

Journée : Physique des Particules



Origines, Constituants et EVolution de l'Univers



Centre de physique des particules de Marseille



24 Juin 2015

Programme de cette journée

- 8h30-9h30 : **Introduction à la physique des particules** – Marlon Barbero (Enseignant-Chercheur CPPM / ATLAS)
- 9h30-10h30 : **La physique auprès de LHCb** – Julien Cogan (Chercheur CPPM / LHCb)
- 10h30-10h45 : Pause (et changement de salle)
- 10h45-11h45 : **Mesure de temps de vie du méson D avec les données LHCb (exercice)** – Julien Cogan
- 11h45-12h : Changement de salle
- 12h-12h30 : **En direct du CERN, salle de contrôle LHCb** – Simon Akar (Chercheur CPPM / LHCb)
- 12h30-13h30 : Pause déjeuner
- 13h30-14h15 : **Le CERN, le LHC et l'expérience ATLAS** – Marlon Barbero
- 14h15-14h30 : changement de salle
- 14h30-15h45 : **Mesure de la structure du proton avec les bosons W (exercice)** – Yann Coadou (Chercheur CPPM / ATLAS)
- 15h45-16h00 : changement de salle
- 16h00-16h45 : **En direct du CERN, visite virtuelle de l'expérience ATLAS** – Pascal Pralavorio (Chercheur CPPM / ATLAS)
- 17h00-18h00 : **La découverte du boson de Higgs** – Yann Coadou
- 18h30-20h00 : repas (plateaux CROUS)
- Ce soir, 20h00-22h00 : **Atelier esprit critique et sciences** – Cyrille Baudouin

Introduction à la physique des particules



Origines, Constituants et EVolution de l'Univers



Centre de physique des particules de Marseille



24 Juin 2015

La physique des particules

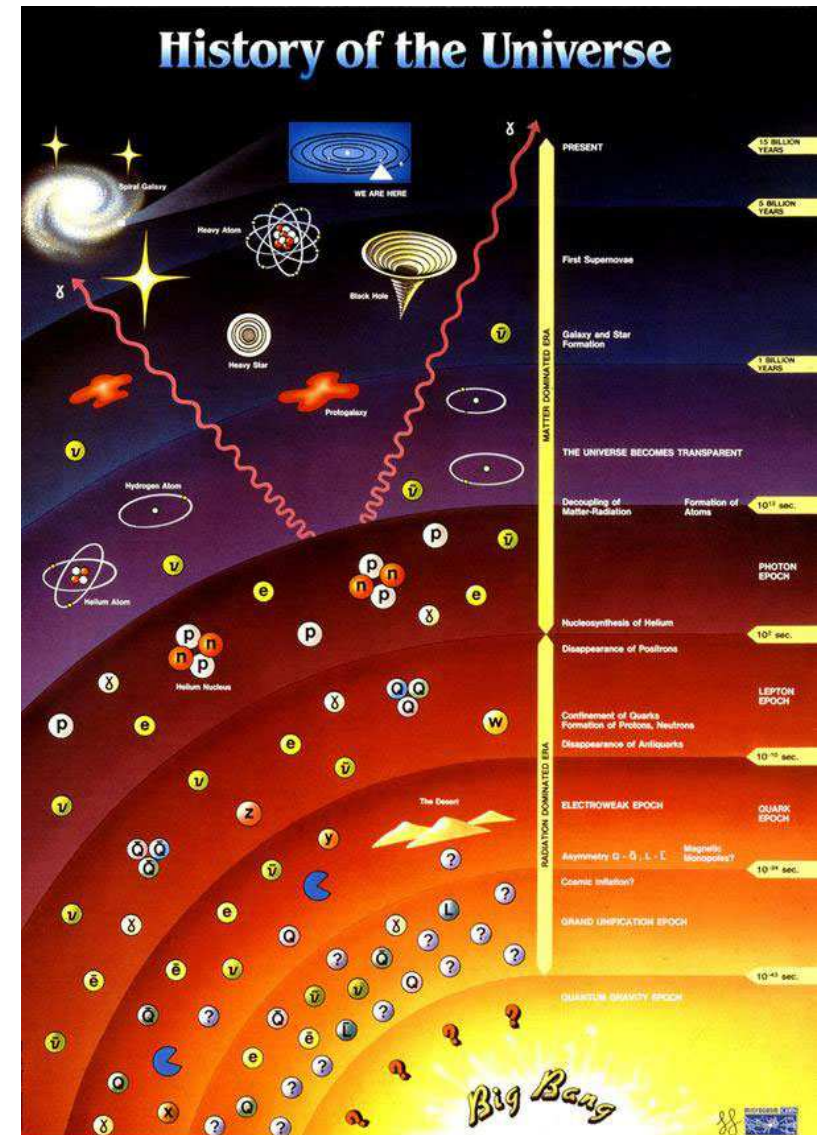
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

- ▶ **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

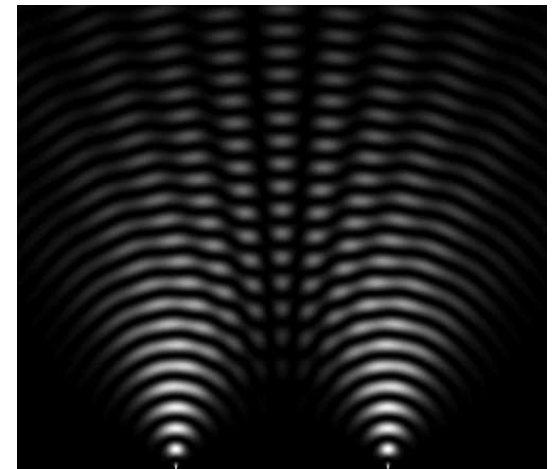


De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



État des lieux à la fin du XIX^e 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^{ème} siècle
 - ▶ La relativité restreinte
 - ▶ La mécanique quantique

Relativité restreinte : espace-temps

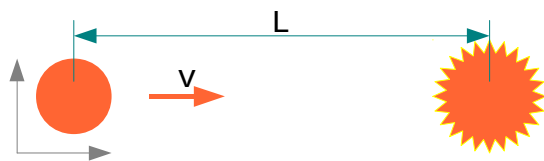
- Contraction des longueurs et dilatation du temps

- ▶ 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

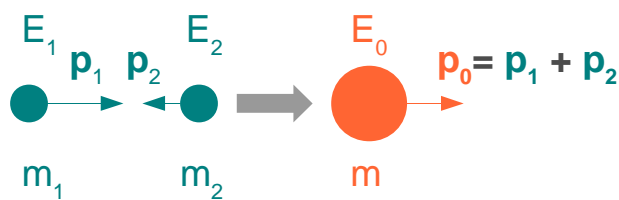
- Équivalence masse-énergie

- ▶ 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

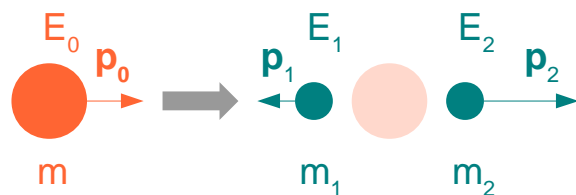


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

exemple : collision de protons avec $E = 7$ TeV
 → énergie disponible : $E_0 = 14$ 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 ($E^2=m^2c^4+p^2c^2$) :
 - ▶ Impulsion : eV/c
 - ▶ Masse : eV/c²
 - $1\text{eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$
 - ▶ 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

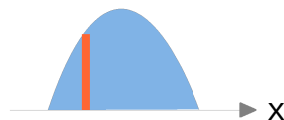
- ▶ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !

- Deux descriptions antagonistes !

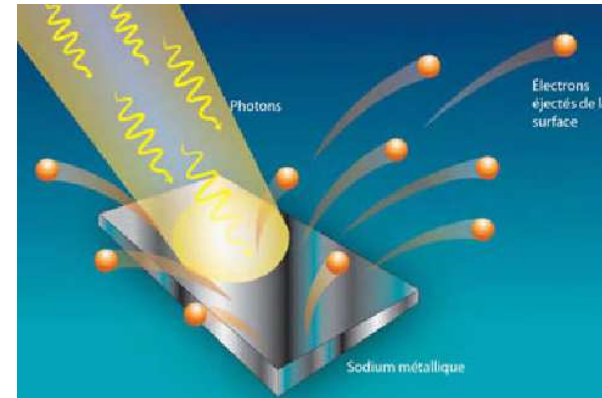
- **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- **onde** : objet étendu pouvant interférer

- ▶ **objet quantique** : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

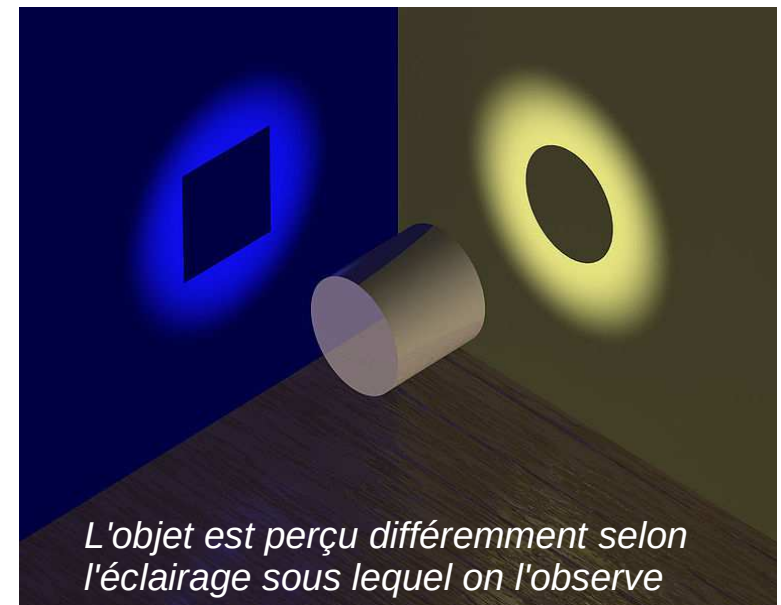
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905



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

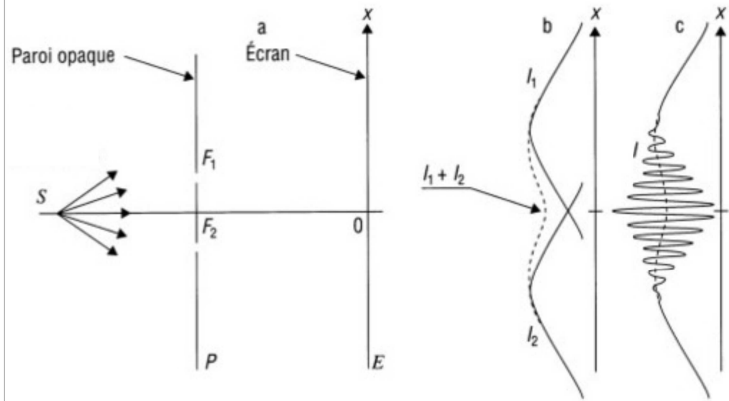


L'objet est perçu différemment selon l'éclairage sous lequel on l'observe

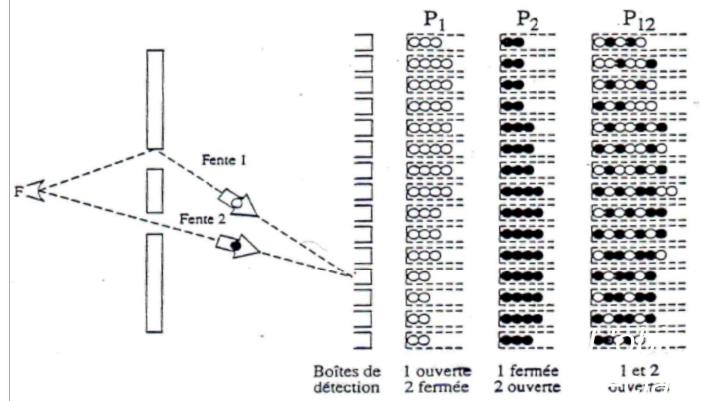
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

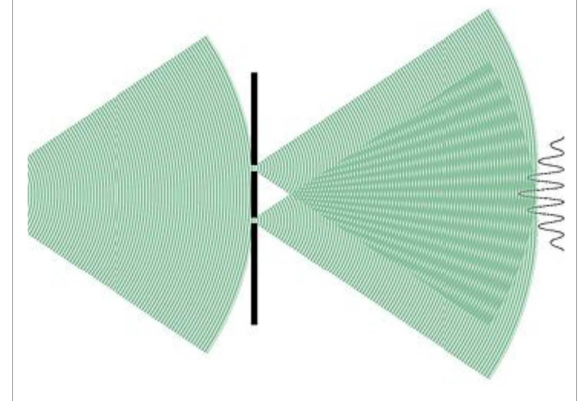
L'expérience :



Cas #1: projectile = bille

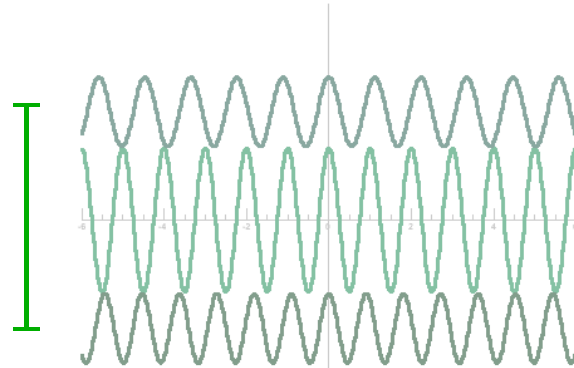


Cas #2: projectile = onde

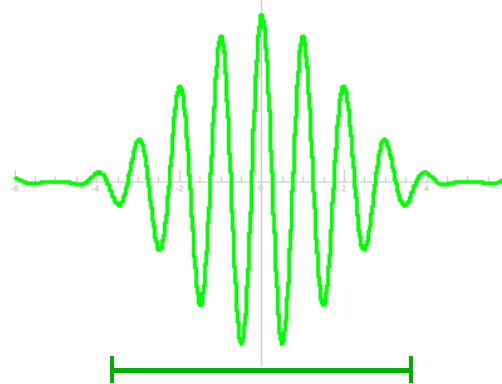


Mécanique quantique : le paquet d'onde

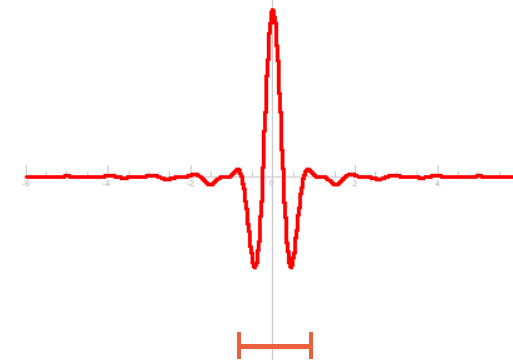
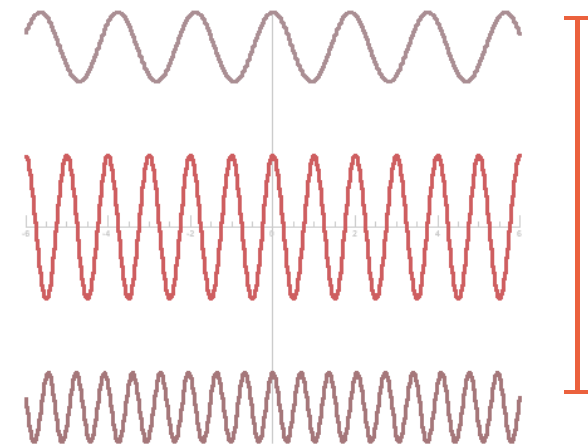
Superposition de plusieurs ondes (planes) de fréquences différentes



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

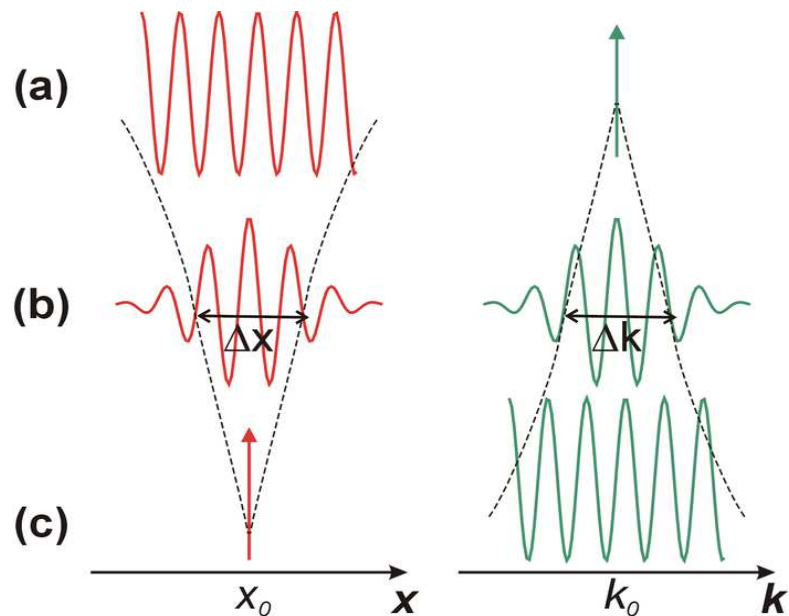


Bande de fréquences étroite
⇒ paquet étendu



Bande de fréquences large
⇒ paquet étroit

Mécanique quantique : les relations d'incertitude



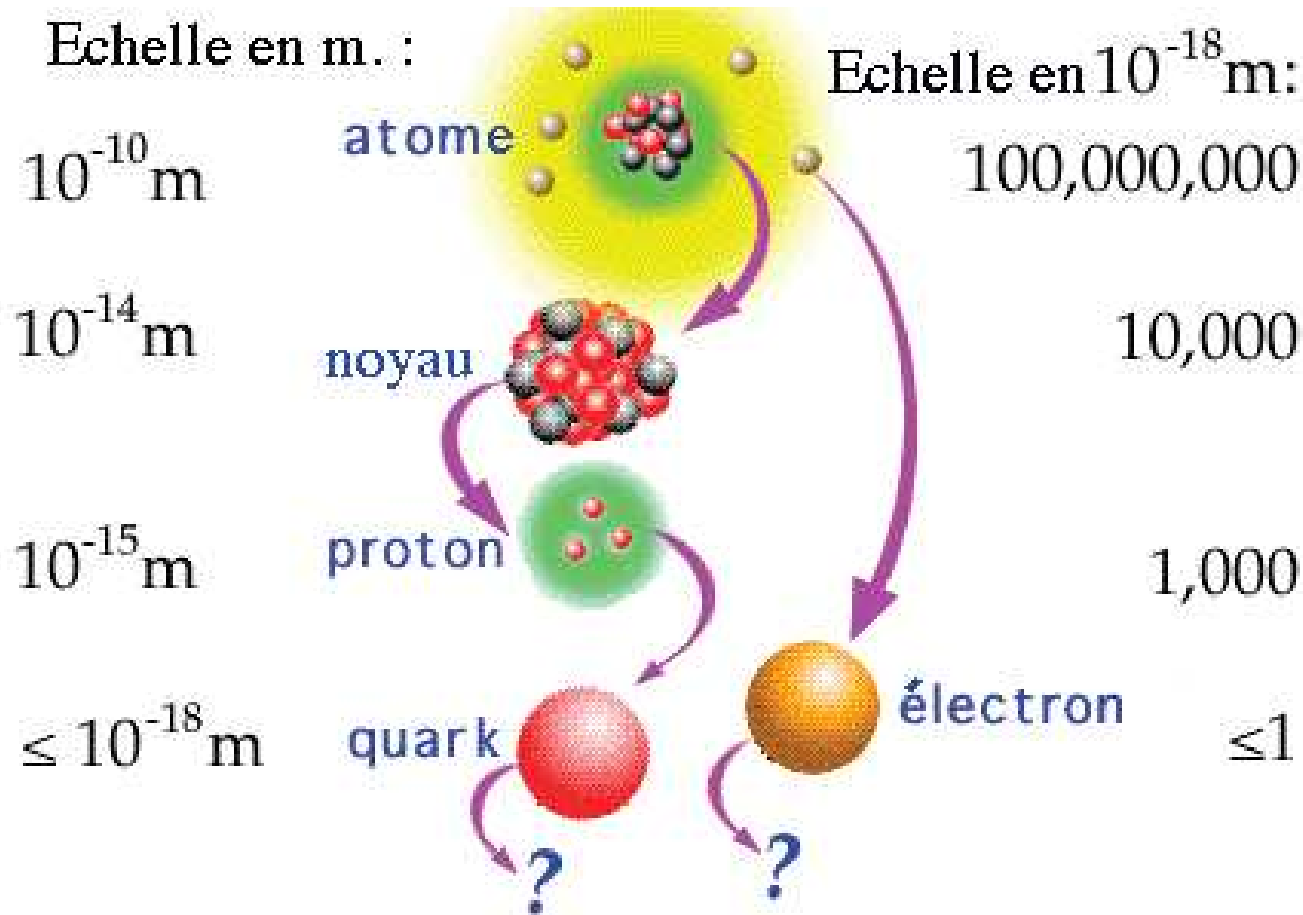
- (a) **onde** : $A = \cos(k.x)$
 - extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) **paquet d'onde** : $A = \sum_k \cos(k.x)$
 - extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) **corpuscule** : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
 - localisé spatialement
 - pas de fréquence déterminée

- Relations d'Heisenberg (1927)
 - ▶ si la précision sur la position d'une particule est Δx , son impulsion a une précision Δp telle que : $\Delta p \cdot \Delta x > \hbar/2$
 - ▶ si la précision sur le temps (de passage) d'une particule est Δt , son énergie a une précision ΔE telle que : $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
- Avantage du flou quantique
 - ▶ une énergie (ΔE) peut être « empruntée » au vide pendant un laps de temps (Δt) suffisamment court pour que $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$
 - ▶ ... 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

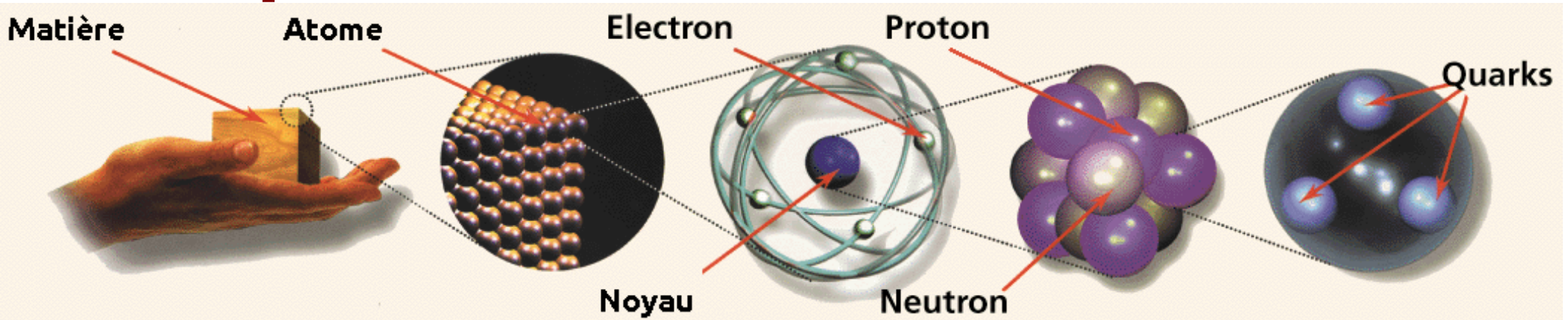
- La mécanique quantique : artifice mathématique ou réalité ?
 - ▶ aspects probabilistes heurtent les partisans du déterminisme
 - « Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers », Einstein (1927)
 - ▶ dualité onde-corpuscule
 - difficile à interpréter
 - a fait longtemps débat
 - fait toujours l'objet d'études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

Échelle des distances en physique des particules

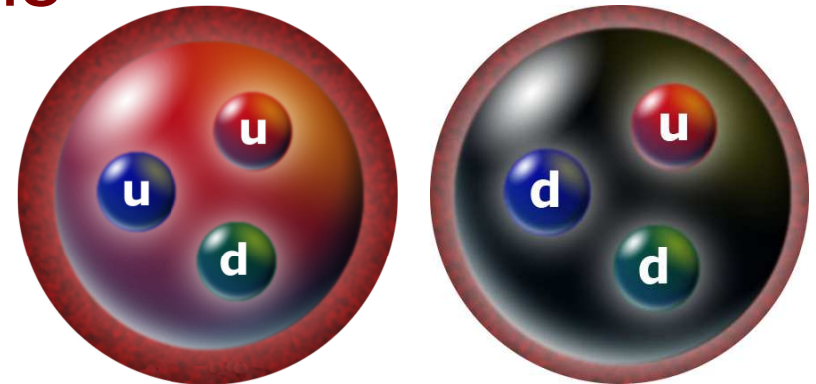


Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

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



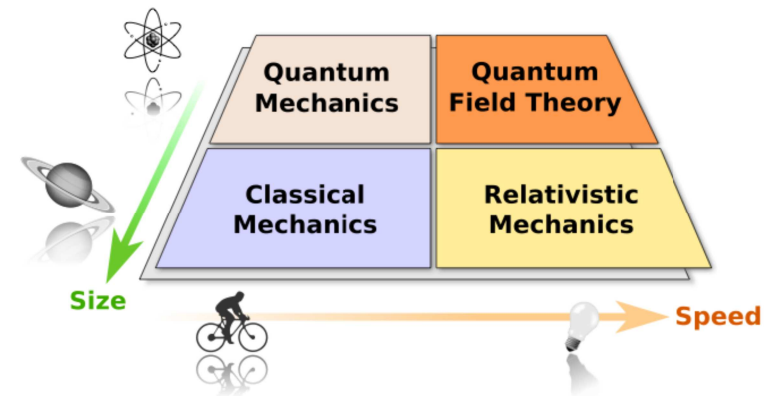
Le positron

- Équation du mouvement d'un électron

[1928, Dirac]

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

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t) = \left(mc^2 \alpha_0 - i\hbar c \sum_{j=1}^3 \alpha_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \psi(\mathbf{x}, t)$$



- Observation :

[1932, Anderson]

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

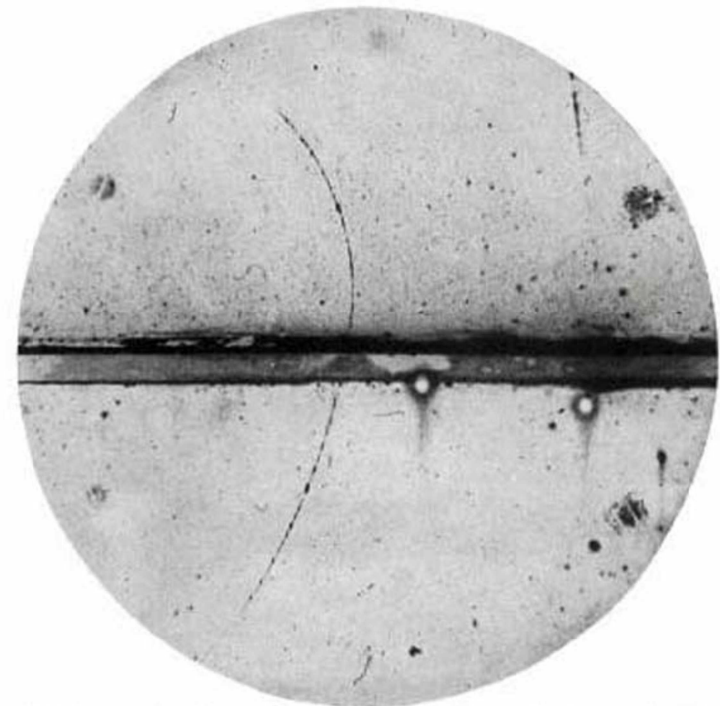
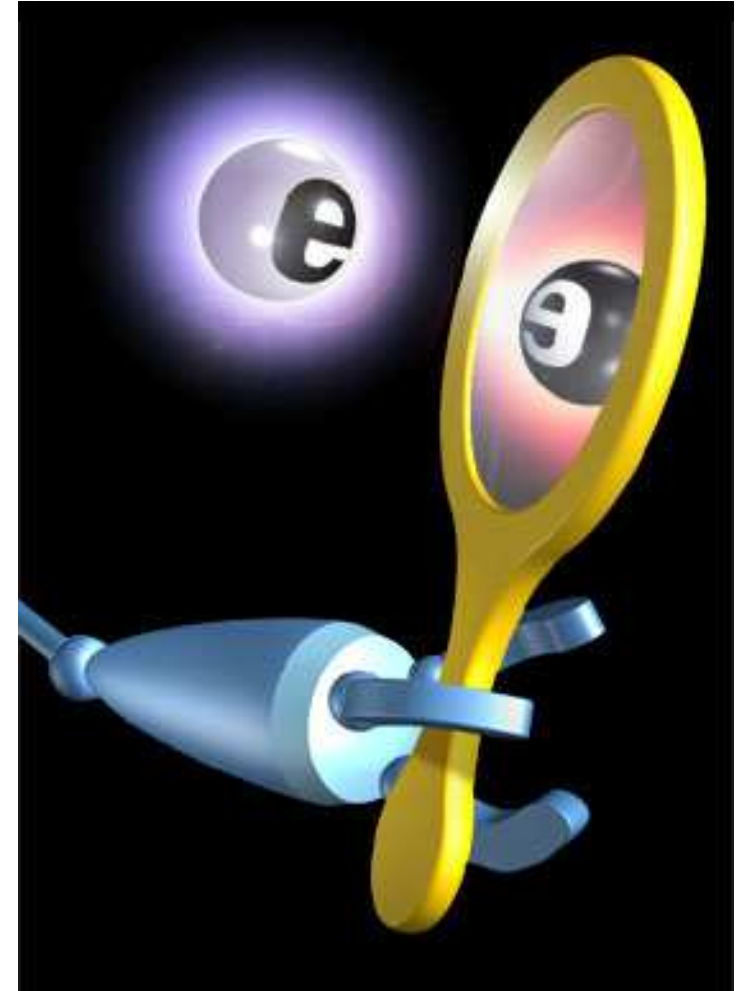


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_0 = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_0 = 7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

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) → (voir « LHCb »)



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

La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium

1896 - Henri Becquerel

L'uranium émet un rayonnement qui lui est propre

Pierre & Marie Curie

- ce n'est pas une réaction chimique

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

- **rayon α** : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon β** : identifié à des électrons
- **rayon γ** : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux



Pierre & Marie Curie

Les désintégrations β

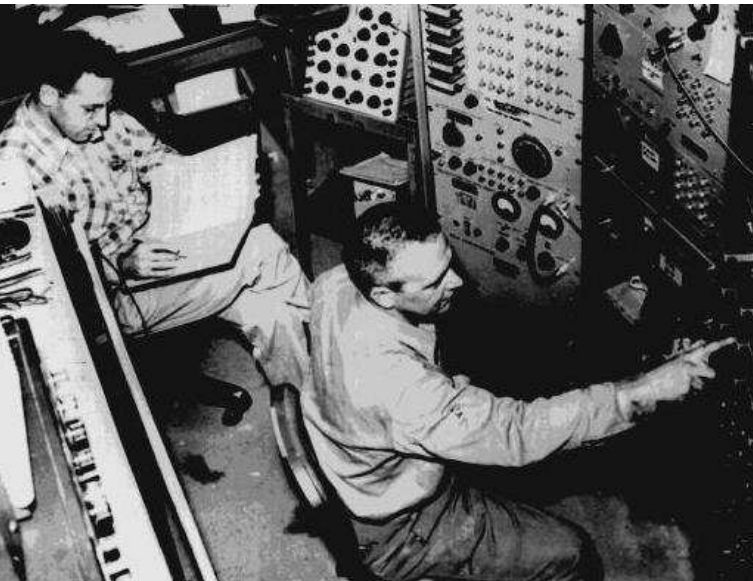
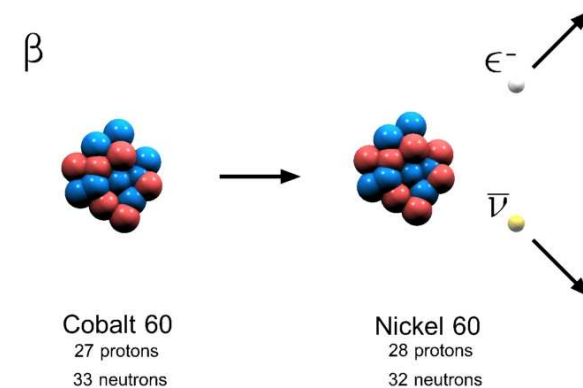
Les désintégrations β posent problème :

- de l'énergie semble manquer

Hypothèse d'une nouvelle particule

1930, Pauli

- le **neutrino**



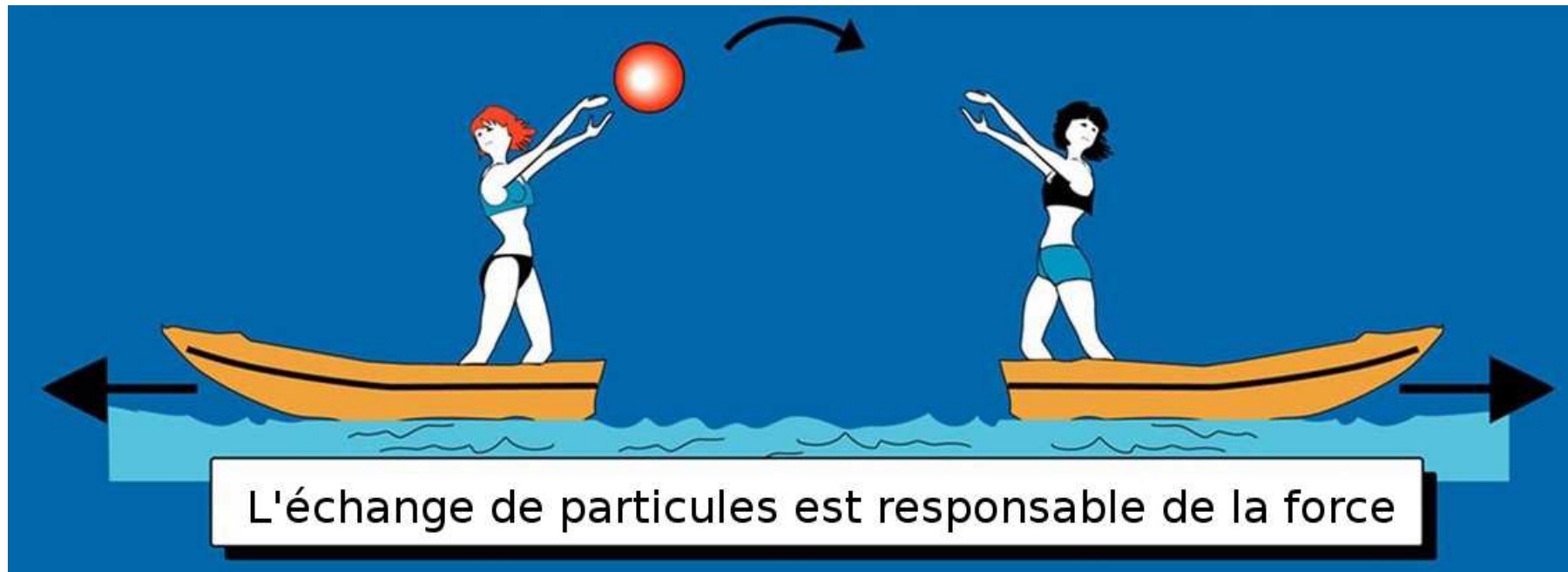
- 1956 : 1ère mise en évidence d'un neutrino
 - Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
 - Cowan et Reines observent la capture d'un (anti-)neutrino par un proton

Les particules *ordinaires*

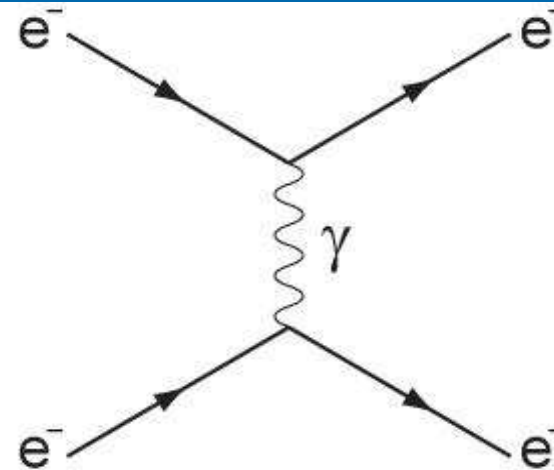
- ❖ Les constituants de l'atome :
 - nucléon (proton ou neutron)
 - électron
- ❖ neutrino,
 - ▶ émis lors de la désintégration de certains noyaux instables
- ❖ ... et l'anti-matière !
- ❖ Comment tout ça tient ensemble ?
 - les interactions

Interaction fondamentale

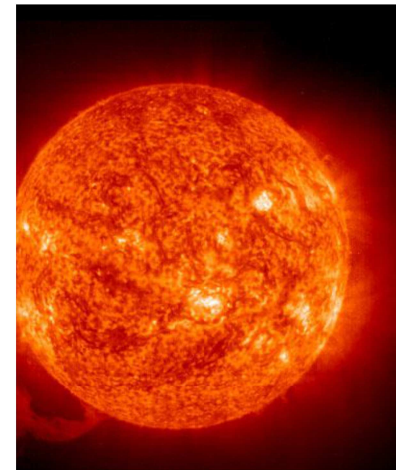
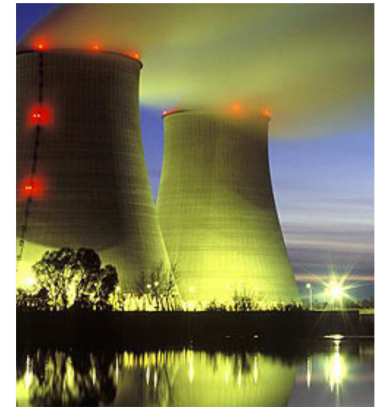
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



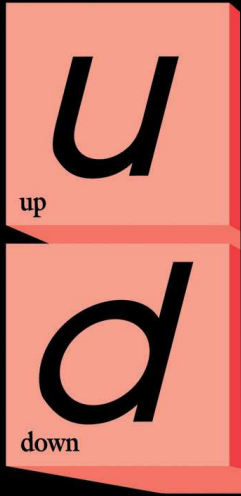
En physique des particules :



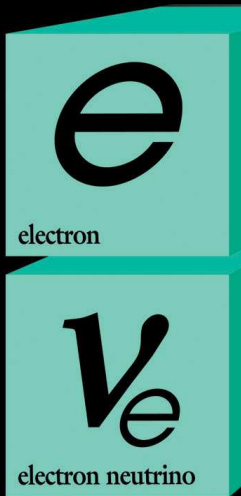
Les forces



Quarks



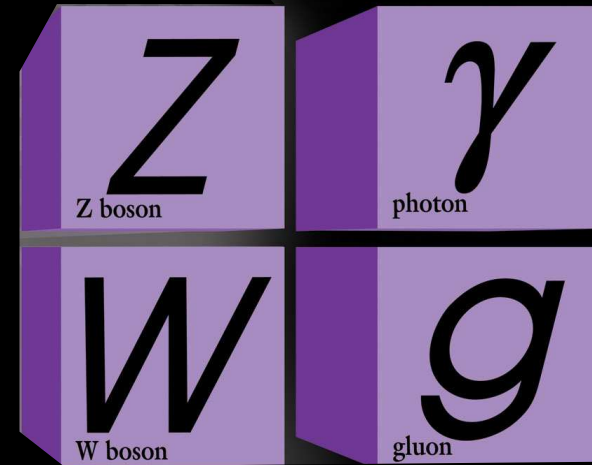
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

Forces



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

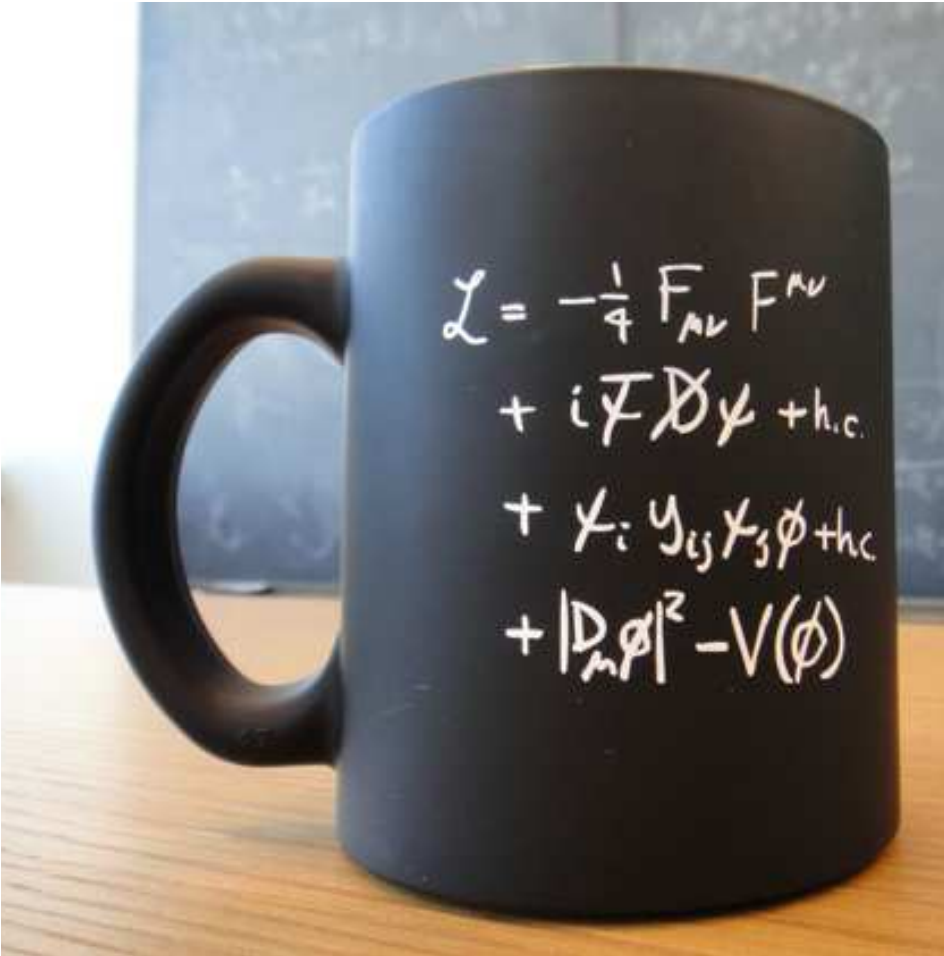
Solution : rajouter un champ de Higgs

(voir : « La découverte du boson de Higgs »)

Le modèle standard

- Version synthétique

- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - 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^\mu \gamma^\mu q_j^\mu) g_\mu^\alpha + 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}{2 c_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}{2 c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} + \\
 & \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - i g c_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^+)] - i g 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_\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] - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} i g [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^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} i g^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \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 + i g 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{i g}{4 c_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{2}{3} s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{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_j^\kappa)] + \frac{i g}{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{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^\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^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^\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 + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{\nu}^+ \nu^+ + \nu^0 - \bar{\nu}^- \nu^- + \nu^0]
 \end{aligned}$$

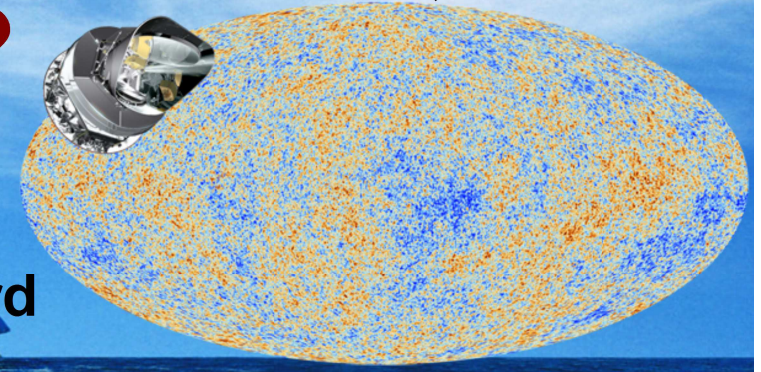
Planck, mars 2013

C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



Autres théories

- 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, ... (« au-delà du MS » samedi)
 - ▶ Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens → Recherches directes / Mesures de précision

Supersymétrie : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

Status: Feb 2015

ATLAS Preliminary

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

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference		
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{q}, \tilde{g} 1.7 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{q} 850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}\gamma, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	1 γ	0-1 jet	Yes	20.3	\tilde{q} 250 GeV	$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0) = m(c)$	1411.1559
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.33 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1405.7875
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qqW^\pm\tilde{\chi}_1^0$	1 e, μ	3-6 jets	Yes	20	\tilde{g} 1.2 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^\pm)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	1501.03555
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq(\ell\ell/\ell\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0-3 jets	-	20	\tilde{g} 1.32 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1501.03555
	GMSB ($\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.6 TeV	$\tan\beta > 20$	1407.0603
	GGM (bino NLSP)	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{g} 1.28 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>50 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2014-001
	GGM (wino NLSP)	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	4.8	\tilde{g} 619 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>50 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2012-144
	GGM (higgsino-bino NLSP)	γ	1 b	Yes	4.8	\tilde{g} 900 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>220 \text{ GeV}$	1211.1167
GGM (higgsino NLSP)	2 e, μ (Z)	0-3 jets	Yes	5.8	\tilde{g} 690 GeV	$m(\text{NLSP})>200 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2012-152	
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale 865 GeV	$m(\tilde{G})>1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$	1502.01518	
3 rd gen. \tilde{g} med.	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0	7-10 jets	Yes	20.3	\tilde{g} 1.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$	1308.1841
	$\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^\pm$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.34 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<400 \text{ GeV}$	1407.0600
	$\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^\pm$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g} 1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<300 \text{ GeV}$	1407.0600
3 rd gen. squarks direct production	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 b	Yes	20.1	\tilde{b}_1 100-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<90 \text{ GeV}$	1308.2631
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^\pm$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{b}_1 275-440 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) \geq 2m(\tilde{\chi}_1^0)$	1404.2500
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$	1-2 e, μ	1-2 b	Yes	4.7	\tilde{t}_1 110-167 GeV, 230-460 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 2m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, 1407.0583
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0$ or $\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	\tilde{t}_1 90-191 GeV, 215-530 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1403.4853, 1412.4742
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	1-2 b	Yes	20	\tilde{t}_1 210-640 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1407.0583, 1406.1122
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ c -tag	Yes	20.3	\tilde{t}_1 90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)<85 \text{ GeV}$	1407.0608
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1 150-580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>150 \text{ GeV}$	1403.5222
$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_2 290-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<200 \text{ GeV}$	1403.5222	
EW direct	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\ell}$ 90-325 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\ell}\nu(\tilde{\ell}\bar{\nu})$	2 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 140-465 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tilde{\tau}\bar{\nu})$	2 τ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 100-350 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1407.0350
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_L\nu\tilde{\ell}_L(\tilde{\nu}\nu), \tilde{\ell}\tilde{\nu}\tilde{\ell}_L(\tilde{\nu}\nu)$	3 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 420 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\tilde{b}/WW/\tau\tau/\gamma\gamma$	e, μ, γ	0-2 b	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$ 250 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1501.07110
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_{2,3}^0 \rightarrow \tilde{\ell}_R\ell$	4 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_{2,3}^0$ 620 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \bar{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1405.5086
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0)=160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm)=0.2 \text{ ns}$	1310.3675
	Stable, stopped \tilde{g} R-hadron	0	1-5 jets	Yes	27.9	\tilde{g} 832 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$	1310.6584
	Stable \tilde{g} R-hadron	trk	-	-	19.1	\tilde{g} 1.27 TeV		1411.6795
	GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$	1-2 μ	-	-	19.1	$\tilde{\chi}_1^0$ 537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$	1411.6795
	GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\gamma}\tilde{G}$, long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	2 γ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$ 435 GeV	$2 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{SPS8 model}$	1409.5542
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{\mu}$ (RPV)	1 μ , displ. vtx	-	-	20.3	\tilde{q} 1.0 TeV	$1.5 < c\tau < 156 \text{ mm}, \text{BR}(\mu)=1, m(\tilde{\tau}^0)=108 \text{ GeV}$	ATLAS-CONF-2013-092
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e + \mu$	2 e, μ	-	-	4.6	$\tilde{\nu}_\tau$ 1.61 TeV	$\lambda'_{311}=0.10, \lambda_{132}=0.05$	1212.1272
	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e(\mu) + \tau$	1 $e, \mu + \tau$	-	-	4.6	$\tilde{\nu}_\tau$ 1.1 TeV	$\lambda'_{311}=0.10, \lambda_{1(2)33}=0.05$	1212.1272
	Bilinear RPV CMSSM	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{q}, \tilde{g} 1.35 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{LS} \mu < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow e\tilde{\nu}_\mu, e\mu\tilde{\nu}_e$	4 e, μ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 750 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{121} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\mp, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\tilde{\nu}_\tau, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^\pm$ 450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)>0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^\pm), \lambda_{133} \neq 0$	1405.5086
$\tilde{g} \rightarrow qq\tilde{q}$	0	6-7 jets	-	20.3	\tilde{g} 916 GeV	$\text{BR}(t)=\text{BR}(b)=\text{BR}(c)=0\%$	ATLAS-CONF-2013-091	
$\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 t, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{g} 850 GeV		1404.250	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 c	Yes	20.3	\tilde{c} 490 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)<200 \text{ GeV}$	1501.01325

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus 1 σ theoretical signal cross section uncertainty.

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

Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: March 2015

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (1.0 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	ℓ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	$\geq 1j$	Yes	20.3	M_D 5.25 TeV	$n = 2$ 1502.01518	
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2e, \mu$	-	20.3	M_S 4.7 TeV	$n = 3$ HLZ 1407.2410	
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1e, \mu$	$1j$	-	M_{th} 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006	
	ADD QBH	-	$2j$	-	M_{th} 5.82 TeV	$n = 6$ 1407.1376	
	ADD BH high N_{brk}	2μ (SS)	-	-	M_{th} 4.7 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH 1308.4075	
	ADD BH high Σp_T	$\geq 1e, \mu$	$\geq 2j$	-	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH 1405.4254	
	ADD BH high multijet	-	$\geq 2j$	-	M_{th} 5.8 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, non-rot BH Preliminary	
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	G_{KK} mass 2.68 TeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 0.1$ 1405.4123	
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2γ	-	-	G_{KK} mass 2.66 TeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 0.1$ Preliminary	
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow ZZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2e, \mu$	$2j/1J$	-	G_{KK} mass 740 GeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$ 1409.6190	
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1e, \mu$	$2j/1J$	Yes	W' mass 700 GeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$ 1503.04677	
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	-	$4b$	-	G_{KK} mass 590-710 GeV	$k/\bar{M}_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2014-005	
Bulk RS $G_{KK} \rightarrow t\bar{t}$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2j$	Yes	G_{KK} mass 2.2 TeV	BR = 0.925 ATLAS-CONF-2015-009		
2UED / RPP	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	KK mass 960 GeV	Preliminary	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$	-	20.3	Z' mass 2.9 TeV	1405.4123	
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2τ	-	19.5	Z' mass 2.02 TeV	1502.07177	
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1e, \mu$	-	Yes	20.3	W' mass 3.24 TeV	1407.7494
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow \ell\nu \ell' \ell'$	$3e, \mu$	-	Yes	20.3	W' mass 1.52 TeV	1406.4456
	EGM $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\ell\ell$	$2e, \mu$	$2j/1J$	-	20.3	W' mass 1.59 TeV	1409.6190
	HVT $W' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$	$1e, \mu$	$2b$	Yes	20.3	W' mass 1.47 TeV	Preliminary
	LRSM $W'_R \rightarrow t\bar{b}$	$1e, \mu$	$2b, 0-1j$	Yes	20.3	W' mass 1.92 TeV	1410.4103
LRSM $W'_R \rightarrow t\bar{b}$	$0e, \mu$	$\geq 1b, 1J$	-	20.3	W' mass 1.76 TeV	1408.0886	
CI	CI $qqqq$	-	$2j$	-	17.3	Λ 12.0 TeV $\eta_{LL} = -1$	Preliminary
	CI $qq\ell\ell$	$2e, \mu$	-	-	20.3	Λ 21.6 TeV $\eta_{LL} = -1$	1407.2410
	CI $uutt$	$2e, \mu$ (SS)	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	Λ 4.35 TeV $ C_{LL} = 1$	Preliminary
DM	EFT D5 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$\geq 1j$	Yes	20.3	M_χ 974 GeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1502.01518
	EFT D9 operator (Dirac)	$0e, \mu$	$1J, \leq 1j$	Yes	20.3	M_χ 2.4 TeV	at 90% CL for $m(\chi) < 100 \text{ GeV}$ 1309.4017
LQ	Scalar LQ 1 st gen	$2e$	$\geq 2j$	-	1.0	LQ mass 660 GeV	$\beta = 1$ 1112.4828
	Scalar LQ 2 nd gen	2μ	$\geq 2j$	-	1.0	LQ mass 685 GeV	$\beta = 1$ 1203.3172
	Scalar LQ 3 rd gen	$1e, \mu, 1\tau$	$1b, 1j$	-	4.7	LQ mass 534 GeV	$\beta = 1$ 1303.0526
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht + X, Wb + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	T mass 785 GeV	isospin singlet ATLAS-CONF-2015-012
	VLQ $TT \rightarrow Zt + X$	$2l \geq 3e, \mu$	$\geq 2l \geq 1b$	-	20.3	T mass 735 GeV	T in (T, B) doublet 1409.5500
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2l \geq 3e, \mu$	$\geq 2l \geq 1b$	-	20.3	B mass 755 GeV	B in (B, Y) doublet 1409.5500
	VLQ $BB \rightarrow Wt + X$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes	20.3	B mass 640 GeV	isospin singlet Preliminary
	$T_{5/3} \rightarrow Wt$	$1e, \mu$	$\geq 1b, \geq 5j$	Yes	20.3	$T_{5/3}$ mass 840 GeV	isospin singlet Preliminary
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1γ	$1j$	-	20.3	q^* mass 3.5 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1309.3230
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2j$	-	20.3	q^* mass 4.09 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1407.1376
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	1 or $2e, \mu$	$1b, 2j$ or $1j$	Yes	4.7	b^* mass 870 GeV	left-handed coupling 1301.1583
	Excited lepton $\ell^* \rightarrow \ell\gamma$	$2e, \mu, 1\gamma$	-	-	13.0	ℓ^* mass 2.2 TeV	$\Lambda = 2.2 \text{ TeV}$ 1308.1364
	Excited lepton $\nu^* \rightarrow \ell W, \nu Z$	$3e, \mu, \tau$	-	-	20.3	ν^* mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921
Other	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1e, \mu, 1\gamma$	-	Yes	20.3	a_T mass 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana ν	$2e, \mu$	$2j$	-	2.1	N^0 mass 1.5 TeV	$m(W_R) = 2 \text{ TeV}$, no mixing 1203.5420
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	$2e, \mu$ (SS)	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 551 GeV	DY production, $BR(H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau) = 1$ 1412.0237
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, $BR(H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau) = 1$ 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1e, \mu$	$1b$	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$ Preliminary
Magnetic monopoles	-	-	-	2.0	monopole mass 862 GeV	DY production, $ g = 1g_D$ 1207.6411	

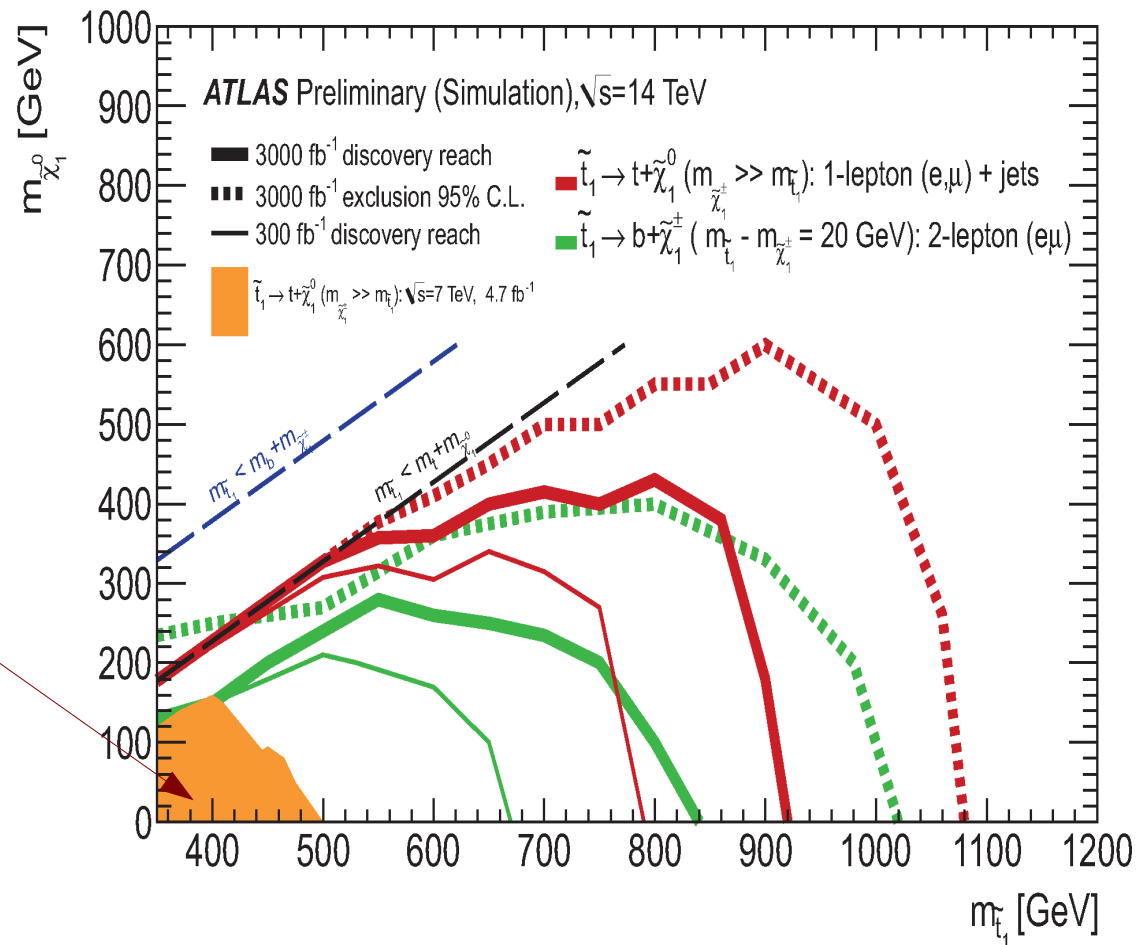
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

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

SUSY et exotiques : le futur

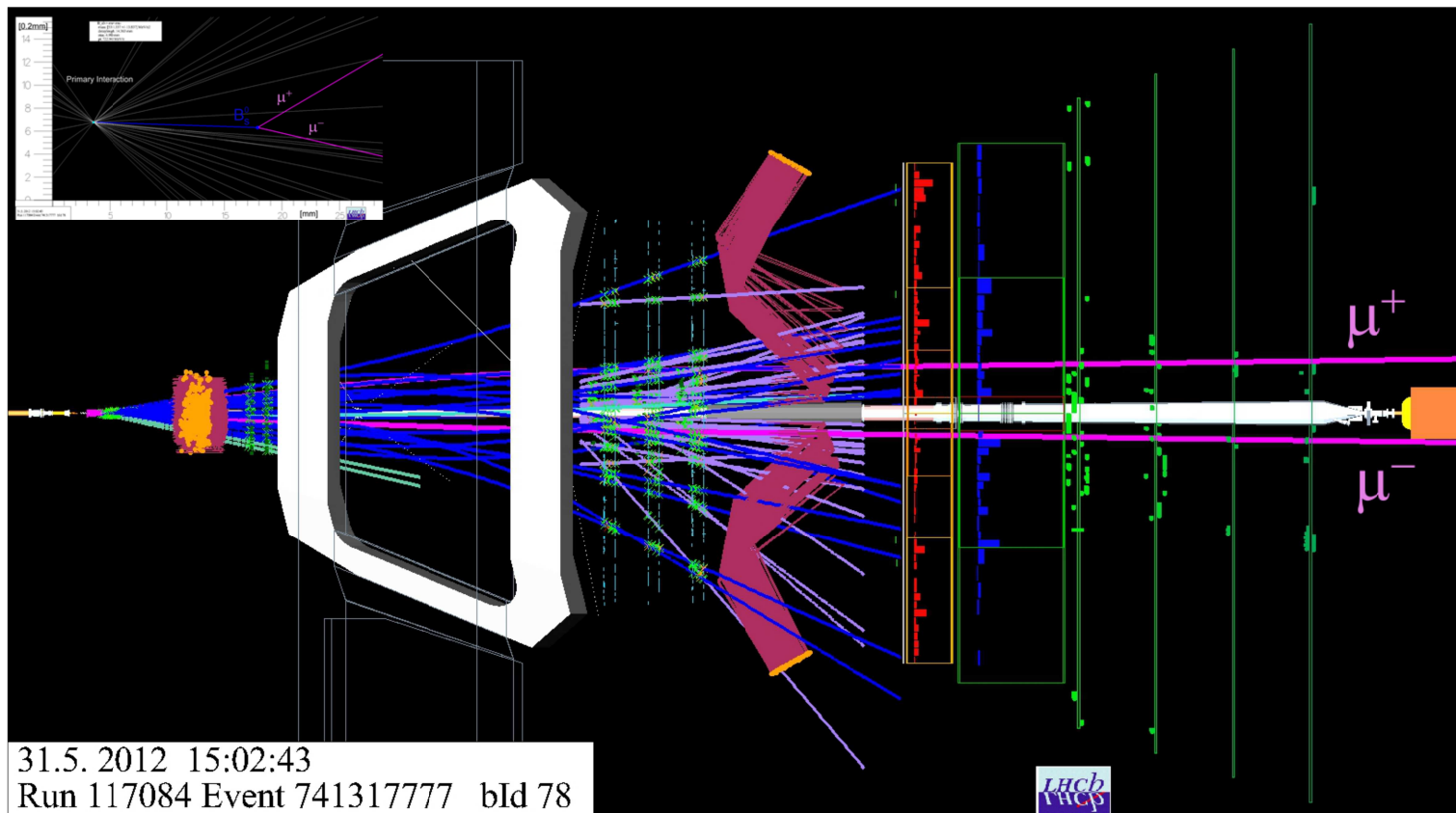
- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2018
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030

Exclus actuellement



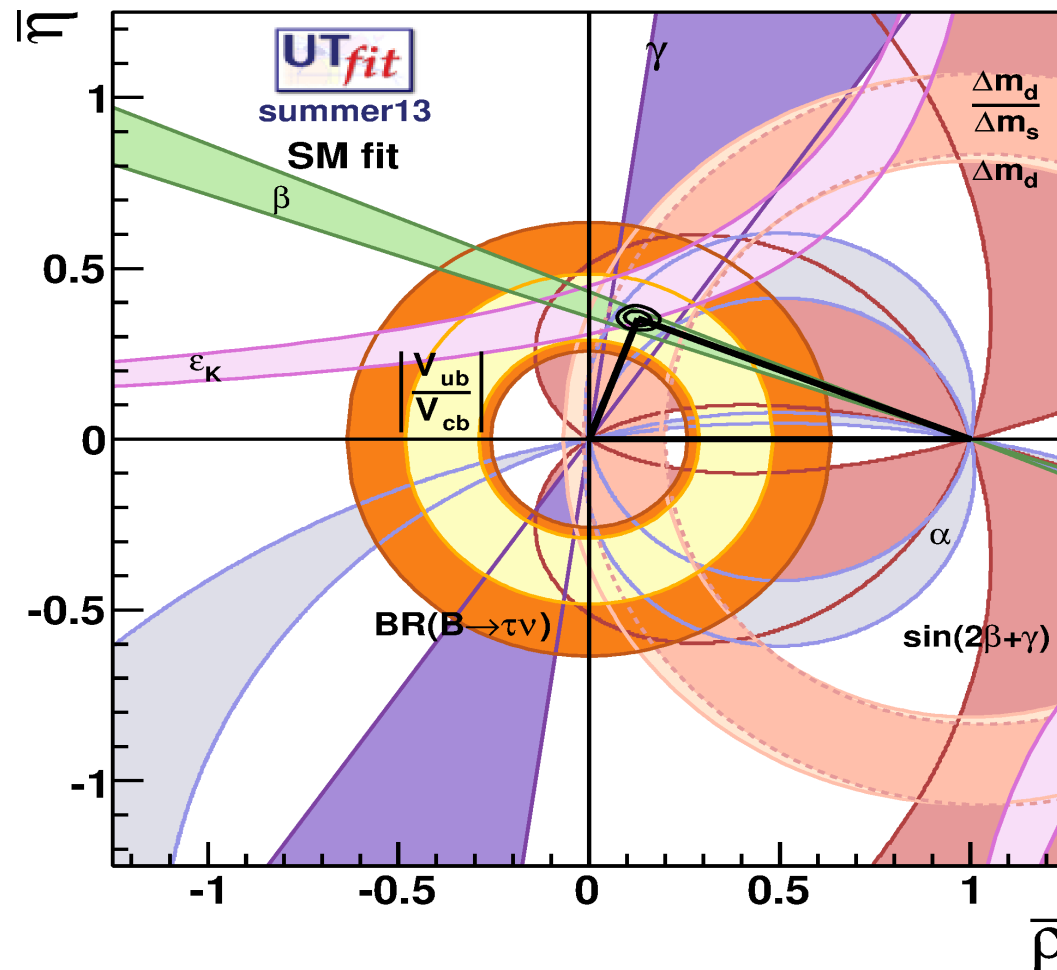
Nouvelle physique indirectement

- Déviations dans des mesures de précision peuvent indiquer la présence de nouvelles particules
- Exemple : production de $B_s \rightarrow \mu\mu$ dans LHCb
- Résultat : encore une fois presque exactement la prédiction du modèle standard, $(3.2^{+1.5}_{-1.2}) \times 10^{-9} \dots$



Asymétrie matière-antimatière

- LHCb fait des mesures de précision
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard ...



Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

Au LHC :

- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- Des surprises ? On l'espère !