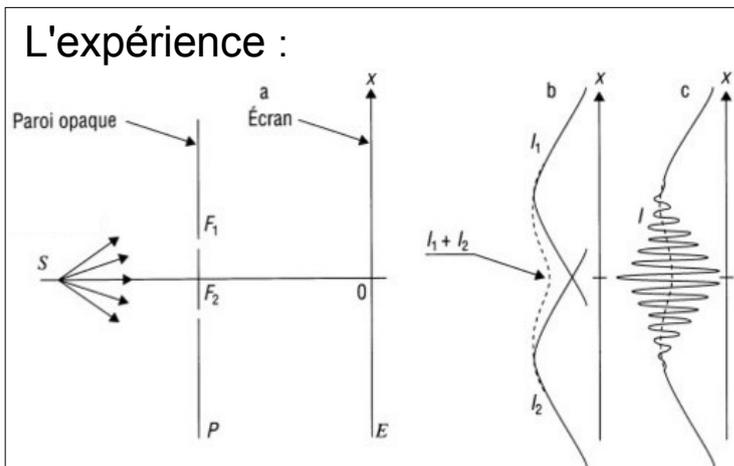
# Mécanique quantique : illustration

## L'expérience des fentes d'Young

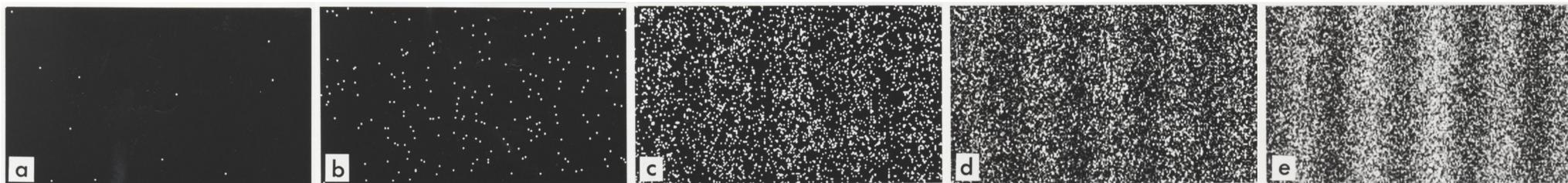


# Mécanique quantique : illustration

## L'expérience des fentes d'Young



### Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



- On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !
- Remarque : si on détecte par quelle fente la particule passe, l'interférence disparaît



LES BRONZÉS JOUENT:  
**LE PÈRE NOËL EST  
UNE  
ORDURE**



**un être  
quantique !**

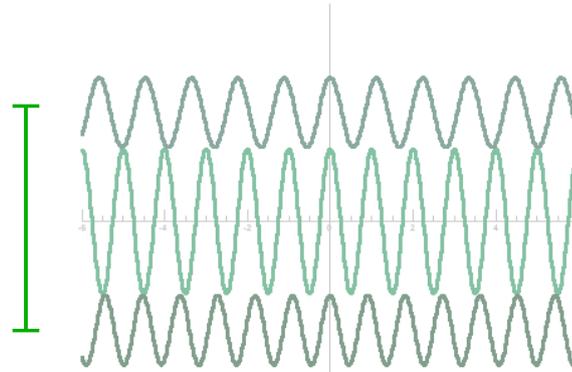
À LA GAÏTÉ MONPARNASSE  
26 RUE DE LA GAÏTÉ 14<sup>e</sup> Tel 322.16.18  
Tous les JOURS 22h. DIMANCHE 20h 30 RELÂCHE LUNDI



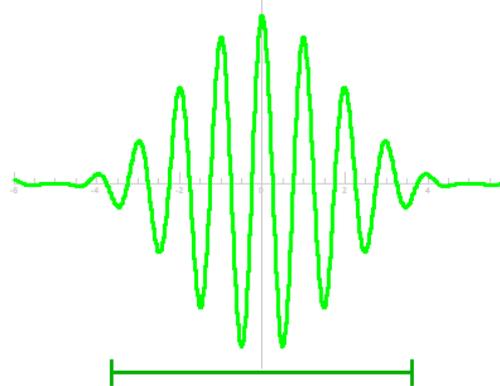
Très léger car quantique ( $\lambda = h/mc$ ) :  
taille  $\sim 1$  m  $\rightarrow$  masse inférieure à  $10^{-42}$  kg

# Mécanique quantique : le paquet d'onde

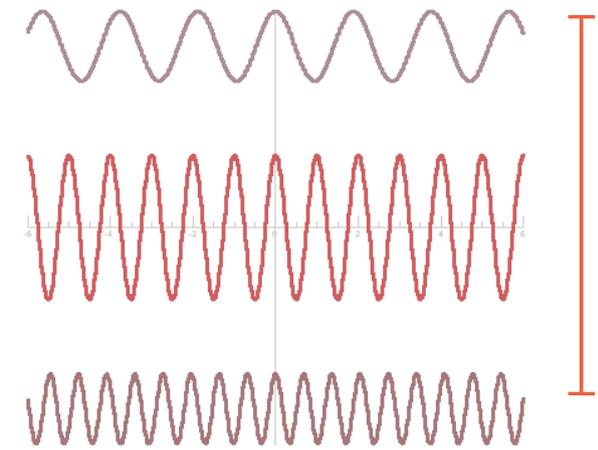
Superposition de  
plusieurs ondes  
(planes) de  
fréquences différentes



L'interférence  
(destructive) entre ces  
ondes donne naissance  
à un *paquet d'onde*

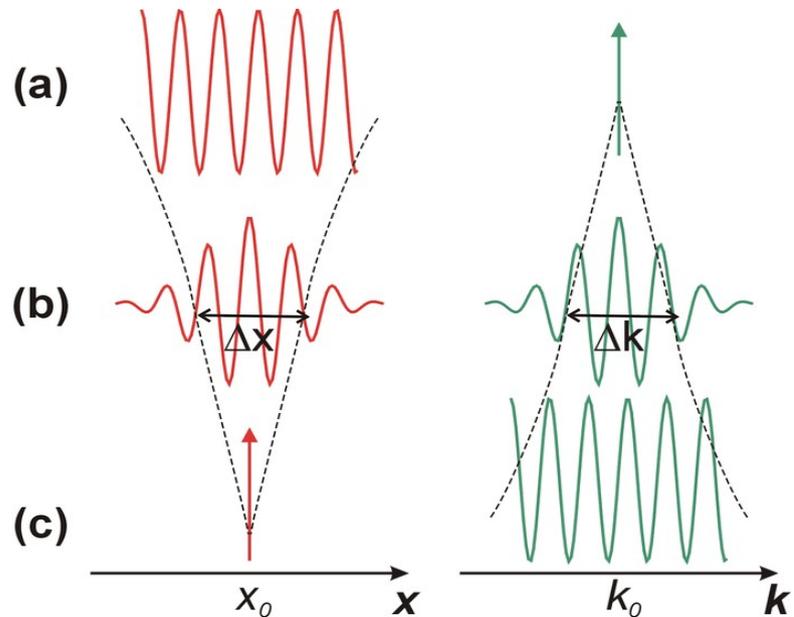


Bande de fréquences  
étroite  $\Rightarrow$  paquet étendu



Bande de fréquences  
large  $\Rightarrow$  paquet étroit

# Mécanique quantique : les relations d'incertitude



- (a) **onde** :  $A = \cos(k.x)$   
 - extension spatiale infinie  
 - fréquence pure
- (b) **paquet d'onde** :  $A = \sum_k \cos(k.x)$   
 - extension spatiale limitée  
 - distribué en fréquence
- (c) **corpuscule** :  $A = 1$  si  $x=x_0$  sinon 0 ( $\forall k$ )  
 - localisé spatialement  
 - pas de fréquence déterminée

- Relations d'Heisenberg (1927)

- ▶ si la précision sur la position d'une particule est  $\Delta x$ , son impulsion a une précision  $\Delta p$  telle que :  $\Delta p.\Delta x > \hbar/2$
- ▶ si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est  $\Delta t$ , son énergie a une précision  $\Delta E$  telle que :  $\Delta E.\Delta t > \hbar/2$

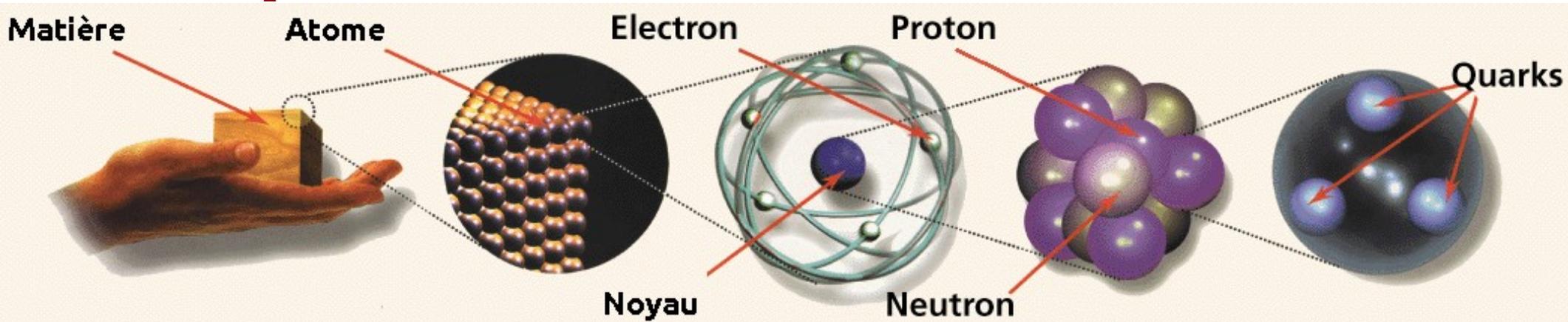
- Avantage du flou quantique

- ▶ une énergie ( $\Delta E$ ) peut être « empruntée » au vide pendant un laps de temps ( $\Delta t$ ) suffisamment court pour que  $\Delta E.\Delta t > \hbar/2$
- ▶ ... et comme  $E=mc^2$ , des particules (virtuelles) peuvent être créées et « vivre » pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde !

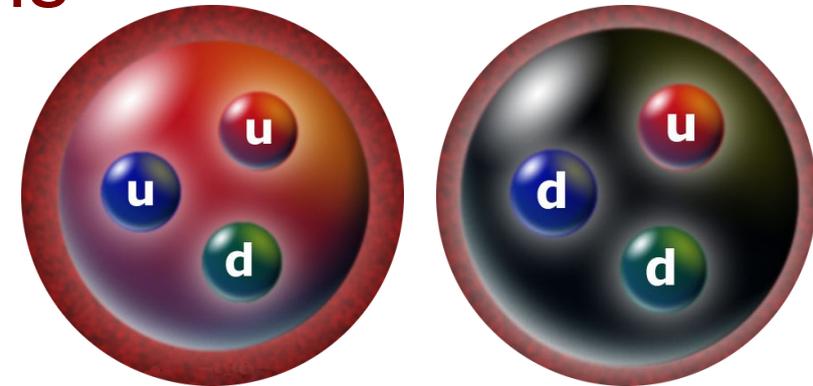
# Mécanique quantique : interprétation

- La mécanique quantique : artifice mathématique ou réalité ?
  - ▶ aspects probabilistes heurtent les partisans du déterminisme
    - « Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers », Einstein (1927)
  - ▶ dualité onde-corpuscule
    - difficile à interpréter
    - a fait longtemps débat
    - fait toujours l'objet d'études actives [S. Haroche, prix Nobel 2012]
- Malgré les réticences et les aspects non-intuitifs, toutes les expériences confirment les prédictions de la mécanique quantique

# De quoi est fait l'Univers visible ?



- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles



# Le positron

- Équation du mouvement d'un électron

[1928, Dirac]

- ▶ mécanique quantique
- ▶ cas relativiste
- ▶ Équation de Dirac avec 2 solutions
  - électron
  - positron

- Observation :

[1932, Anderson]

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les même caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

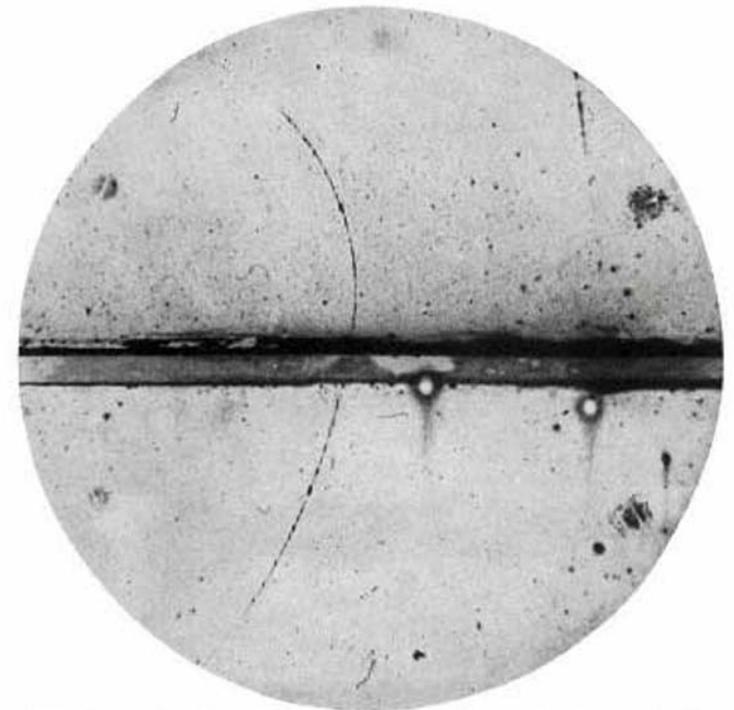
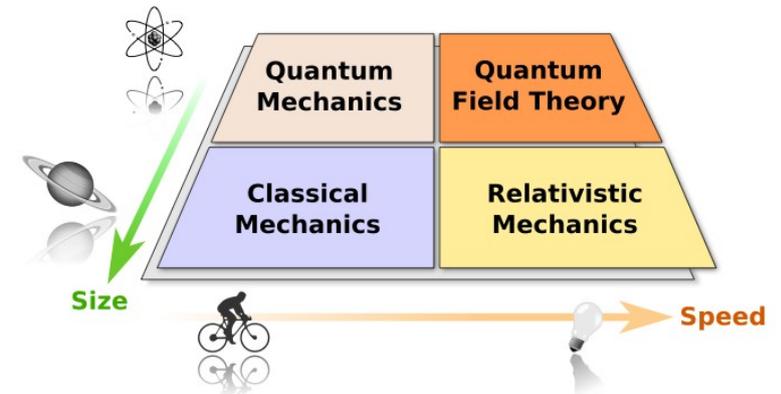
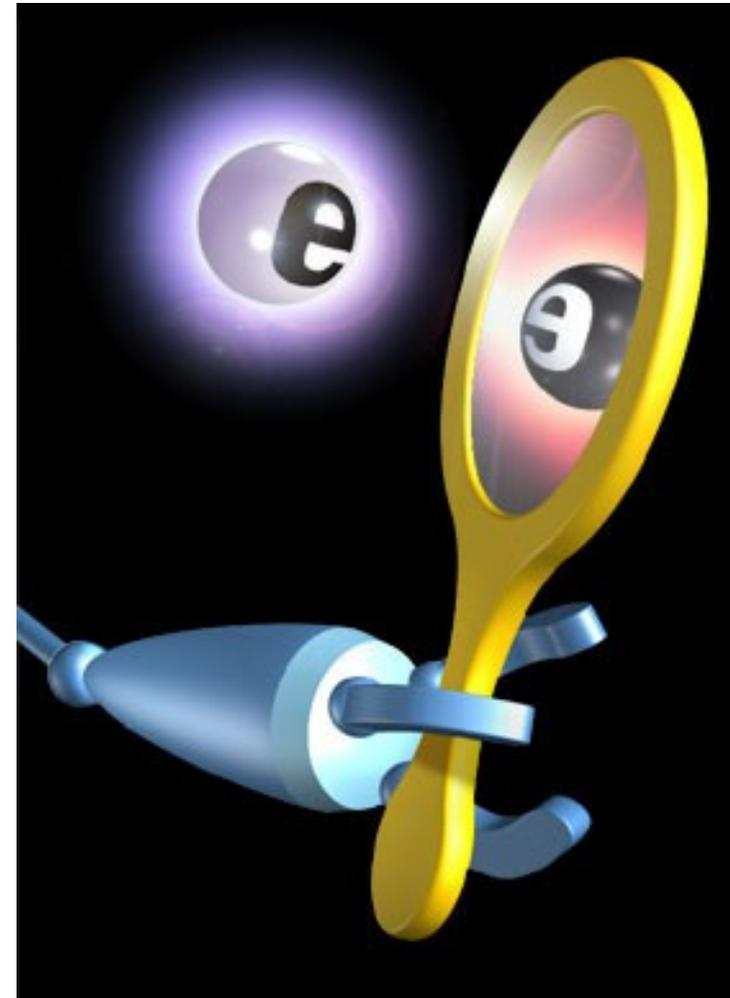


Fig. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# L'anti-matière

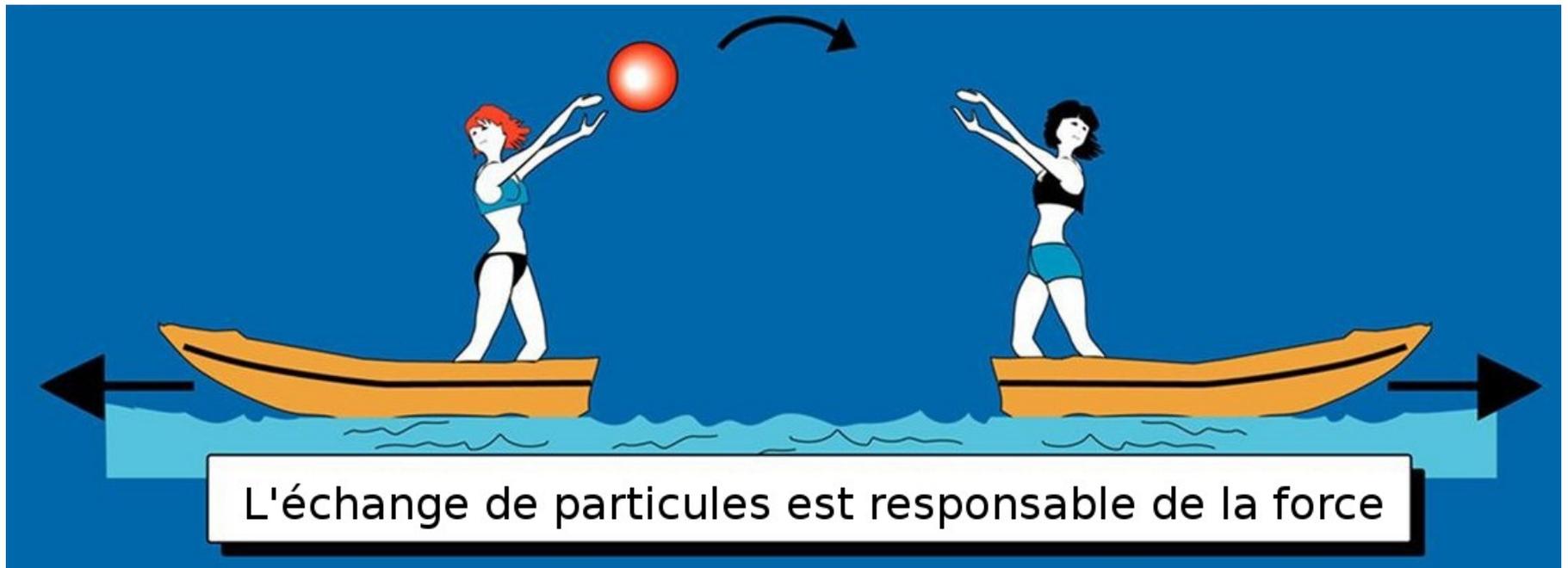
- La découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'anti-matière
  - ▶ positron = anti-électron
- Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :
  - ▶ de même masse
  - ▶ de même *spin* (moment angulaire interne)
  - ▶ de charge(s) opposée(s)
- L'anti-matière se comporte comme la matière (vue dans un miroir)
  - ▶ mais pas exactement
    - il existe une petite asymétrie
    - sujet d'étude très actif (et casse-tête théorique)



par convention : l'anti-particule de  $x$  est notée :  $\bar{x}$

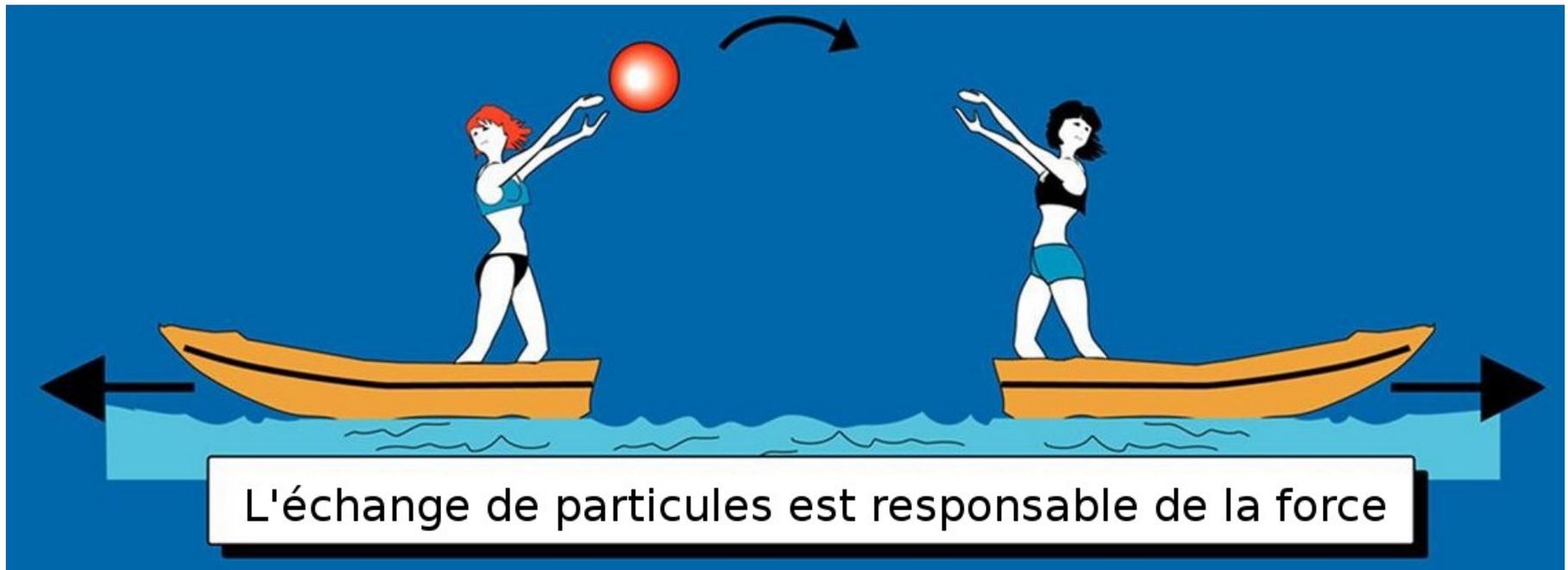
# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)

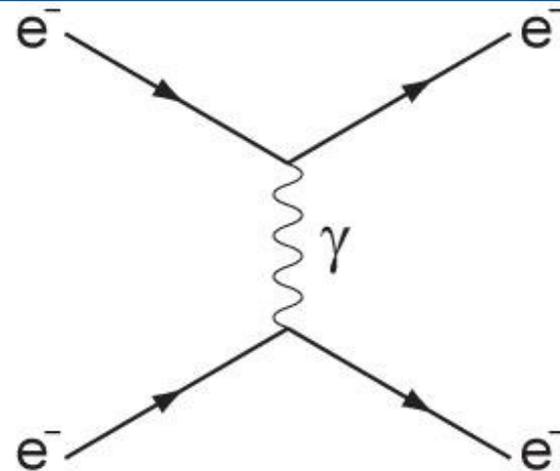


# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



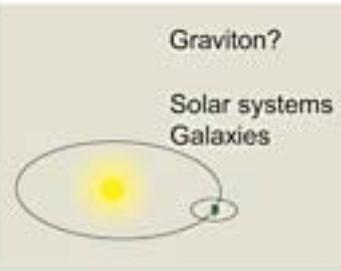
En physique des particules :



# Les forces

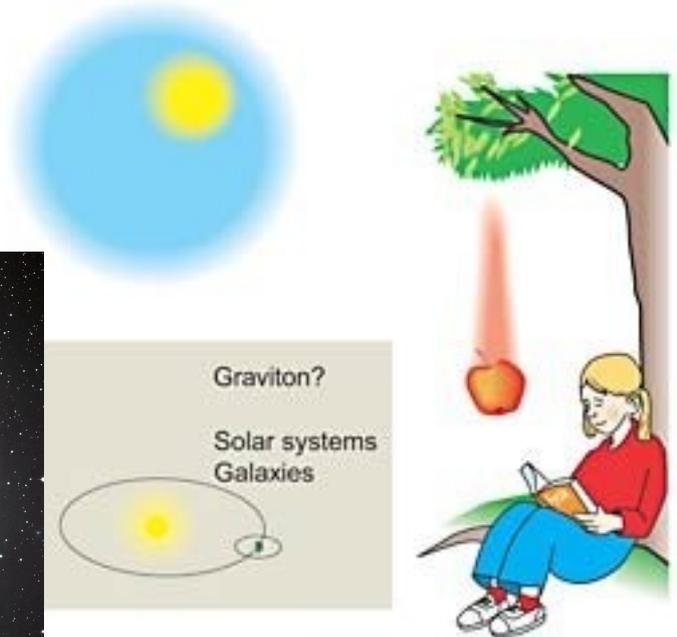


# Les forces

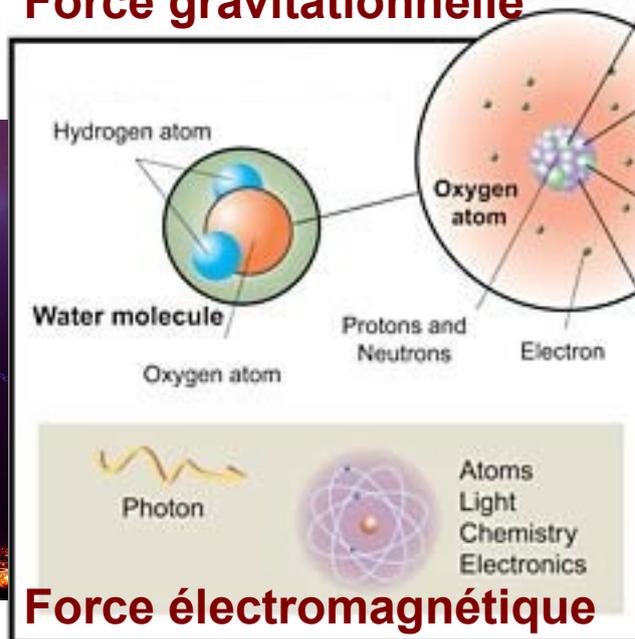


**Force gravitationnelle**

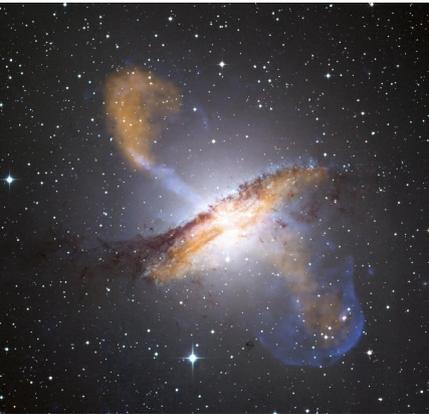
# Les forces



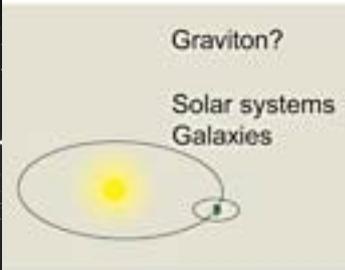
**Force gravitationnelle**



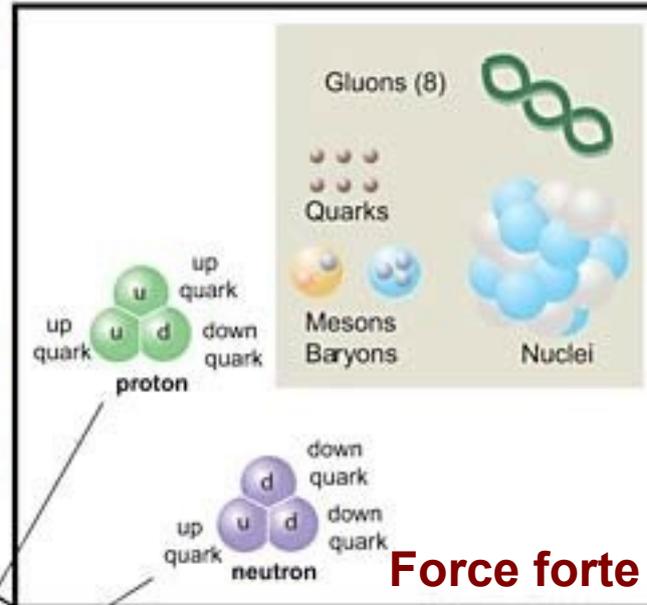
**Force électromagnétique**



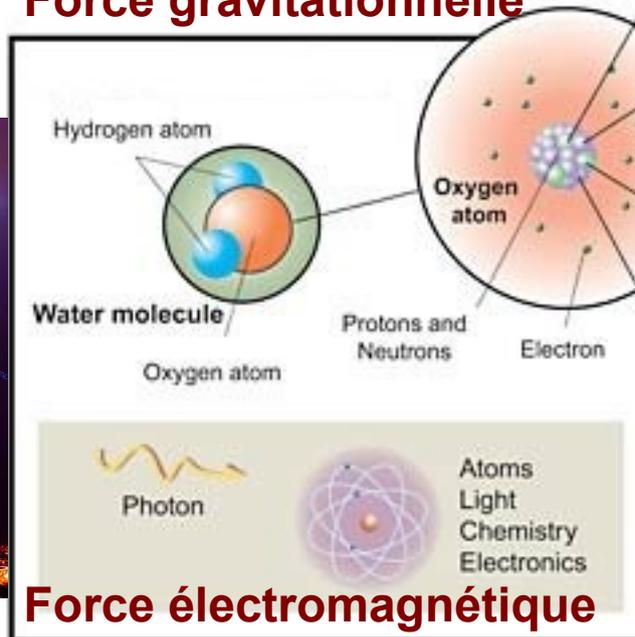
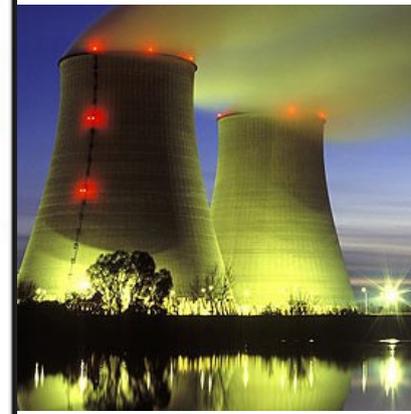
# Les forces



**Force gravitationnelle**

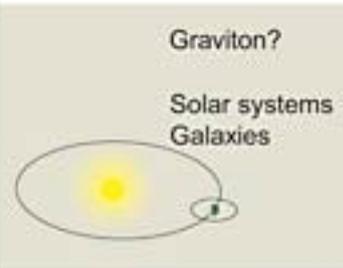


**Force forte**

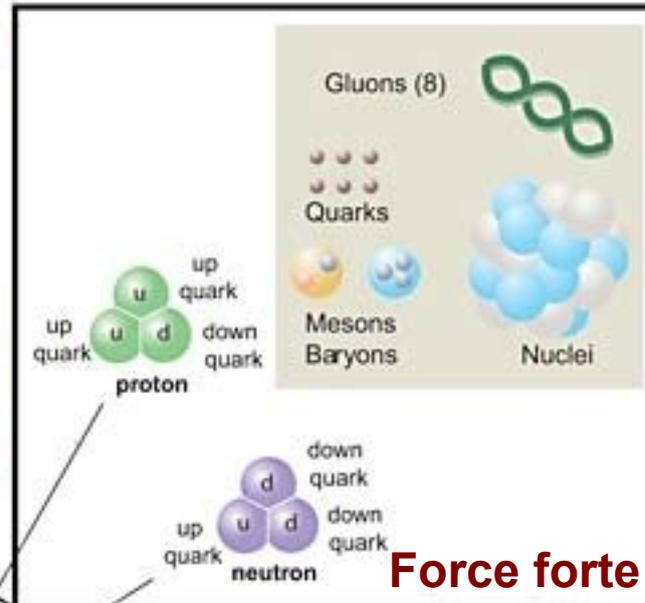


**Force électromagnétique**

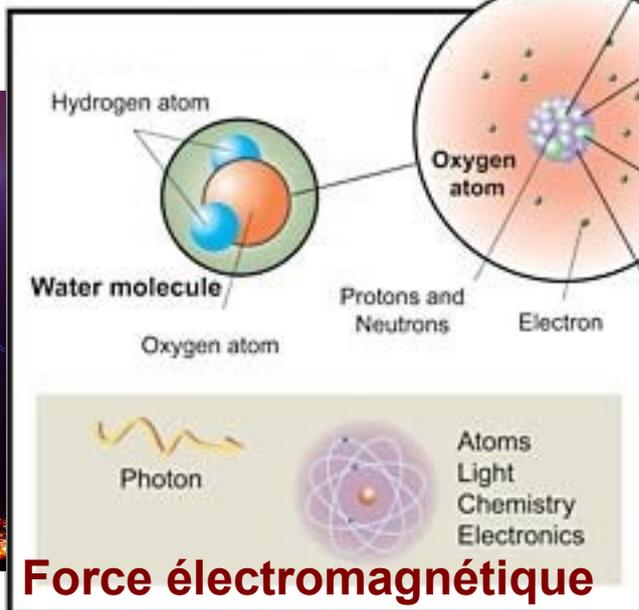
# Les forces



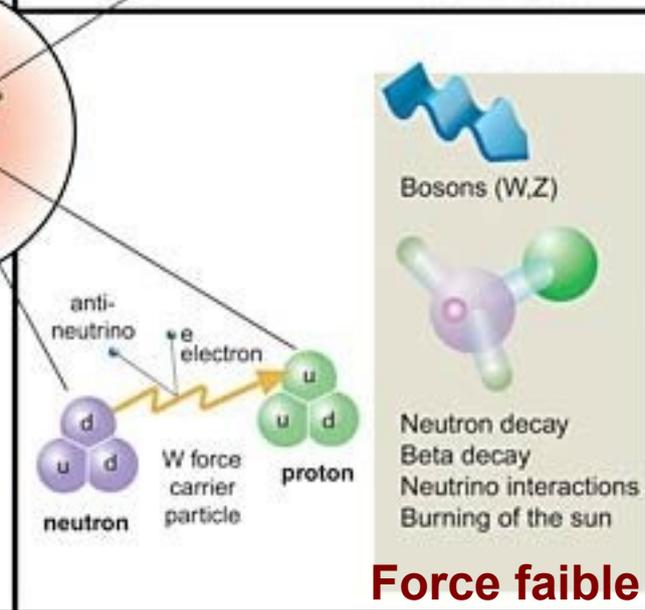
**Force gravitationnelle**



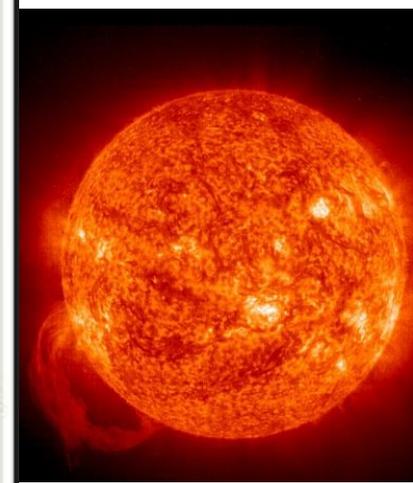
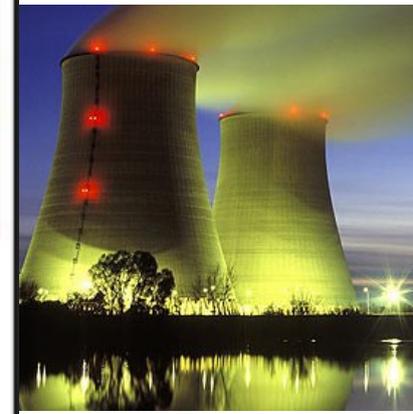
**Force forte**



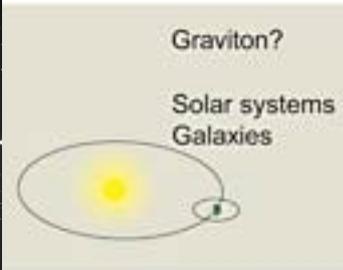
**Force électromagnétique**



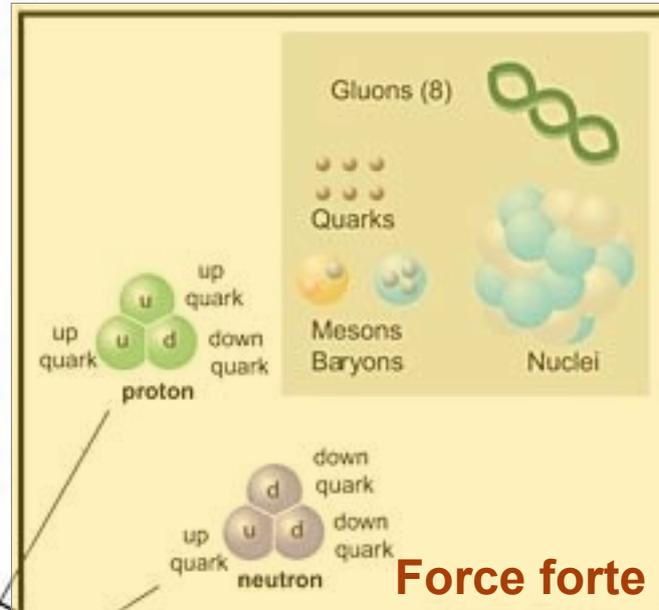
**Force faible**



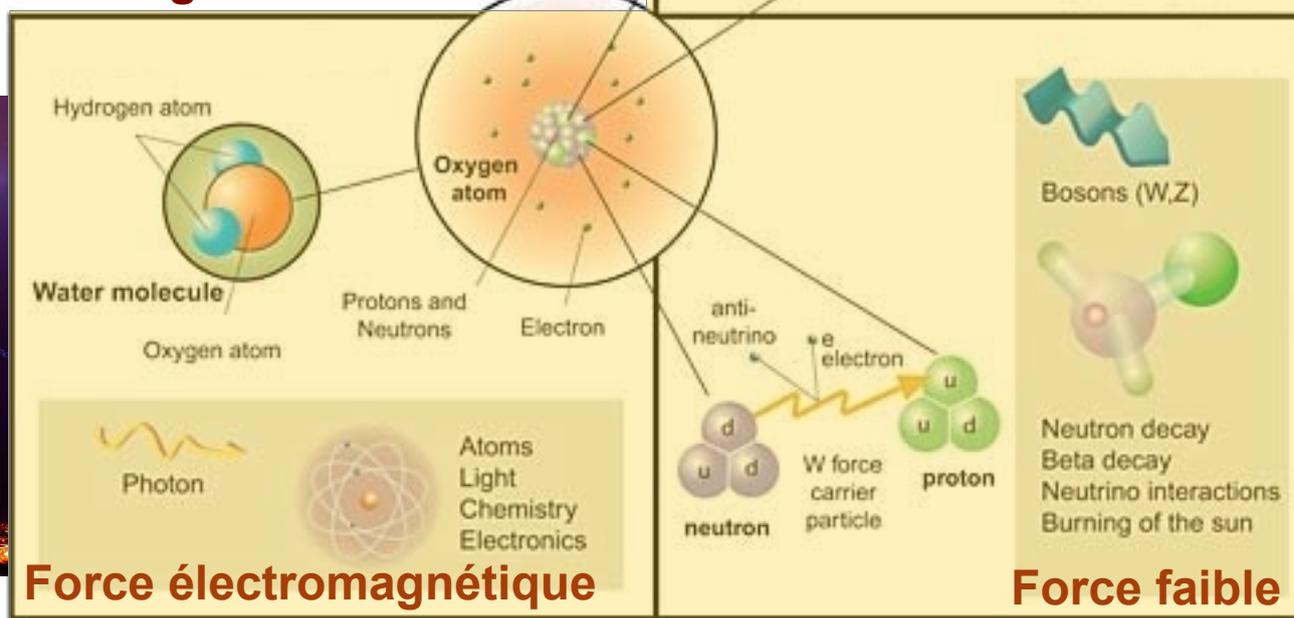
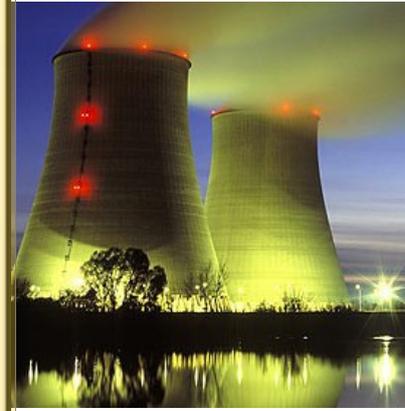
# Les forces



**Force gravitationnelle**

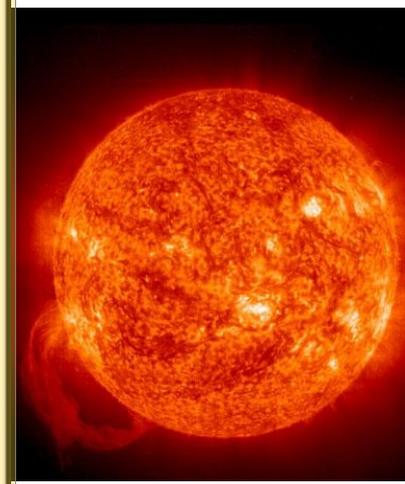


**Force forte**



**Force électromagnétique**

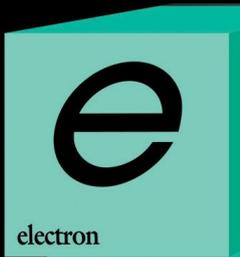
**Force faible**



# Quarks



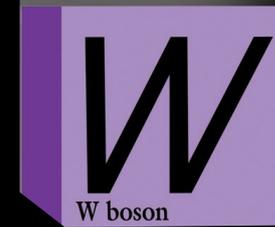
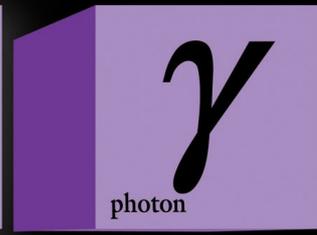
+ anti-matière



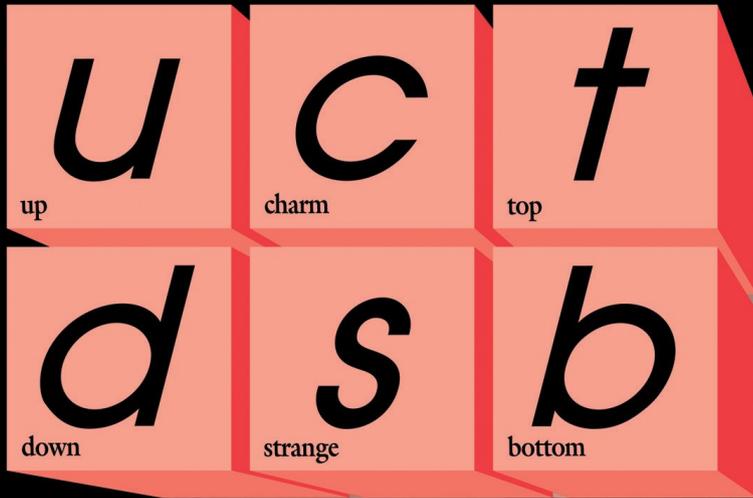
# Leptons

# Le modèle standard

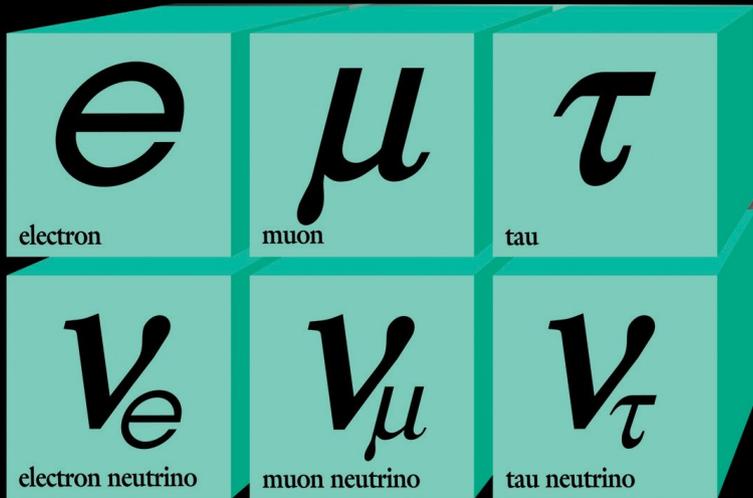
# Forces



# Quarks



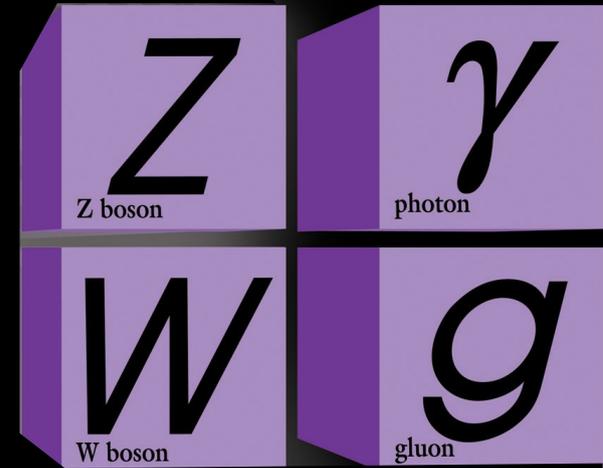
+ anti-matière



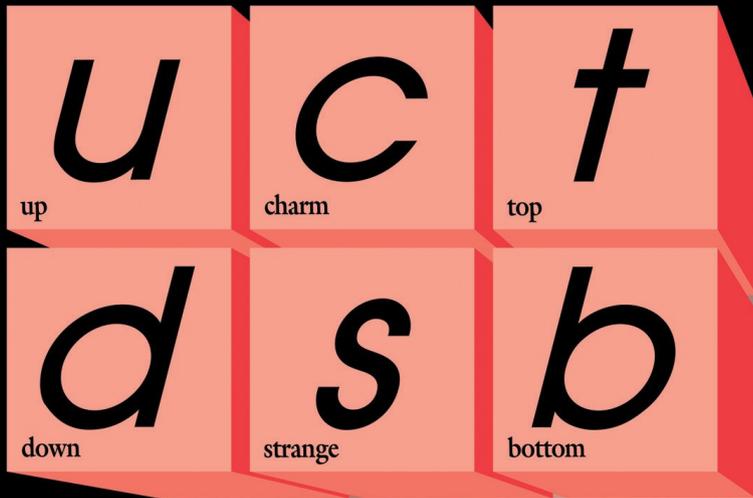
# Leptons

# Le modèle standard

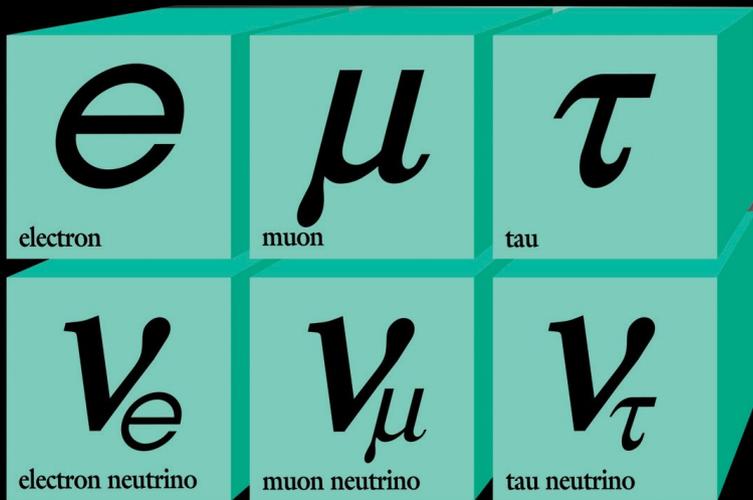
# Forces



# Quarks



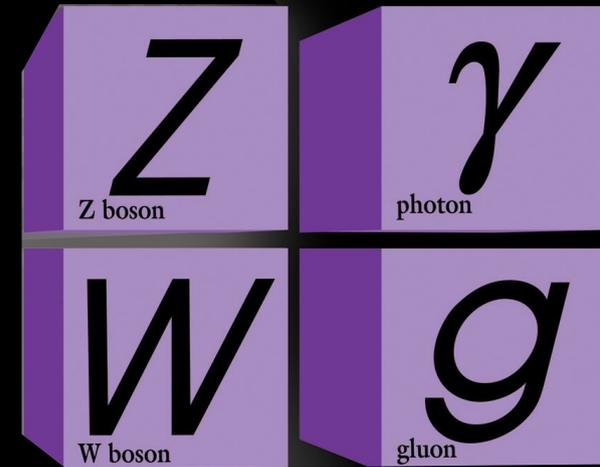
+ anti-matière



# Leptons

# Le modèle standard

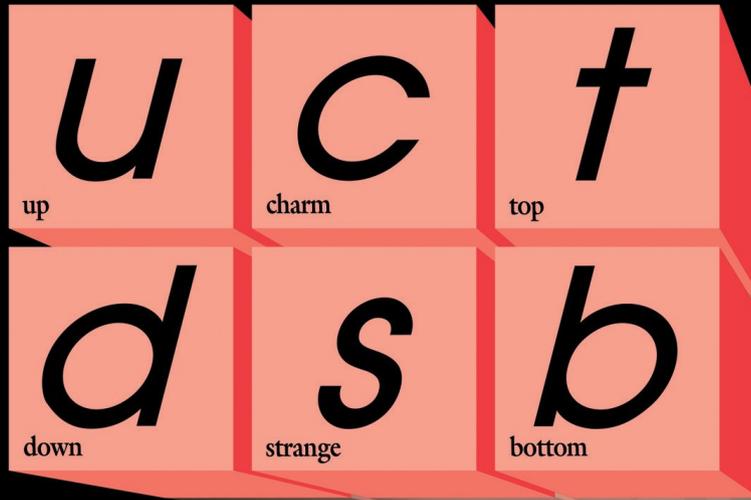
# Forces



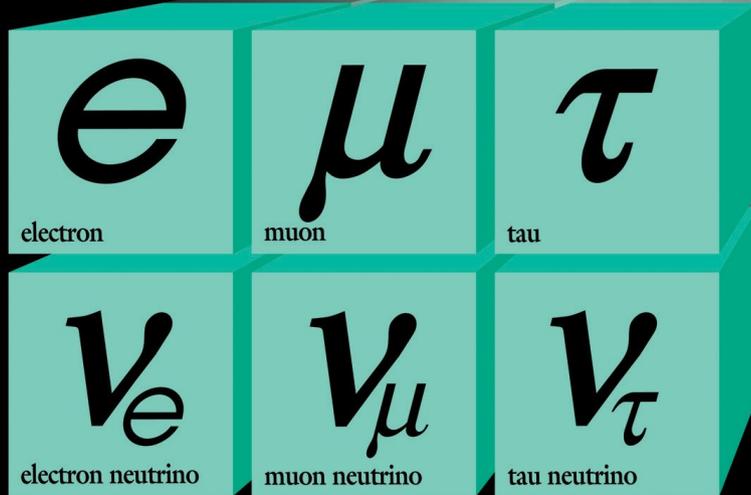
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

# Quarks

# Le modèle standard

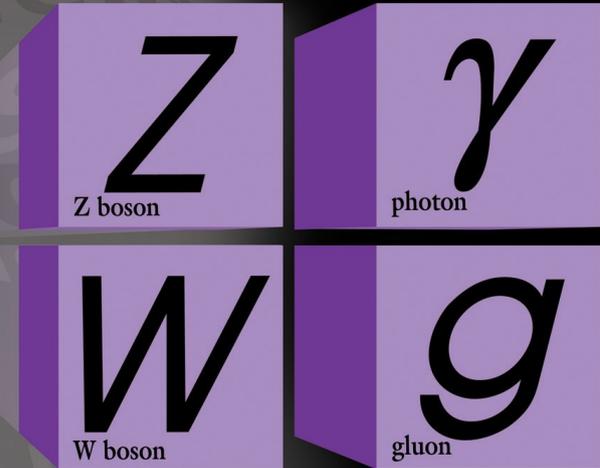


+ anti-matière



# Leptons

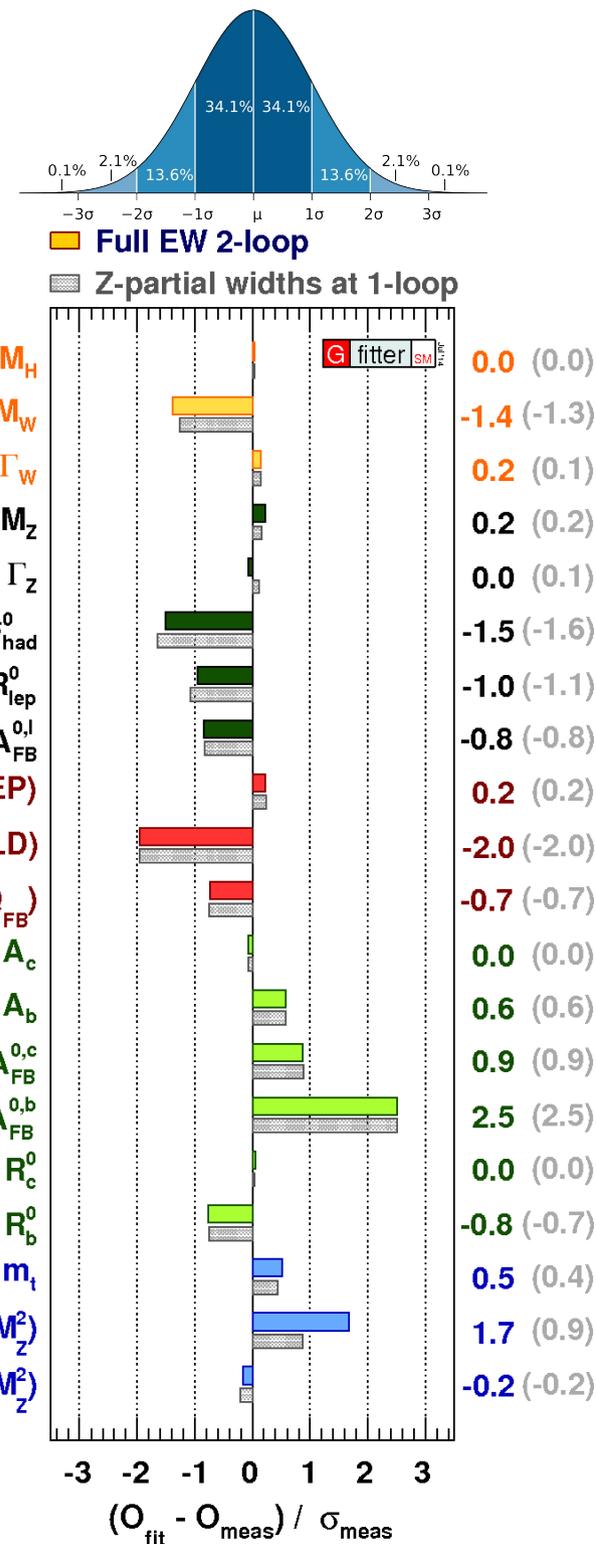
# Forces



Solution : rajouter un champ de Higgs

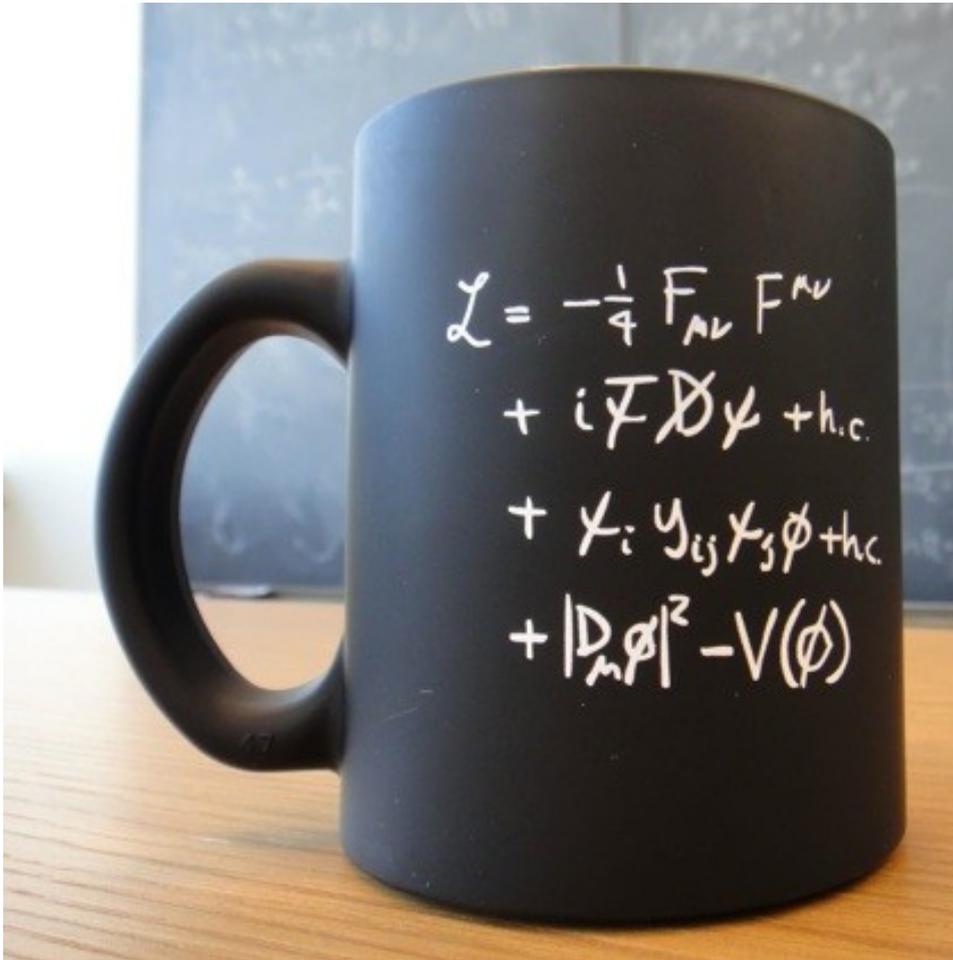
# Le modèle standard

- Modèle théorique qui explique à peu près tous les phénomènes observés et prédits en physique des particules
- Décrit les particules élémentaires et leurs interactions forte et électrofaible (faible et électromagnétique)
- Mis en place dans les années 1960-70
- Basé sur des symétries qui impliquent des lois de conservation
- Grand succès : testé avec très grande précision



# Le modèle standard

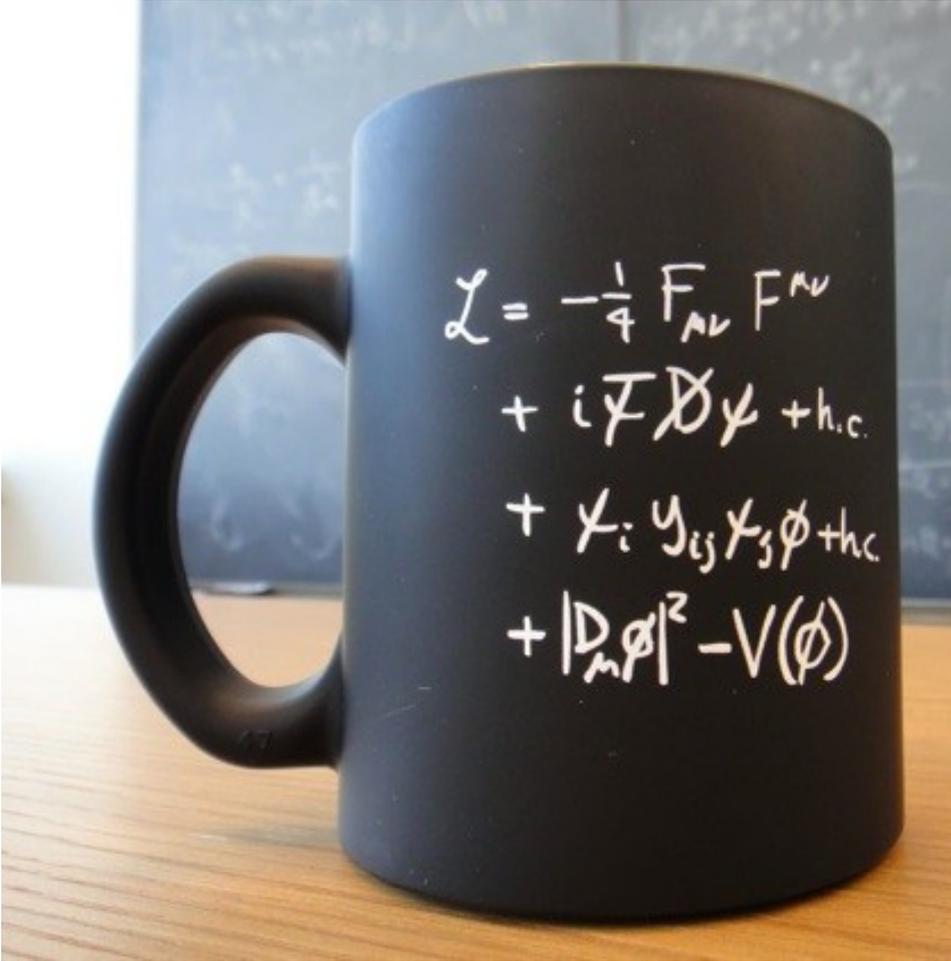
- Version synthétique



# Le modèle standard

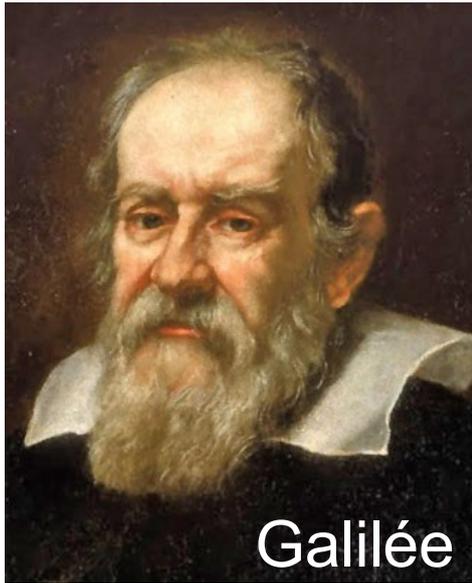
- Version synthétique

- Version développée...



$$\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} i g_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 \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2} m_h^2 \mathbf{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} \mathbf{H} + \frac{1}{2} (\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & igc_w [\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^+)] - ig s_w [\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^+)] - \\
 & \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_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ 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 [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - g M W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{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^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_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^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{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 \mathbf{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 \mathbf{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 + ig s_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 [(\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)] + \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^j)] + \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}} \frac{m_\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} [\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_\kappa^j) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^j) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_\kappa^j) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_\kappa^j) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\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 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_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^+) + ig s_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^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^- + \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^- + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^- + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

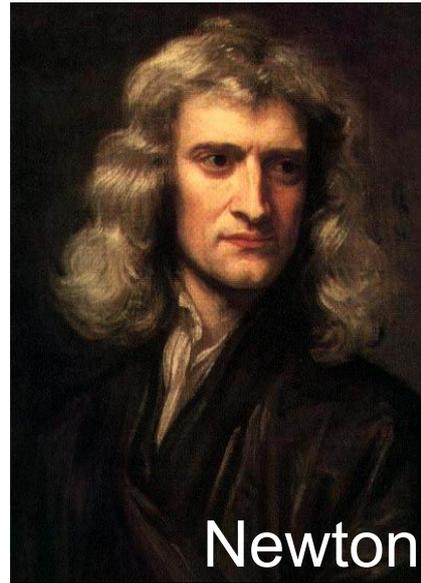
# La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

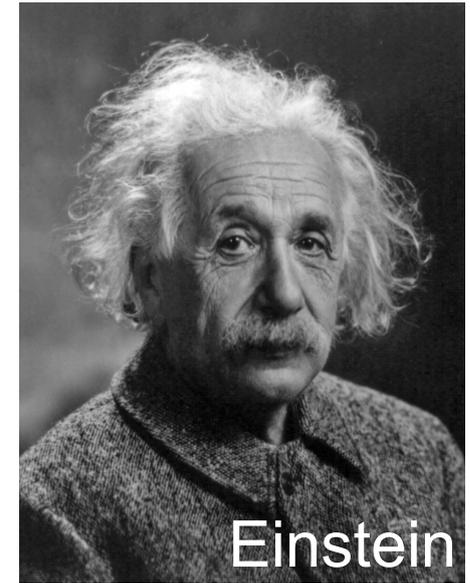
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

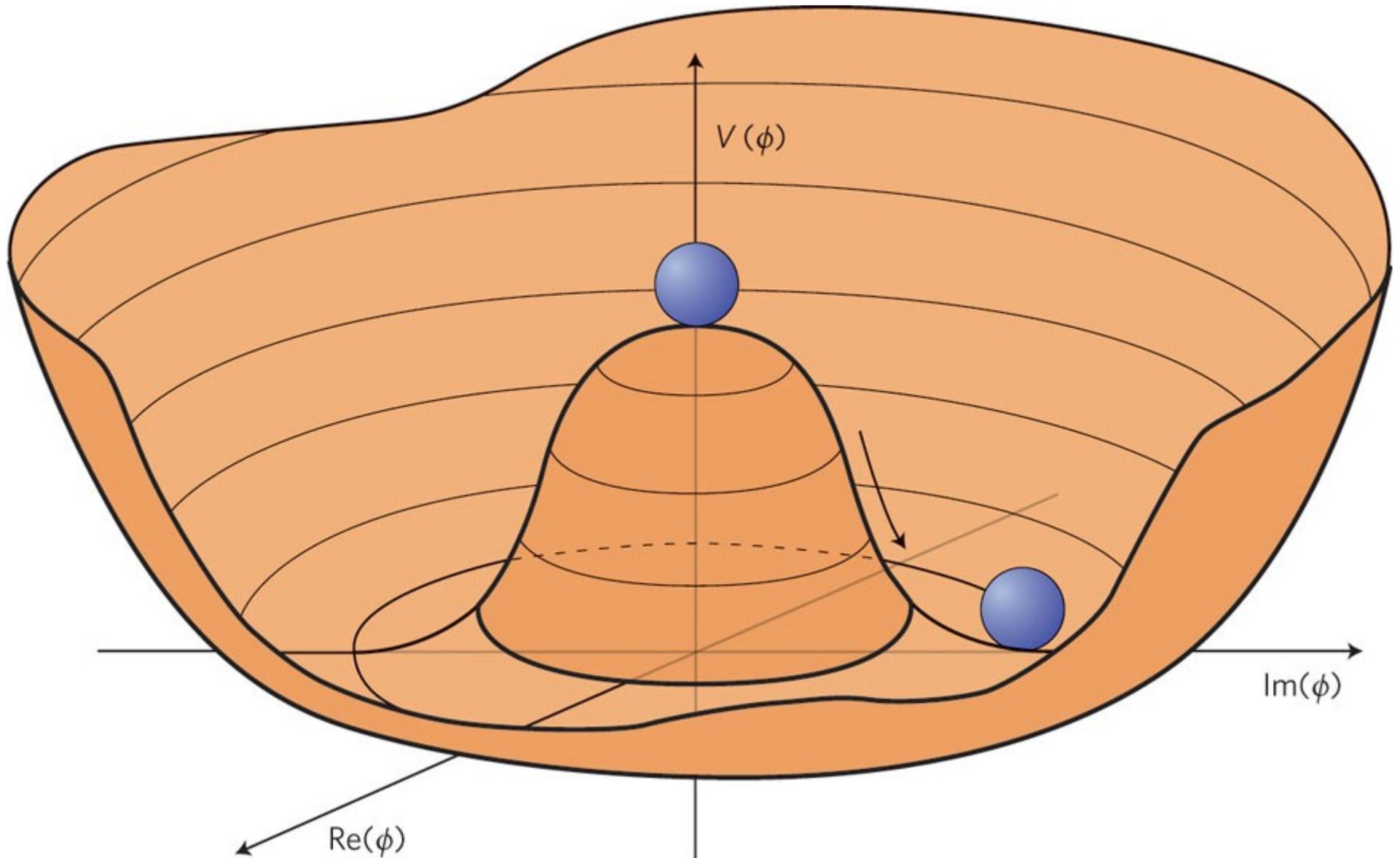
- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

- Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes
- D'après la théorie les particules élémentaires ont une masse nulle
  - L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...
  - Contraire à l'expérience, introduction d'un mécanisme pour générer la masse : **brisure spontanée de la symétrie électrofaible**

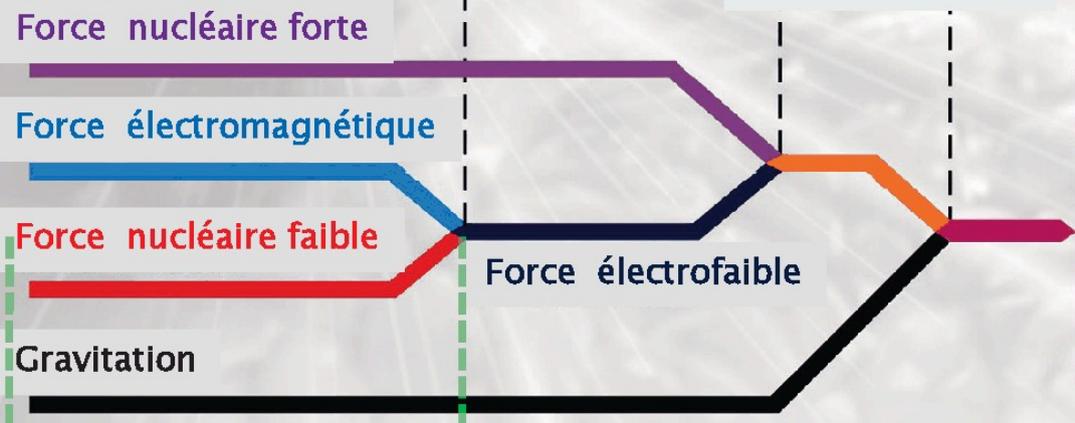
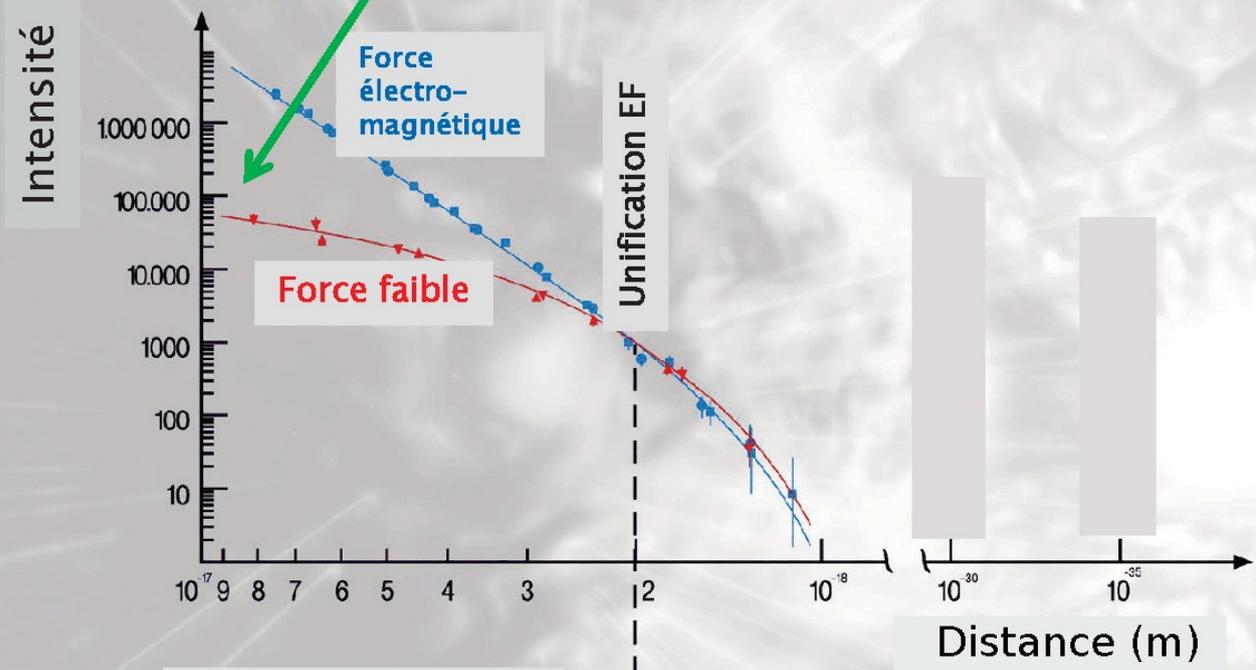
# Brisure spontanée de la symétrie électrofaible

Le potentiel de Higgs : le « chapeau mexicain »



# Unification électrofaible

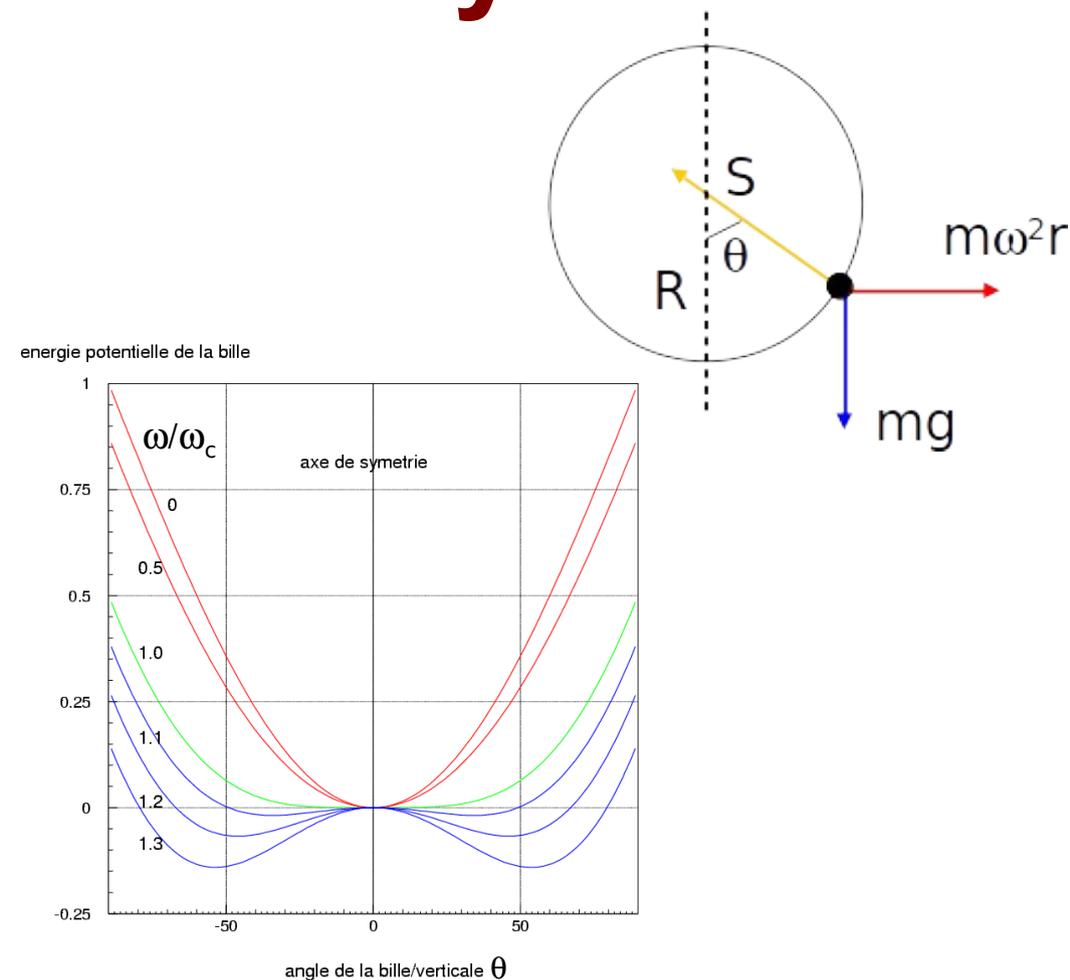
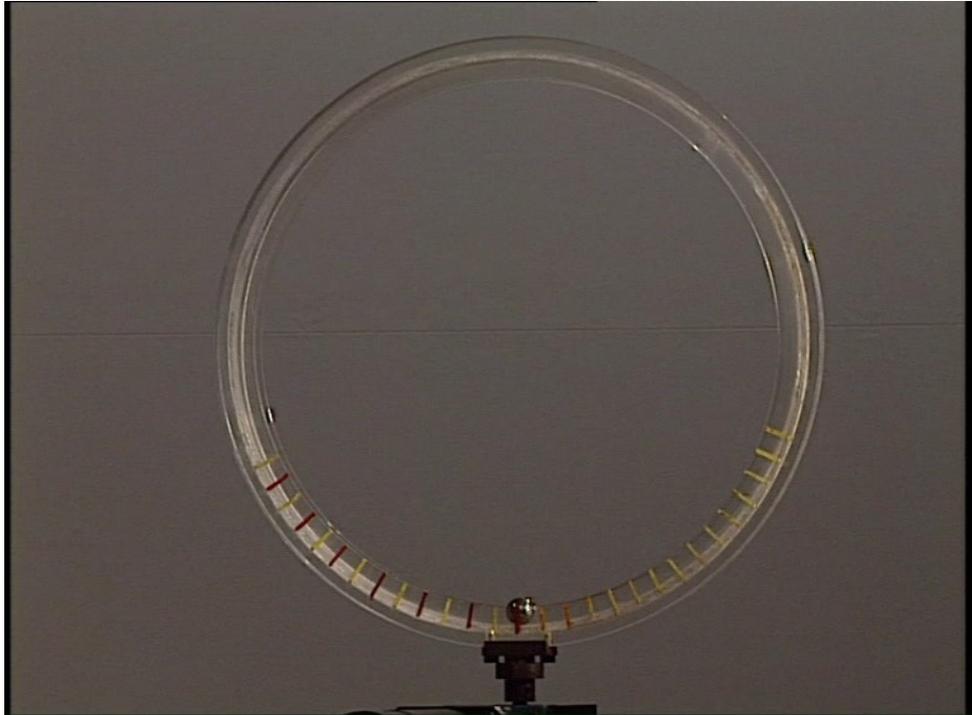
basse énergie: différences entre  $\gamma$  et  $W/Z$   
pas de différence dans le formalisme mathématique !



13,7 milliards d'années (2,7 K)

$10^{-12}$  s ( $10^{15}$  K)

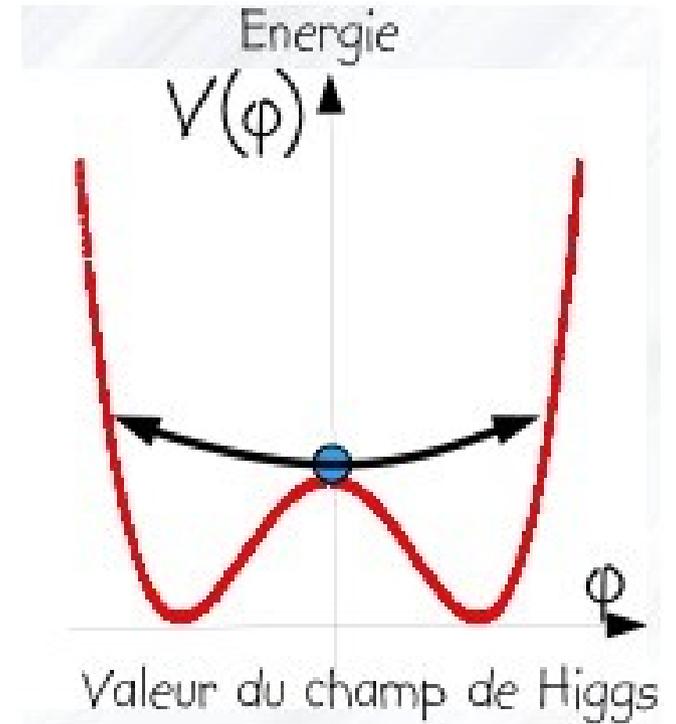
# Brisure spontanée de symétrie



- vitesse angulaire de rotation  $\omega \Rightarrow$  vitesse critique  $\omega_c$ 
  - ▶ si  $\omega < \omega_c$  : bille sur l'axe de symétrie
  - ▶ si  $\omega > \omega_c$  : 2 positions stables. La bille doit « choisir » l'une des deux  $\Rightarrow$  brisure spontanée de symétrie

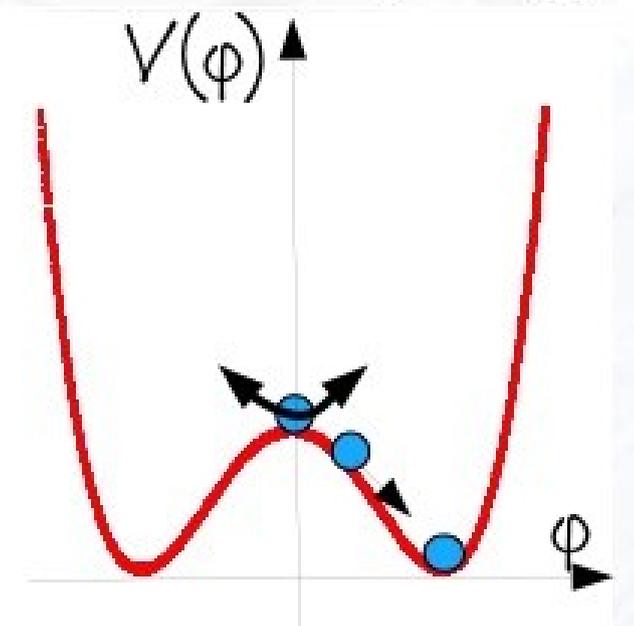
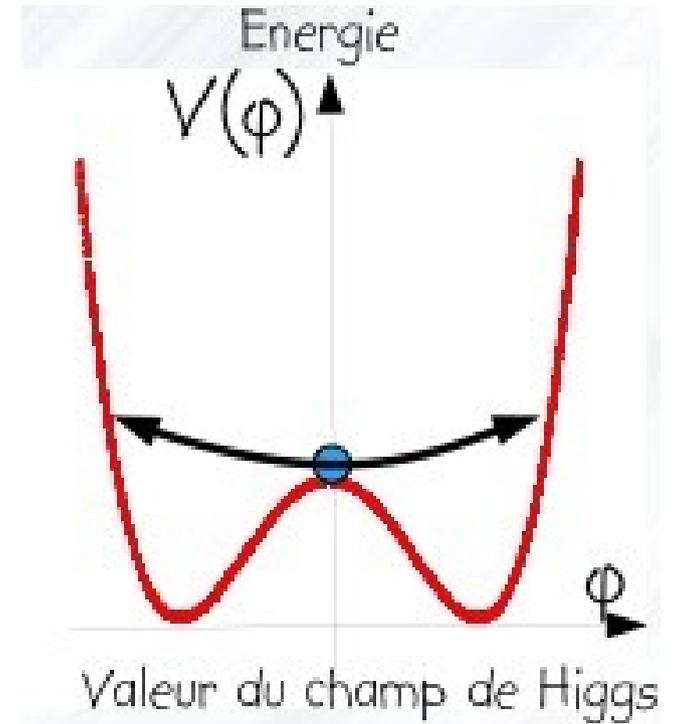
# Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
  - ▶ champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - ▶ les particules restent sans masse

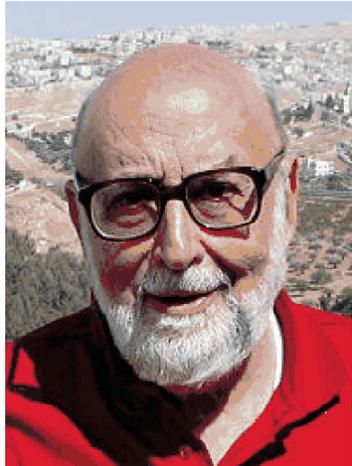


# Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
  - ▶ champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - ▶ les particules restent sans masse
- Réduction de la température ( $10^{-12}$  s après le Big Bang) :
  - ▶ brisure de symétrie
  - ▶ champ non nul
  - ▶ les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle en interagissant avec le champ de Higgs



# 1964 : Le mécanisme de Higgs



## BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS\*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction<sup>1</sup>; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field<sup>2</sup> associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.<sup>3</sup> In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.<sup>4-6</sup> A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local  $\gamma_5$ -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the  $\gamma_5$  invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

## BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenom-

about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

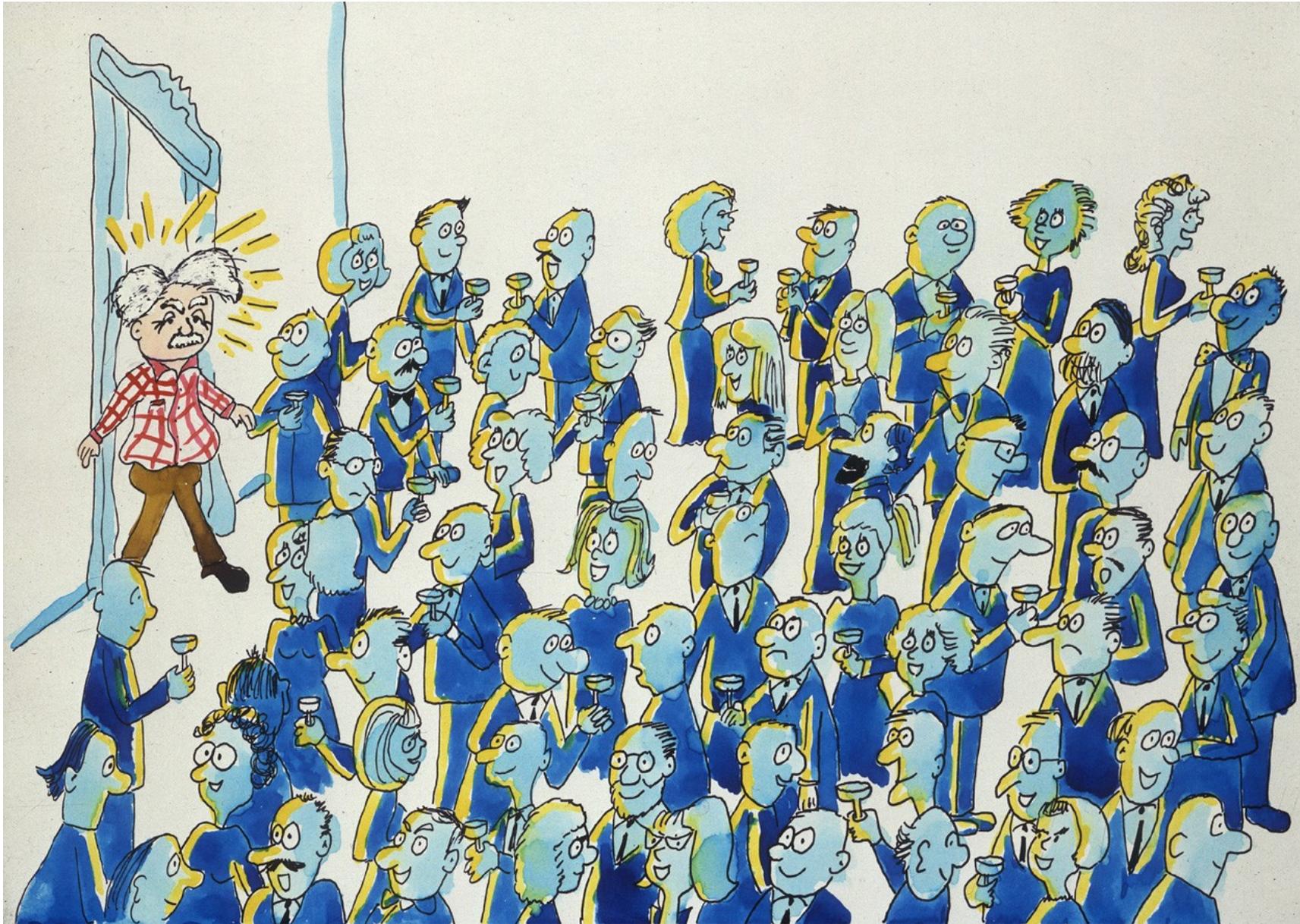
- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

# Mécanisme de Higgs en images



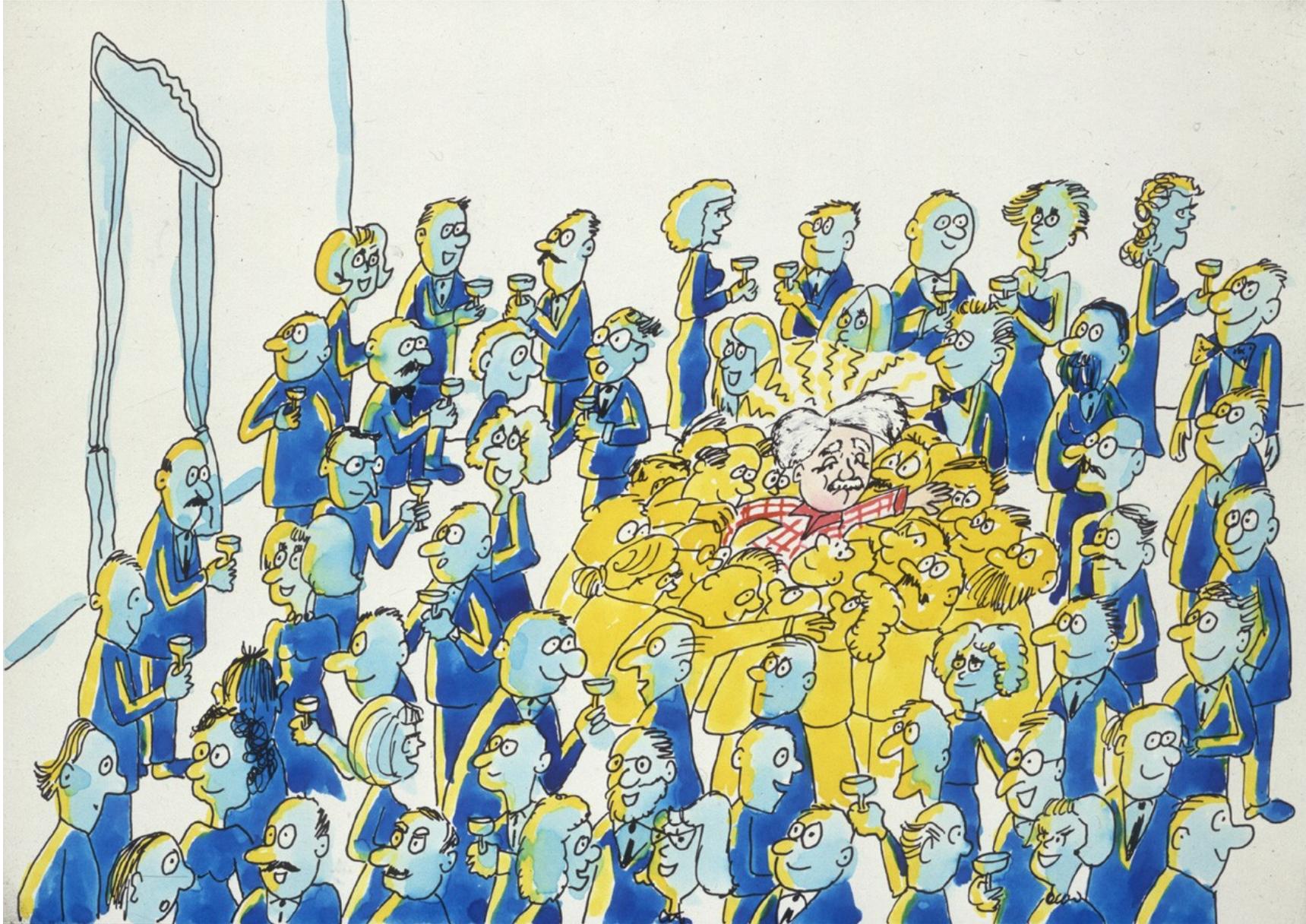
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

# Mécanisme de Higgs en images



... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

# Mécanisme de Higgs en images



ce qui accroît la résistance à son déplacement : il acquiert une masse, comme une particule se déplaçant dans un champ de Higgs

# Mécanisme de Higgs en images



... si une rumeur traverse la salle ...

# Mécanisme de Higgs en images



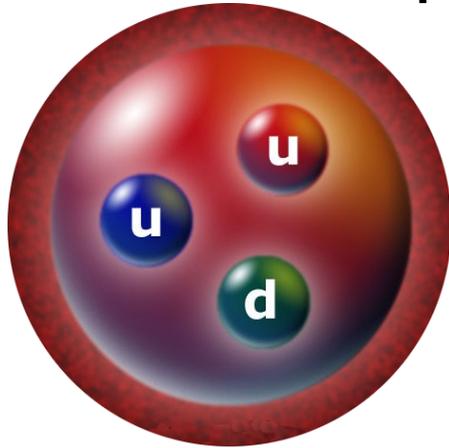
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

# Interactions avec le boson de Higgs



# La masse

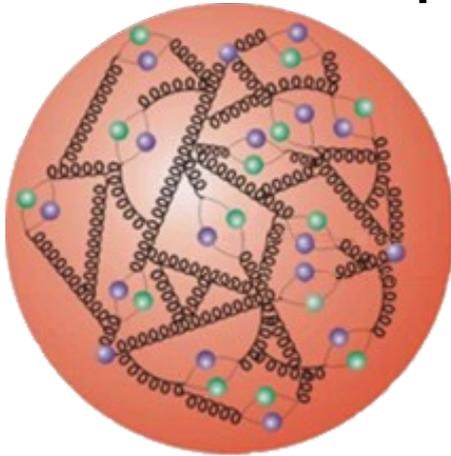
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse  $\sim 10$  MeV

# La masse

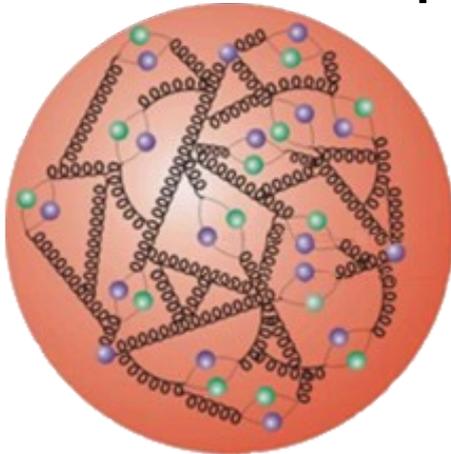
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )

# La masse

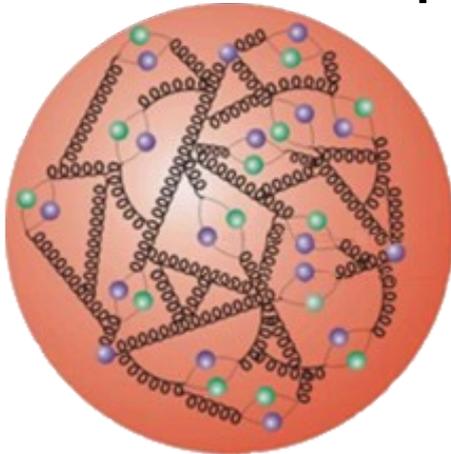
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne

# La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



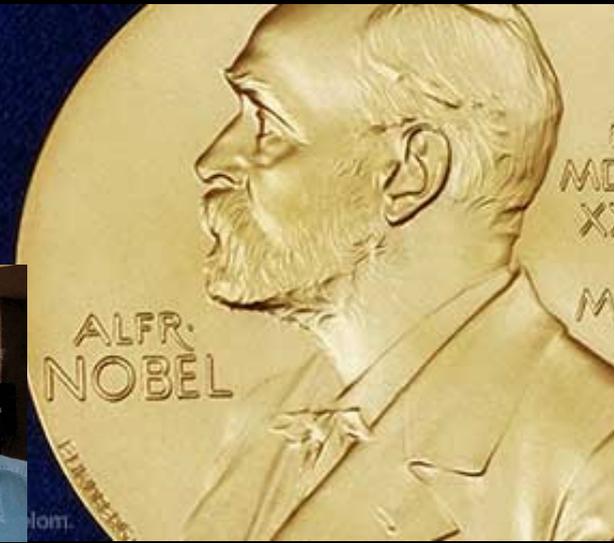
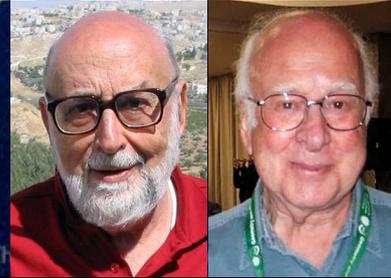
- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne
- Pas grand chose ? Sans lui, pas d'atomes, pas de chimie, pas de vie ou d'Univers tels que nous les connaissons...



# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

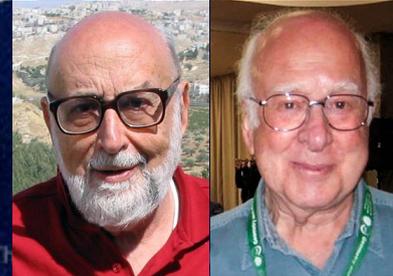


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

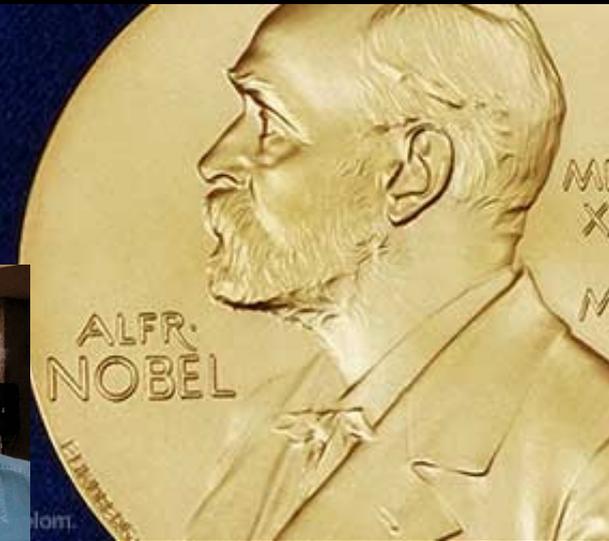
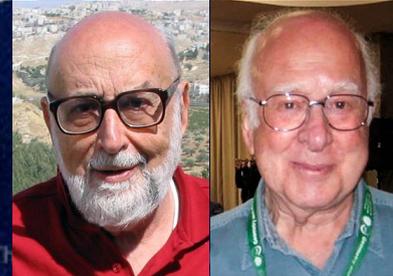


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



**Le CERN et les expériences ATLAS & CMS**

# Et maintenant ?

Quelques prédictions « intéressantes » :

- Lord Kelvin en 1900 (British Association for the advancement of Science) :
  - ▶ « There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement. »
    - Oops, il manquait « juste » la physique quantique et les relativités restreinte et générale
- Charles de Gaulle, voeux pour l'année 1968 (31/12/1967, six mois avant mai 68) :
  - ▶ « L'avenir n'appartient pas aux hommes et je ne le prédis pas. Pourtant en considérant la façon dont les choses se présentent, c'est vraiment avec confiance que j'envisage pour les 12 prochains mois, l'existence de notre pays »

# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

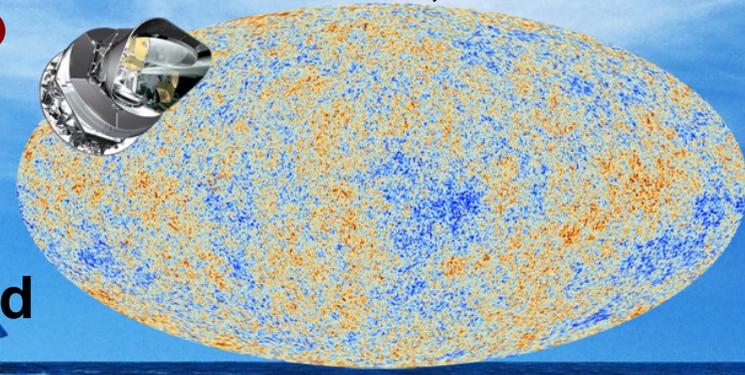


**Modèle standard**



Planck, mars 2013

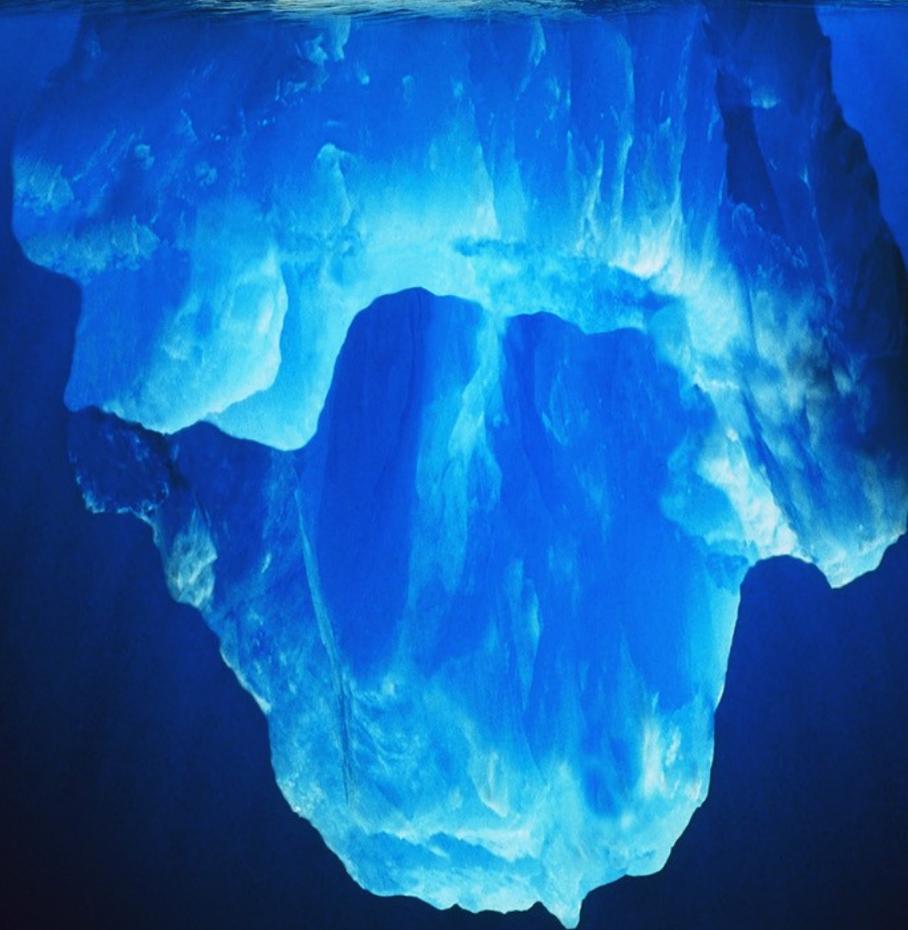
# C'est tout ?



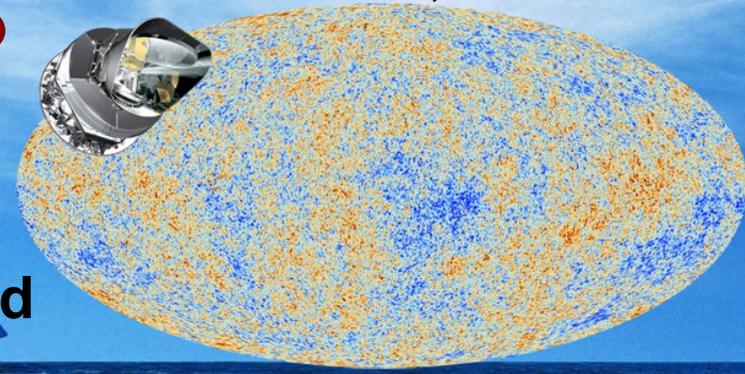
Nous et l'Univers visible



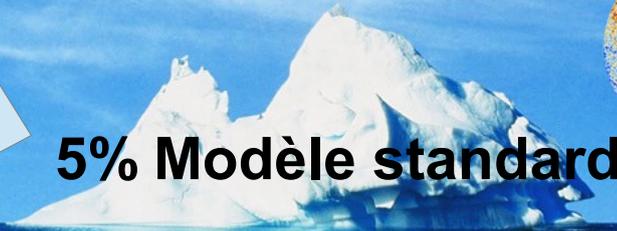
5% Modèle standard



# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

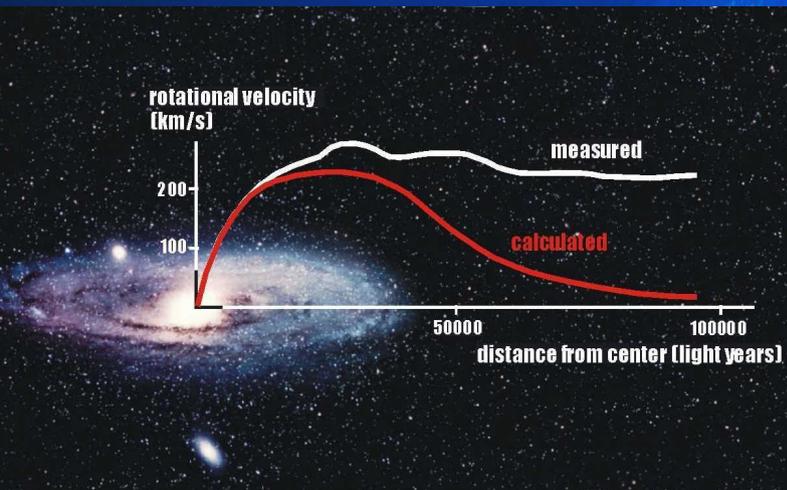


5% Modèle standard

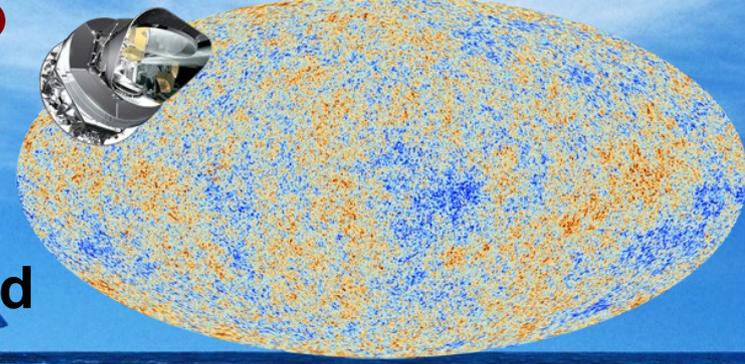
27% Matière noire



- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



# C'est tout ?



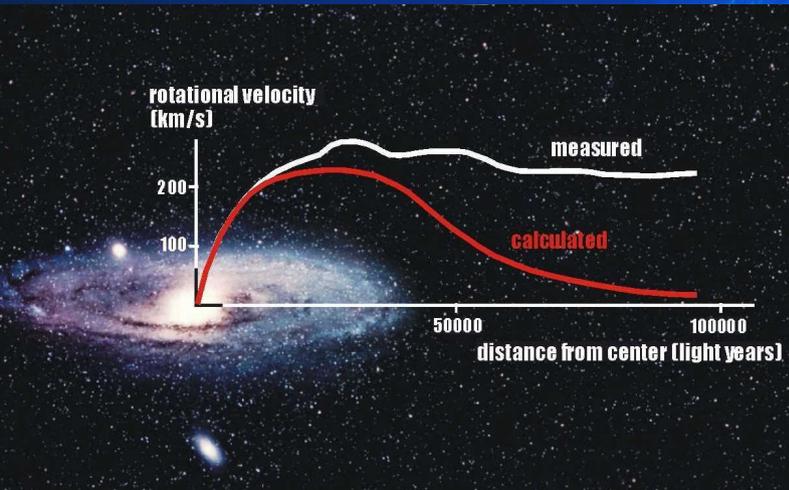
Nous et l'Univers visible



5% **Modèle standard**

27% **Matière noire**

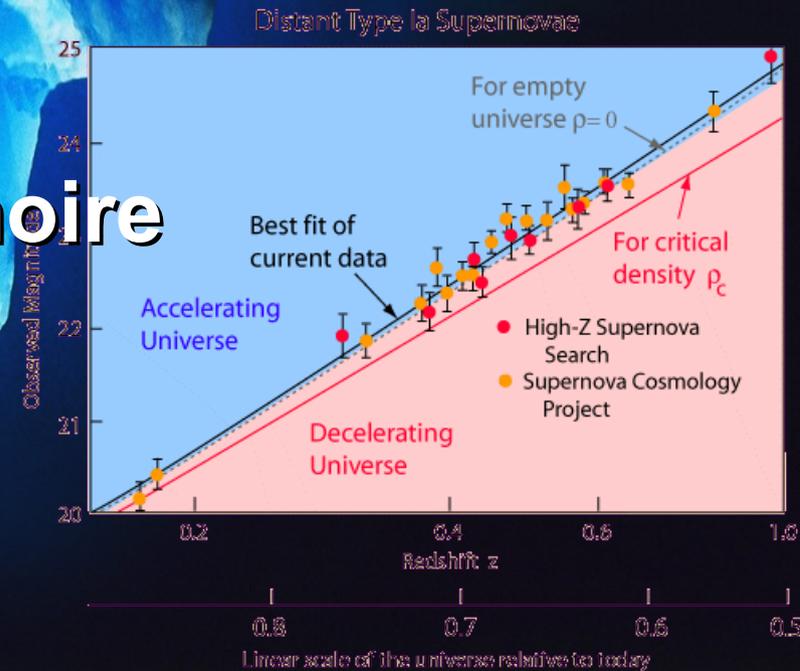
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ... ) ?



68% **Énergie noire**



Pas la moindre idée de son origine !



# Autres théories

*Felix Brümmer  
ce soir*

- Le modèle standard n'explique pas tout :
  - ▶ Pourquoi trois familles ?
  - ▶ Pourquoi les particules élémentaires ont des masses si différentes ?
  - ▶ Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
  - ▶ Pourquoi l'antimatière a presque disparu ?
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- Beaucoup de modèles font des prédictions que l'on peut tester au LHC
- Supersymétrie, modèles exotiques, dimensions supplémentaires d'espace, ...
  - ▶ Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens

# Supersymétrie : état des lieux

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: March 2016

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8, 13 \text{ TeV}$

Model	$e, \mu, \tau, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} d\Omega [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$	Reference
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0-3 $e, \mu/1-2 \tau$	2-10 jets/3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.85 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{q})$
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	3.2	$\tilde{q}$	980 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	3.2	$\tilde{q}$	610 GeV	$m(\tilde{g})-m(\tilde{\chi}_1^0)<5 \text{ GeV}$
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q(\ell/\nu)/\nu\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (off-Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	820 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	0	2-6 jets	Yes	3.2	$\tilde{g}$	1.52 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}W\tilde{\chi}_1^0$	1 $e, \mu$	2-6 jets	Yes	3.3	$\tilde{g}$	1.6 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<350 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_2^0)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(\ell/\nu)/\nu\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0-3 jets	-	20	$\tilde{g}$	1.38 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}W\tilde{\chi}_1^0$	0	7-10 jets	Yes	3.2	$\tilde{g}$	1.4 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}$
	GMSB ( $\tilde{l}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.63 TeV	$\tan\beta > 20$
	GGM (bino NLSP)	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.34 TeV	$c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}$
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 950 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu < 0$
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 850 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu > 0$
	GGM (higgsino NLSP)	2 $e, \mu$ (Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	900 GeV	$m(\text{NLSP}) > 430 \text{ GeV}$
	Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale	865 GeV	$m(\tilde{G}) > 1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$
$3^{\text{rd}}$ gen. $\tilde{g}, \text{ med.}$	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 $b$	Yes	3.3	$\tilde{g}$	1.78 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 800 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	3.3	$\tilde{g}$	1.76 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$
$3^{\text{rd}}$ gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $b$	Yes	3.2	$\tilde{b}_1$	840 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 100 \text{ GeV}$
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	3.2	$\tilde{b}_1$	325-540 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=50 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_1^0)+100 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	1-2 $e, \mu$	1-2 $b$	Yes	4.7/20.3	$\tilde{t}_1$	117-170 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=2m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_2^0)=55 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	0-2 $e, \mu$	0-2 jets/1-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-198 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ $c$ -tag	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-245 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0) < 85 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	150-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 150 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_2$	290-610 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + h$	1 $e, \mu$	6 jets + 2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_2$	320-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
EW direct	$\tilde{\chi}_{1R}^0\tilde{\chi}_{1R}^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	90-335 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\chi}_1^0(\tilde{\nu})$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	140-475 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\nu}(\tilde{\nu})$	2 $\tau$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	355 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\nu}(\tilde{\nu}), \tilde{\chi}_1^0\tilde{\nu}(\tilde{\nu})$	3 $e, \mu$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	715 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_2^0)=0, m(\tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 $e, \mu$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	425 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_2^0)=0$ , sleptons decoupled
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\tilde{b}/W\tilde{W}/\tau\tau/\gamma\gamma$	$e, \mu, \gamma$	0-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$	270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_2^0)=0$ , sleptons decoupled
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_3^0$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_2^0$	635 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_3^0)=0, m(\tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_3^0$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_2^0$	115-370 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$
	GGM (wino NLSP) weak prod.	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{w}$	115-370 GeV	
	Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	270 GeV
Direct $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$		dE/dx trk	-	Yes	18.4	$\tilde{\chi}_1^\pm$	495 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm) < 15 \text{ ns}$
Stable, stopped $\tilde{g}$ R-hadron		0	1-5 jets	Yes	27.9	$\tilde{g}$	850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$
Metastable $\tilde{g}$ R-hadron		dE/dx trk	-	-	3.2	$\tilde{g}$	1.54 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, \tau > 10 \text{ ns}$
GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{\nu}, \tilde{h}) + \tau(e, \mu)$		1-2 $\mu$	-	-	19.1	$\tilde{\tau}$	537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$
GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$ , long-lived $\tilde{\chi}_1^0$		2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	440 GeV	$1 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}$ , SPS8 model
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow e\tilde{\nu}/e\tilde{\mu}/\mu\tilde{\nu}$		displ. $e\ell/\mu\mu/\mu\nu$	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$7 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.3 \text{ TeV}$
GGM $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}$	displ. vtx + jets	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.1 \text{ TeV}$	
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu$	$e\mu, e\tau, \mu\tau$	-	-	20.3	$\tilde{\nu}_\tau$	1.7 TeV	$\lambda'_{311}=0.11, \lambda'_{132/133/233}=0.07$
	Bilinear RPV CMSSM	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.45 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{q}), c\tau_{LSP} < 1 \text{ mm}$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\tilde{\nu}_\mu, e\mu\tilde{\nu}_e$	4 $e, \mu$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	760 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^0), \lambda_{121} \neq 0$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\tau\tilde{\nu}_e, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$	450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^0), \lambda_{133} \neq 0$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	917 GeV	$BR(\tilde{g})=BR(\tilde{b})=BR(\tilde{c})=0\%$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	980 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=600 \text{ GeV}$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	880 GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	0	2 jets + 2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	320 GeV	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{l}$	2 $e, \mu$	2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	0.4-1.0 TeV	$BR(\tilde{t}_1 \rightarrow b\ell/\mu) > 20\%$	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $c$	Yes	20.3	$\tilde{c}$	510 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

10<sup>-1</sup>

1

Mass scale [TeV]

• On n'a rien trouvé, et pourtant on cherche !

# Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Exclusion

Status: March 2016

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$

Model	$\ell, \gamma$	Jets <sup>†</sup>	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$\geq 1j$	Yes	3.2	$M_D$ 6.86 TeV	$n = 2$ Preliminary	
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2 e, \mu$	-	20.3	$M_S$ 4.7 TeV	$n = 3$ HLZ 1407.2410	
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1 e, \mu$	$1j$	20.3	$M_{\text{th}}$ 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006	
	ADD QBH	-	$2j$	3.6	$M_{\text{th}}$ 8.3 TeV	$n = 6$ 1512.01530	
	ADD BH high $\Sigma p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2j$	3.2	$M_{\text{th}}$ 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ ATLAS-CONF-2016-006	
	ADD BH multijet	-	$\geq 3j$	3.6	$M_{\text{th}}$ 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ 1512.02586	
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	20.3	$G_{KK}$ mass 2.68 TeV	$k/M_{Pl} = 0.1$ 1405.4123	
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	$2 \gamma$	-	20.3	$G_{KK}$ mass 2.66 TeV	$k/M_{Pl} = 0.1$ 1504.05511	
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\nu$	$1 e, \mu$	$1J$	Yes	3.2	$G_{KK}$ mass 1.06 TeV	$k/M_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2015-075
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	-	$4b$	-	3.2	$G_{KK}$ mass 475-785 GeV	$k/M_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2016-017
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow tt$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2J$	Yes	20.3	$G_{KK}$ mass 2.2 TeV	BR = 0.925 1505.07018
	2UED / RPP	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 4j$	Yes	3.2	$KK$ mass 1.46 TeV	Tier (1,1), BR( $A^{(1,1)} \rightarrow tt$ ) = 1 ATLAS-CONF-2016-013
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	3.2	$Z'$ mass 3.4 TeV	ATLAS-CONF-2015-070	
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	$2 \tau$	-	19.5	$Z'$ mass 2.02 TeV	1502.07177	
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	$2b$	-	3.2	$Z'$ mass 1.5 TeV	Preliminary
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1 e, \mu$	-	Yes	3.2	$W'$ mass 4.07 TeV	ATLAS-CONF-2015-063
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\nu\nu$ model A	$0 e, \mu$	$1J$	Yes	3.2	$W'$ mass 1.6 TeV	$g_V = 1$ ATLAS-CONF-2015-068
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qqqq$ model A	-	$2J$	-	3.2	$W'$ mass 1.38-1.6 TeV	$g_V = 1$ ATLAS-CONF-2015-073
	HVT $W' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu bb$ model B	$1 e, \mu$	$1-2b, 1-0j$	Yes	3.2	$W'$ mass 1.62 TeV	$g_V = 3$ ATLAS-CONF-2015-074
	HVT $Z' \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu bb$ model B	$0 e, \mu$	$1-2b, 1-0j$	Yes	3.2	$Z'$ mass 1.76 TeV	$g_V = 3$ ATLAS-CONF-2015-074
	LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$1 e, \mu$	$2b, 0-1j$	Yes	20.3	$W'_R$ mass 1.92 TeV	1410.4103
LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$0 e, \mu$	$\geq 1b, 1J$	-	20.3	$W'_R$ mass 1.76 TeV	1408.0886	
CI	CI $qqqq$	-	$2j$	-	3.6	$\Lambda$ 17.5 TeV $\eta_{LL} = -1$	1512.01530
	CI $qq\ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	3.2	$\Lambda$ 23.1 TeV $\eta_{LL} = -1$	ATLAS-CONF-2015-070
	CI $uutt$	$2 e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, 1-4j$	Yes	20.3	$\Lambda$ 4.3 TeV $ C_{LL}  = 1$	1504.04605
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$\geq 1j$	Yes	3.2	$m_A$ 1.0 TeV	$g_\tau = 0.25, g_\nu = 1.0, m(\chi) < 140 \text{ GeV}$ Preliminary
	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu, 1 \gamma$	$1j$	Yes	3.2	$m_A$ 650 GeV	$g_\tau = 0.25, g_\nu = 1.0, m(\chi) < 10 \text{ GeV}$ Preliminary
	$ZZ\chi\chi$ EFT (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1J, \leq 1j$	Yes	3.2	$M_*$ 550 GeV	$m(\chi) < 150 \text{ GeV}$ ATLAS-CONF-2015-080
LQ	Scalar LQ 1 <sup>st</sup> gen	$2 e$	$\geq 2j$	-	3.2	LQ mass 1.07 TeV	$\beta = 1$ Preliminary
	Scalar LQ 2 <sup>nd</sup> gen	$2 \mu$	$\geq 2j$	-	3.2	LQ mass 1.03 TeV	$\beta = 1$ Preliminary
	Scalar LQ 3 <sup>rd</sup> gen	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$ 1508.04735
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	T mass 855 GeV	T in (T,B) doublet 1505.04306
	VLQ $YY \rightarrow Wb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	Y mass 770 GeV	Y in (B,Y) doublet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Hb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	B mass 735 GeV	isospin singlet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2 \geq 3 e, \mu$	$\geq 2 \geq 1b$	-	20.3	B mass 755 GeV	B in (B,Y) doublet 1409.5500
	VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	$1 e, \mu$	$\geq 4j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV	1509.04261
	$T_{5/3} \rightarrow Wt$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes	20.3	$T_{5/3}$ mass 840 GeV	1503.05425
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	$1 \gamma$	$1j$	-	3.2	$q^*$ mass 4.4 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$ 1512.05910
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2j$	-	3.6	$q^*$ mass 5.2 TeV	only $u^*$ and $d^*$ , $\Lambda = m(q^*)$ 1512.01530
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	$1b, 1j$	-	3.2	$b^*$ mass 2.1 TeV	Preliminary
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	$1 \text{ or } 2 e, \mu$	$1b, 2-0j$	Yes	20.3	$b^*$ mass 1.5 TeV	$f_b = f_t = f_q = 1$ 1510.02664
	Excited lepton $\ell^*$	$3 e, \mu$	-	-	20.3	$\ell^*$ mass 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$ 1411.2921
	Excited lepton $\nu^*$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$\nu^*$ mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921
Other	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1 e, \mu, 1 \gamma$	-	Yes	20.3	$a_T$ mass 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana $\nu$	$2 e, \mu$	$2j$	-	20.3	$N^0$ mass 2.0 TeV	$m(W_R) = 2.4 \text{ TeV, no mixing}$ 1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$ (SS)	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 551 GeV	DY production, BR( $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$ )=1 1412.0237
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, BR( $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$ )=1 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1 e, \mu$	$1b$	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$ 1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q  = 5e$ 1504.04188
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g  = 1g_D, \text{spin } 1/2$ 1509.08059

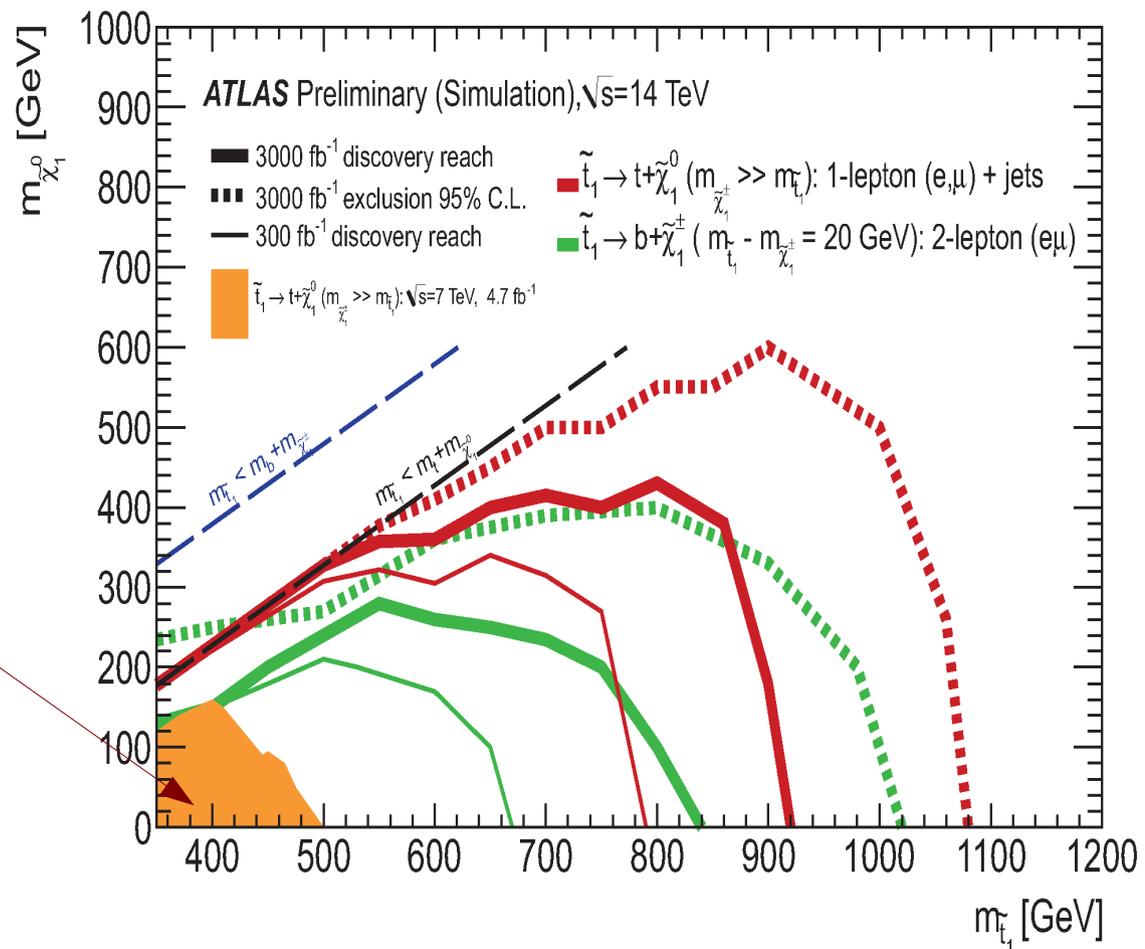
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Lower bounds are specified only when explicitly not excluded.

† Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

- On n'a rien trouvé non plus, mais on continue de chercher !

# SUSY et exotiques : le futur

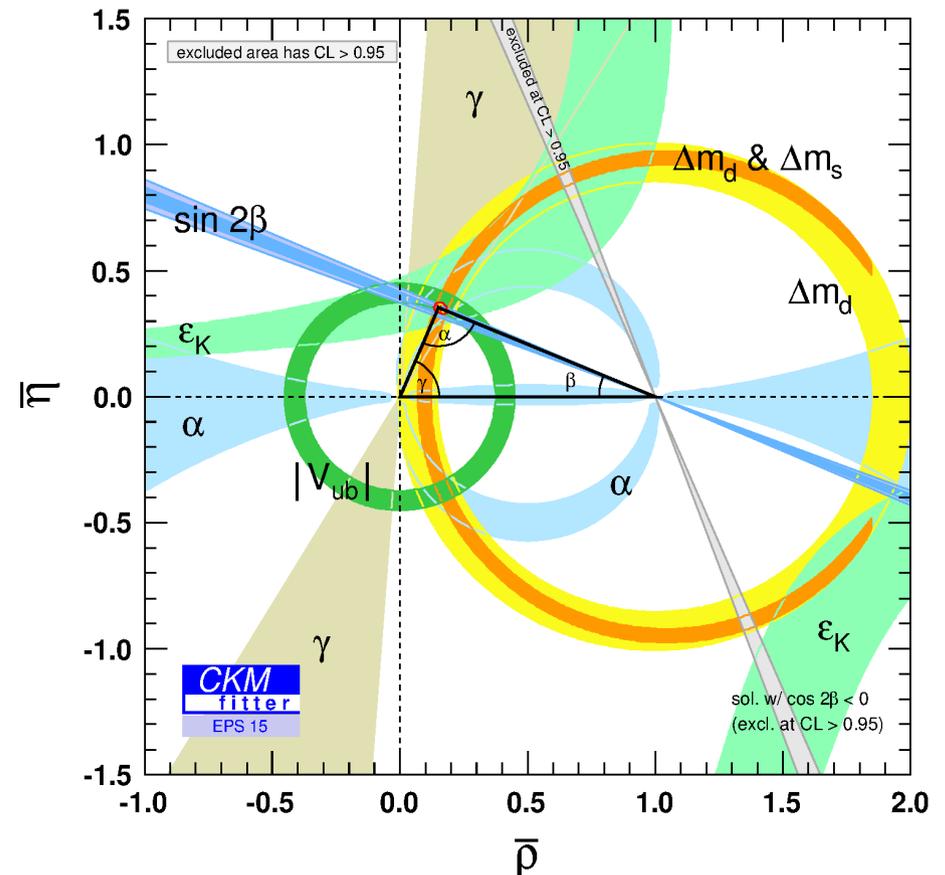
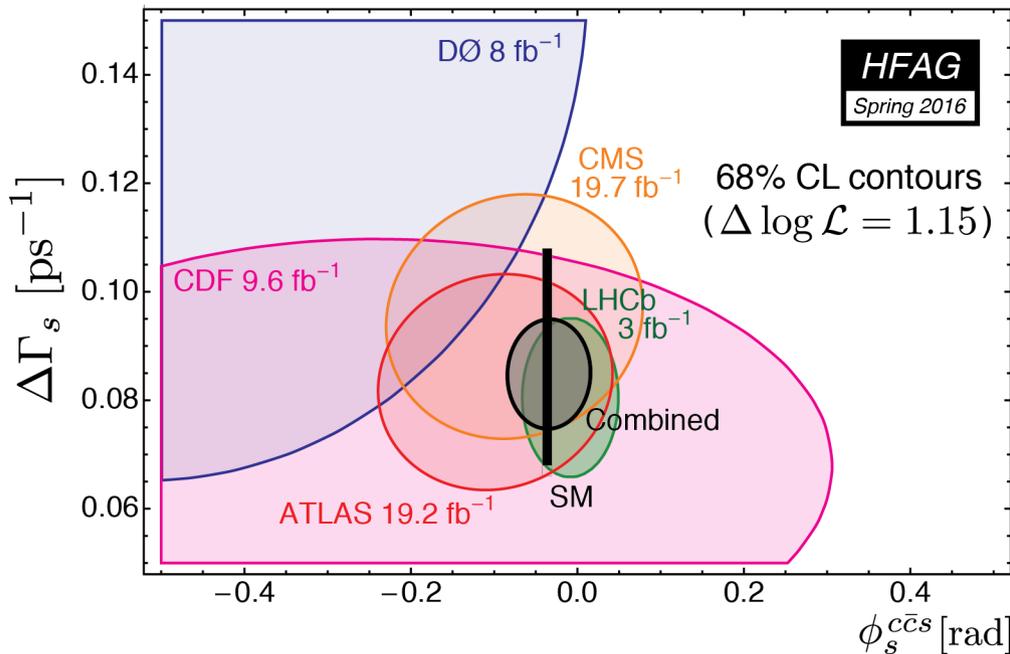
- Pour l'instant, 25 fb<sup>-1</sup> collectés jusqu'en 2012 (7-8 TeV), 3,5 fb<sup>-1</sup> en 2015, à peu près déjà autant en 2016
- On envisage ~30 fb<sup>-1</sup> d'ici novembre, 300 fb<sup>-1</sup> d'ici ~2022
- puis 3000 fb<sup>-1</sup> pour 2030-2035



Exclus avec les données 2011

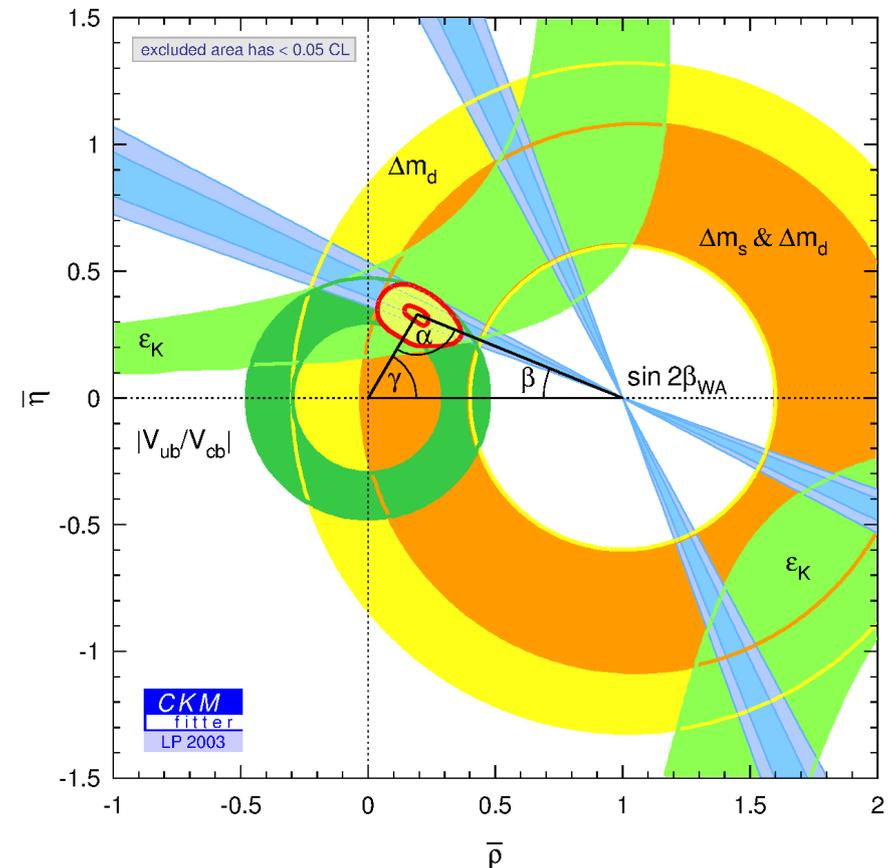
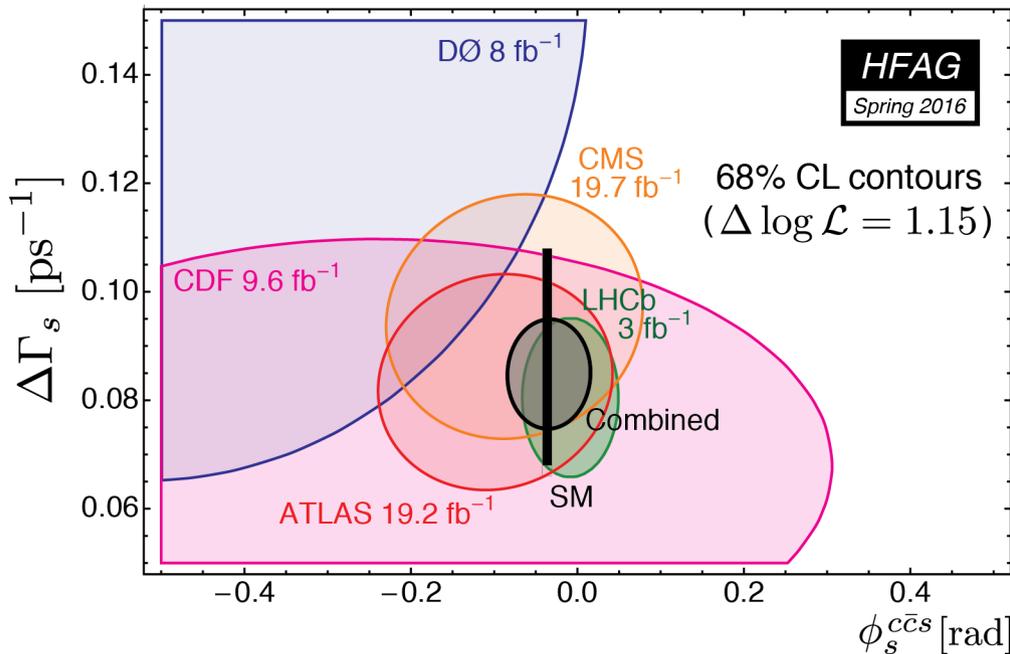
# Asymétrie matière-antimatière

- Pas assez d'antimatière dans l'Univers
- Mesures de précision pour quantifier les infimes différences entre matière et antimatière
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard



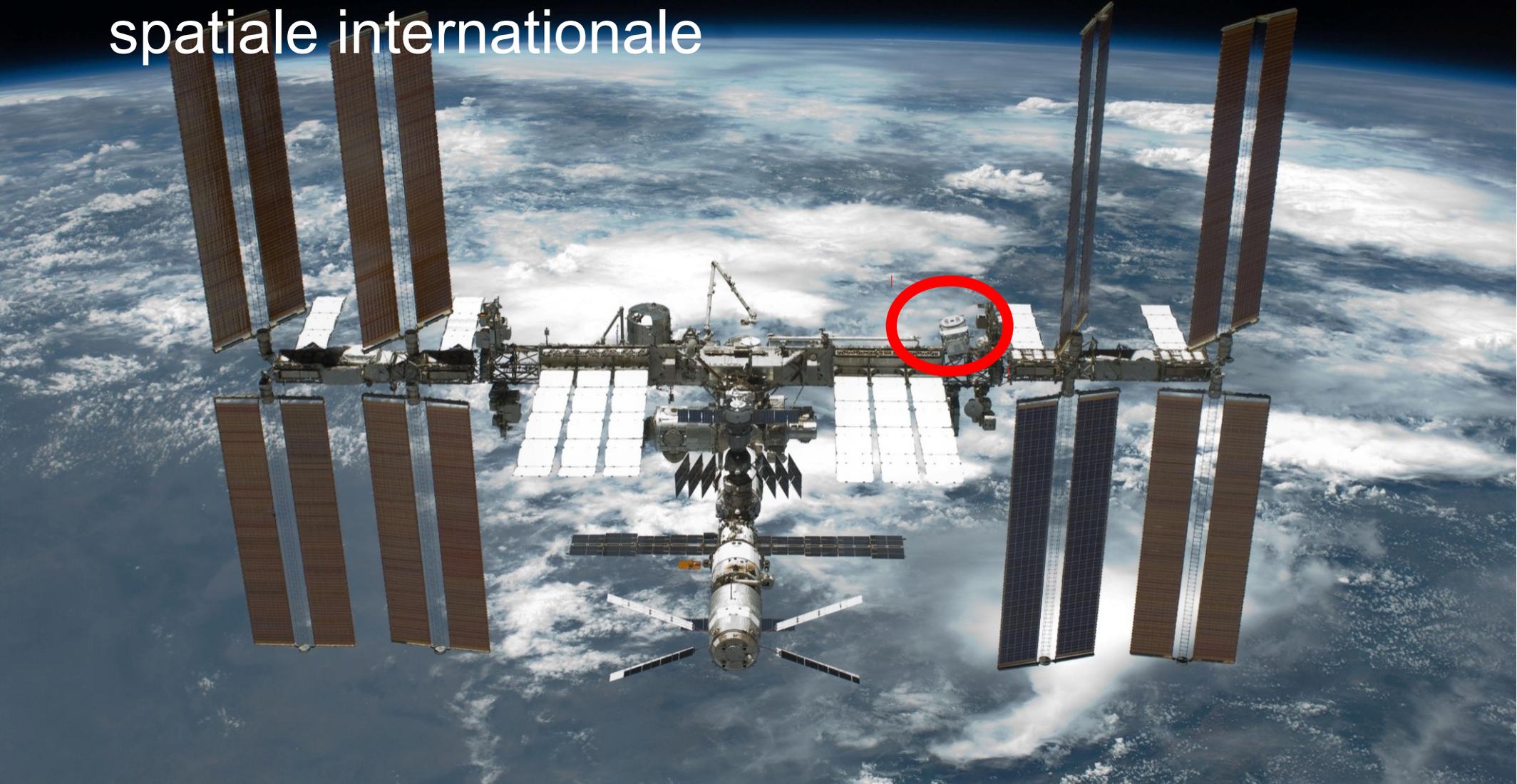
# Asymétrie matière-antimatière

- Pas assez d'antimatière dans l'Univers
- Mesures de précision pour quantifier les infimes différences entre matière et antimatière
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard



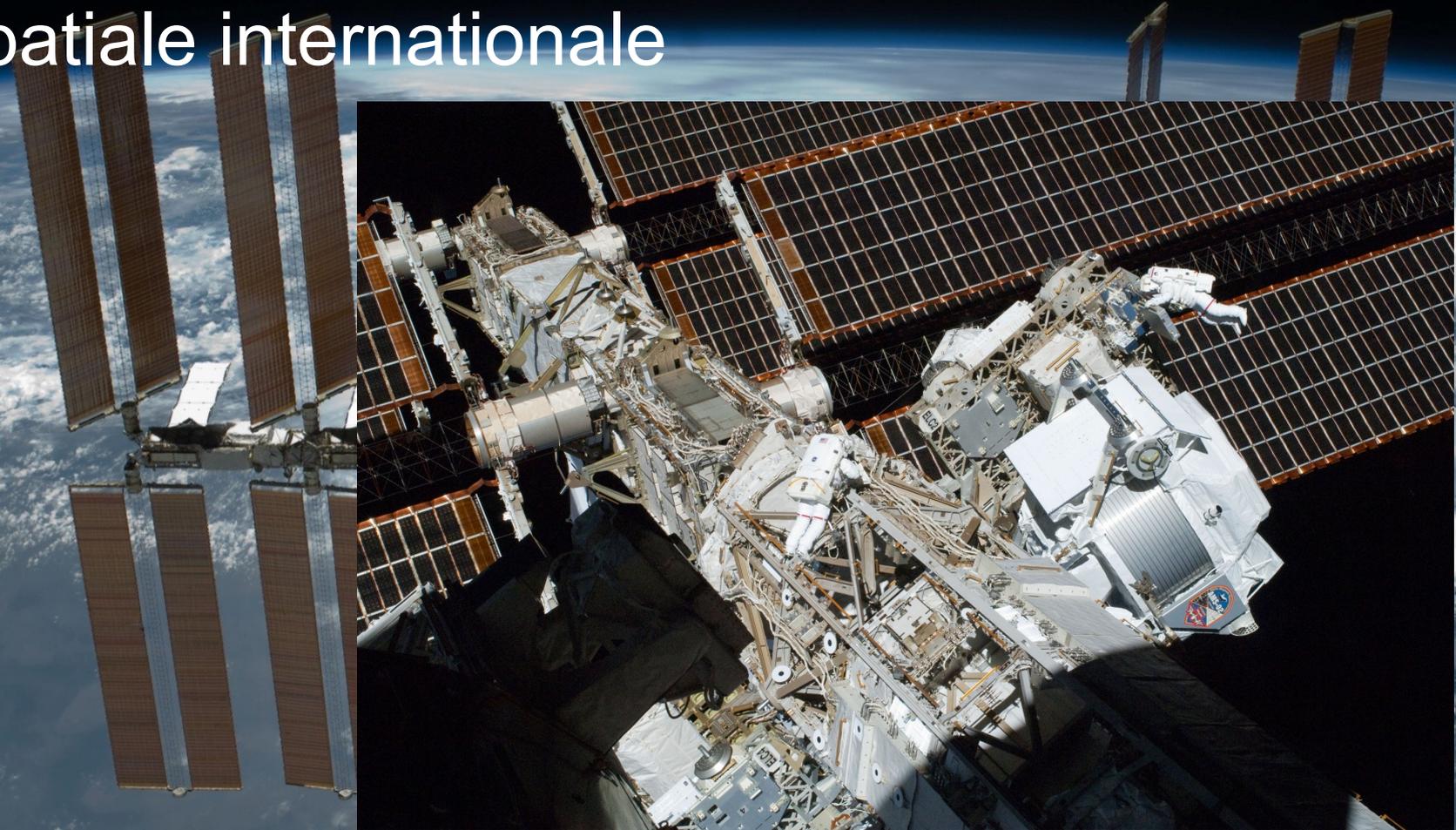
# Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer
- Détecteur de particules à bord de la station spatiale internationale



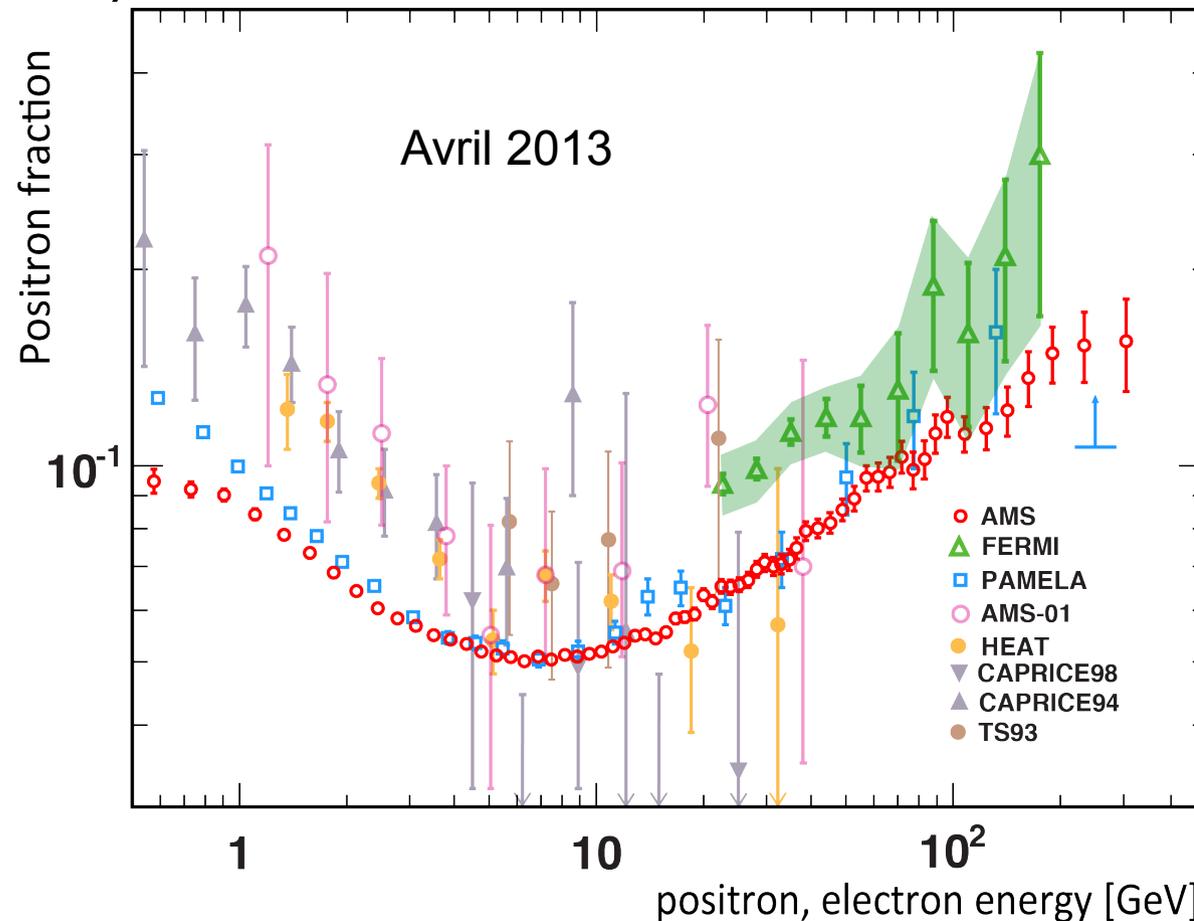
# Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer
- Détecteur de particules à bord de la station spatiale internationale



# Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Mesure le rapport des flux d'électrons et de positrons
- Confirme un excès de positrons connu depuis longtemps
- Susceptible d'indiquer la désintégration de matière noire (non confirmé)



# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?



# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - ▶ Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - ▶ Signe de nouvelle physique ?

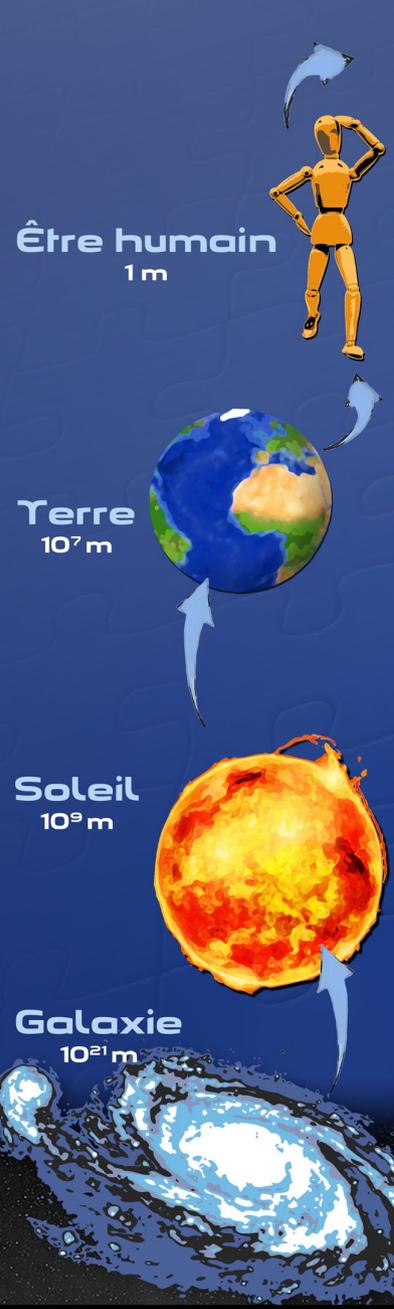
# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - ▶ Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - ▶ Signe de nouvelle physique ?
- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- On espère des surprises !

# Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>	<p><math>t = 1,6 \cdot 10^{-12}</math> s <math>Q = 0</math> <math>m = 125</math> GeV/c<sup>2</sup></p> <p>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.</p>
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>	



## INTERACTIONS FONDAMENTALES

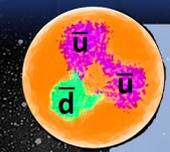
Portée	Interaction
$10^{-17}$ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
$10^{-15}$ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	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.