

La physique des particules au LHC

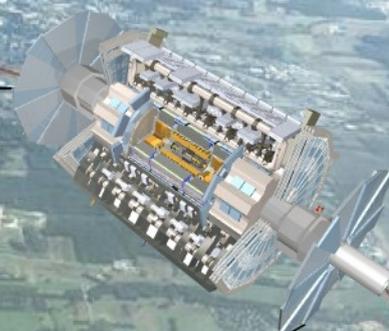
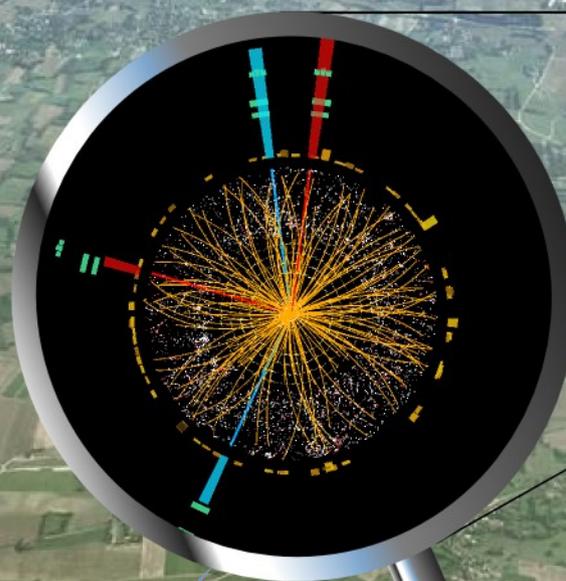
Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille



Merci à Julien Cogan

Summer Camp, Observatoire de Haute Provence
4 juillet 2013

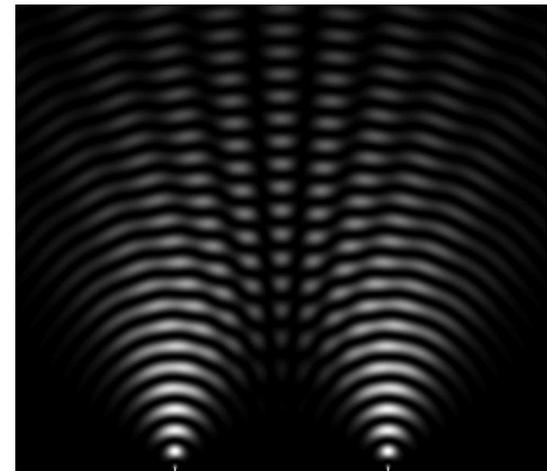


De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



État des lieux à la fin du XIX^{ème} 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 :

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

- ▶ 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

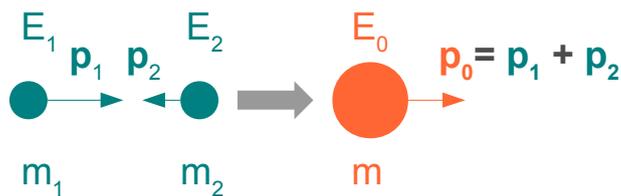
- Équivalence masse-énergie

- ▶ 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

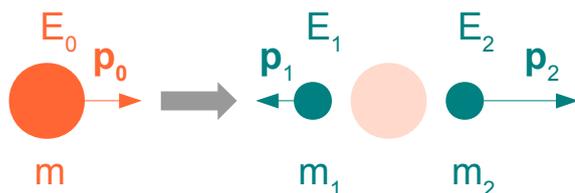


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

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
- Et, 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

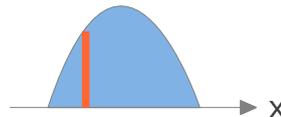
- Aux échelles microscopiques, les objets ont une nature à la fois *corpusculaire* et *ondulatoire*

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

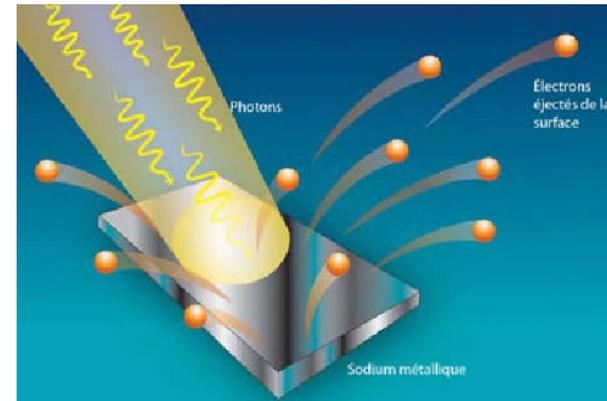
constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s

- ▶ 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.

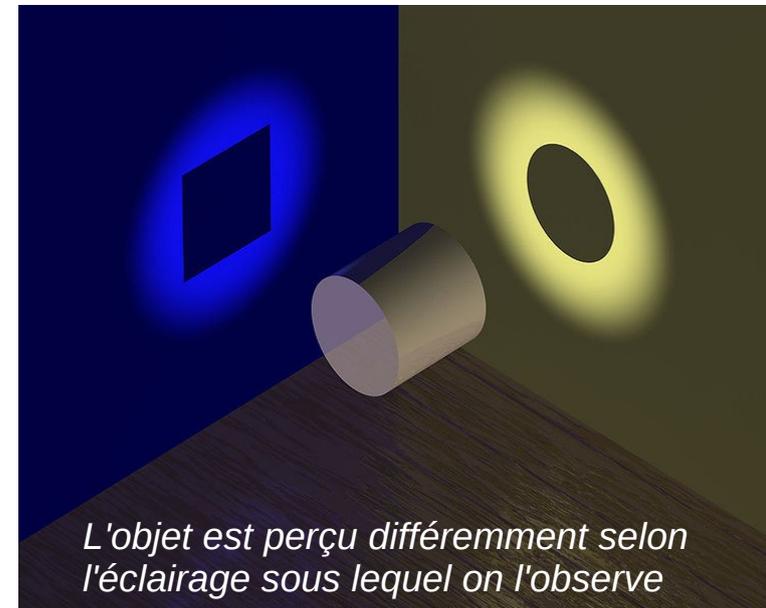
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905

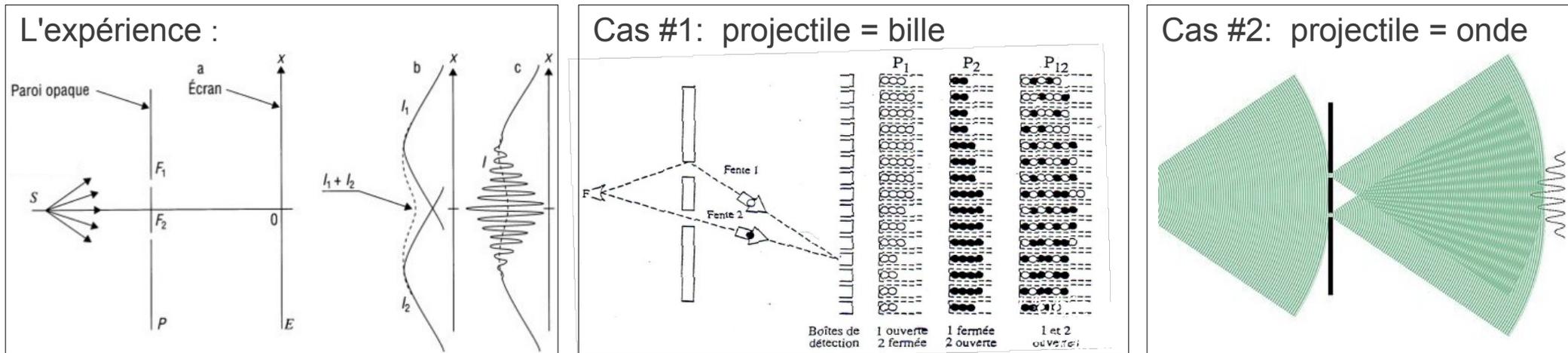


L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon

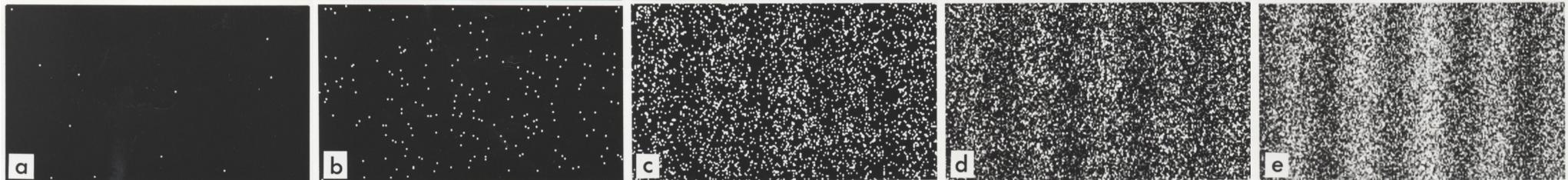


Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

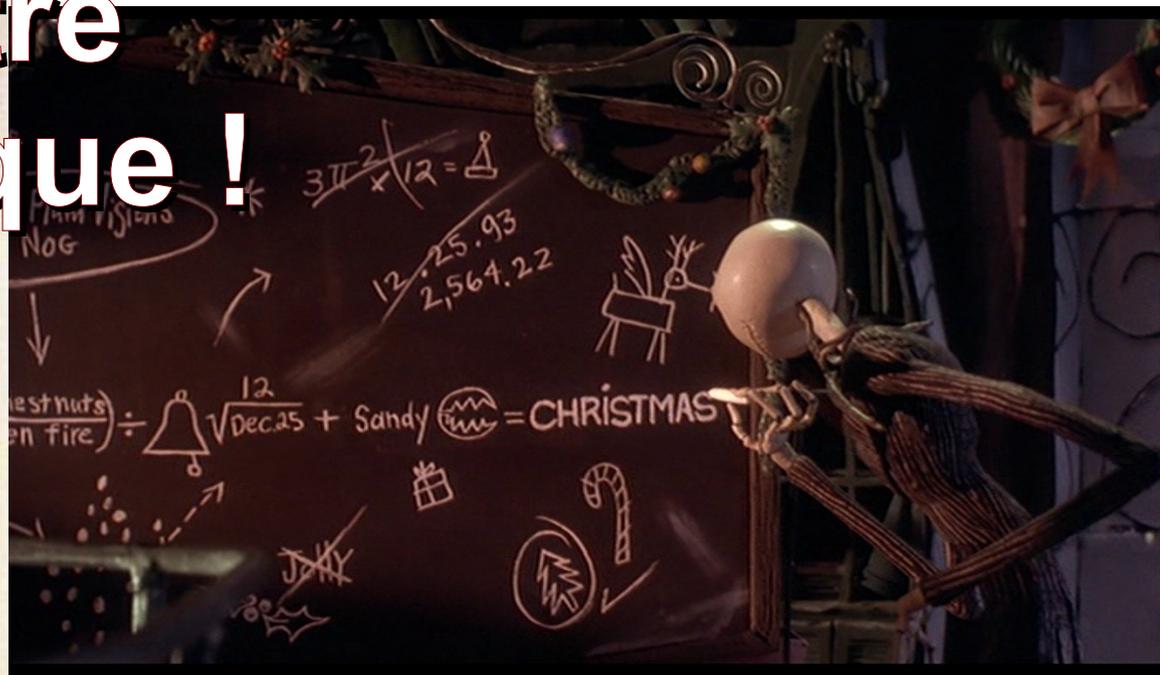


Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



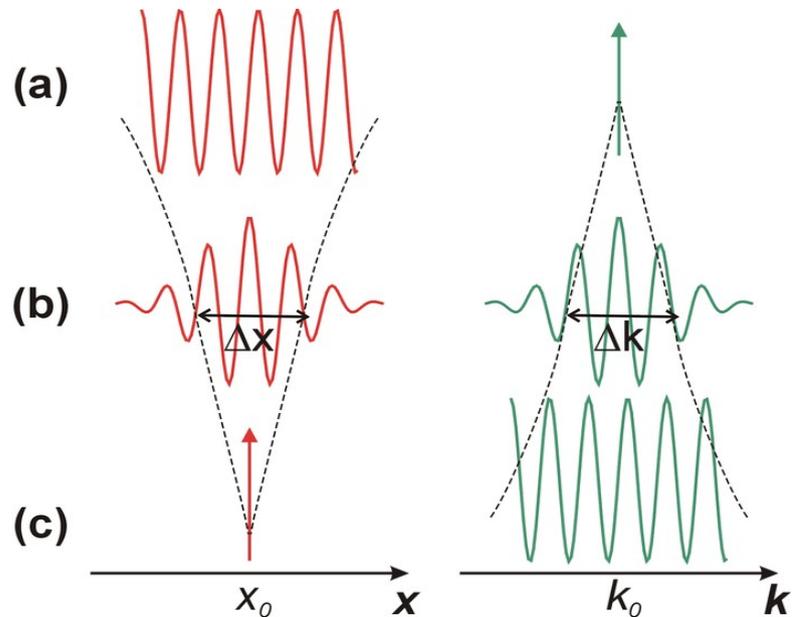
- On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !
- Remarque : si on détecte par quelle fente la particule passe, l'interférence disparaît

Mécanique quantique : illustration



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

Mécanique quantique : les relations d'incertitude



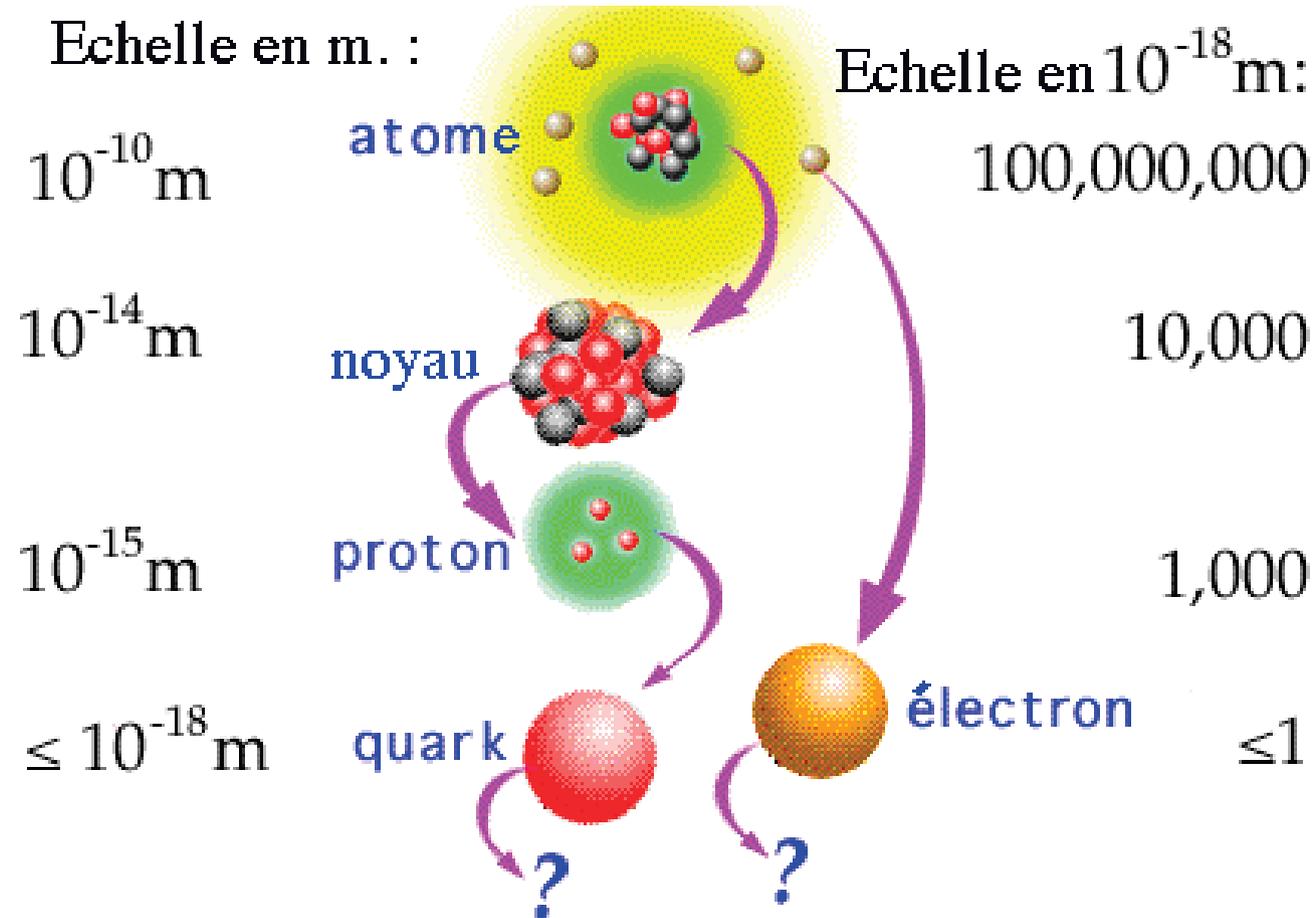
- (a) **onde** : $A = \cos(k.x)$
 - extension spatiale infinie
 - fréquence pure
- (b) **paquet d'onde** : $A = \sum_k \cos(k.x)$
 - extension spatiale limitée
 - distribué en fréquence
- (c) **corpuscule** : $A = 1$ si $x=x_0$ sinon 0 ($\forall k$)
 - localisé spatialement
 - pas de fréquence déterminée

- 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

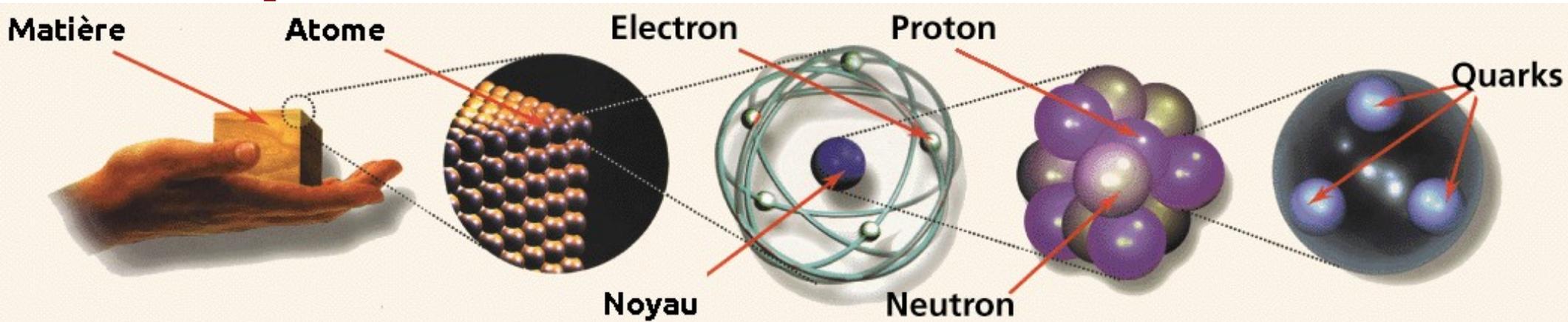
- La mécanique quantique : artifice mathématique ou réalité ?
 - ▶ aspects probabilistes heurtent les partisans du déterminisme
 - « Dieu ne joue pas aux dés avec l'Univers », Einstein (1927)
 - ▶ dualité onde-corpuscule
 - difficile à interpréter
 - a fait longtemps débat
 - fait toujours l'objet d'études 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

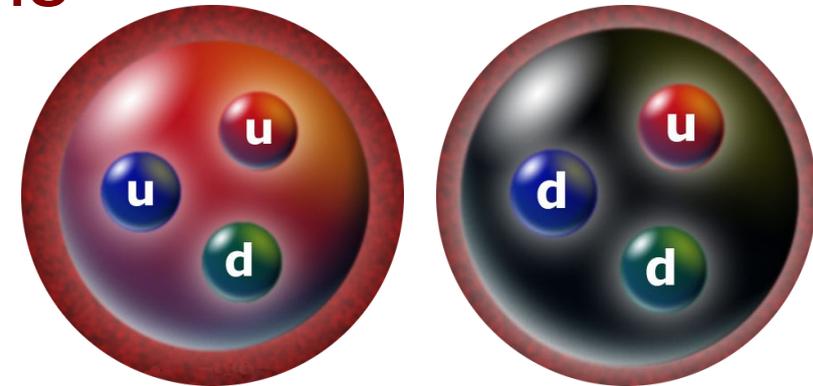


Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

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**

- Observation :

[1932, Anderson]

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

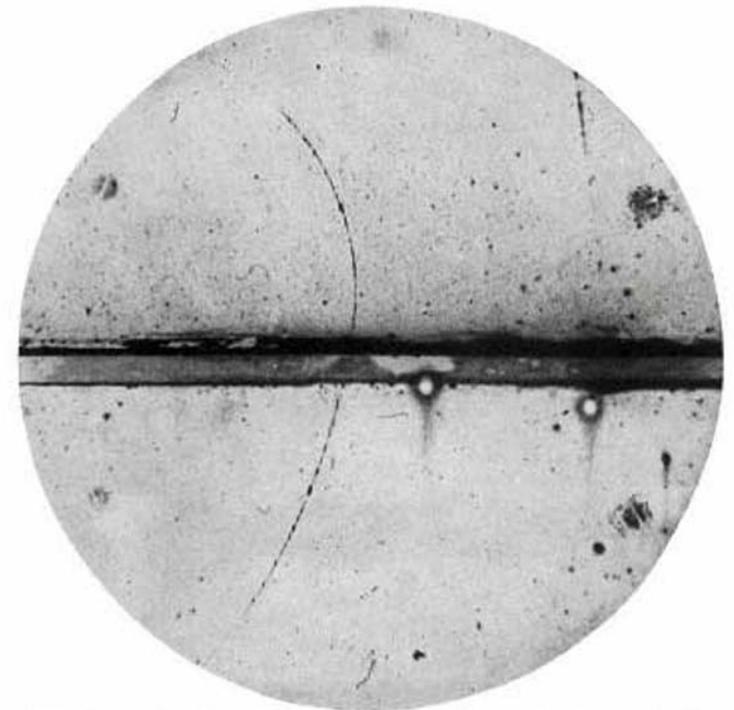
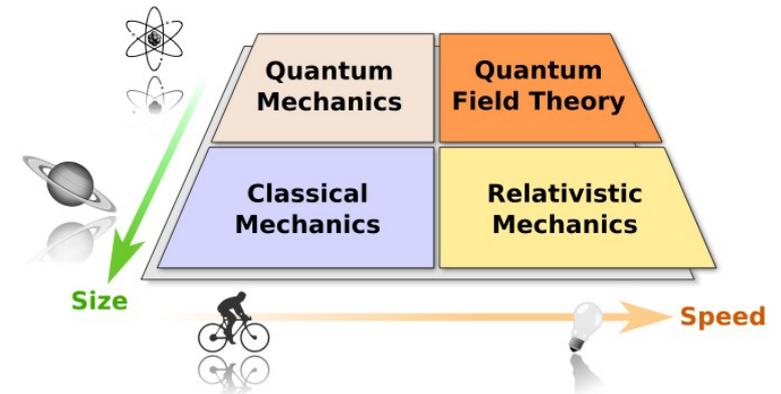
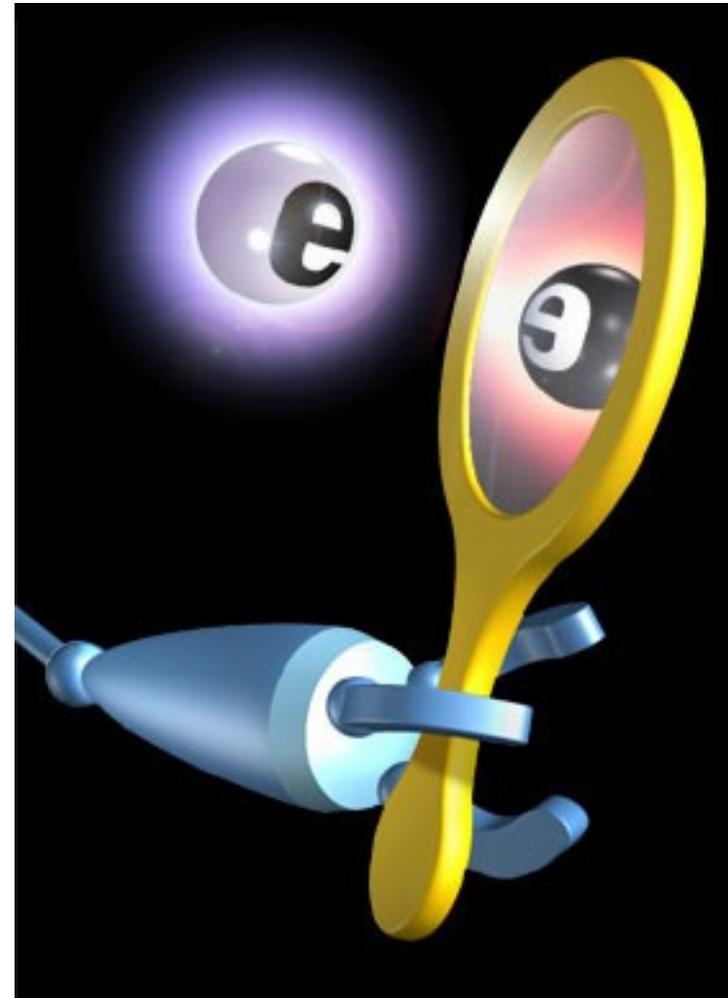


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

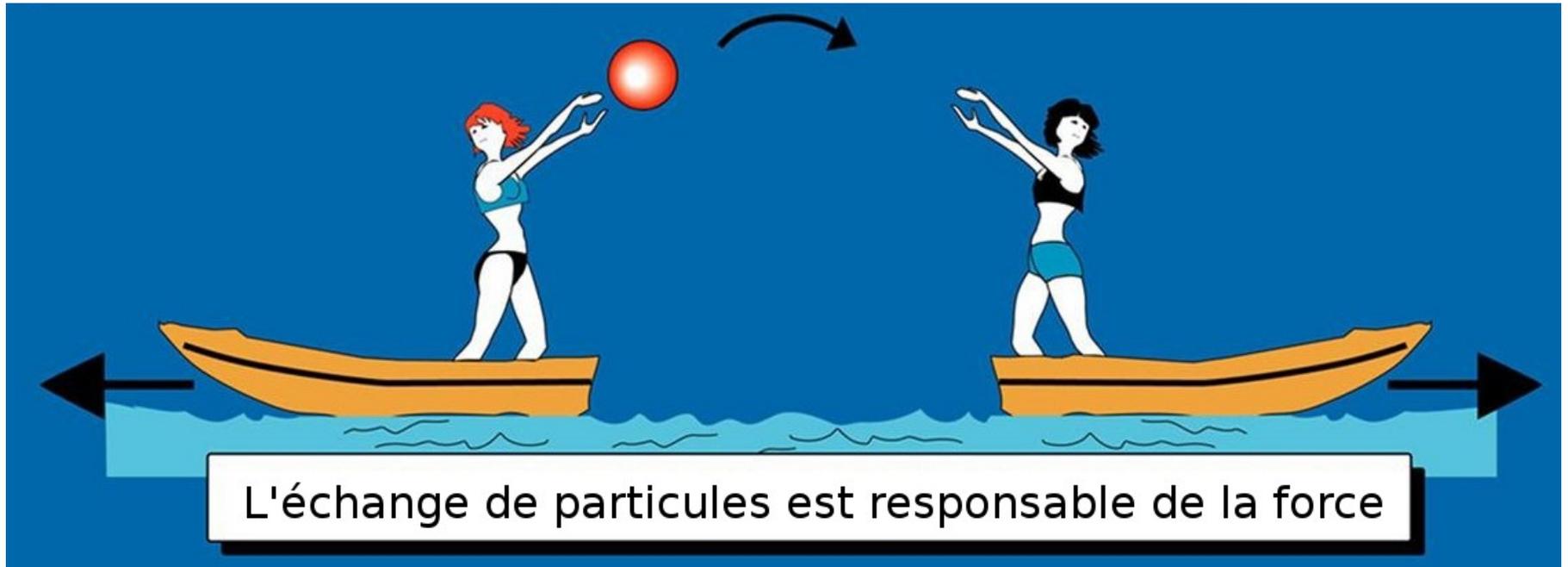
L'anti-matière

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



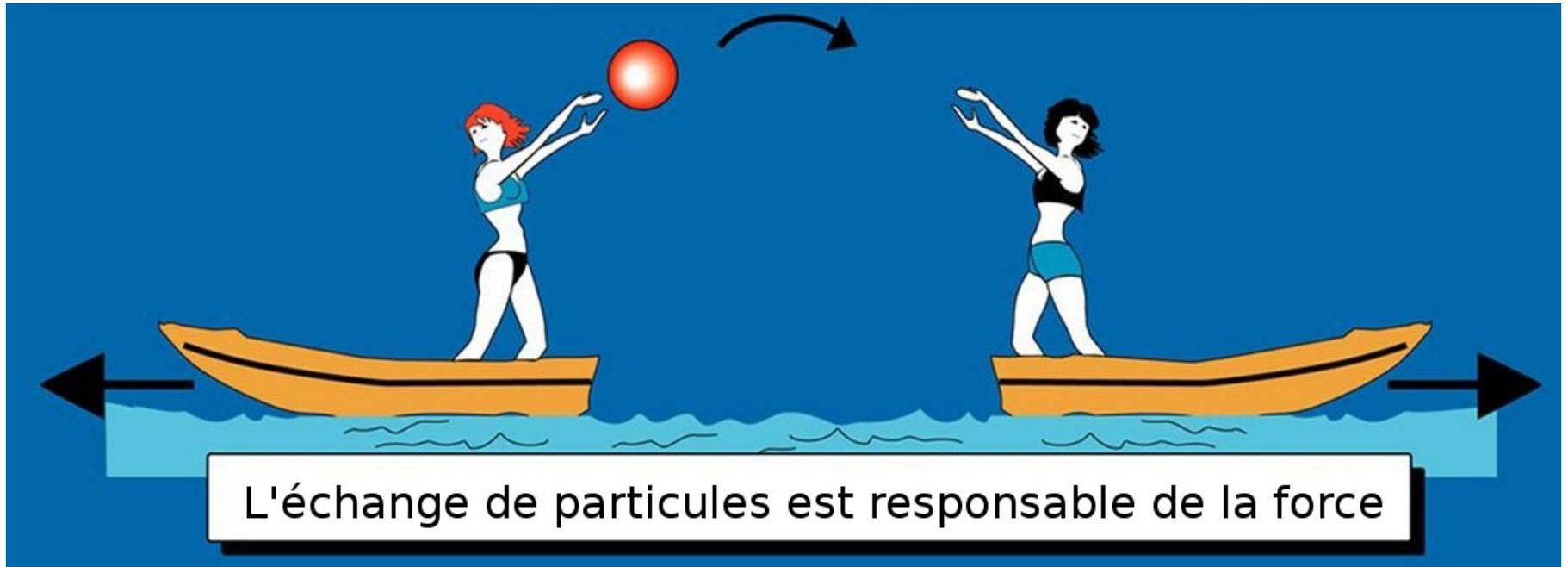
Interaction fondamentale

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

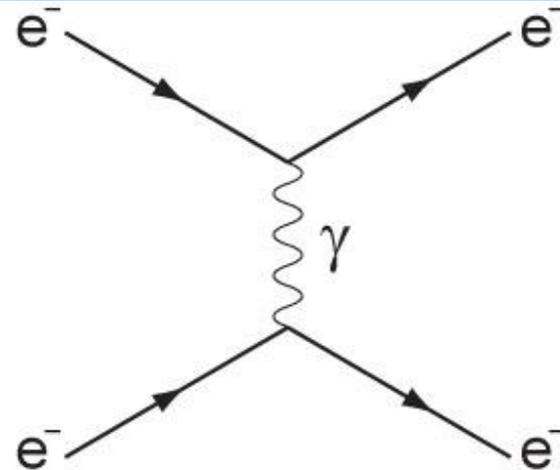


Interaction fondamentale

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



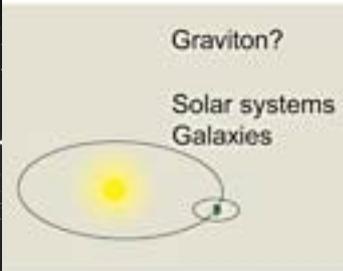
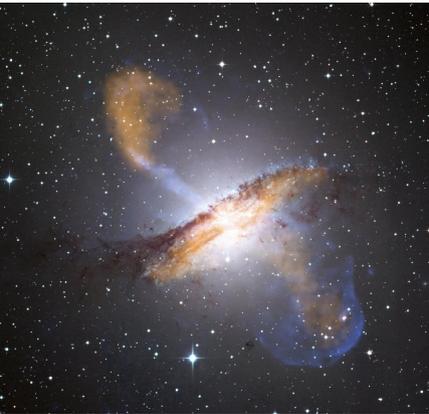
En physique des particules :



Les forces

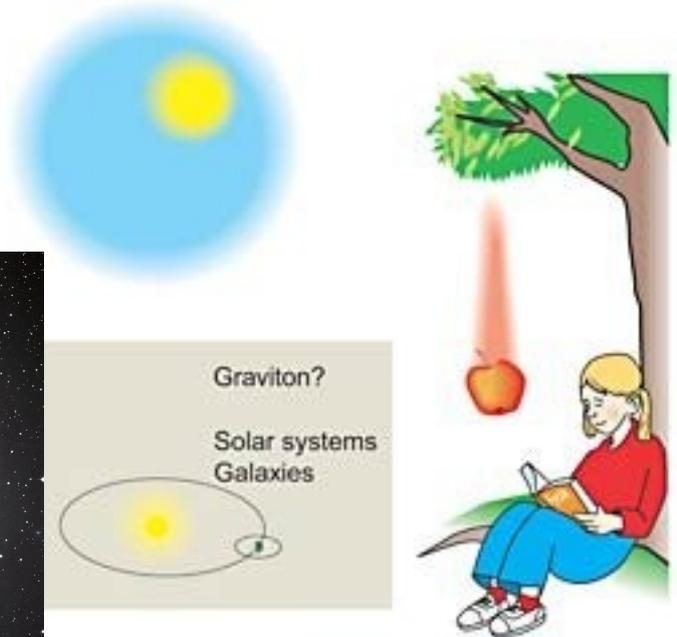


Les forces

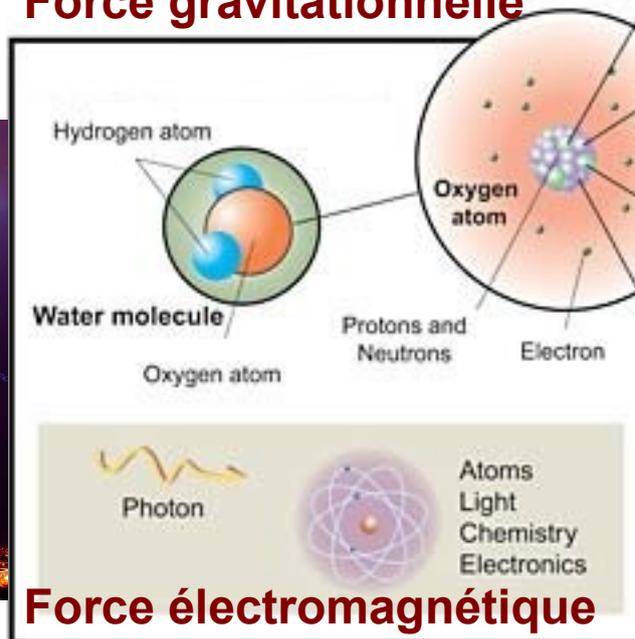


Force gravitationnelle

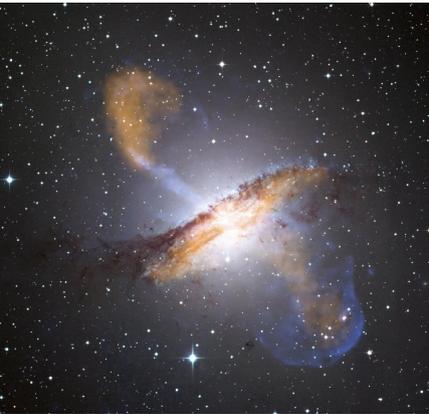
Les forces



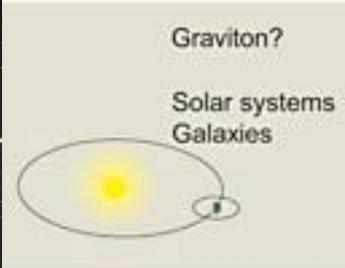
Force gravitationnelle



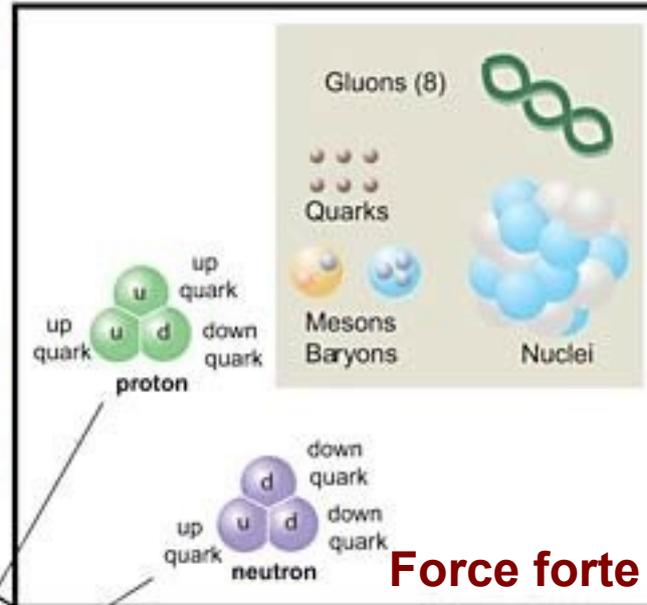
Force électromagnétique



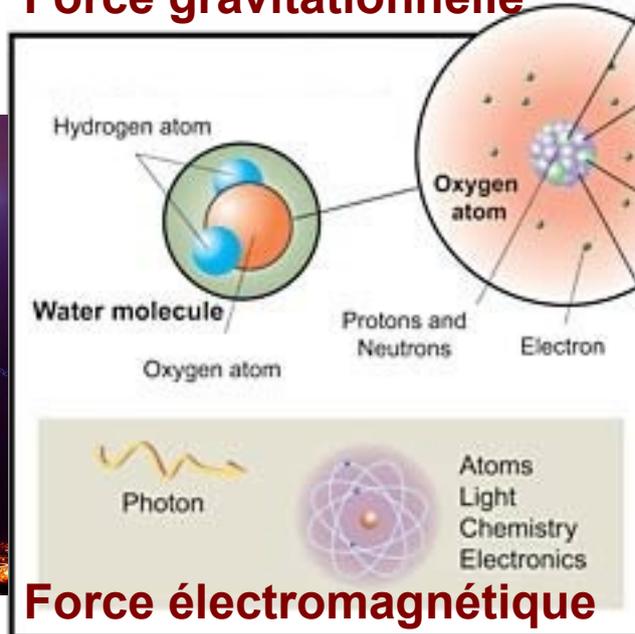
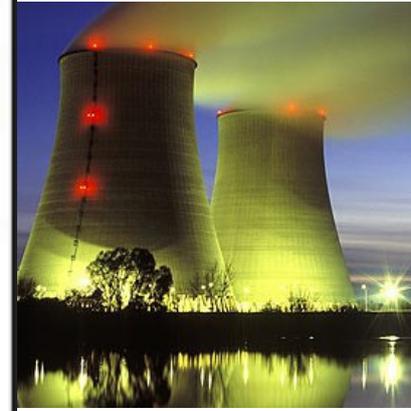
Les forces



Force gravitationnelle

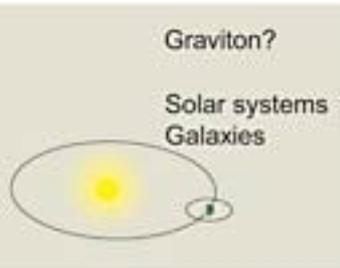


Force forte

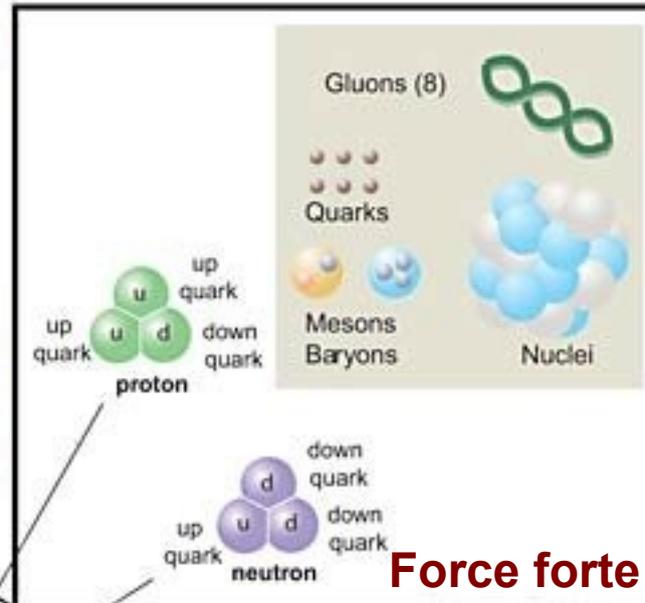


Force électromagnétique

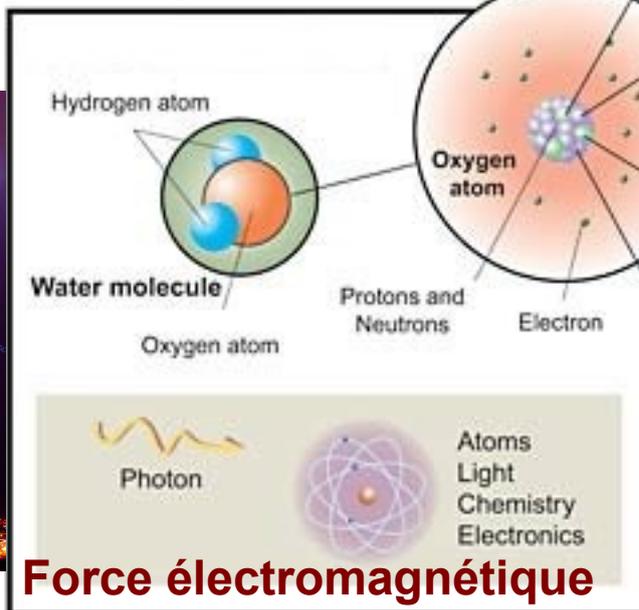
Les forces



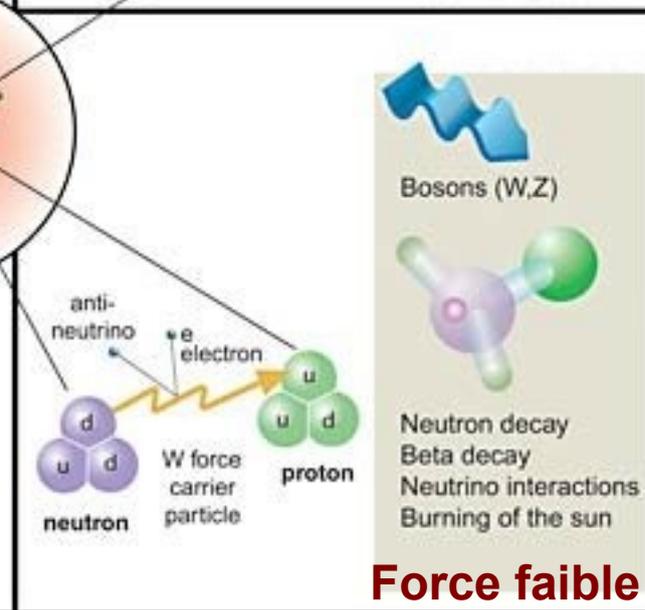
Force gravitationnelle



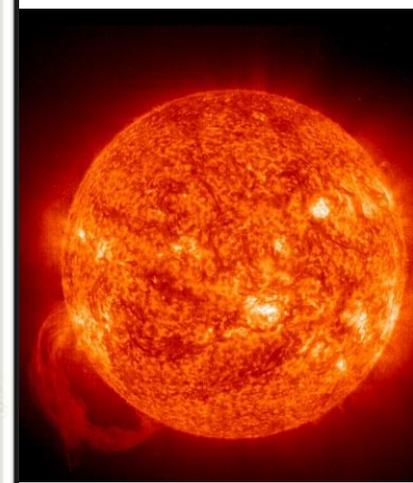
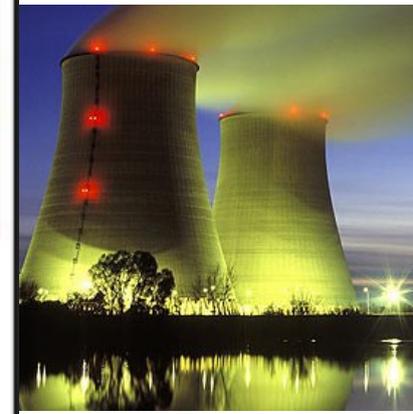
Force forte



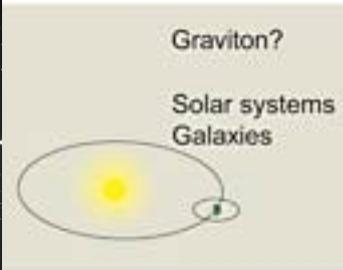
Force électromagnétique



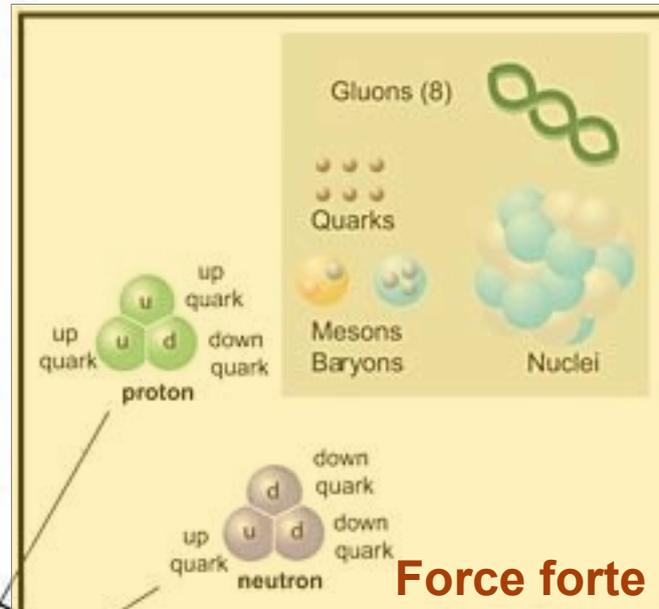
Force faible



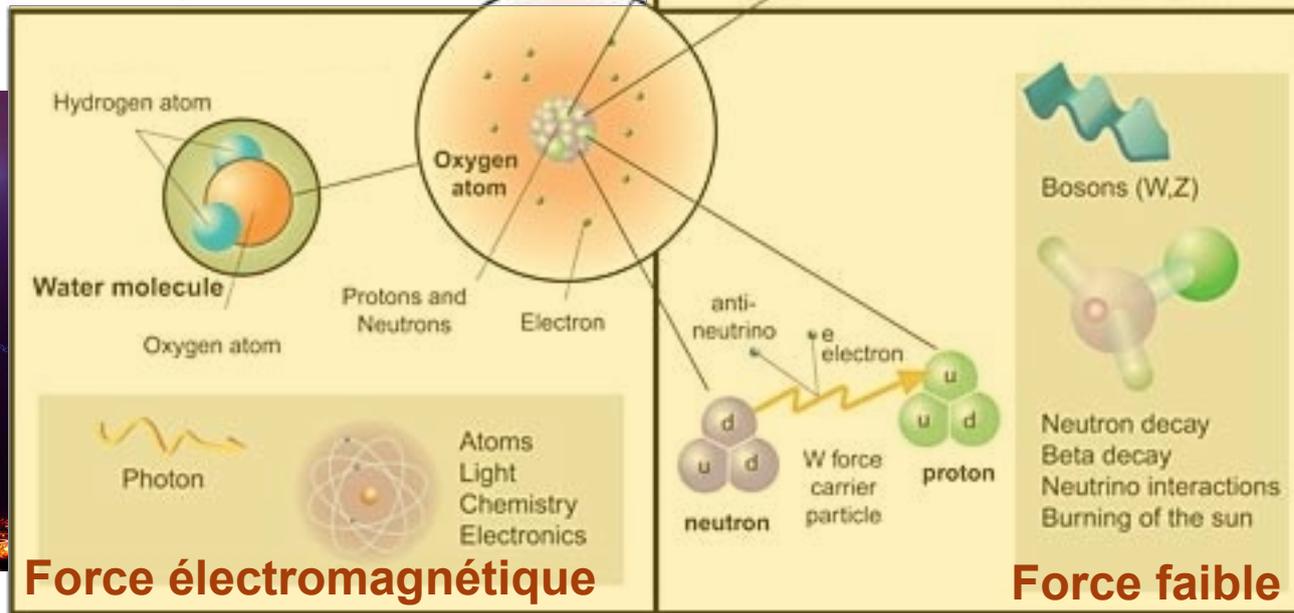
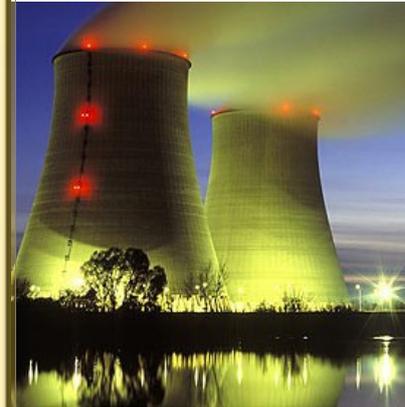
Les forces



Force gravitationnelle

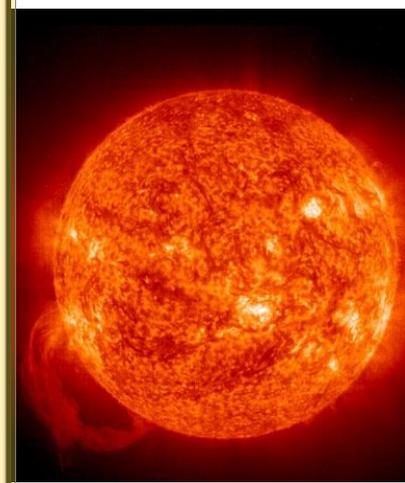


Force forte

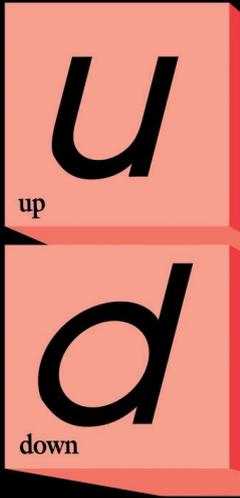


Force électromagnétique

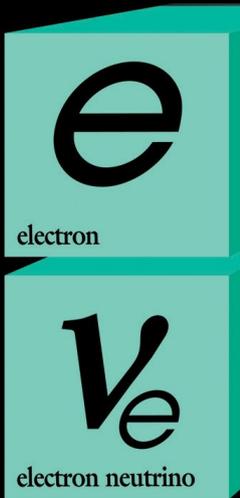
Force faible



Quarks



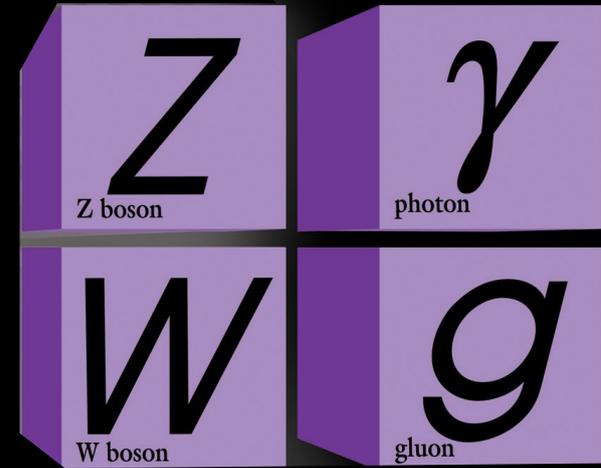
+ anti-matière



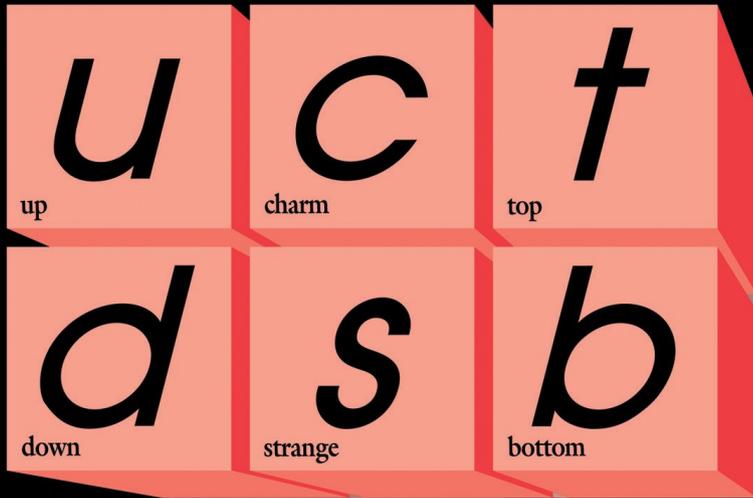
Leptons

Le modèle standard

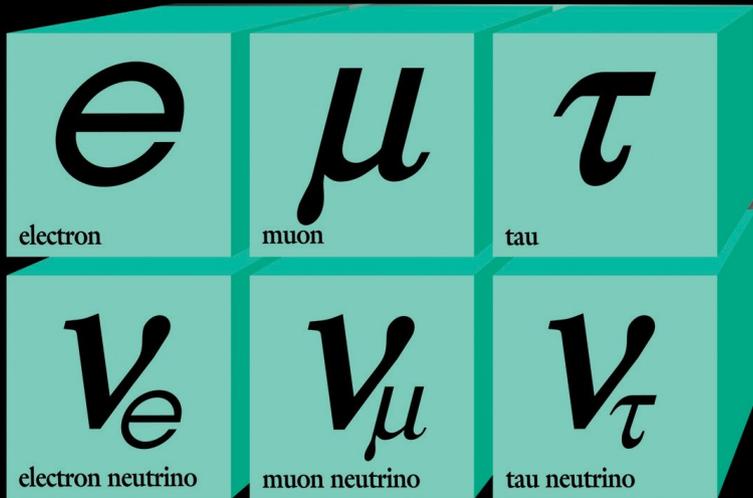
Forces



Quarks



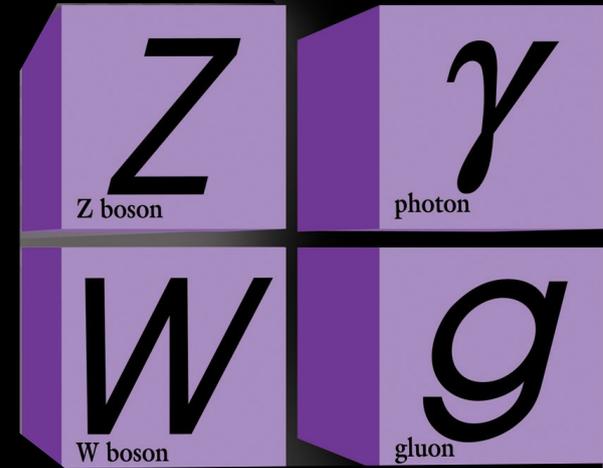
+ anti-matière



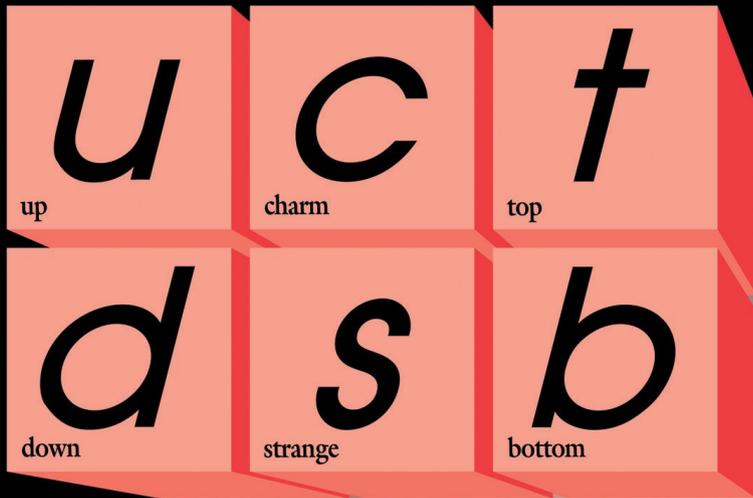
Leptons

Le modèle standard

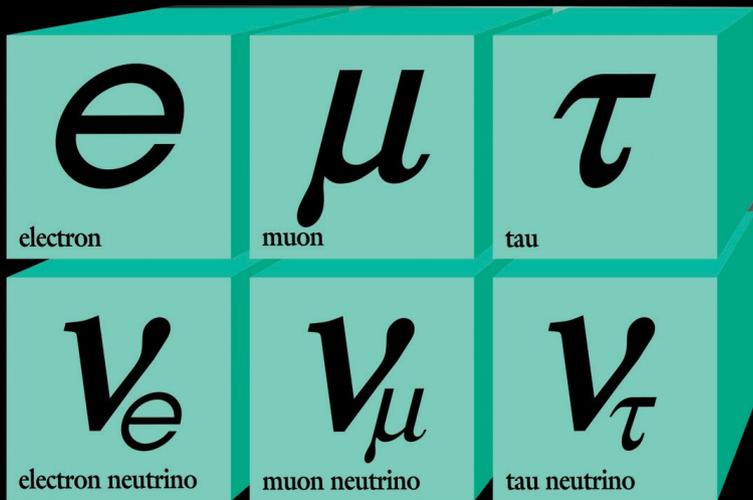
Forces



Quarks



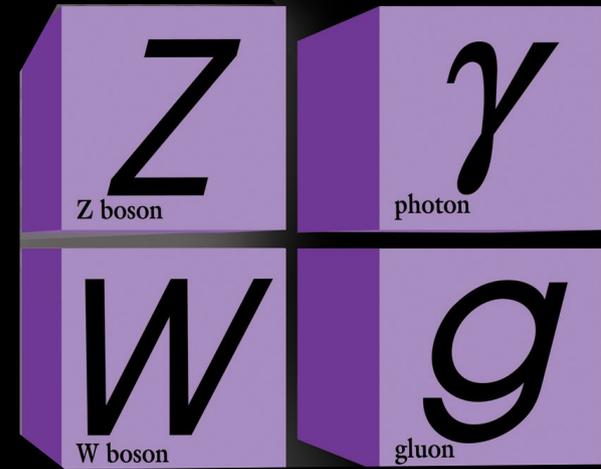
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

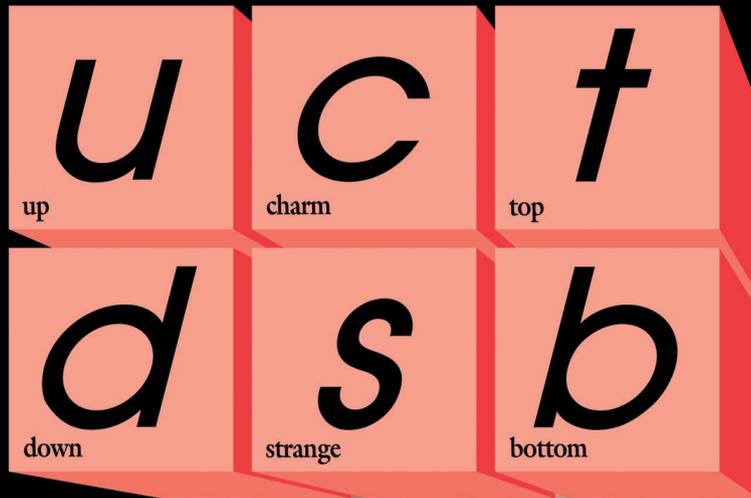
Forces



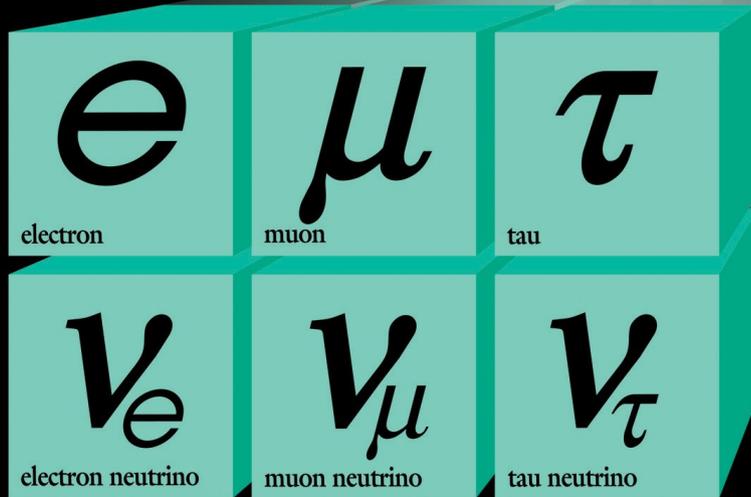
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

Quarks

Le modèle standard

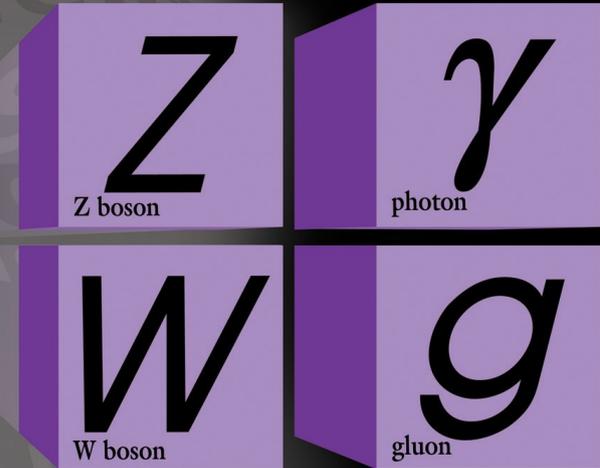


+ anti-matière



Leptons

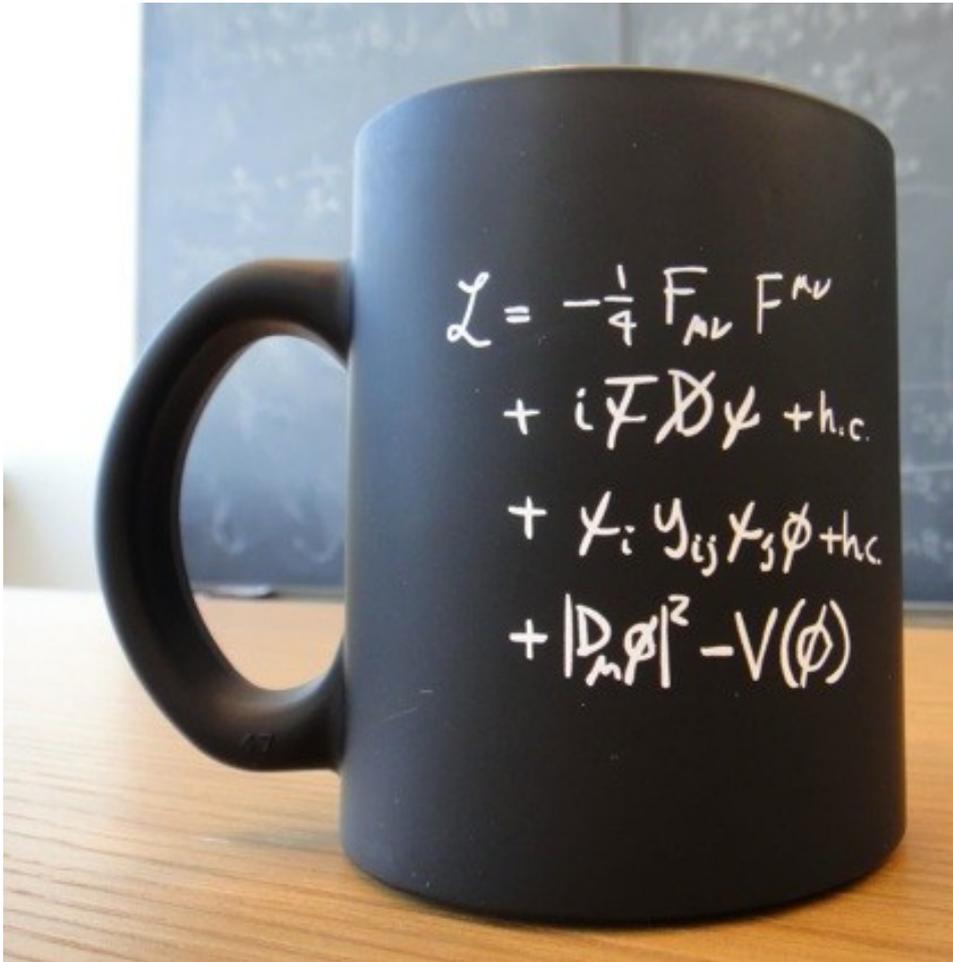
Forces



Solution : rajouter un champ de Higgs

Le modèle standard

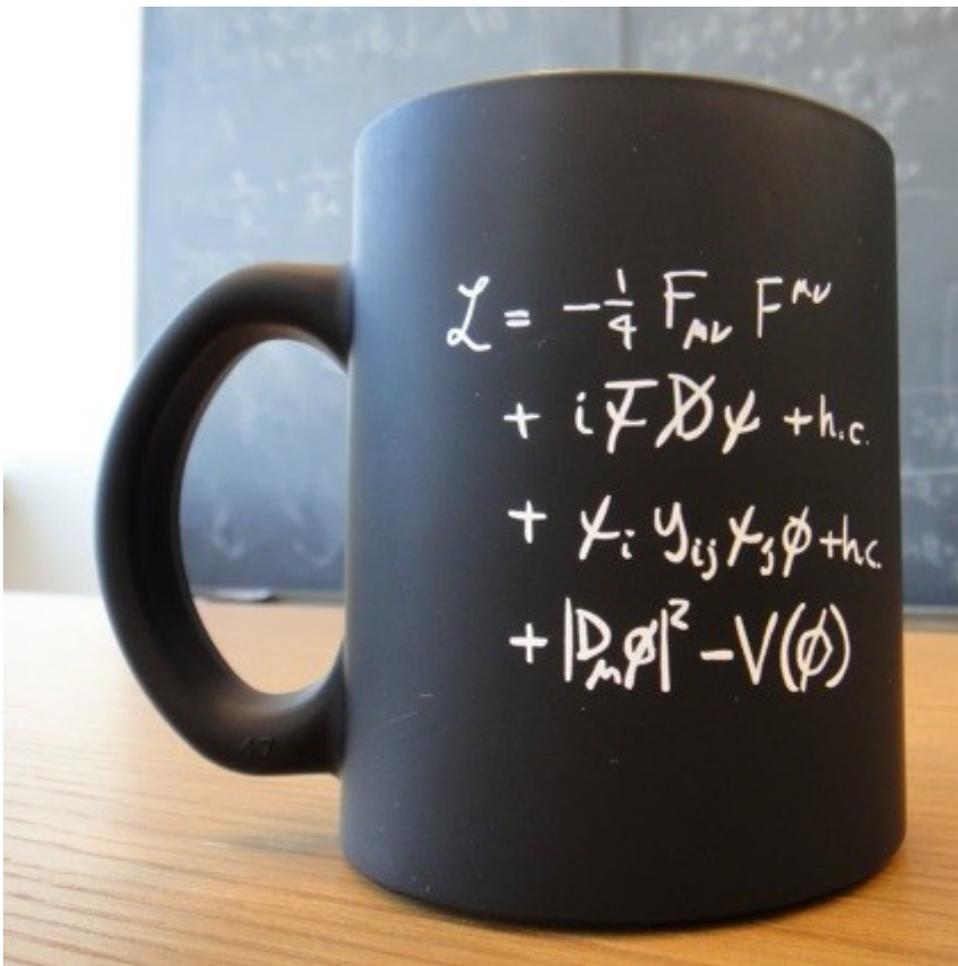
- Version synthétique



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^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \\ & \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\ & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - 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_\nu^- \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^2} 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^2}{c_w^2} (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}{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{2}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{e}^\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^2}{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^2}{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_\lambda^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\ & m_\lambda^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_\lambda^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\ & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\ & \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{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^2} \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{V}^+ V^+ + \bar{V}^0 V^0 - \bar{V}^- V^- + \bar{V}^0 V^0] \end{aligned}$$

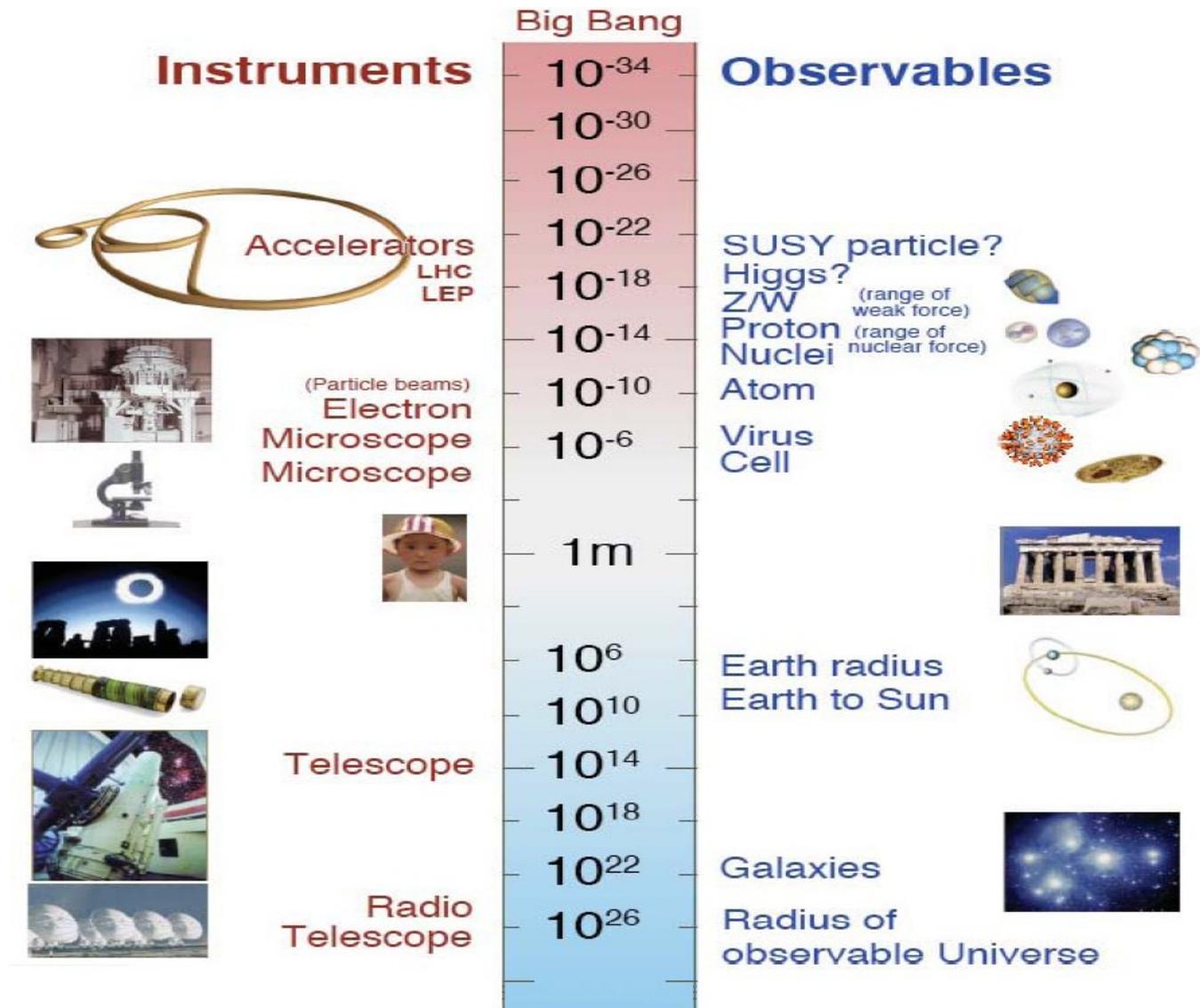
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :

- ▶ longueur d'onde associée $\lambda = h/p$

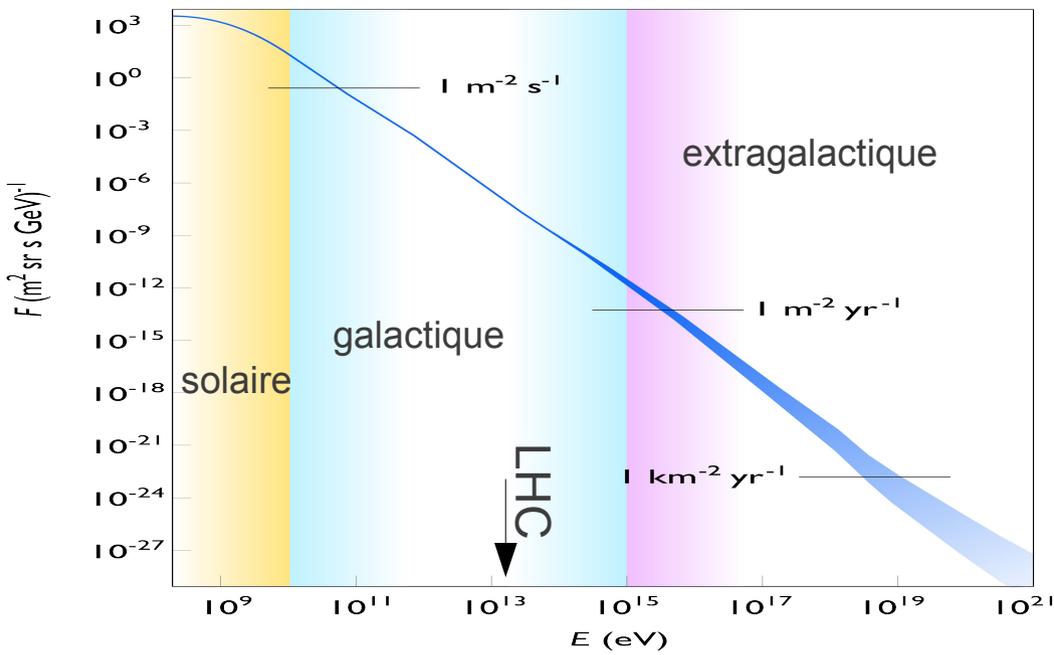
- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶ $E = mc^2$

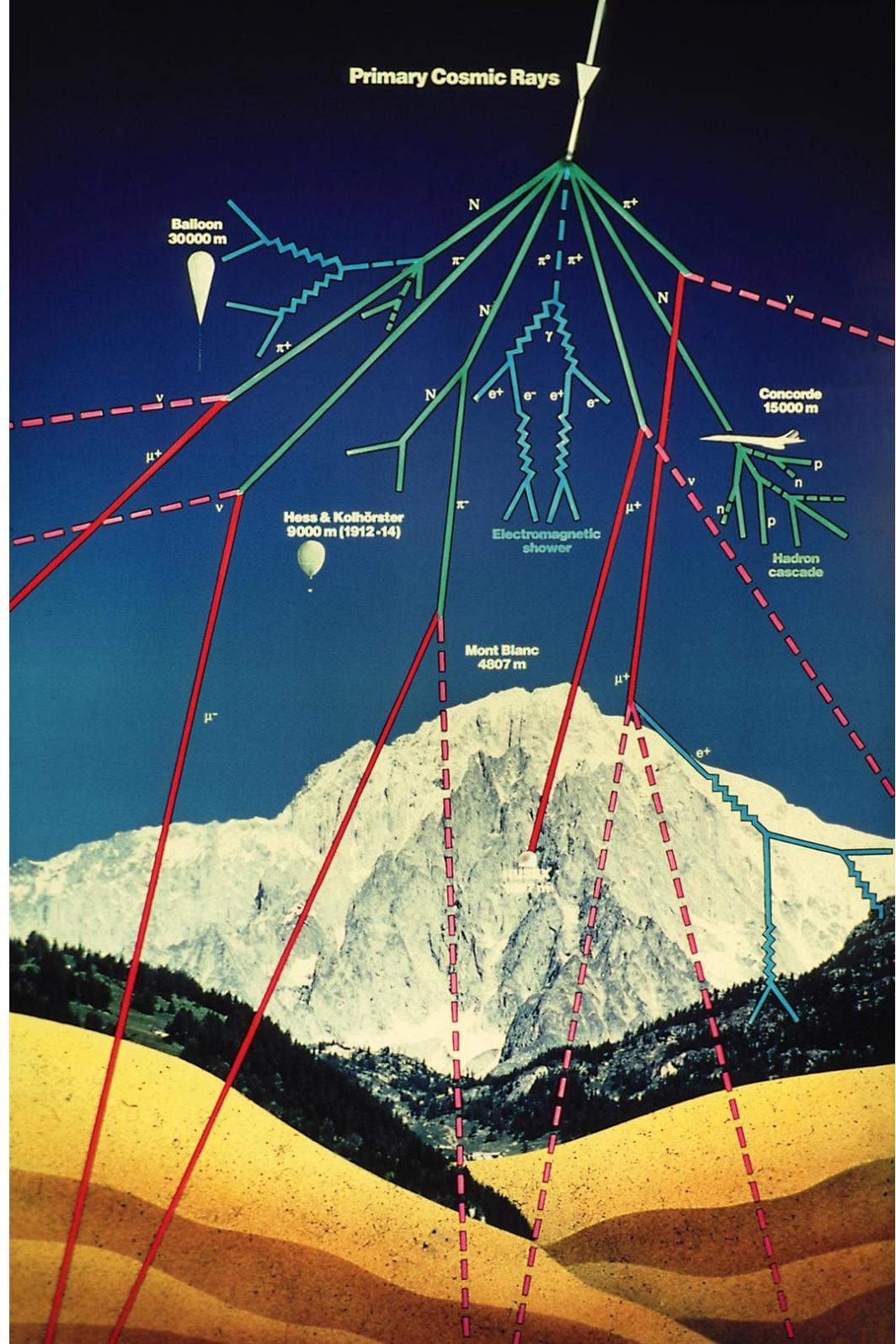


Accélérateur naturel

- Rayons cosmiques de très haute énergie
- Découverts par Hess en 1912
- Avantage : énergies faramineuses
- Problème : hasard



- Détails avec José/Damien



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

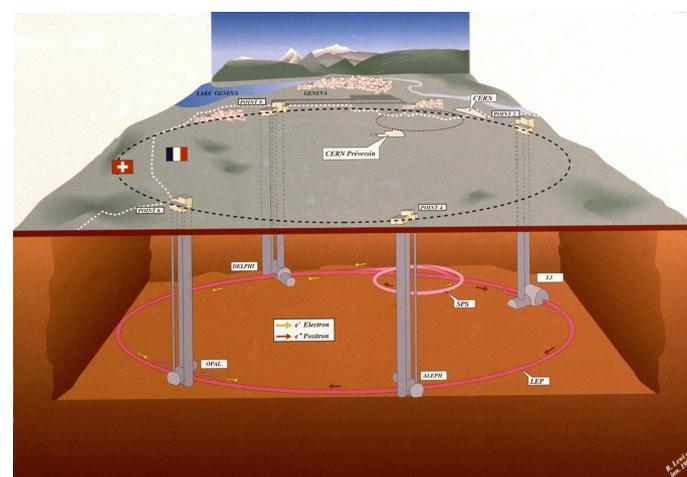
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions e^+e^-
- ▶ 1989-2000

- Le Tevatron

- ▶ Fermilab, Chicago
- ▶ Collisions proton-antiproton
- ▶ 1983-2011

- Le LHC

- ▶ Au CERN
- ▶ Collisions proton-proton
- ▶ Depuis 2009

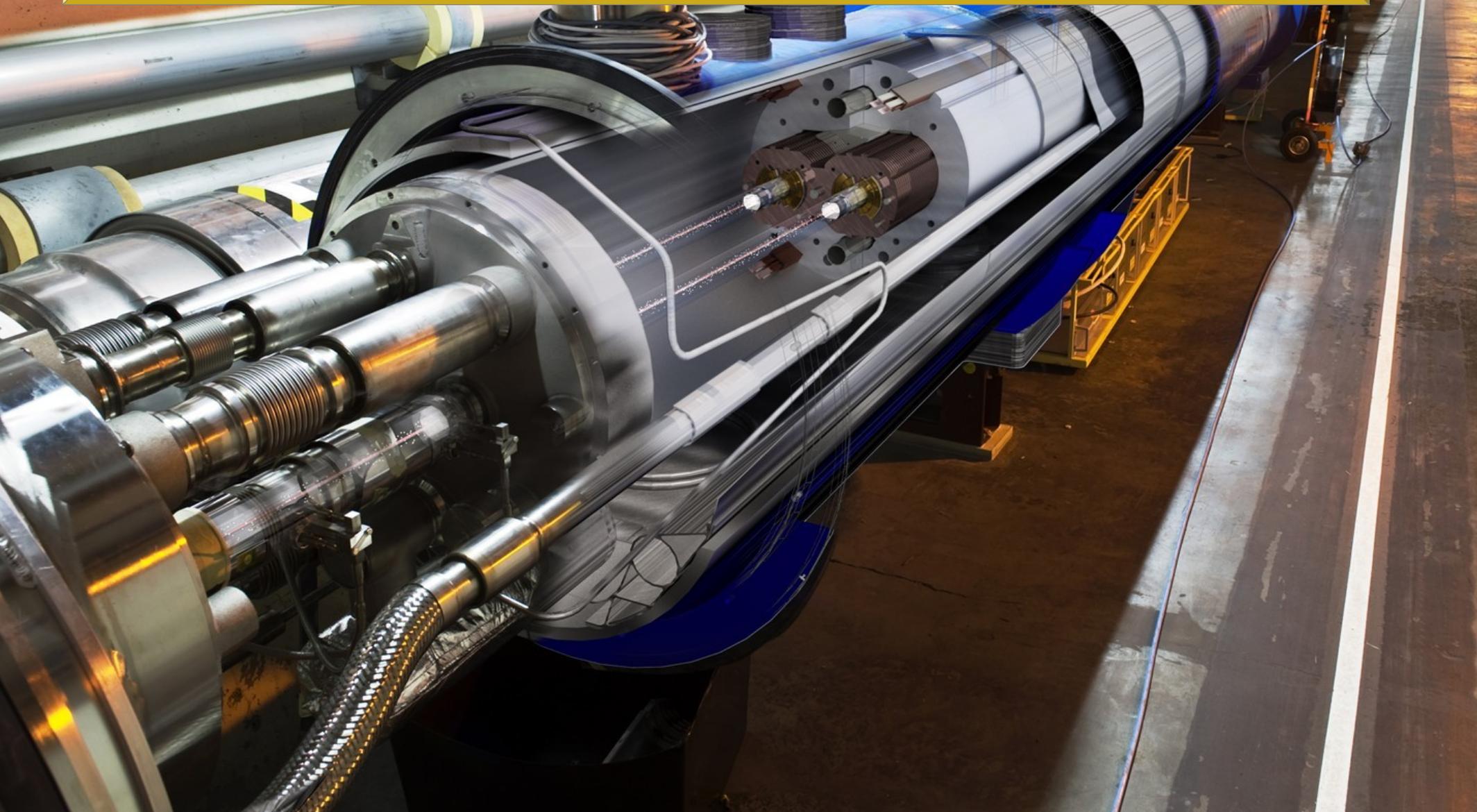


Le LHC : la machine à superlatifs



Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



Le LHC : la machine à superlatifs



27 km de circonférence
100 m sous terre

Le LHC : la machine à superlatifs



Protons voyageant à
99,9999991%
de la vitesse de la lumière,
soit 11000 tours
par seconde

Le LHC : la machine à superlatifs



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C), plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K), avec de l'hélium superfluide pour rendre les câbles supraconducteurs et générer un champ magnétique de 8,3 T (200000 fois le champ magnétique terrestre)

Le LHC : la machine à superlatifs



1232 dipôles.
Un dipôle :
15 m de long
35 tonnes

Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs :
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil



Le LHC : la machine à superlatifs

Vide presque parfait (10^{-13} atm) :
pression 10 fois plus faible
que sur la Lune



Le LHC : la machine à superlatifs



Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol,
mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

| | |
|----------------|--|
| 1984 | Études préliminaires |
| 1992 | Création de la collaboration ATLAS |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 1996-1998 | Approbation des quatre grandes expériences |
| 1998-2008 | Construction du LHC et des détecteurs |
| Septembre 2008 | Mise en service, panne cryogénique |
| Octobre 2009 | Redémarrage |
| Mars 2010 | Premières collisions à 7 TeV |
| Fin 2012 | Fin des collisions à 8 TeV |
| Fin 2014 | Redémarrage à 13-14 TeV |
| 2018-2020 | Fin des collisions à luminosité nominale ? |
| 2020-2030 | Phase à haute luminosité ? |

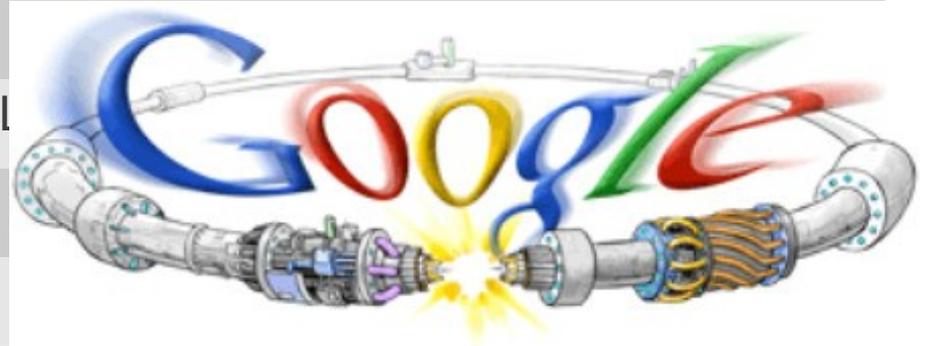
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



| | |
|----------------|---|
| 1984 | Études préliminaires |
| 1992 | Création de la collaboration ATLAS |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 1996-1998 | Approbation des quatre grands accélérateurs |
| 1998-2008 | Construction du LHC et des détecteurs |
| Septembre 2008 | Mise en service, panne cryogénique |
| Octobre 2009 | Redémarrage |
| Mars 2010 | Premières collisions à 7 TeV |
| Fin 2012 | Fin des collisions à 8 TeV |
| Fin 2014 | Redémarrage à 13-14 TeV |
| 2018-2020 | Fin des collisions à luminosité nominale ? |
| 2020-2030 | Phase à haute luminosité ? |

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

| | |
|----------------|--|
| 1984 | Études préliminaires |
| 1992 | Création de la collaboration ATLAS |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 1996-1998 | Approbation des |
| 1998-2008 | Construction du L |
| Septembre 2008 | Mise en service, |
| Octobre 2009 | Redémarrage |
| Mars 2010 | Premières collisions à 7 TeV |
| Fin 2012 | Fin des collisions à 8 TeV |
| Fin 2014 | Redémarrage à 13-14 TeV |
| 2018-2020 | Fin des collisions à luminosité nominale ? |
| 2020-2030 | Phase à haute luminosité ? |



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

| | |
|----------------|--|
| 1984 | Études préliminaires |
| 1992 | Création de la collaboration ATLAS |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 1996-1998 | Approbation des quatre grandes expériences |
| 1998-2008 | Construction du LHC et des détecteurs |
| Septembre 2008 | Mise en service, panne cryogénique |
| Octobre 2009 | Redémarrage |
| Mars 2010 | Premières collisions à 7 TeV |
| Fin 2012 | Fin des collisions à 8 TeV |
| Fin 2014 | Redémarrage à 13-14 TeV |
| 2018-2020 | Fin des collisions à luminosité nominale ? |
| 2020-2030 | Phase à haute luminosité ? |



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

| | |
|----------------|--|
| 1984 | Études préliminaires |
| 1992 | Création de la collaboration ATLAS |
| 1994 | Approbation par le conseil du CERN |
| 1996-1998 | Approbation des quatre grandes expériences |
| 1998-2008 | Construction du LHC et des détecteurs |
| Septembre 2008 | Mise en service, panne cryogénique |
| Octobre 2009 | Redémarrage |
| Mars 2010 | Premières collisions à 7 TeV |
| Fin 2012 | Fin des collisions à 8 TeV |
| Fin 2014 | Redémarrage à 13-14 TeV |
| 2018-2020 | Fin des collisions à luminosité nominale ? |
| 2020-2030 | Phase à haute luminosité ? |



Le CERN

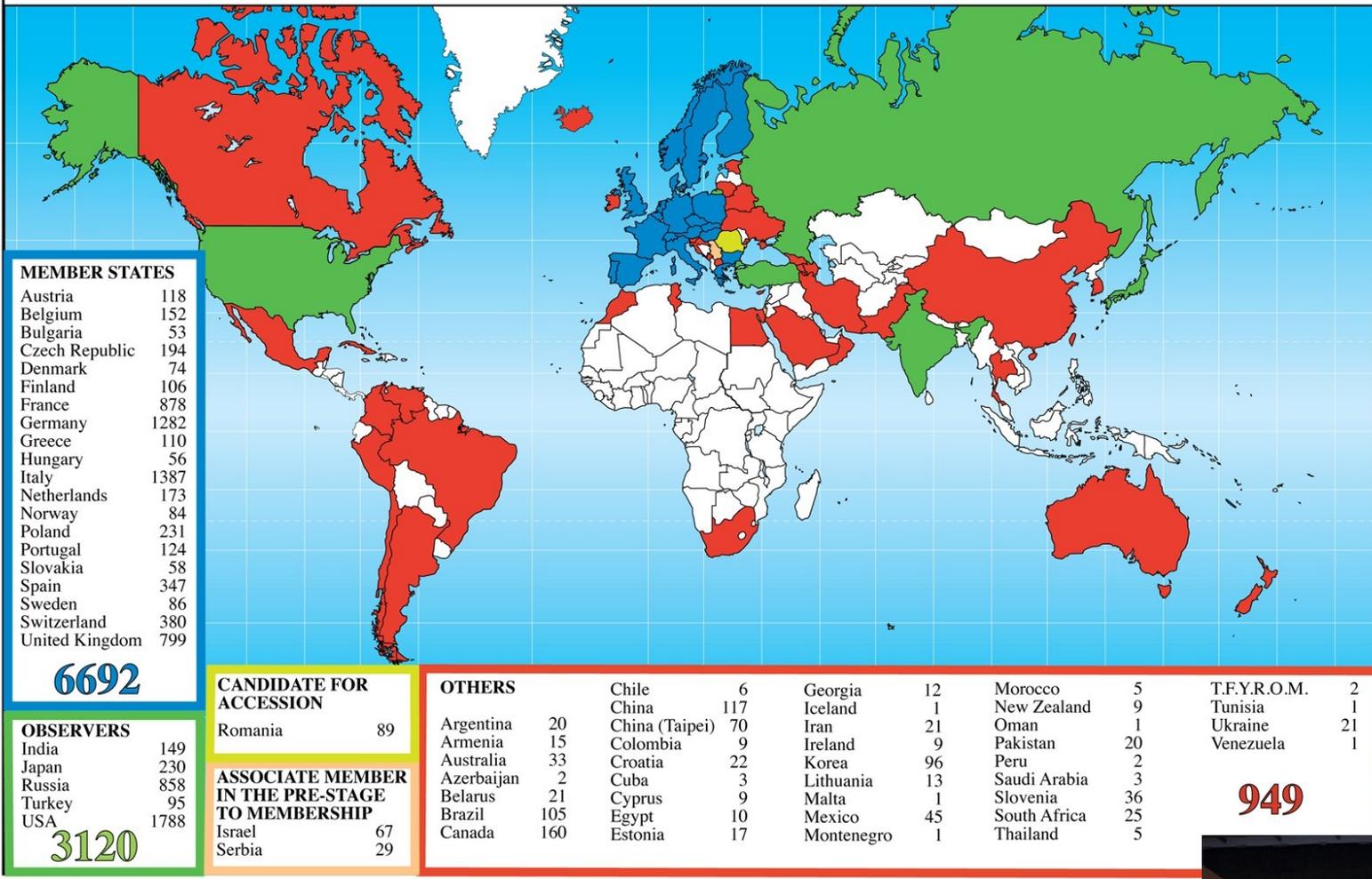


- Organisation européenne pour la recherche nucléaire
- Fondé en 1954
- Basé à Genève (Suisse), sites également en France
- Organisation internationale (les employés sont fonctionnaires internationaux)
- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques
- Plusieurs prix Nobel
- Programme d'étudiant d'été



Le CERN : laboratoire mondial

Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 3 September 2012



- 20 États membres
- Une centaine de nationalités, tout le monde coopère
- 10000 scientifiques



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

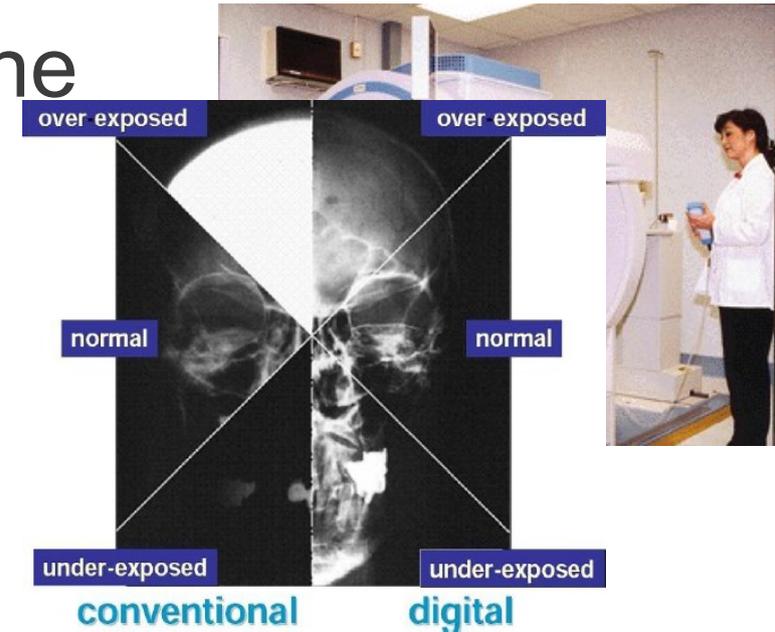
A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
 - ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
 - ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
 - ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
 - ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
 - ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
 - ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

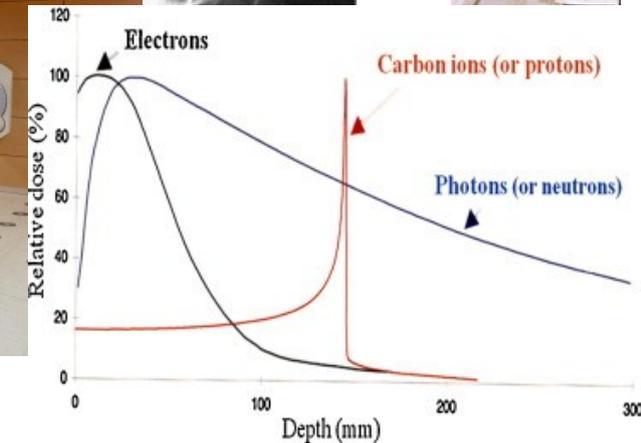
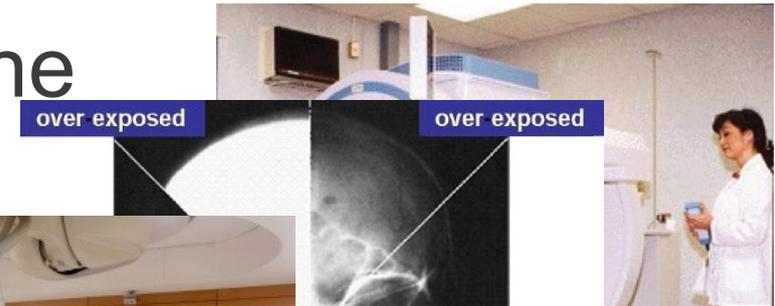


A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- ▶ Le Web a été inventé au CERN



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

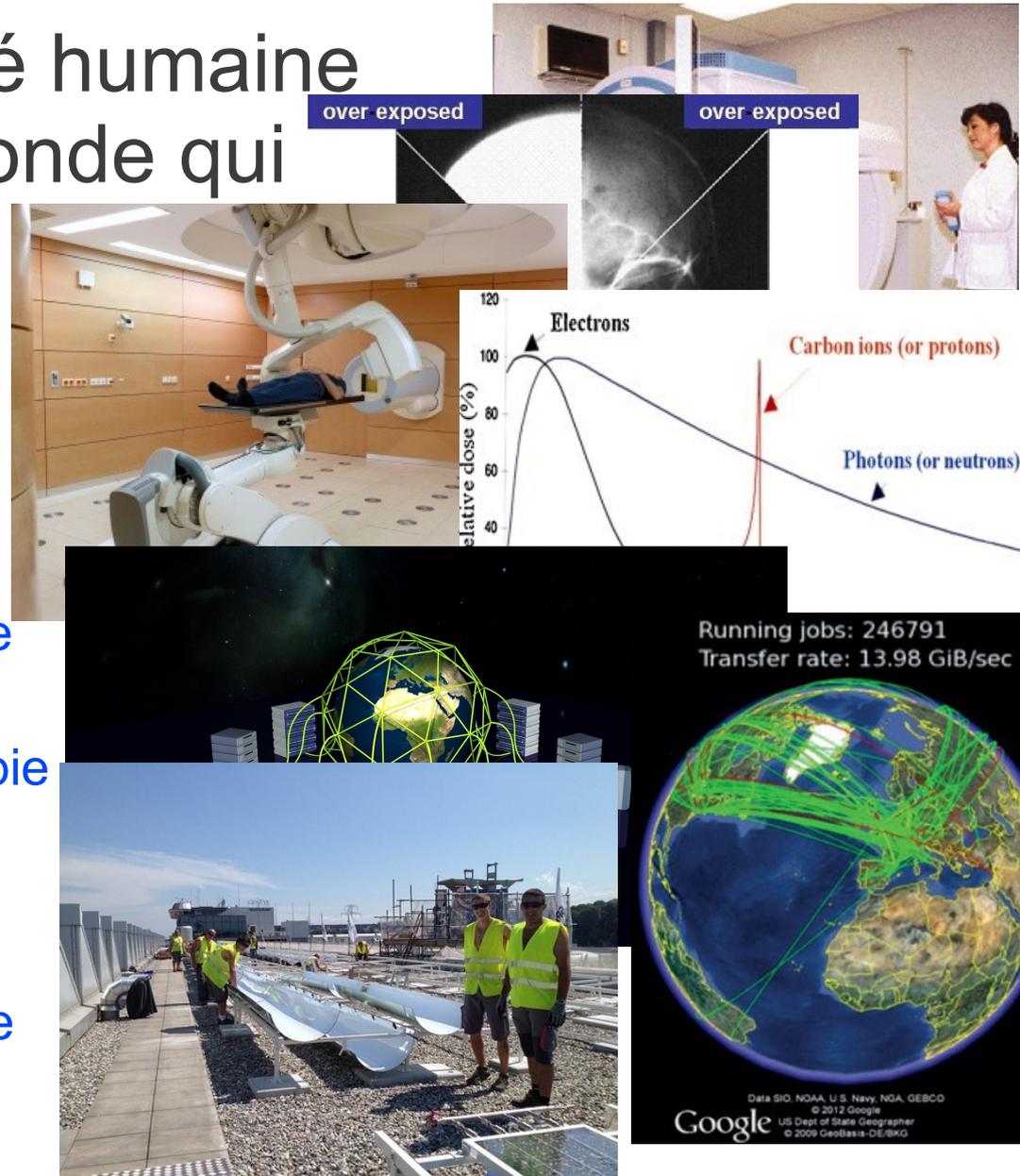
- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- ▶ Le Web a été inventé au CERN



A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

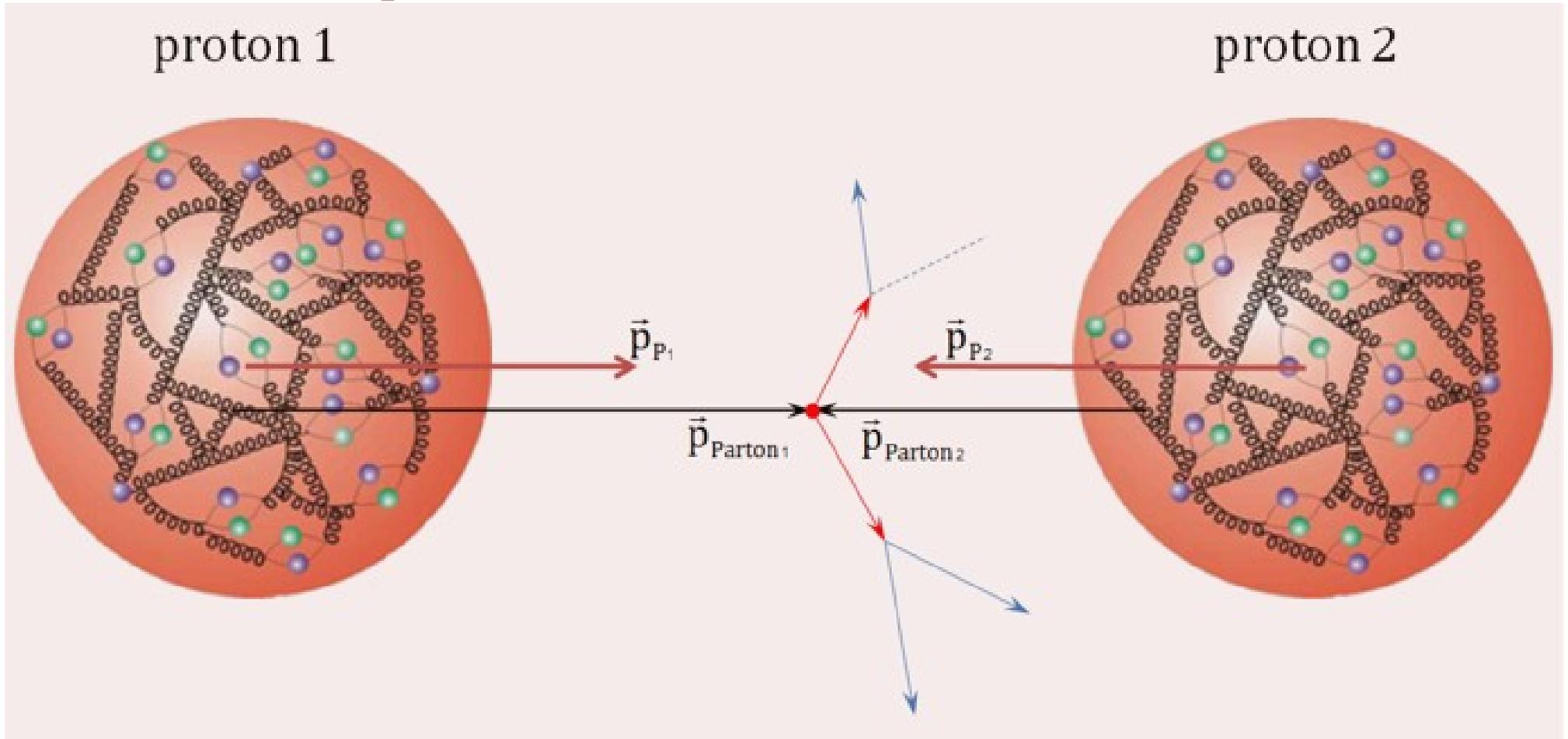
- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- ▶ Le Web a été inventé au CERN



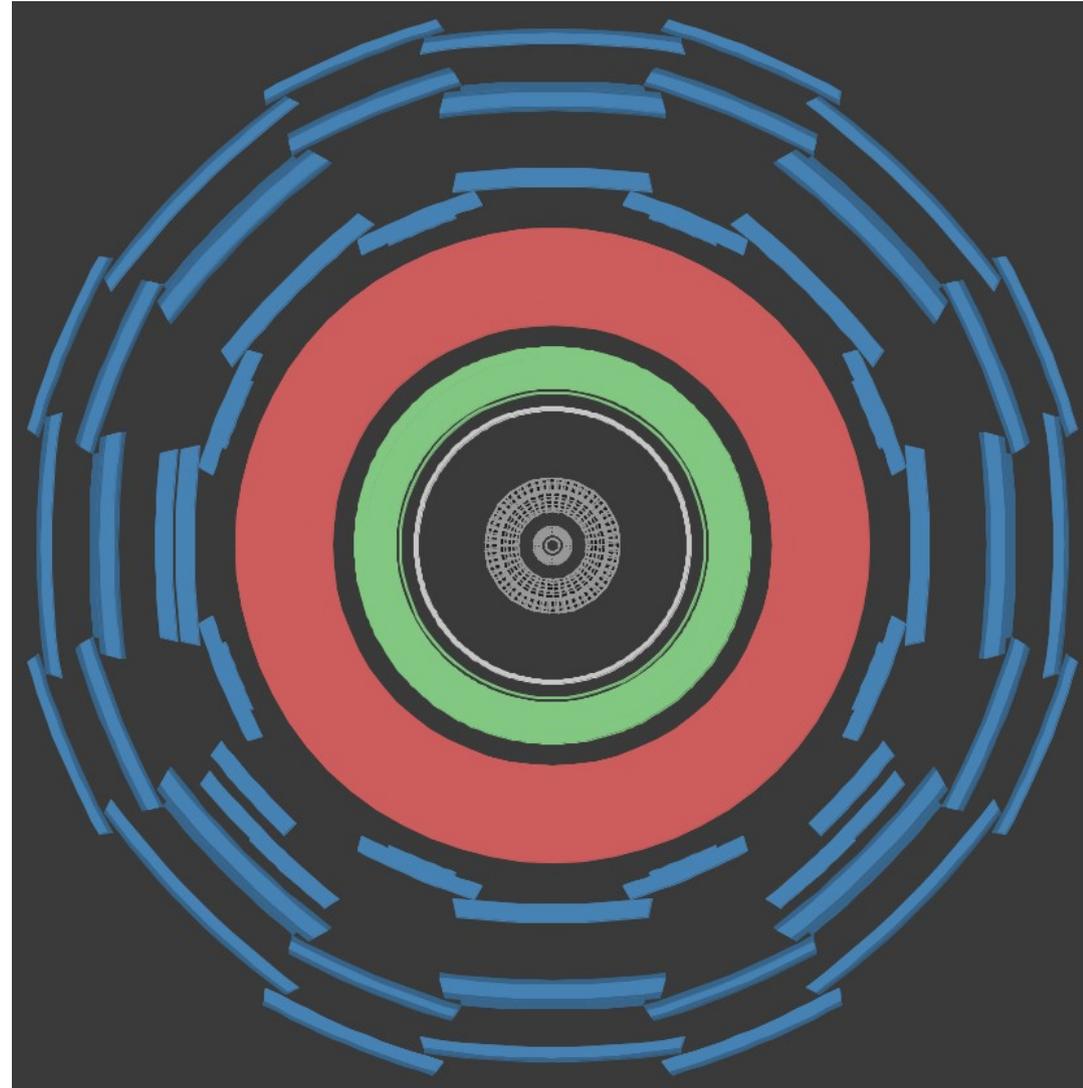
Deux protons se rencontrent...



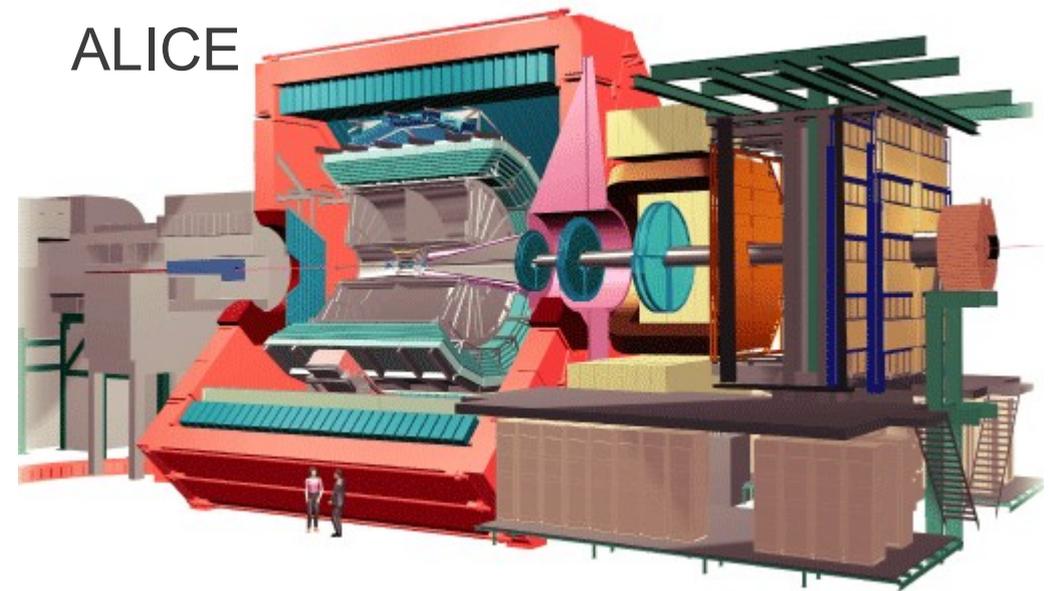
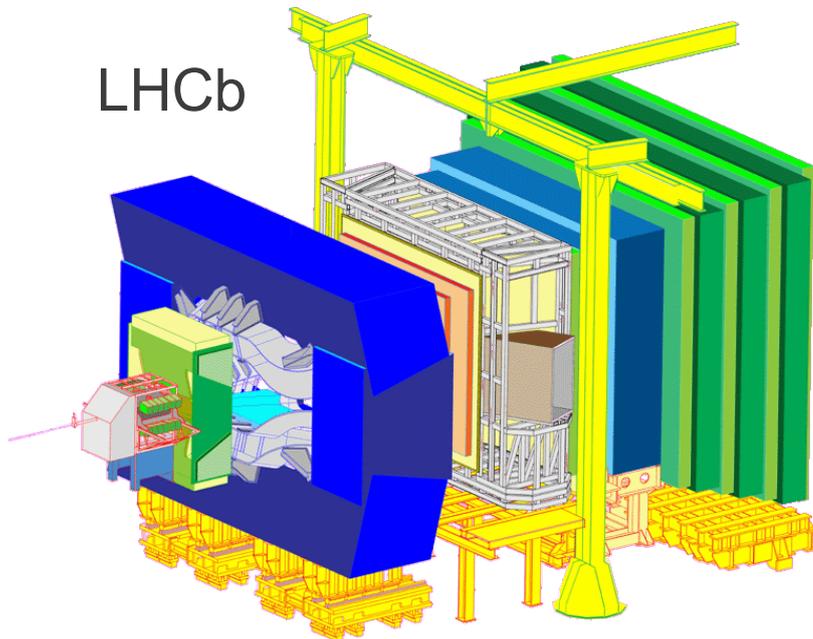
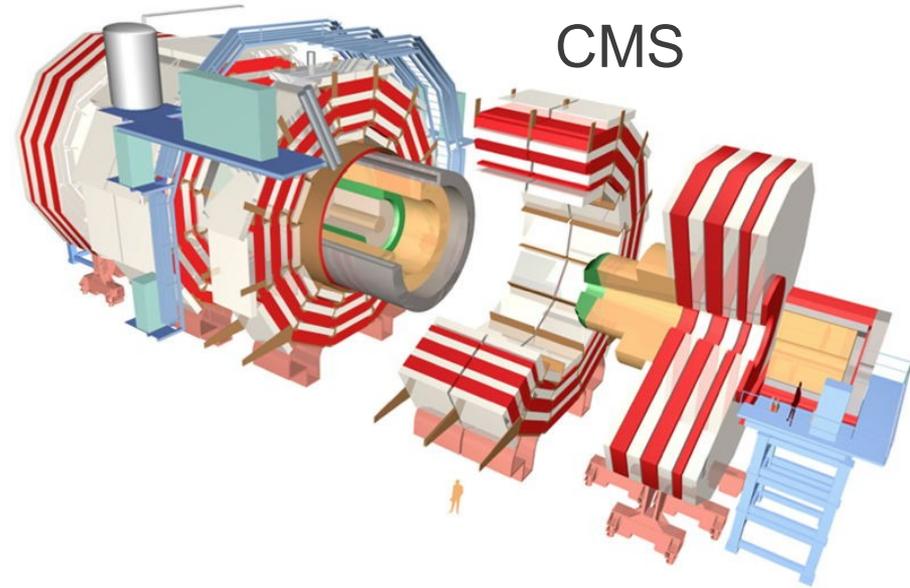
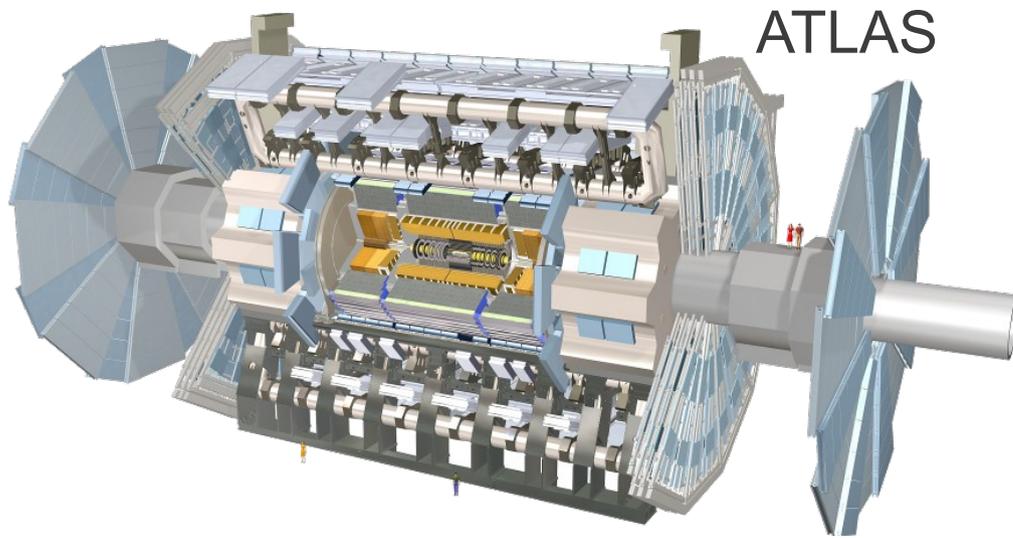
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

- Détecteur interne (trajectographe)
 - ▶ Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
 - ▶ Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
 - ▶ Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- Détecteur à muons
 - ▶ Mesure la charge et l'impulsion des muons



Les détecteurs géants du LHC



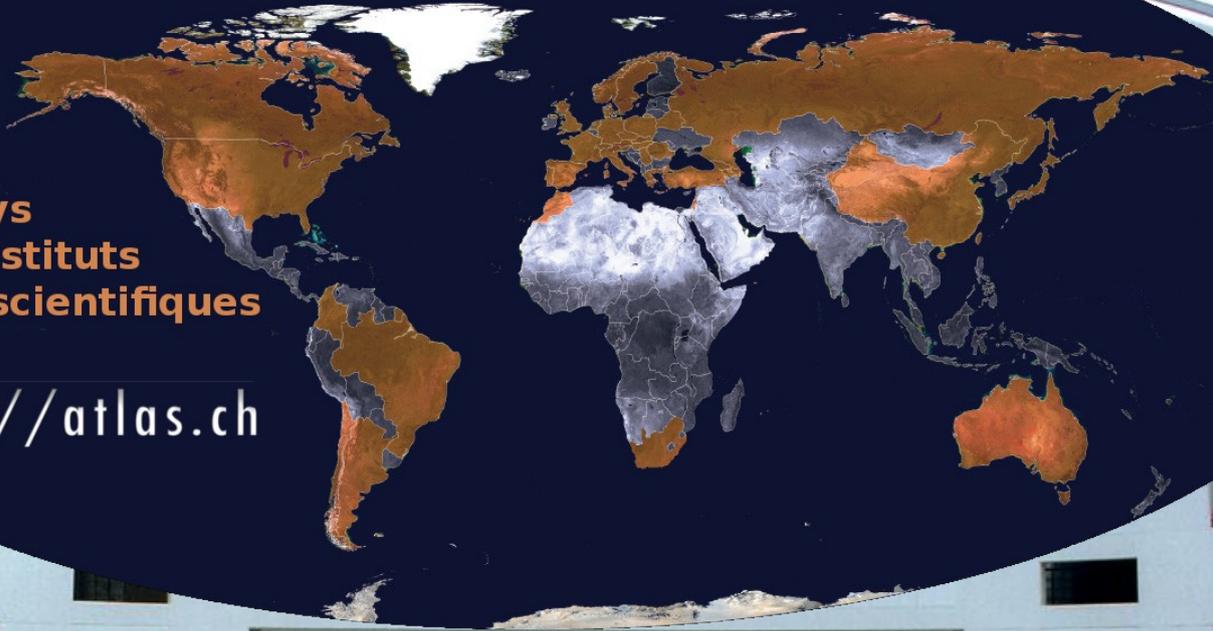
La collaboration ATLAS



La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

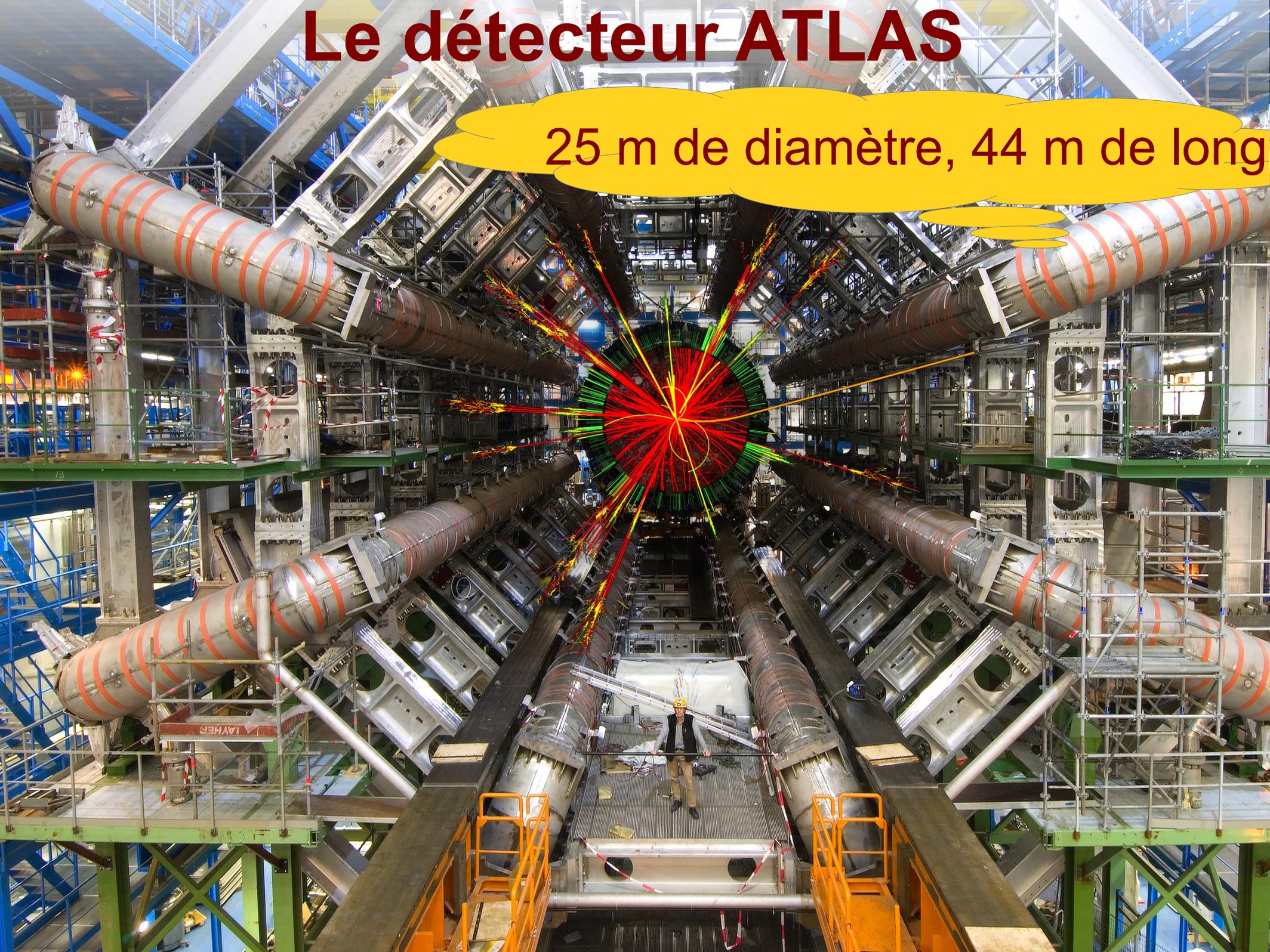


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

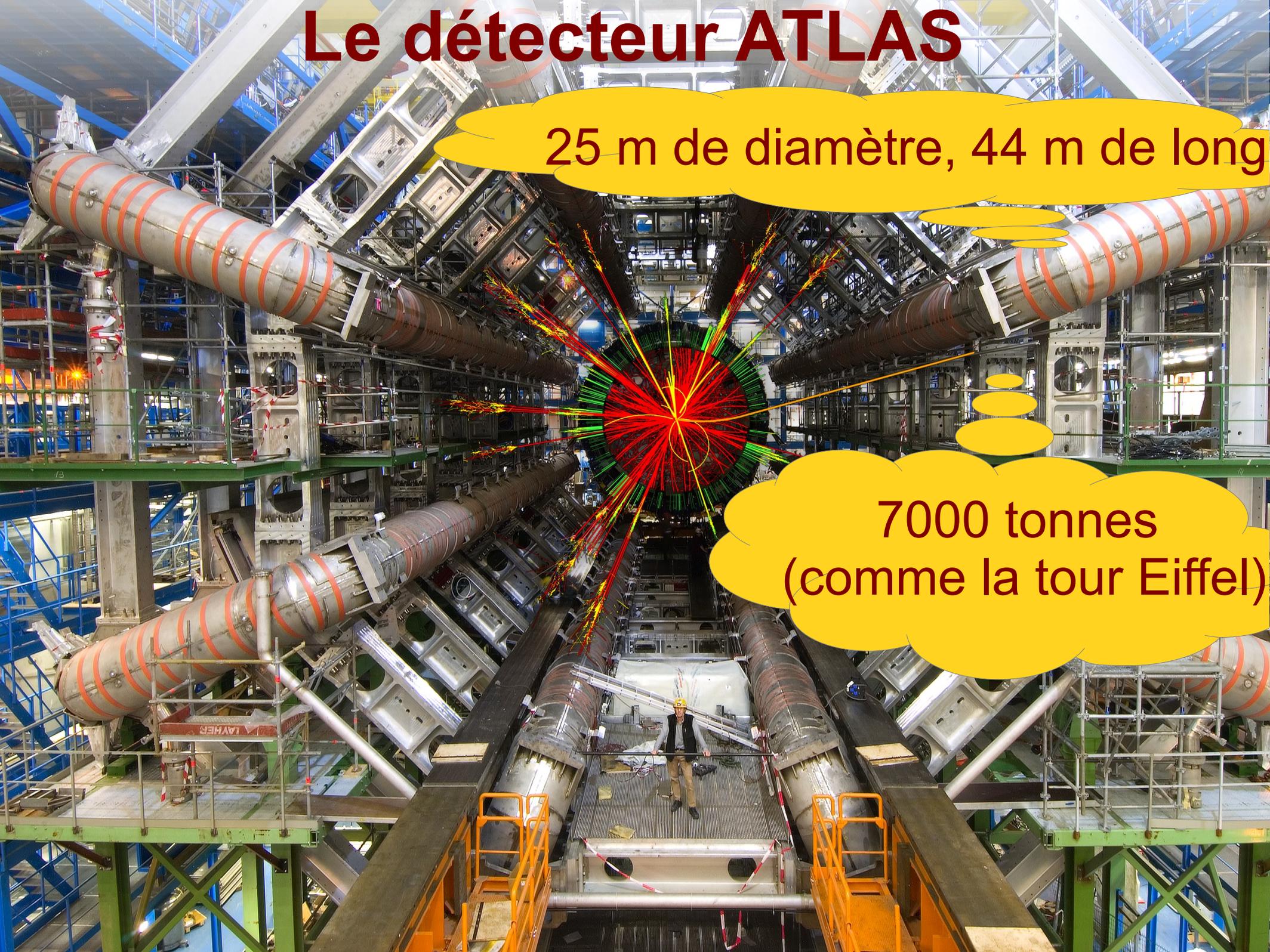
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

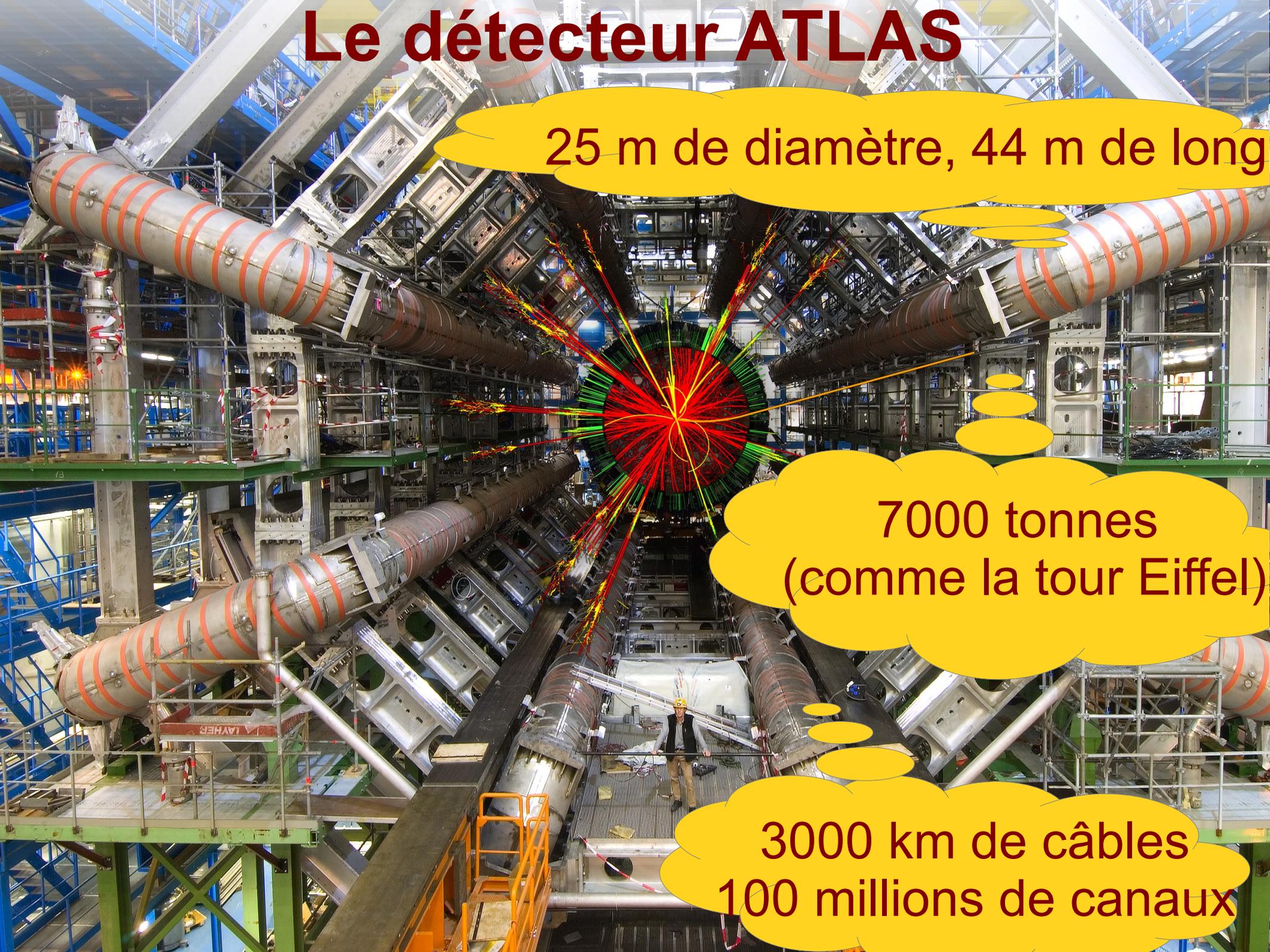


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



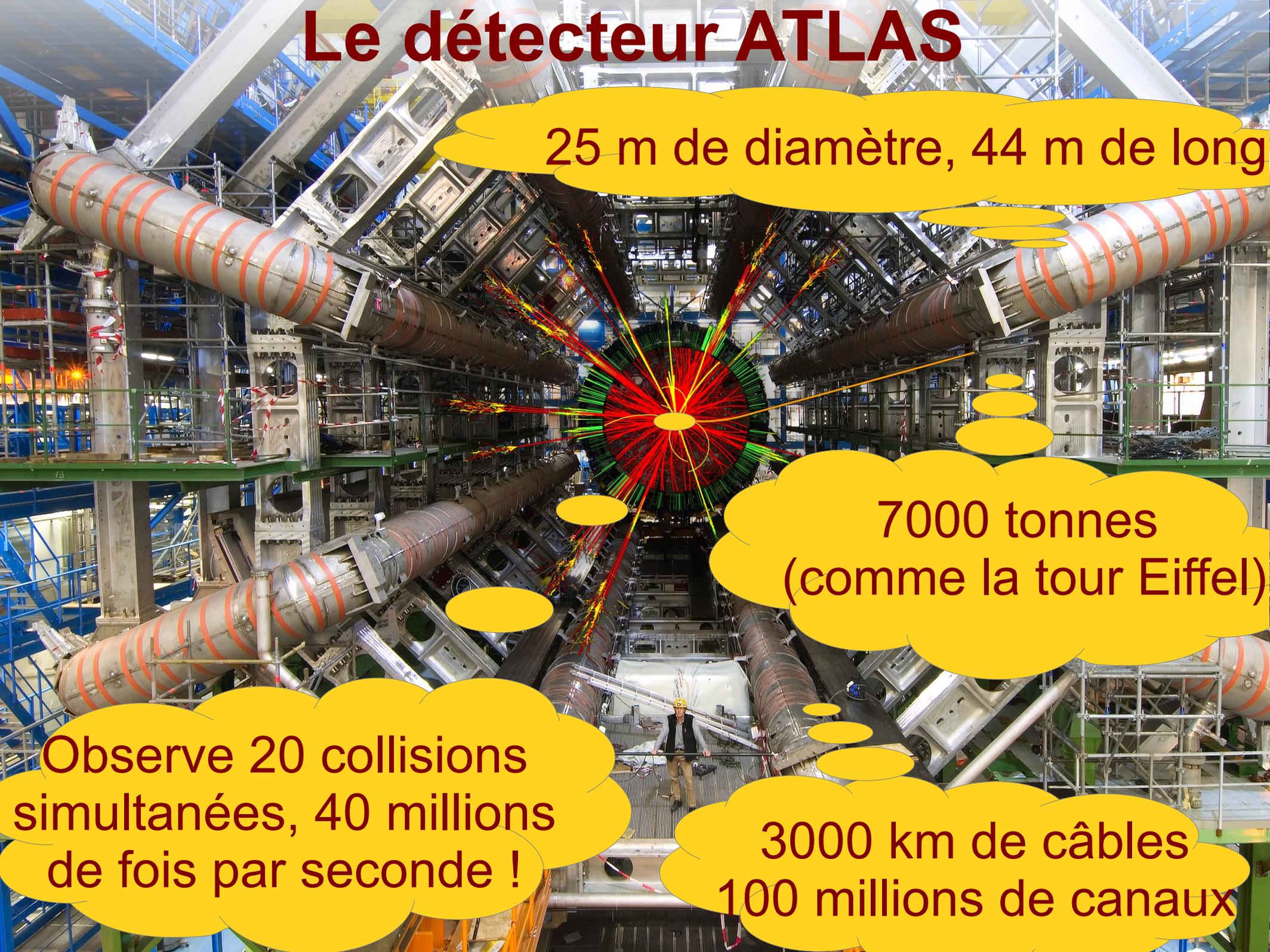
Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux



Le détecteur ATLAS



25 m de diamètre, 44 m de long

En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

Le détecteur ATLAS construit en 1 minute



Le détecteur ATLAS avec des explications



Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m² de silicium

Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



- Argon liquide à -183°C

Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



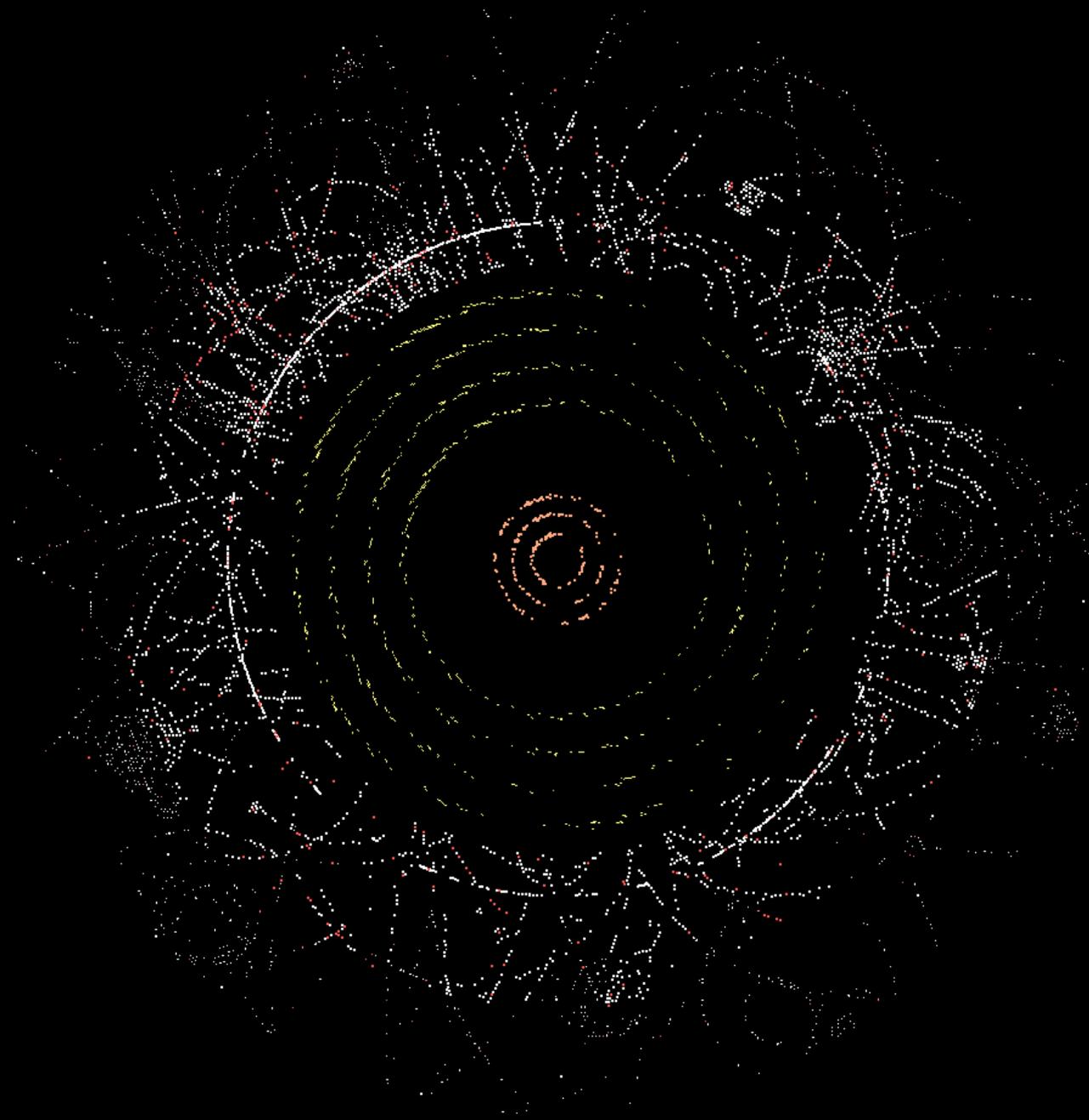
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

Mesurer le passage des particules dans le système à muons



- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

Passage des particules



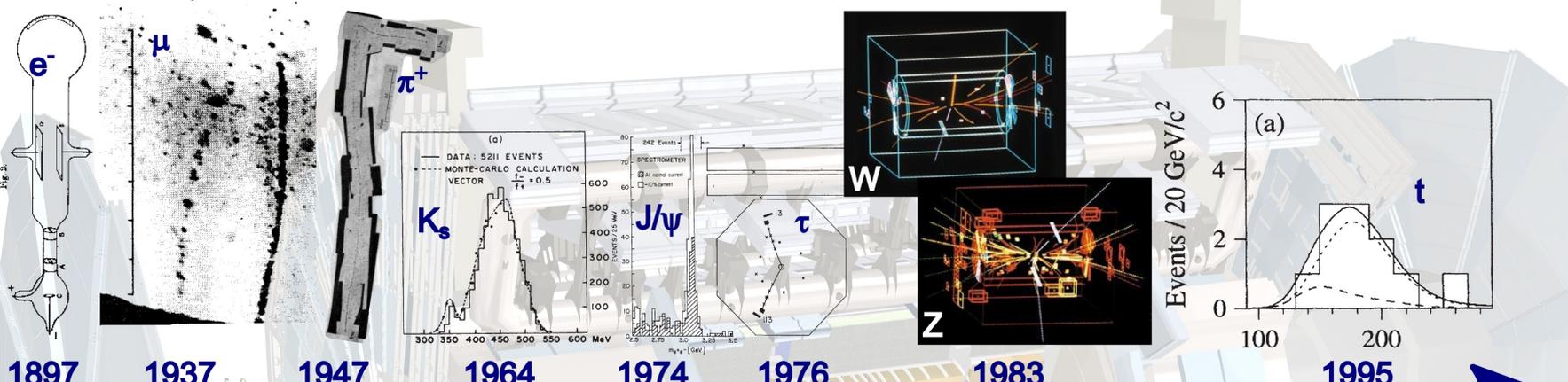
Reconstruction des trajectoires



Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

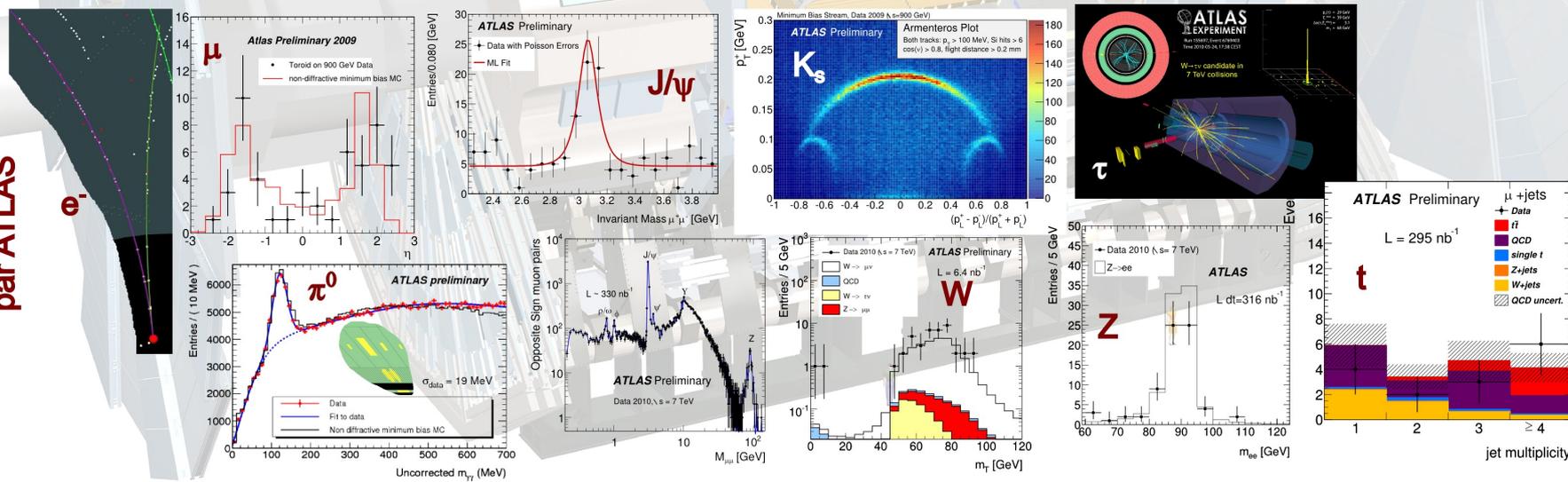
Découverte historique



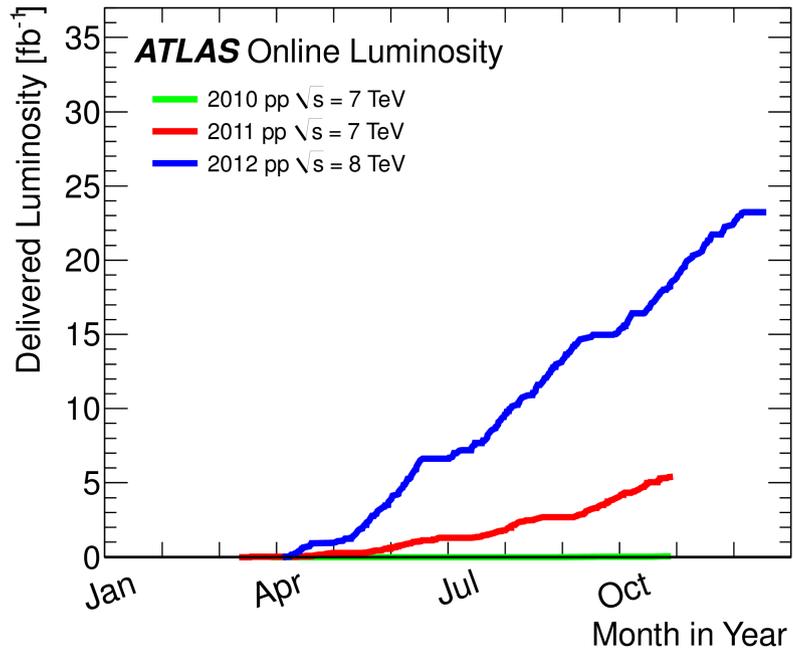
déc 2009

août 2010

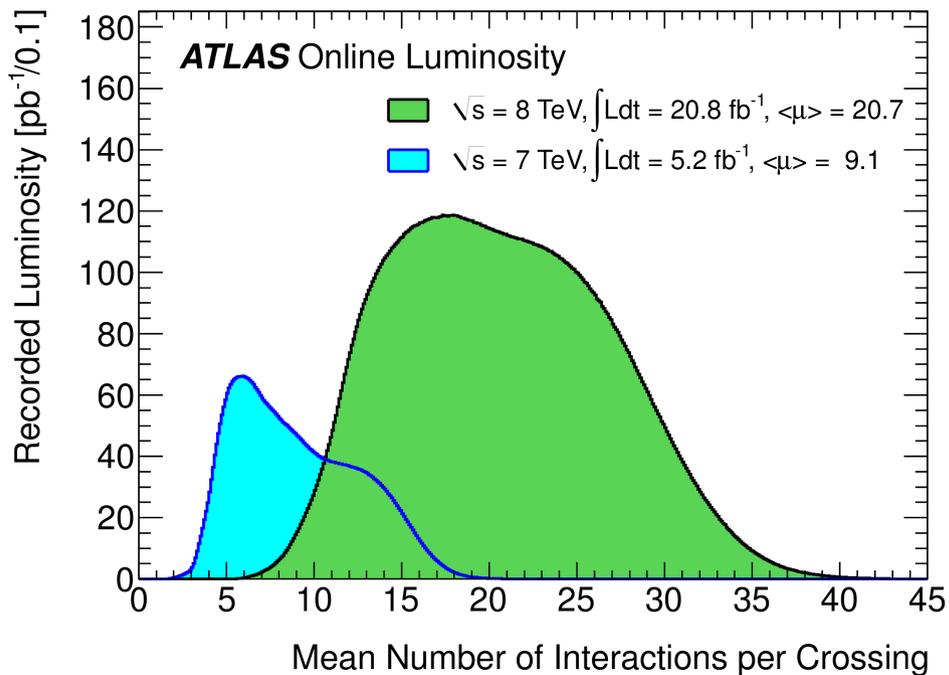
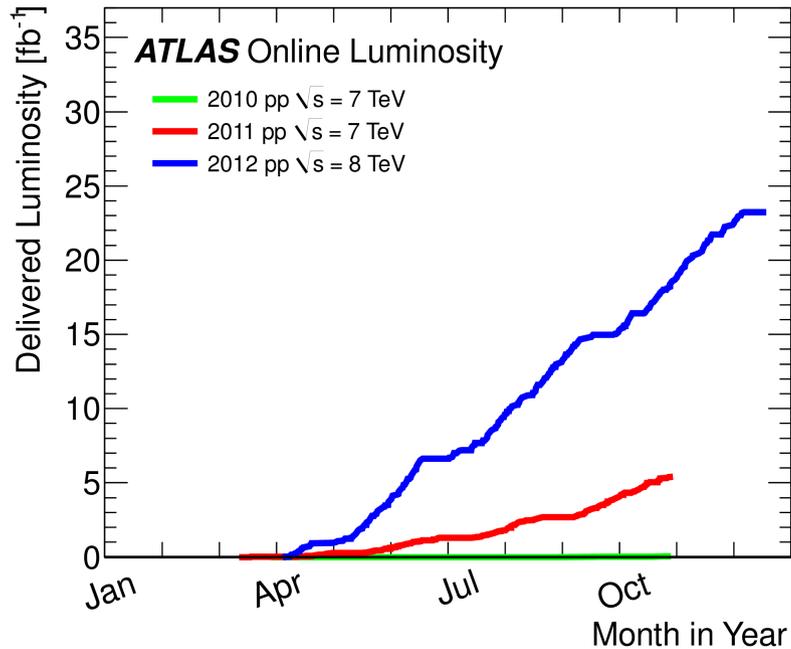
Redécouverte par ATLAS



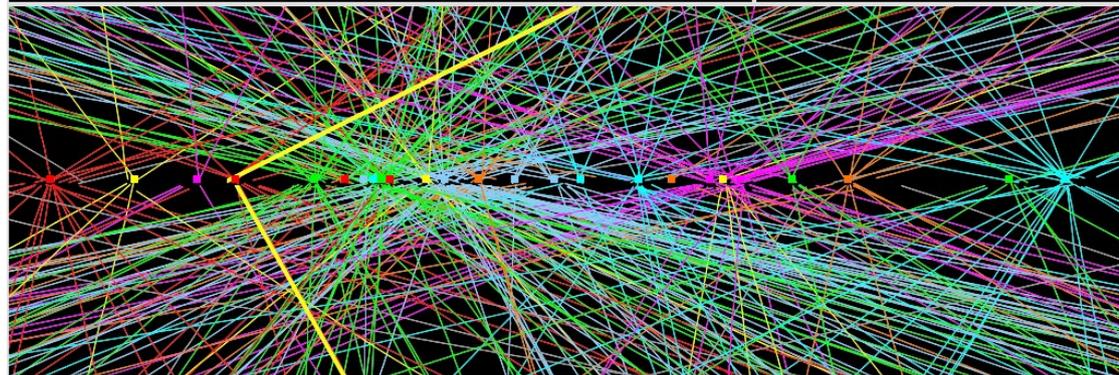
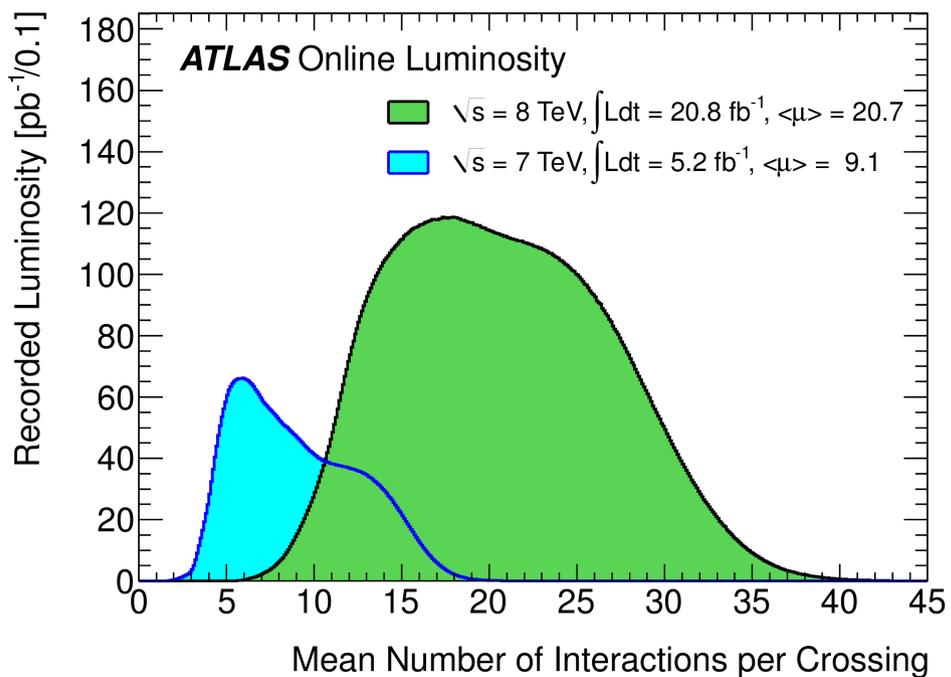
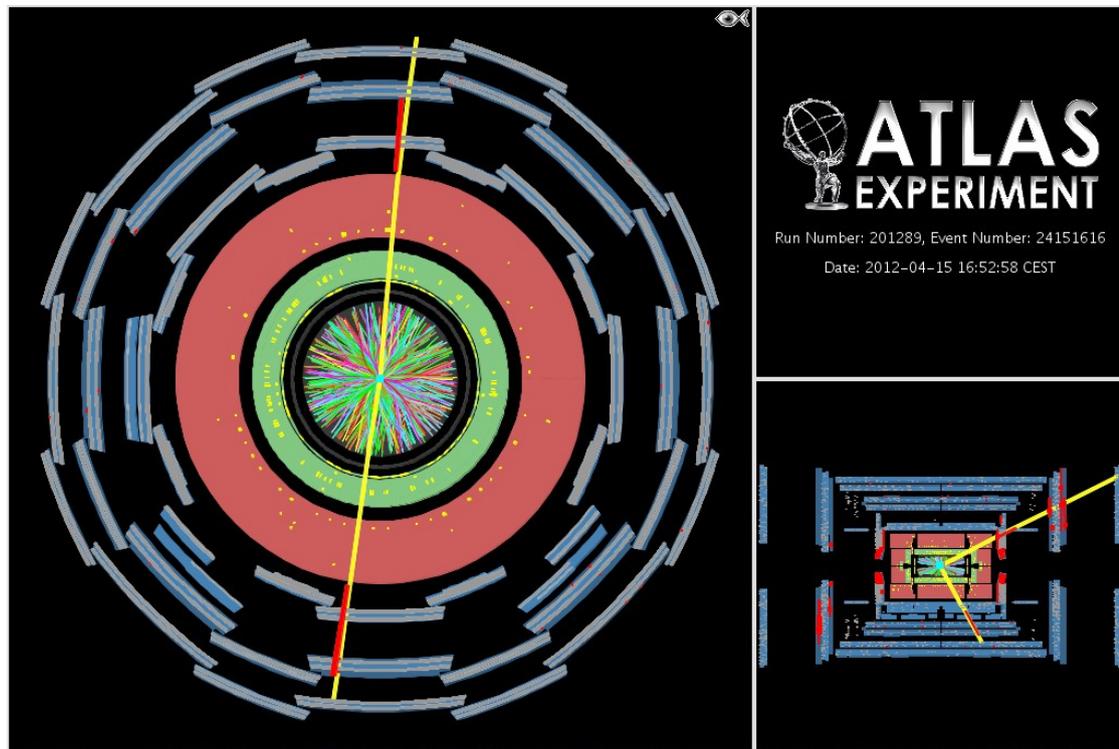
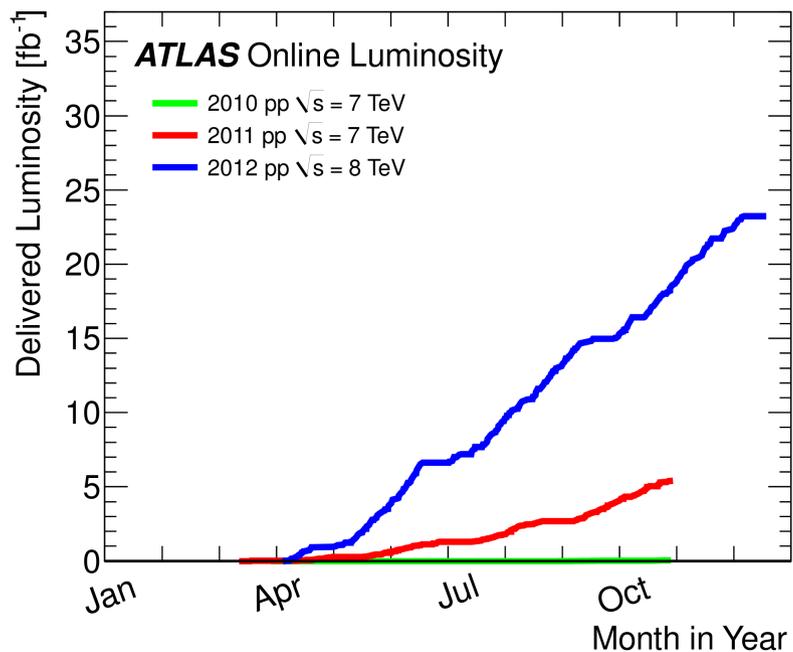
Accumulation des données



Accumulation des données



Accumulation des données

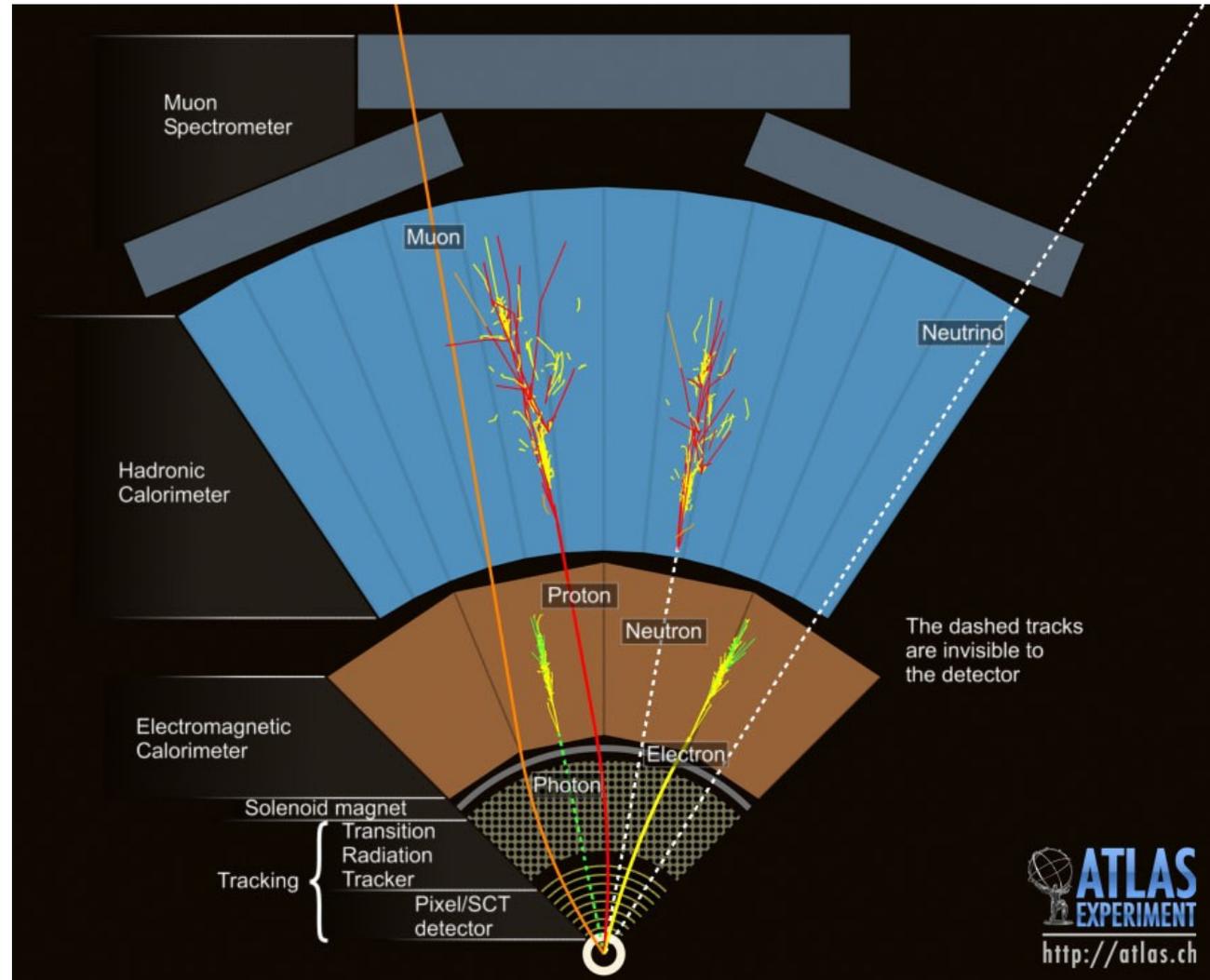
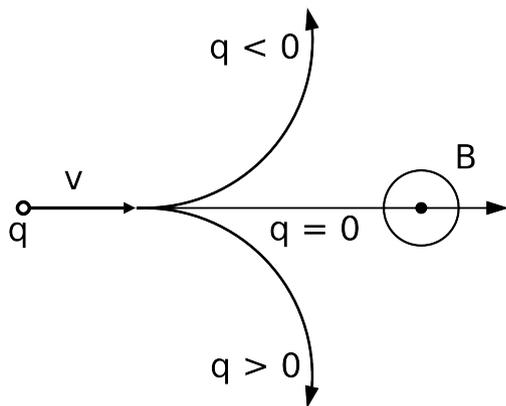


Interaction des particules avec le détecteur

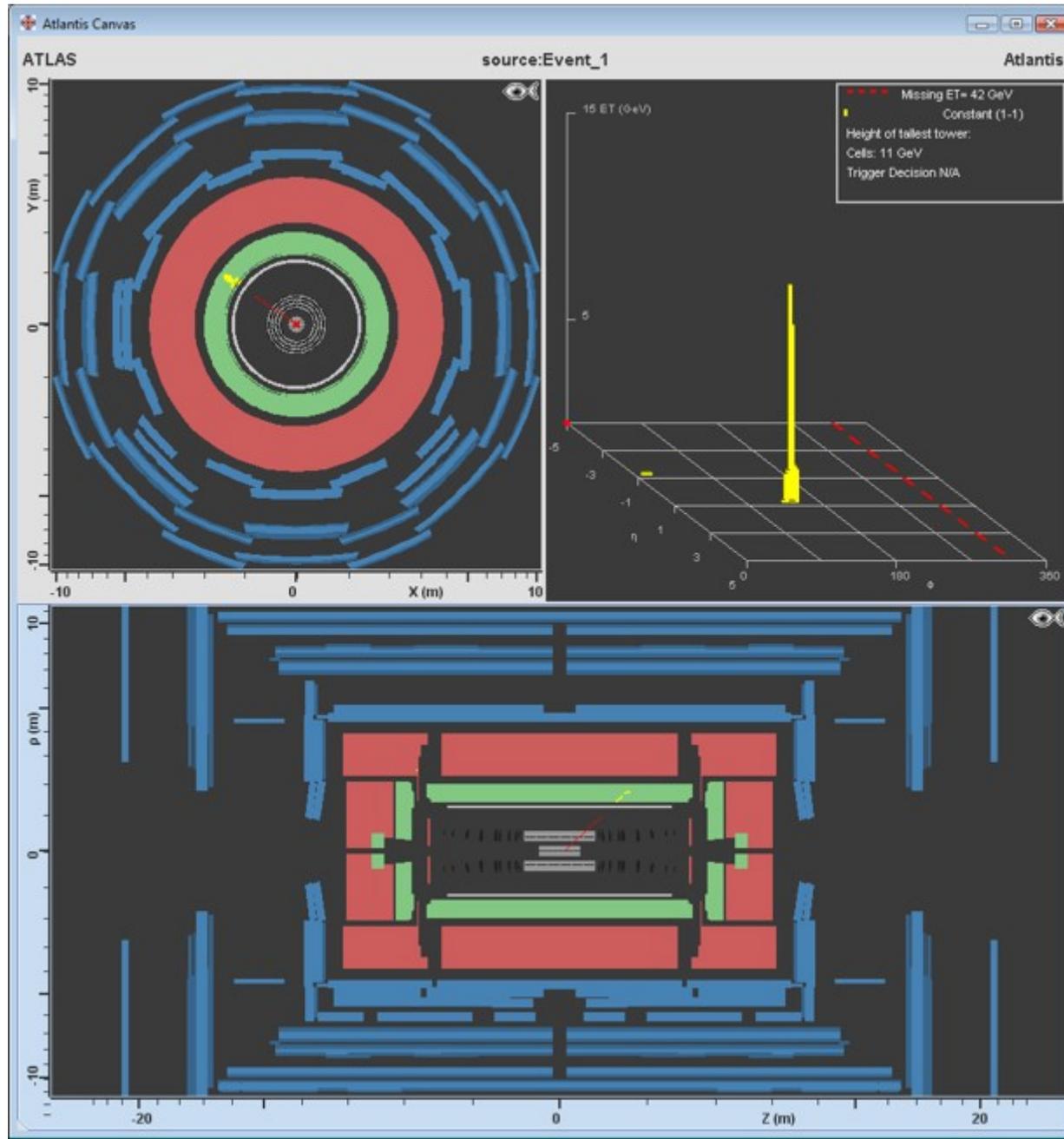


Identifier les électrons/positrons et photons

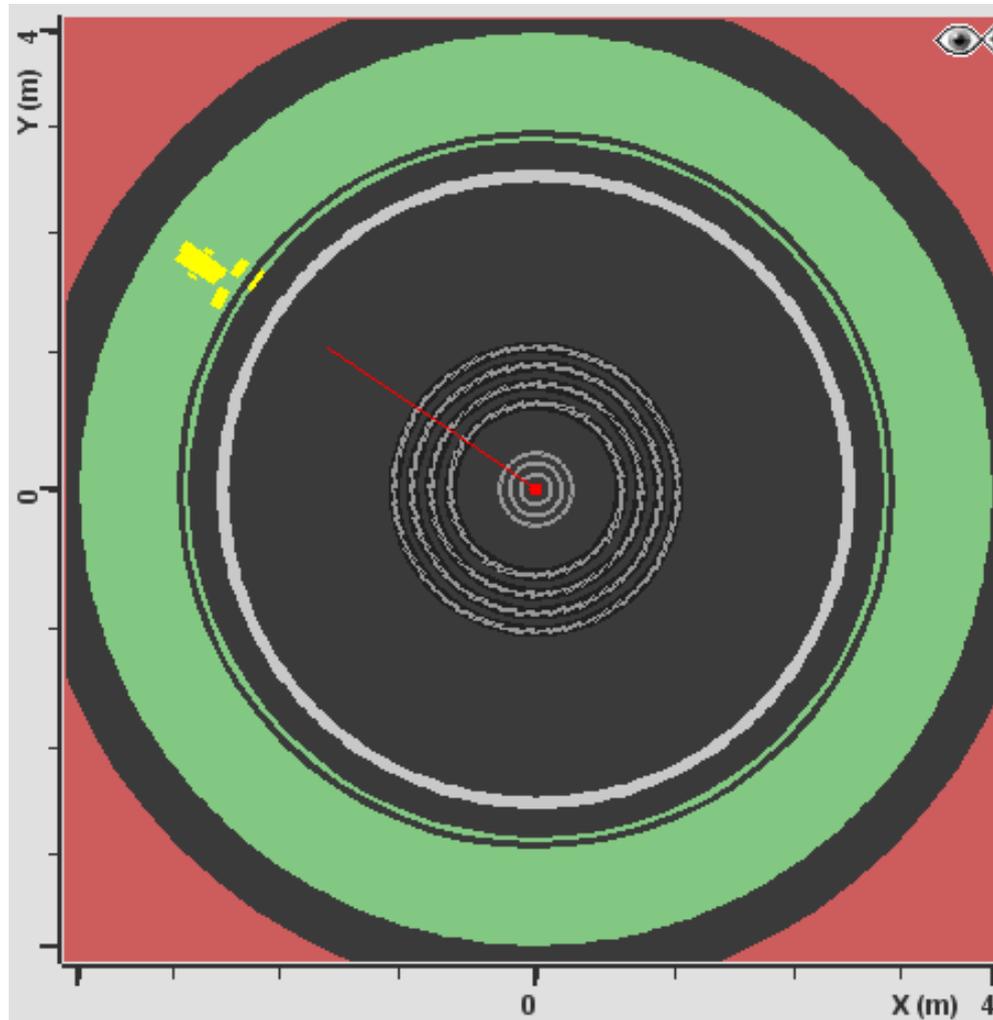
- Gerbe dans le calorimètre EM
- e^+/e^- : particule chargée, trace dans le trajectographe
- Courbure de la trace \rightarrow signe de la charge électrique



Identifier les électrons/positrons avec Minerva

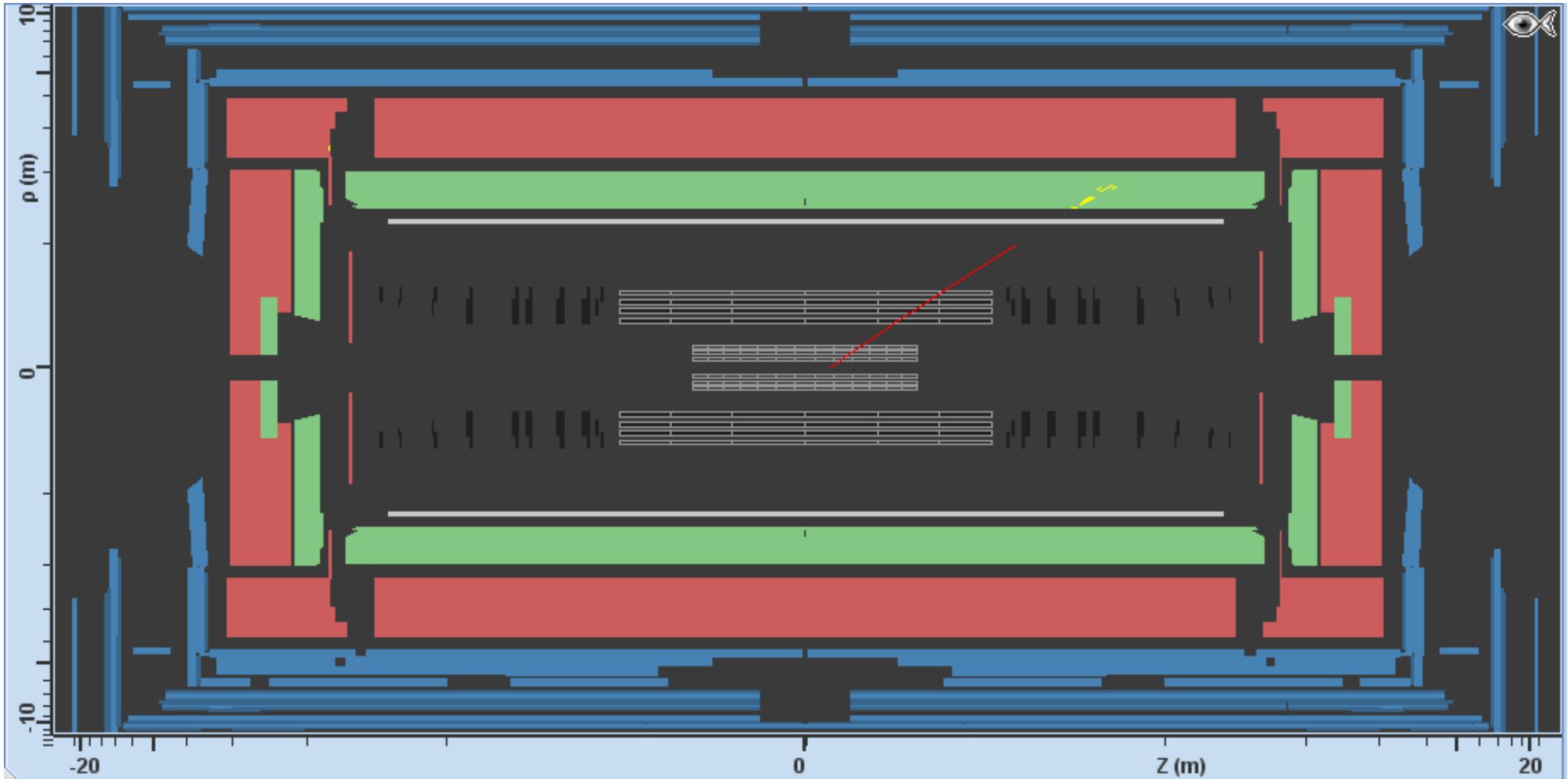


Identifier les électrons/positrons avec Minerva



- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Minerva



- Trace dans le trajectographe
- Énergie dans le calorimètre

Identifier les électrons/positrons avec Minerva

The image displays the Atlantis GUI interface. On the left, there are three main views: a top-down view of the ATLAS detector, a 3D plot of the event, and a longitudinal cross-section of the detector. The top-down view shows a yellow track in the inner detector. The 3D plot shows a yellow track in the detector volume. The longitudinal cross-section shows the track passing through the detector layers. On the right, the Atlantis GUI control panel is shown. A red box highlights the mouse cursor icon, and a red arrow points from it to the track in the 3D plot. Below the control panel, a data table is visible, and a status window at the bottom right displays the event information.

| Status | Name | Value |
|-------------------------------------|---------|-------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | InDet | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Calo | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | MuonDet | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Objects | |

Welcome to Atlantis !
Minerva.xml (10602000326459)

- Choisir la main et cliquer sur la trace
- Des infos apparaissent dans la fenêtre en bas à droite

Identifier les électrons/positrons avec Minerva

The screenshot displays the Atlantis GUI interface. On the left, there are two plots: a top view of the ATLAS detector and a 3D view of the detector. The top view shows a green ring representing the calorimeter. The 3D view shows the detector's internal structure. On the right, there is a control panel with a toolbar and a data table. The data table has columns for Name and Value. The data table is currently empty. Below the data table, there is a list of event files. The file 'Exercise2-Event05.xml (160472004700963)' is selected. The event details for this file are displayed in a window below the list. The details include:

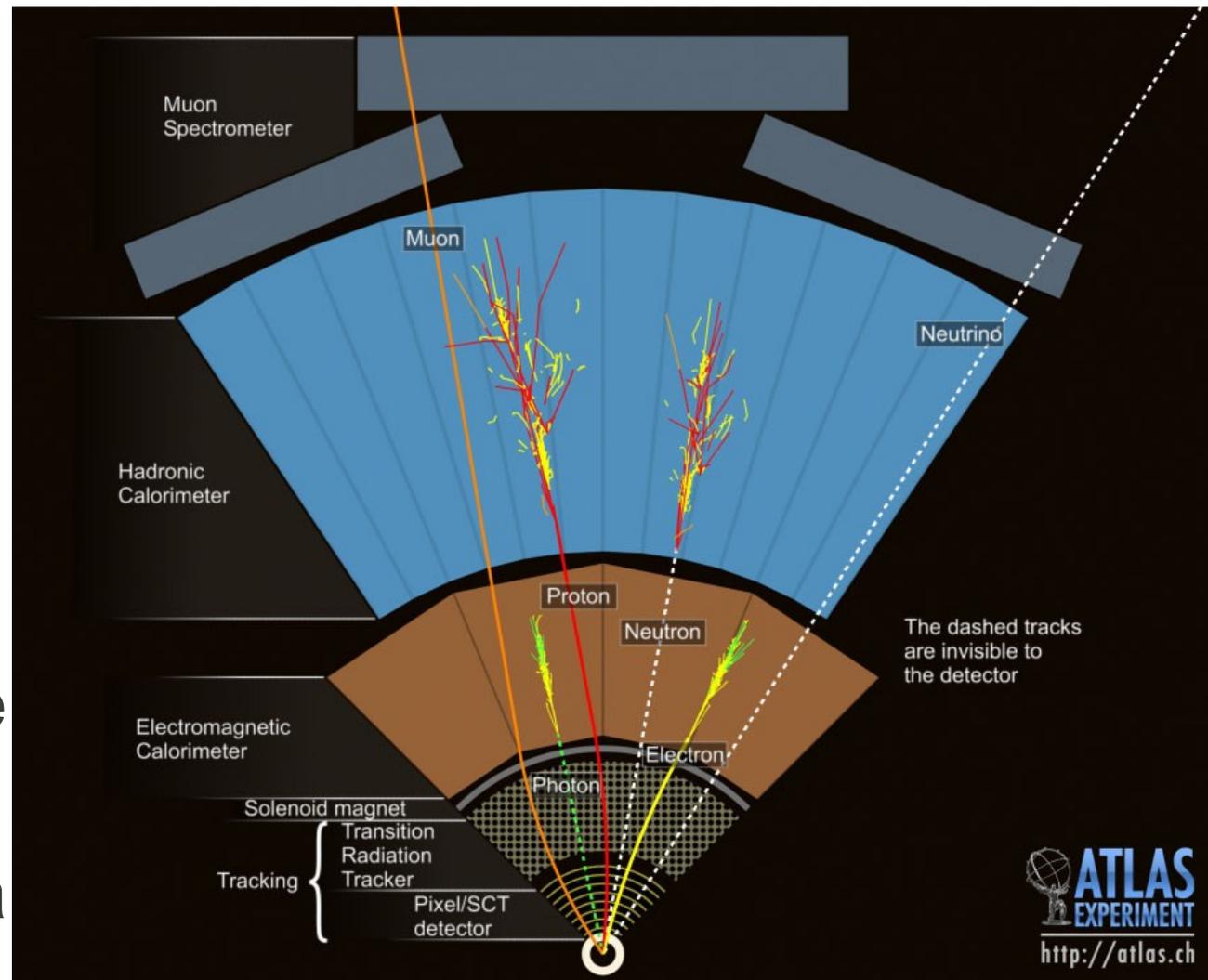
- PT=44.730 GeV
- $\eta = -1.139$
- $\Phi = 190.952^\circ$
- $P_x = -43.915$ GeV
- $P_y = -8.498$ GeV
- $P_z = 62.730$ GeV
- Charge = -1

Red boxes highlight the PT=44.730 GeV and Charge = -1 values in the event details window. Red arrows point from these boxes to the corresponding values in the event list window.

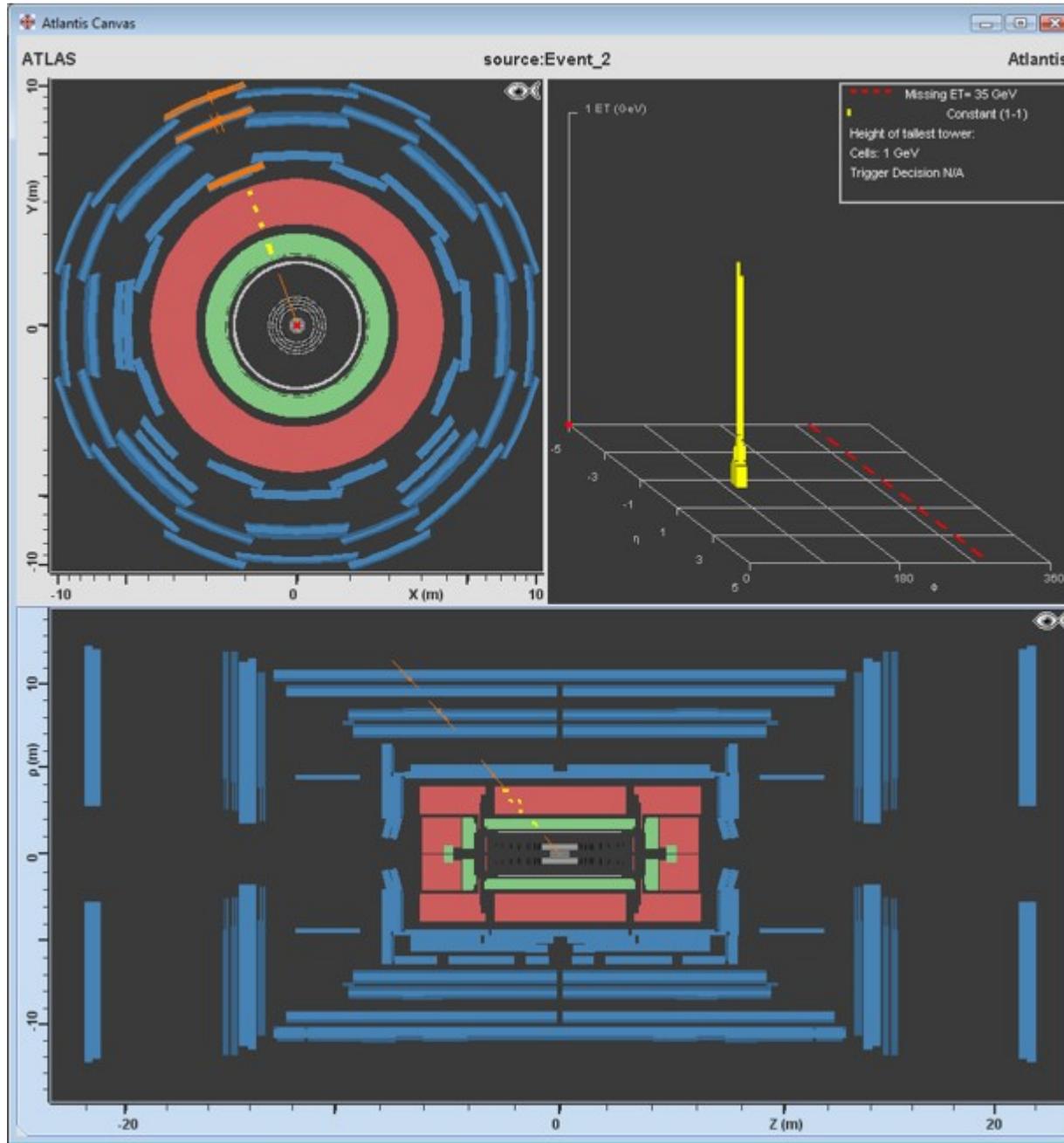
- PT = impulsion transverse
- Ici charge négative → électron

Identifier les muons et antimuons

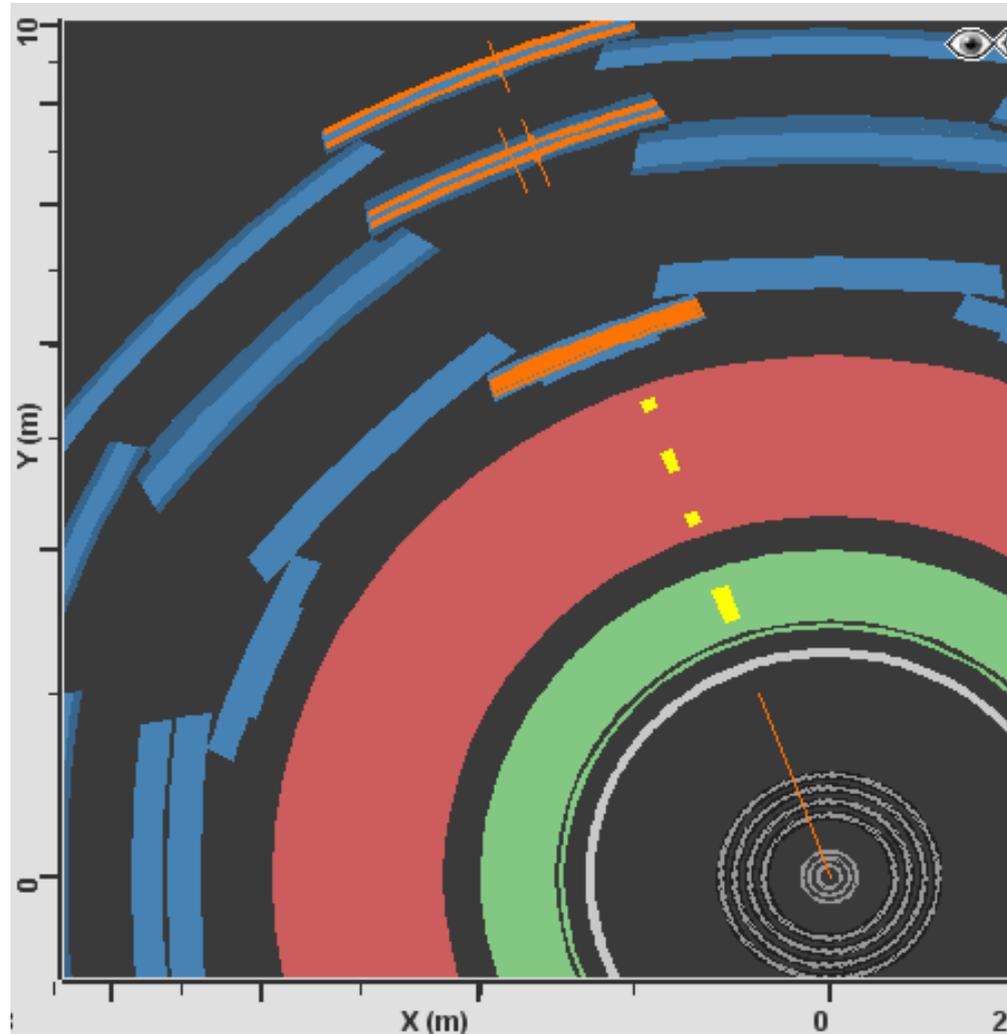
- Particule chargée, trace dans le trajectographe
- Un peu d'énergie dans le calorimètre
- Trace dans le détecteur à muons
- Courbure de la trace → signe de la charge électrique
- Continue sa course à l'extérieur d'ATLAS



Identifier les muons/antimuons avec Minerva

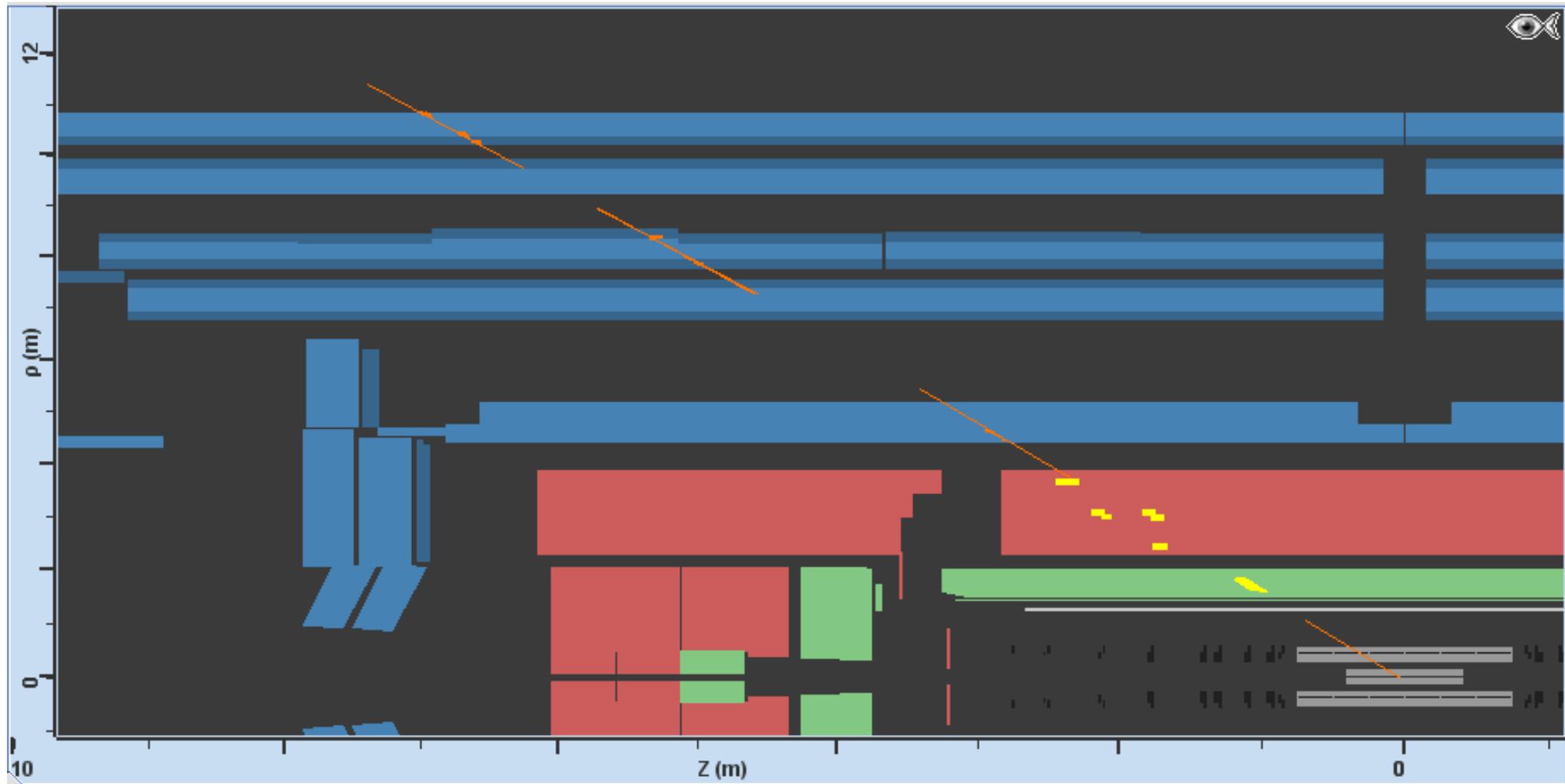


Identifier les muons/antimuons avec Minerva



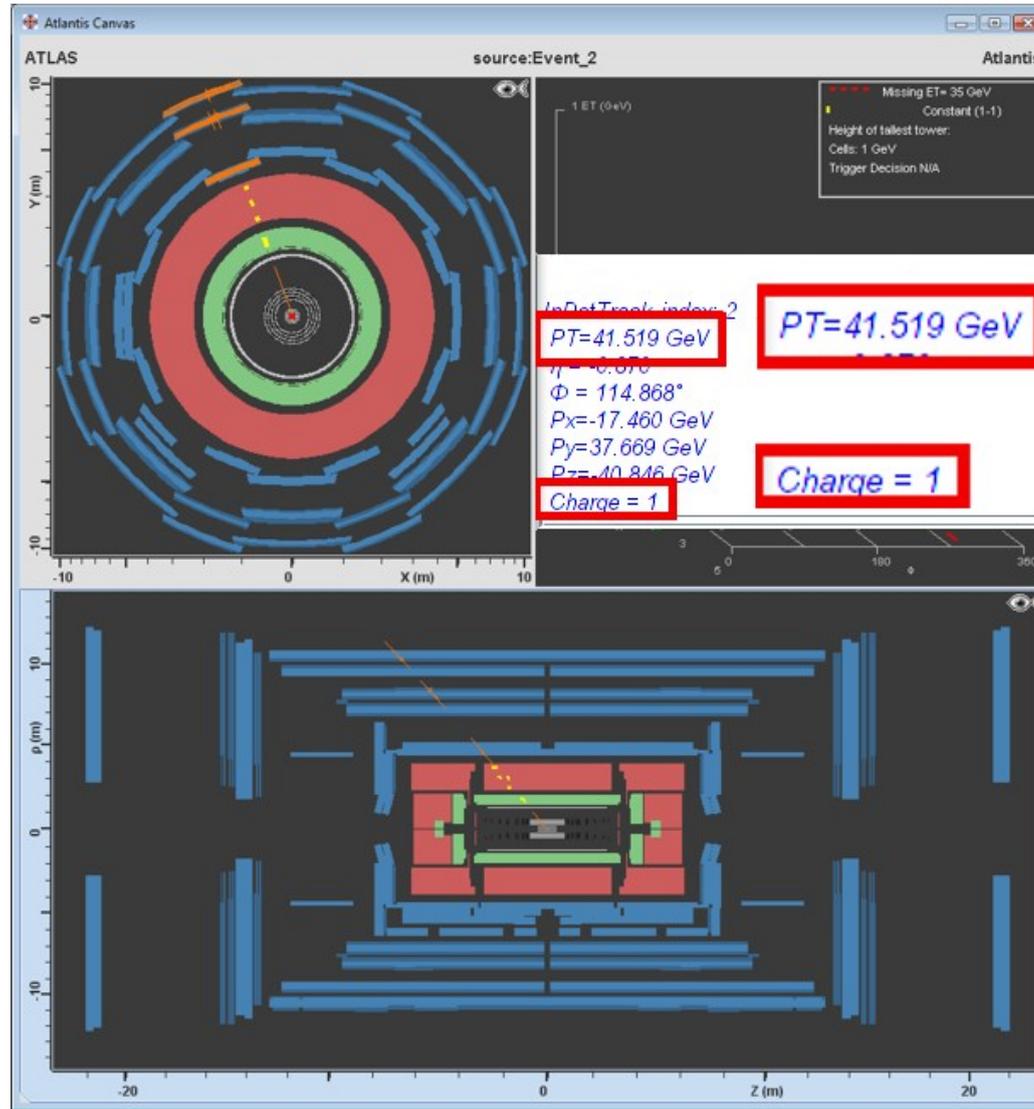
- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Un peu d'énergie dans les calorimètres

Identifier les muons/antimuons avec Minerva



- Trace dans le trajectographe et le système des muons
- Un peu d'énergie dans les calorimètres

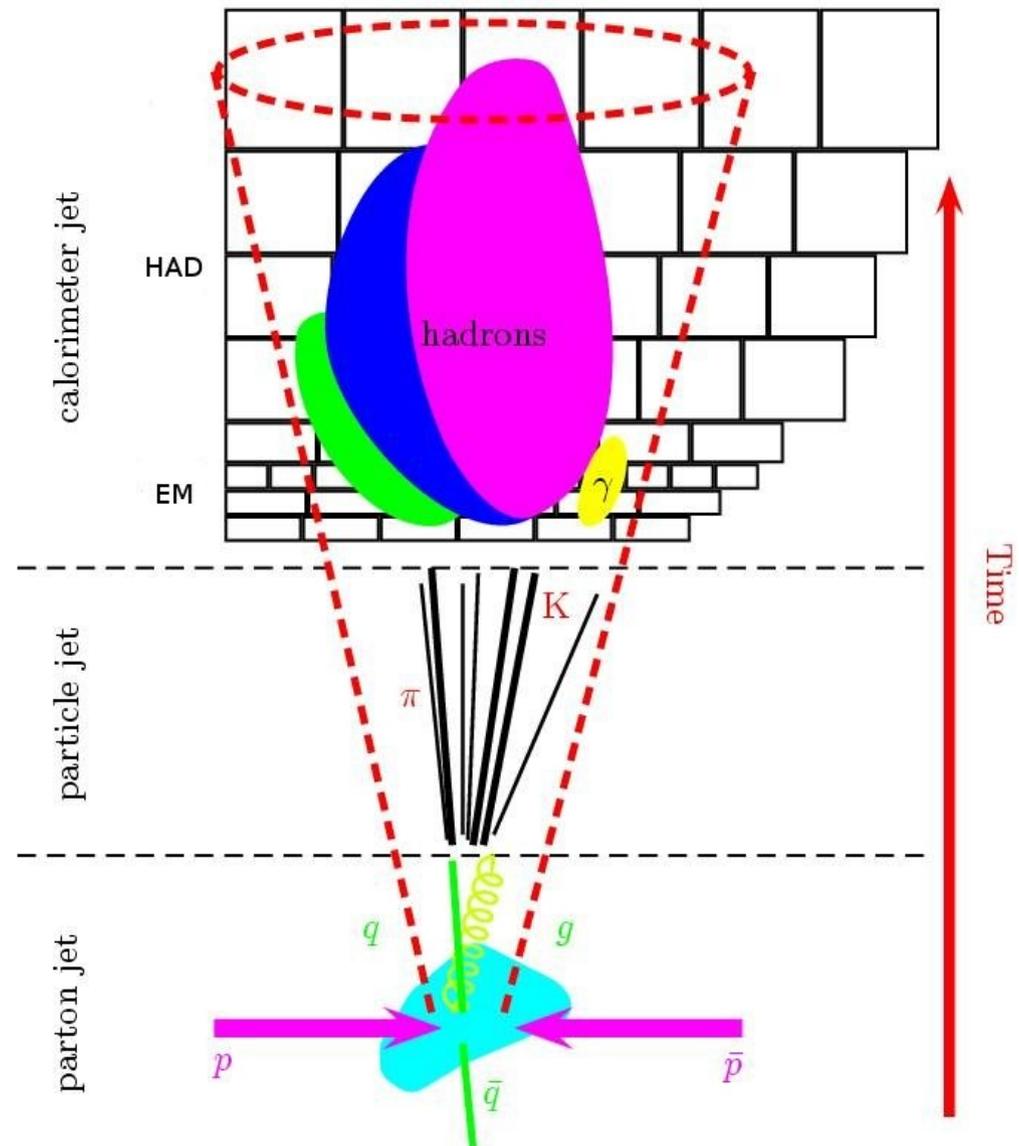
Identifier les muons/antimuons avec Minerva



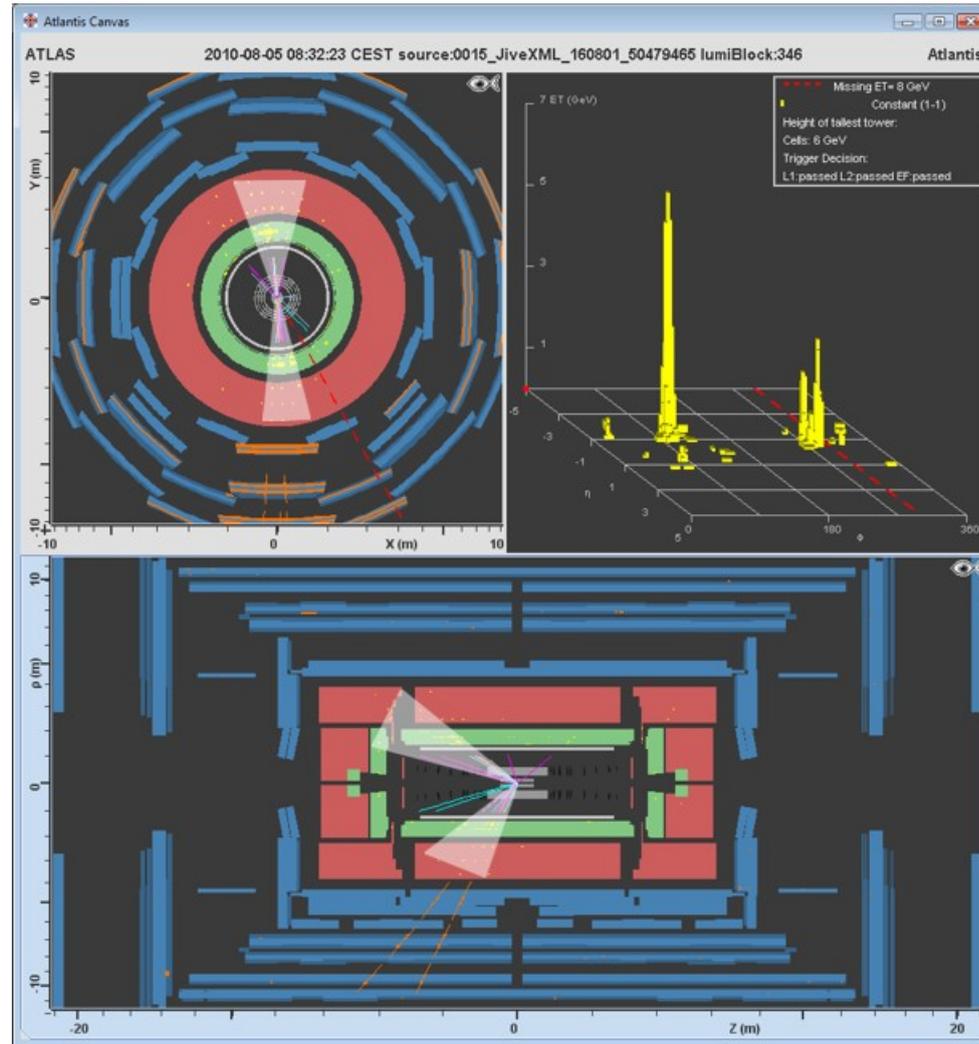
- Positif : antimuon

Identifier les quarks/antiquarks et gluons

- Jamais seuls, forment des hadrons
- Gerbes dans le calorimètre EM et surtout hadronique
- Particules chargées, traces dans le trajectographe

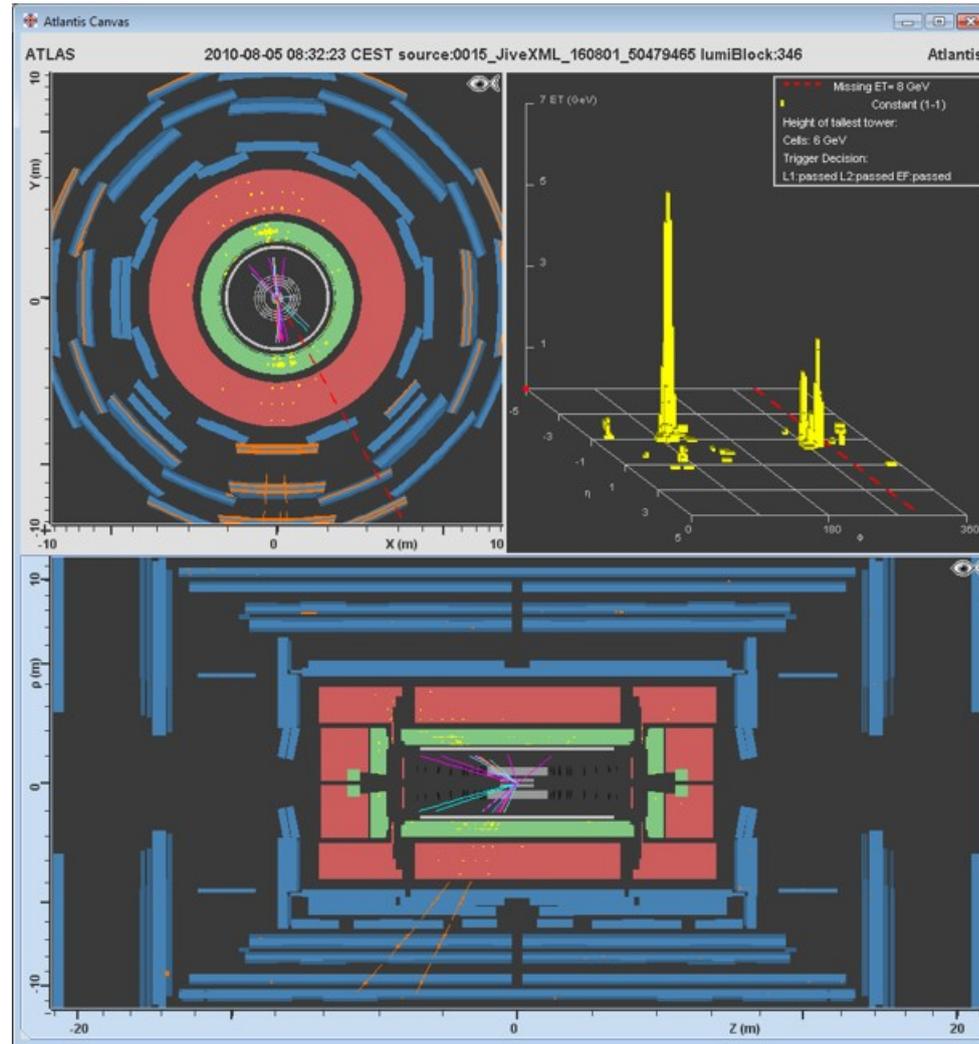


Identifier les jets avec Minerva



- Nombreuses particules → nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

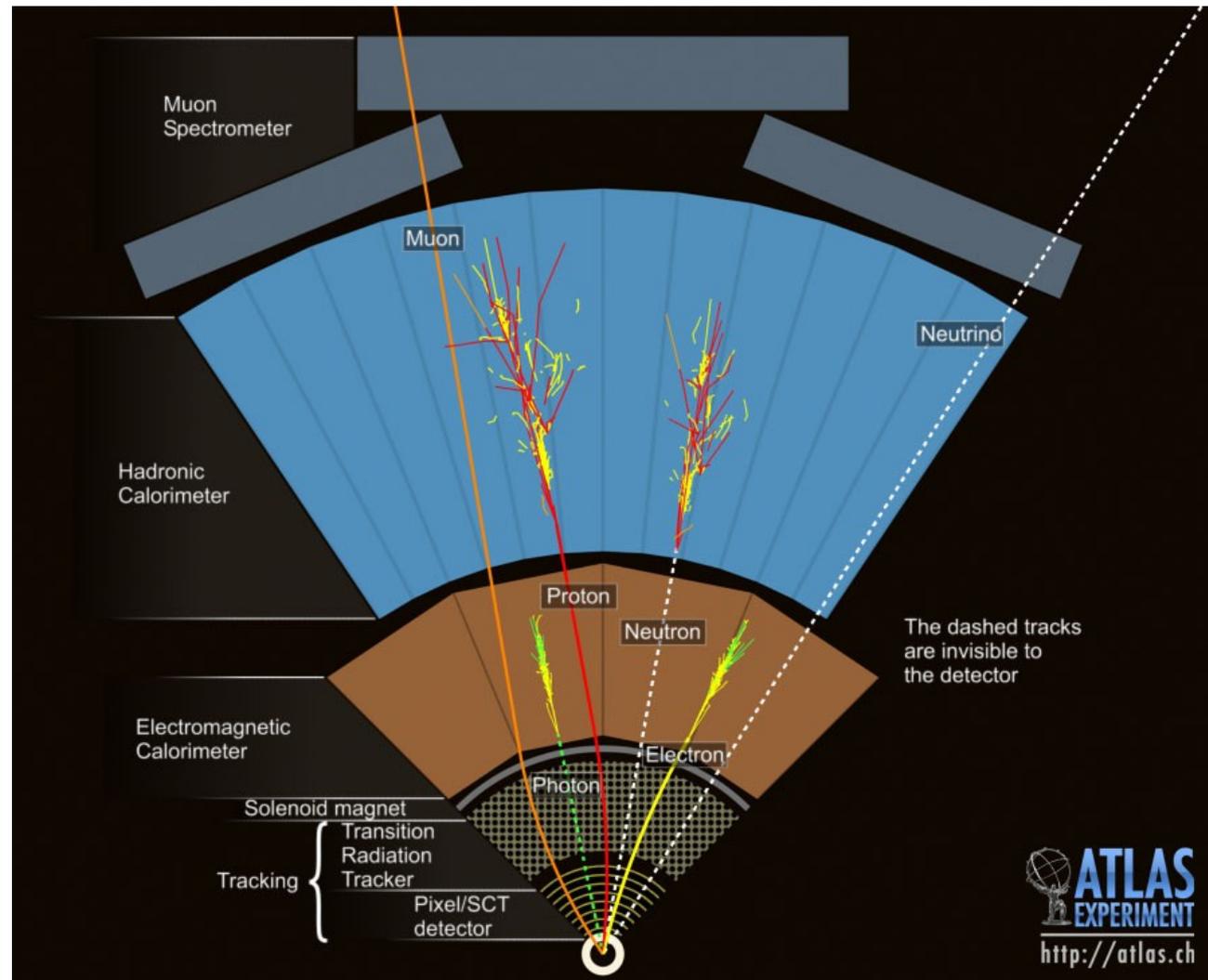
Identifier les jets avec Minerva



- Nombreuses particules → nombreuses traces
- Dépôts d'énergie dans les calorimètres (surtout hadronique)

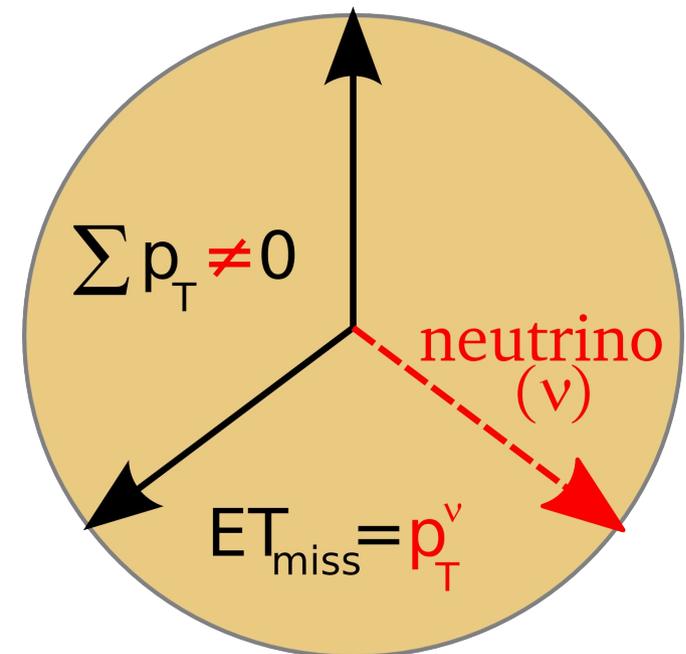
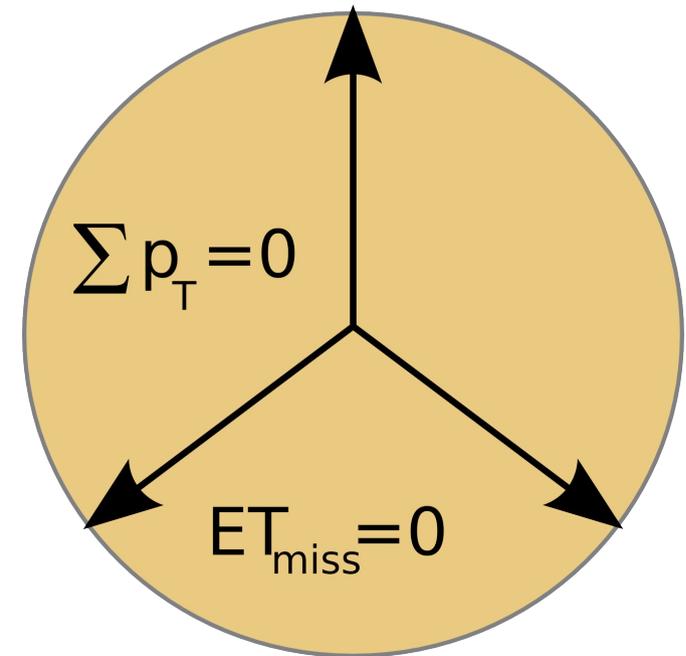
Identifier les neutrinos

- Particule neutre qui n'interagit presque pas avec la matière
- Aucune trace dans le détecteur
- Identifié par induction, en utilisant la conservation de l'impulsion

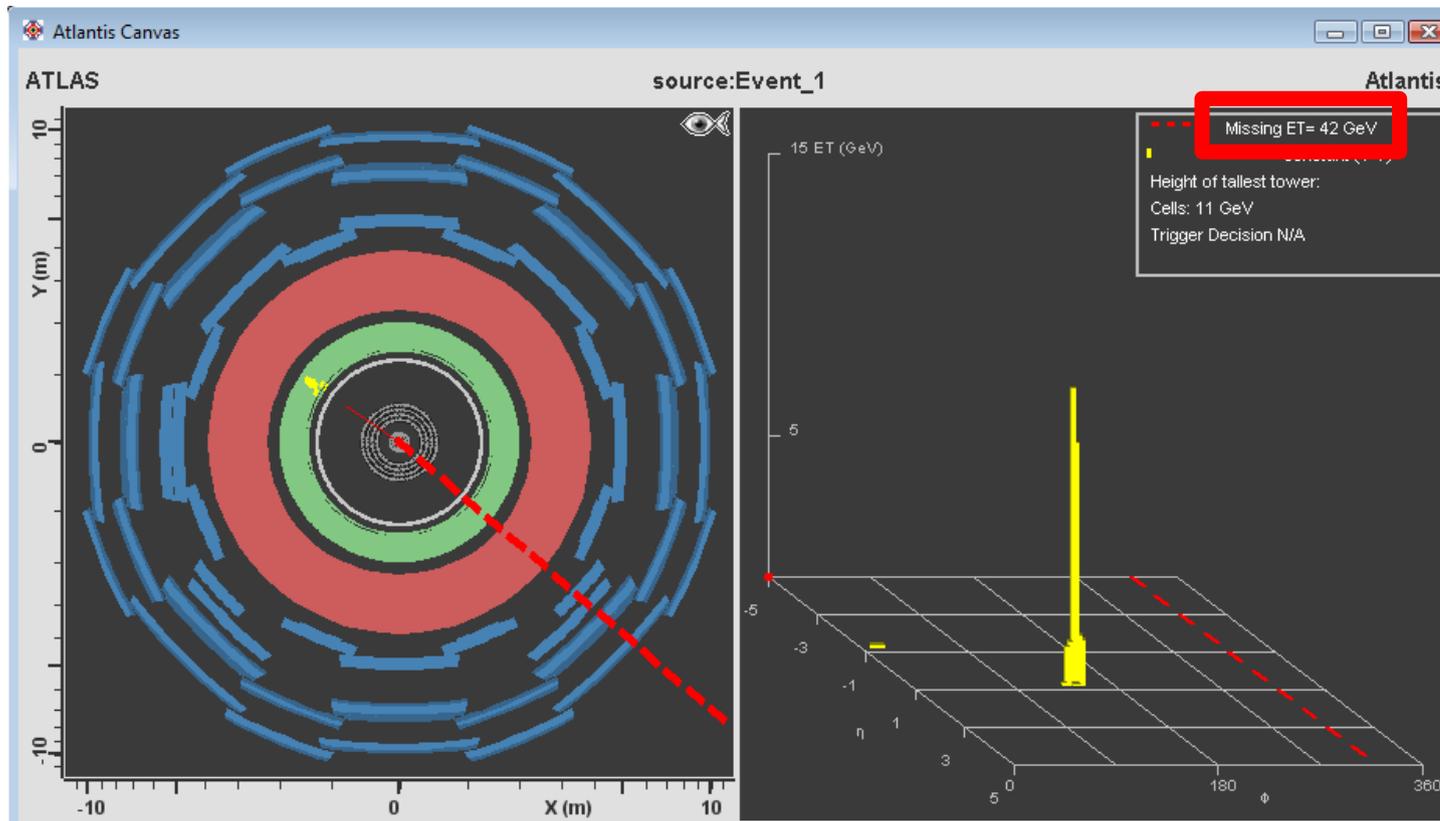


Energie transverse manquante

- Sans neutrino
 - ▶ 3 particules reconstruites
 - ▶ Somme des impulsions dans le plan transverse : 0
 - ▶ Donc $E_T^{\text{miss}} = 0$
- Avec un neutrino
 - ▶ On « voit » seulement une partie de l'événement
 - ▶ La somme des impulsions n'est pas nulle
 - ▶ La différence est E_T^{miss} , associée au neutrino



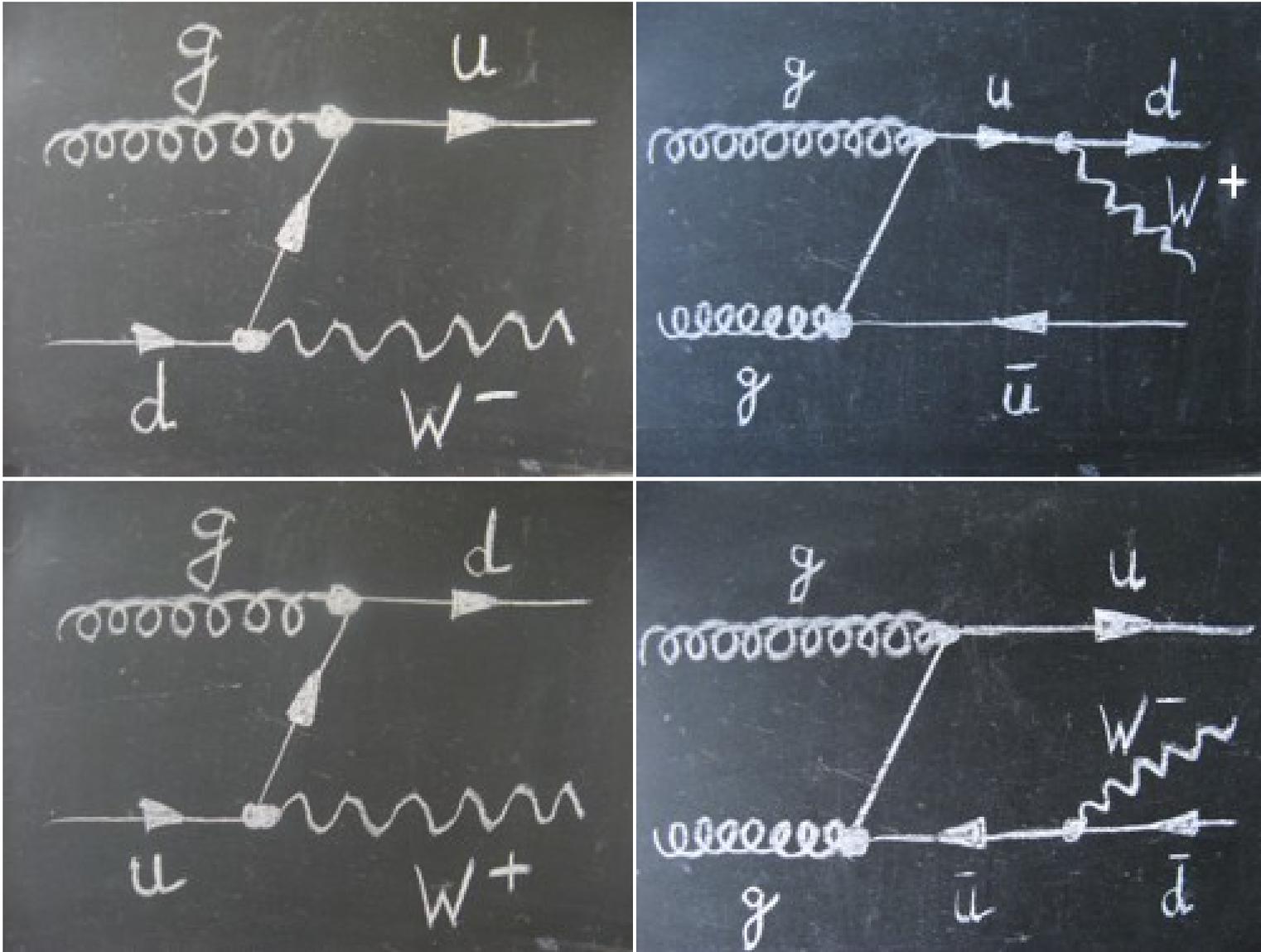
Identifier un neutrino avec Minerva



- Par conservation, la somme des impulsions dans le plan transversal vaut 0
- Sinon, « énergie transverse manquante (Missing ET) » : particules indétectables (comme les neutrinos), non détectées ou mal mesurées
- Représenté par une ligne rouge pointillée, valeur en haut à droite

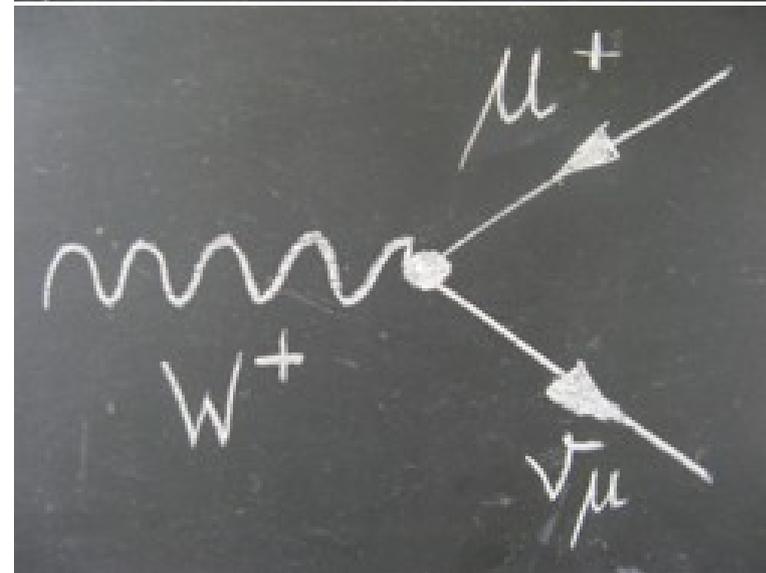
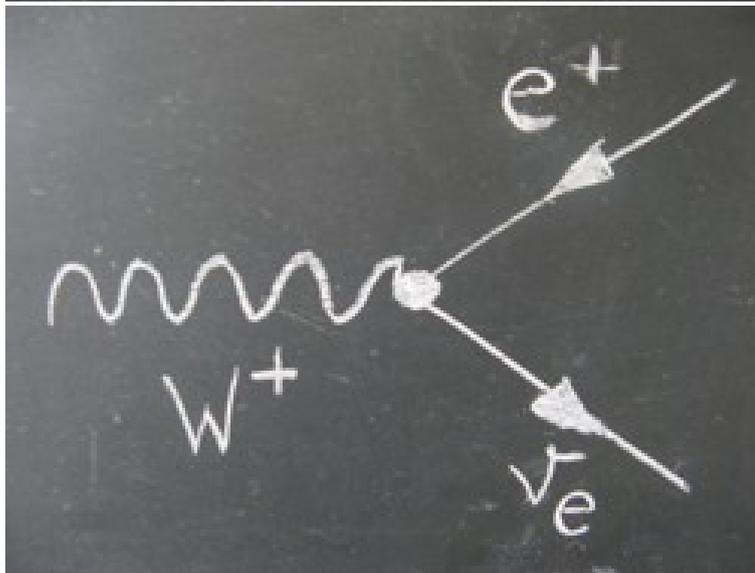
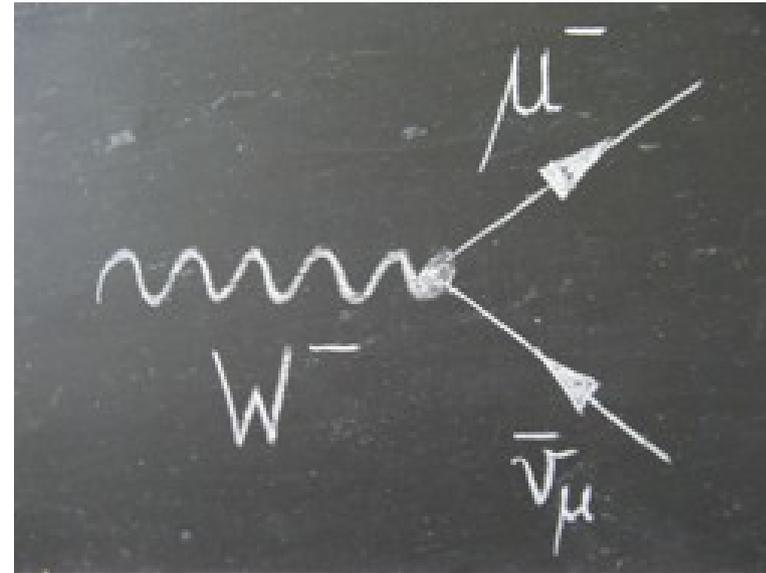
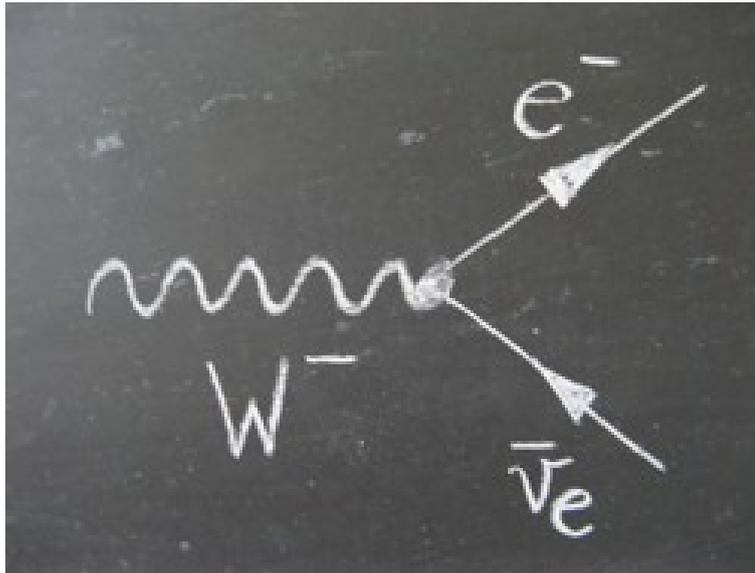
Analyse : observer des bosons W

Production



Analyse : observer des bosons W

Désintégration

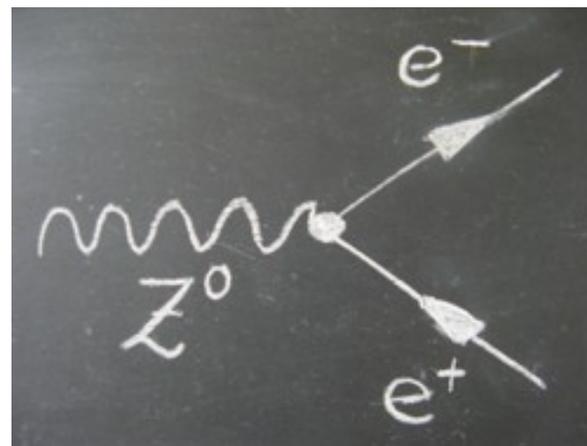
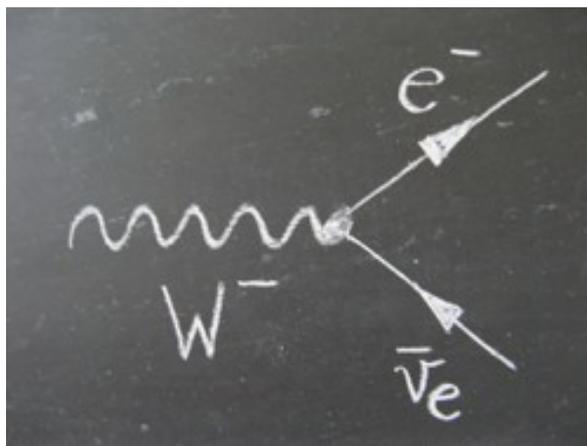
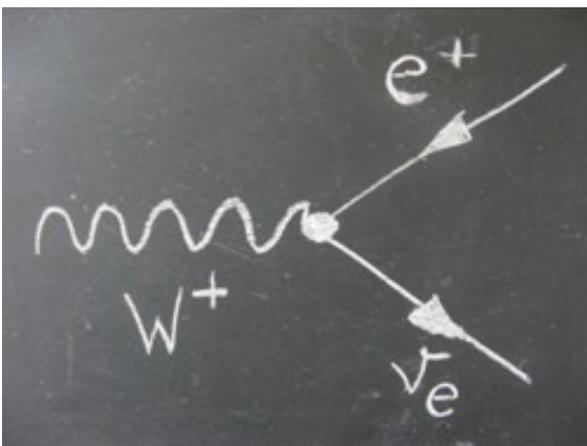


Difficulté : le bruit de fond

- Signature similaire à ce que l'on cherche, mais venant d'une source différente
- Peut être un vrai processus qui fournit le même état final
- Ou bien dû au fait qu'une particule n'est pas vue dans le détecteur
 - ▶ par exemple s'échappe le long du faisceau
- Ou bien à une mauvaise reconstruction dans le détecteur
 - ▶ il y a un jet et je crois que c'est un électron
- Ou encore à la présence d'autres particules dans l'événement
 - ▶ chaque événement contient plusieurs collisions

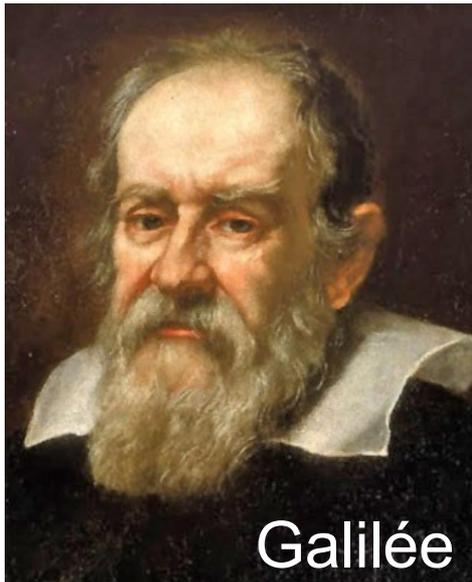
Exemple de signal et bruit de fond

- Signal : désintégration de bosons $W \rightarrow e\nu$
- Bruit de fond : $Z \rightarrow ee$
- Un des e n'est pas reconstruit



- Si on cherche des événements Z , alors les W peuvent être un bruit de fond !

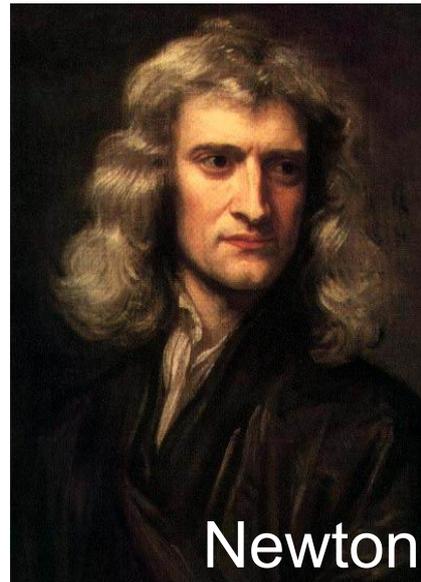
La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

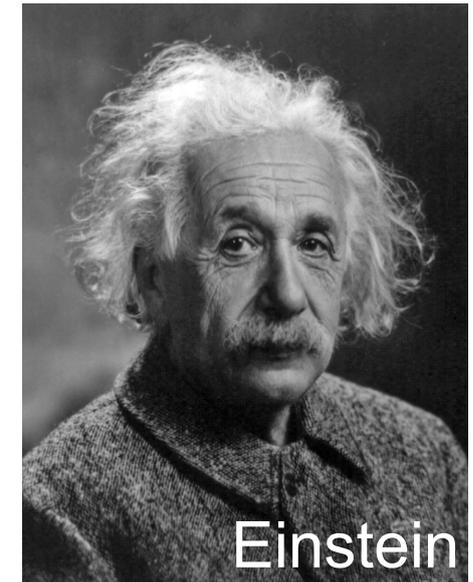
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

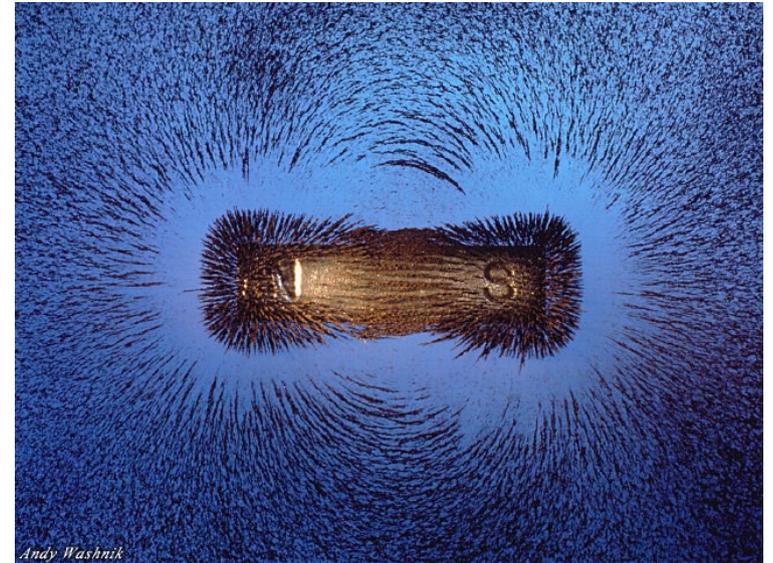
- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

- 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

Notion de champ

- Ensemble des valeurs prises par une grandeur physique en tout point de l'espace
 - Champ orienté : vecteur
 - ▶ Champ magnétique



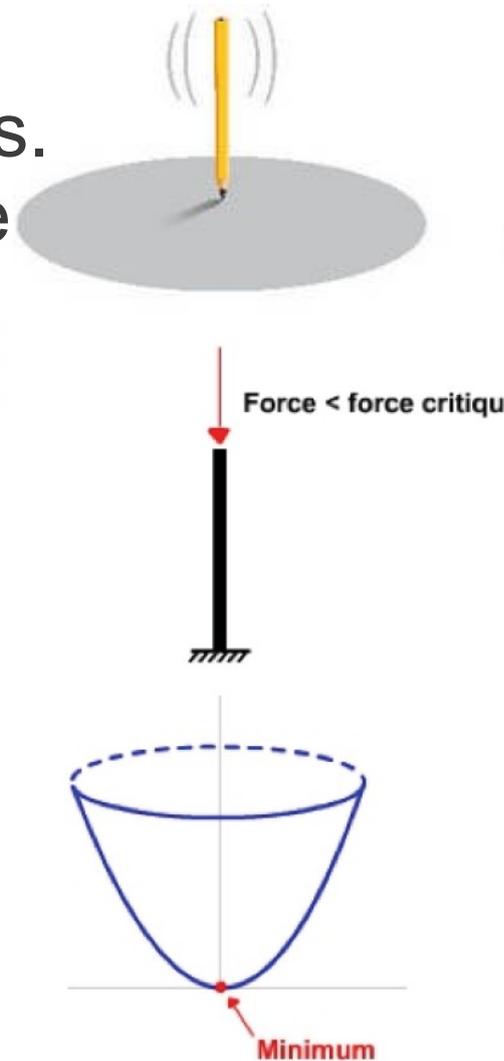
- Champ non-orienté : scalaire
 - ▶ Carte des températures
 - ▶ Champ de Higgs !

Bonus en théorie quantique des champs :
particule associée (excitation du champ)

Brisure spontanée de symétrie

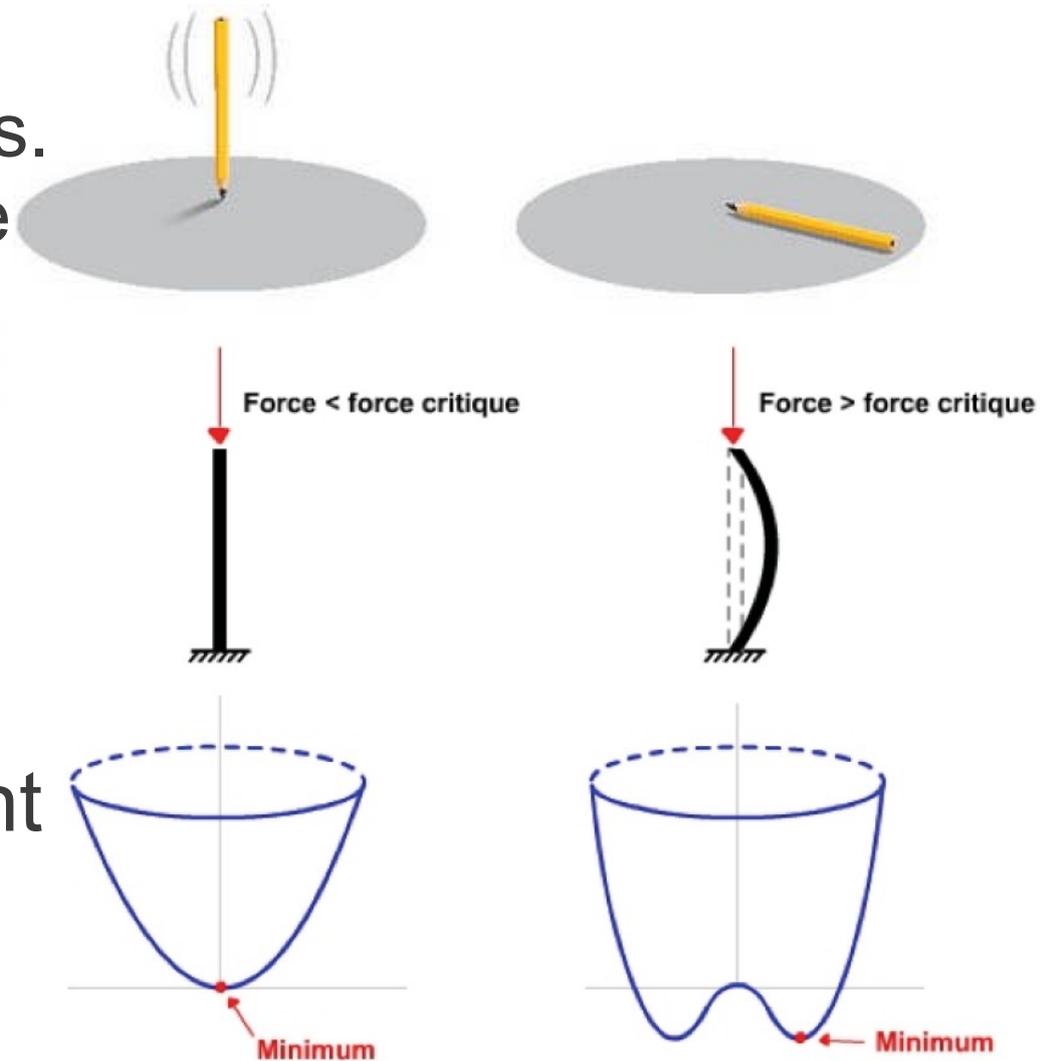
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :

- ▶ du crayon qui tourne sur lui-même
- ▶ d'une barre en compression



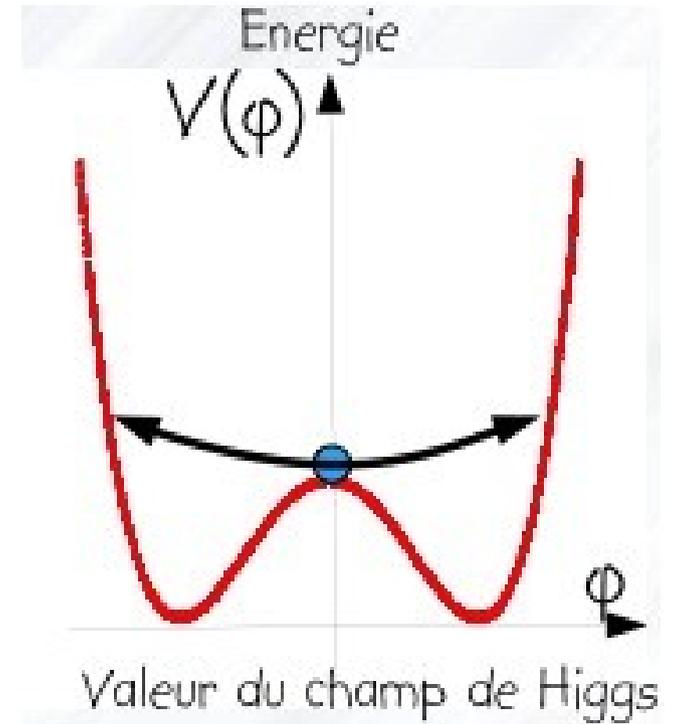
Brisure spontanée de symétrie

- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
 - ▶ du crayon qui tourne sur lui-même
 - ▶ d'une barre en compression
- Les solutions ne respectent pas forcément les mêmes symétries :
 - ▶ chute du crayon
 - ▶ flambage de la barre dans une direction donnée



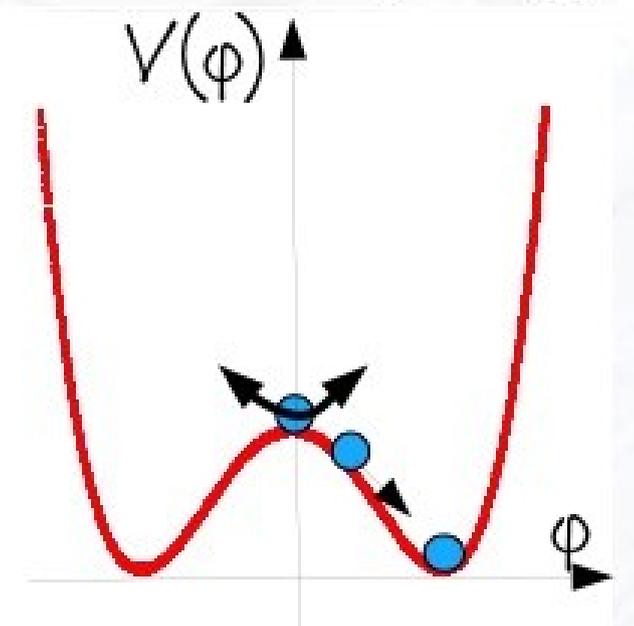
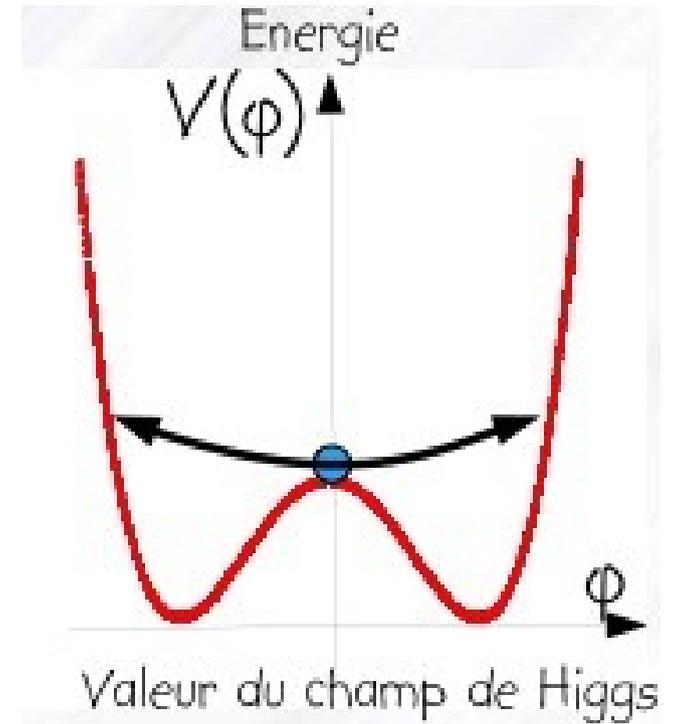
Brisure de la symétrie électrofaible

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

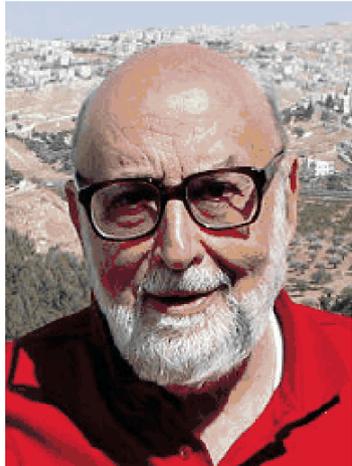


Brisure de la symétrie électrofaible

- 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)

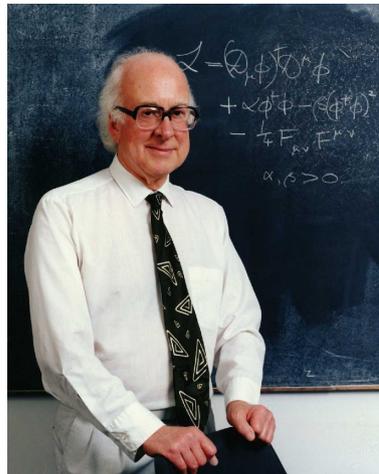
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ 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.⁴⁻⁶ 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 γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_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 note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² 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 phe-

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

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

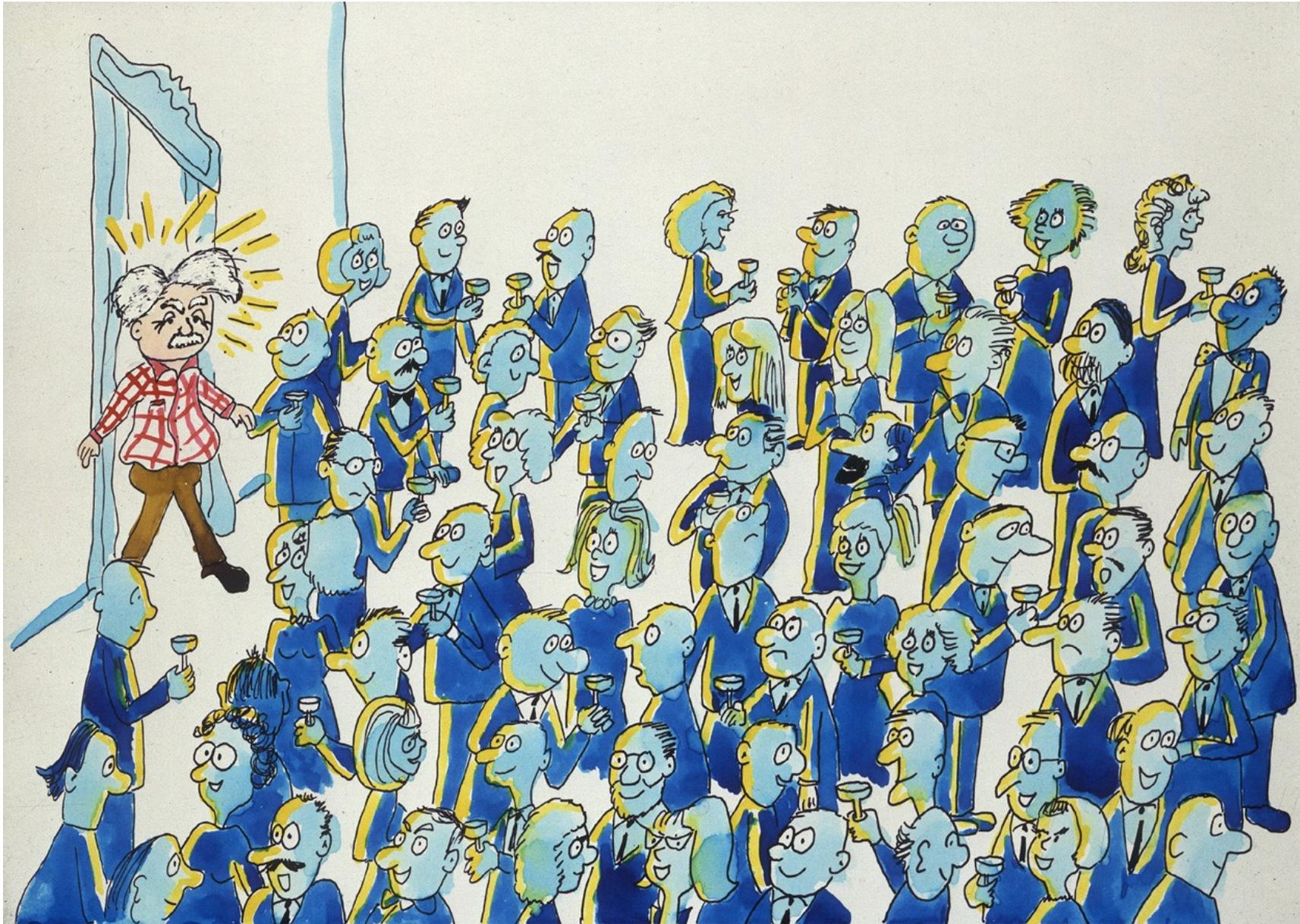
- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

Mécanisme de Higgs en images



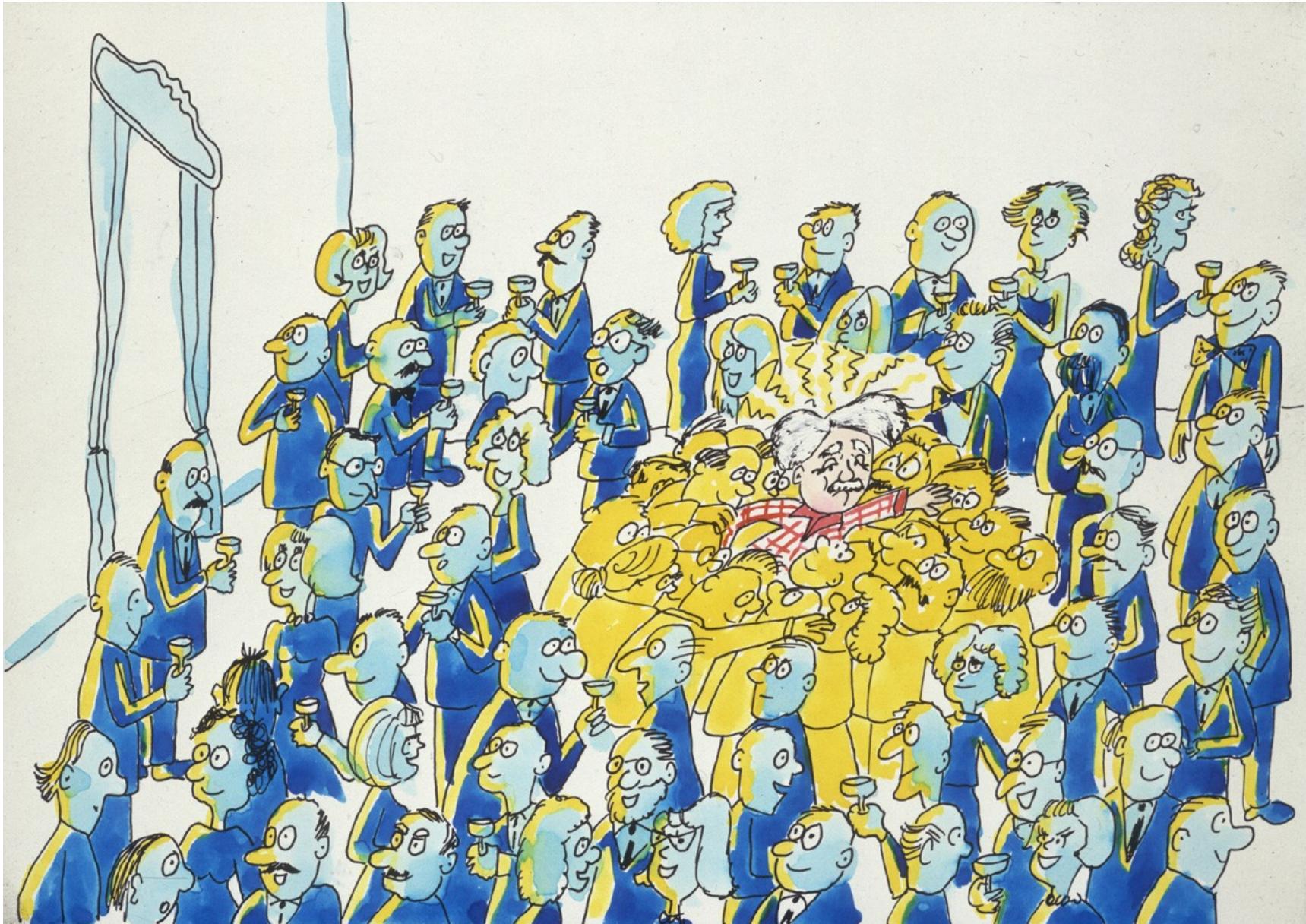
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

Mécanisme de Higgs en images



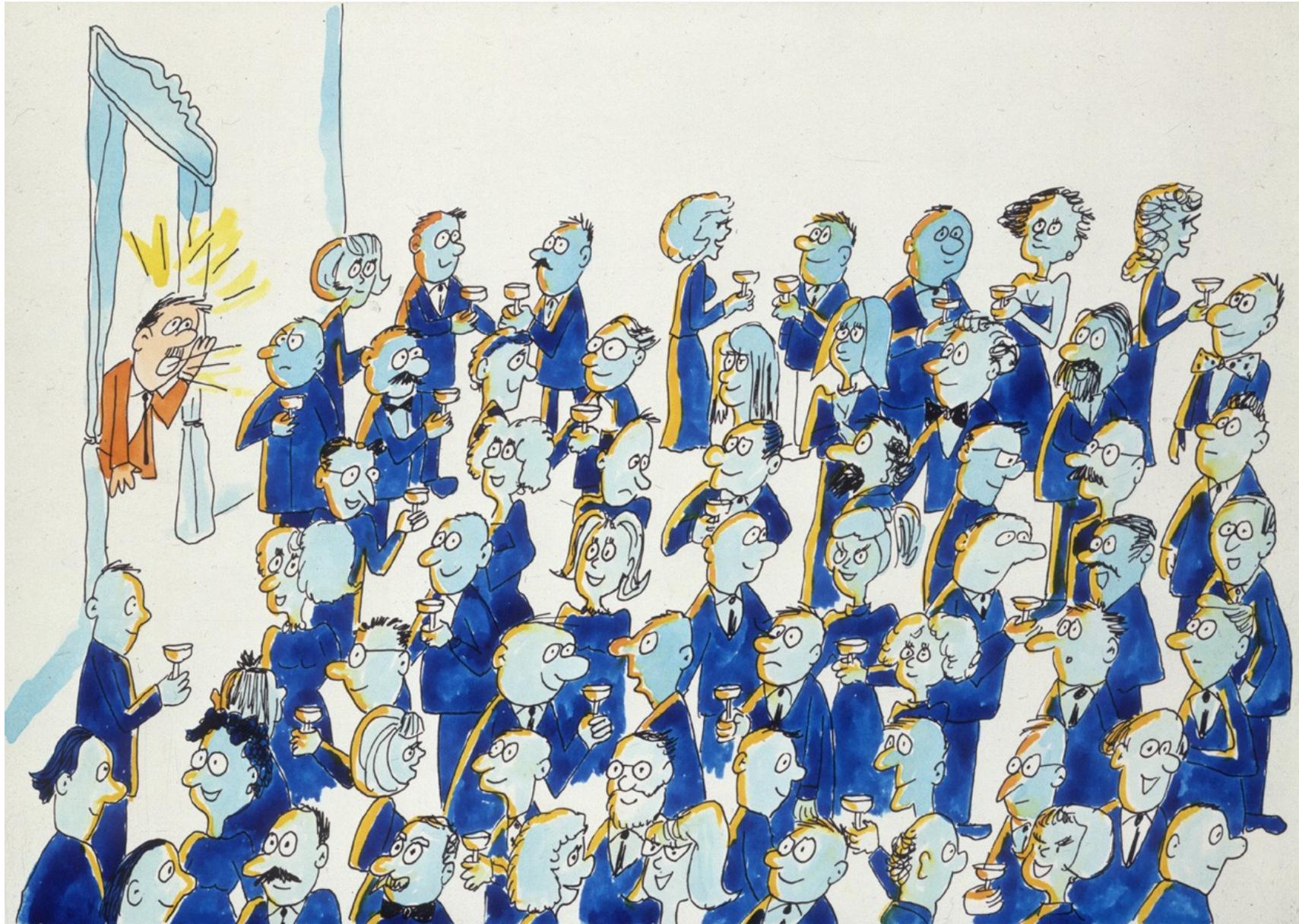
... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

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 111

Mécanisme de Higgs en images



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

Mécanisme de Higgs en images



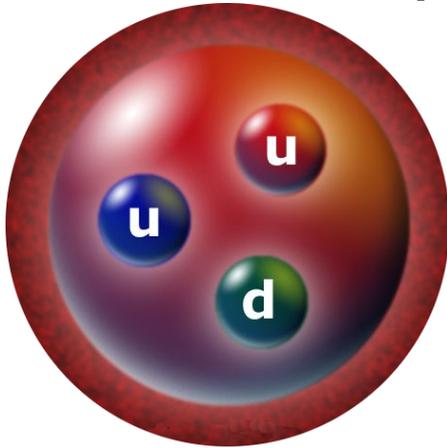
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

Interactions avec le boson de Higgs



La masse

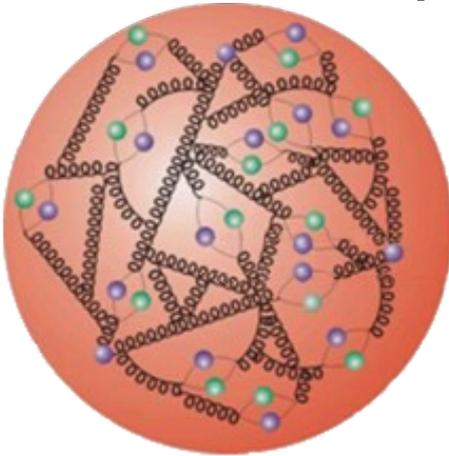
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse ~ 10 MeV

La masse

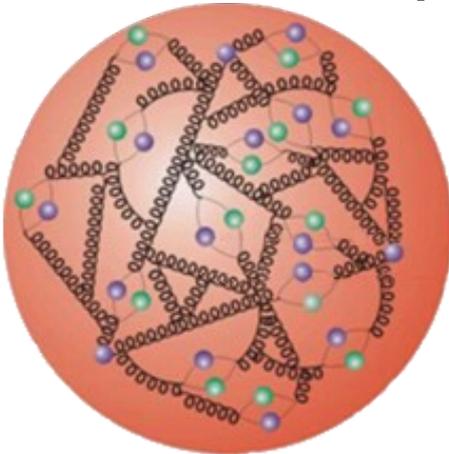
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

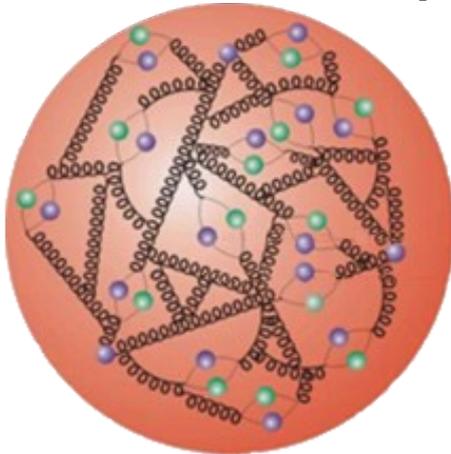
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- 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

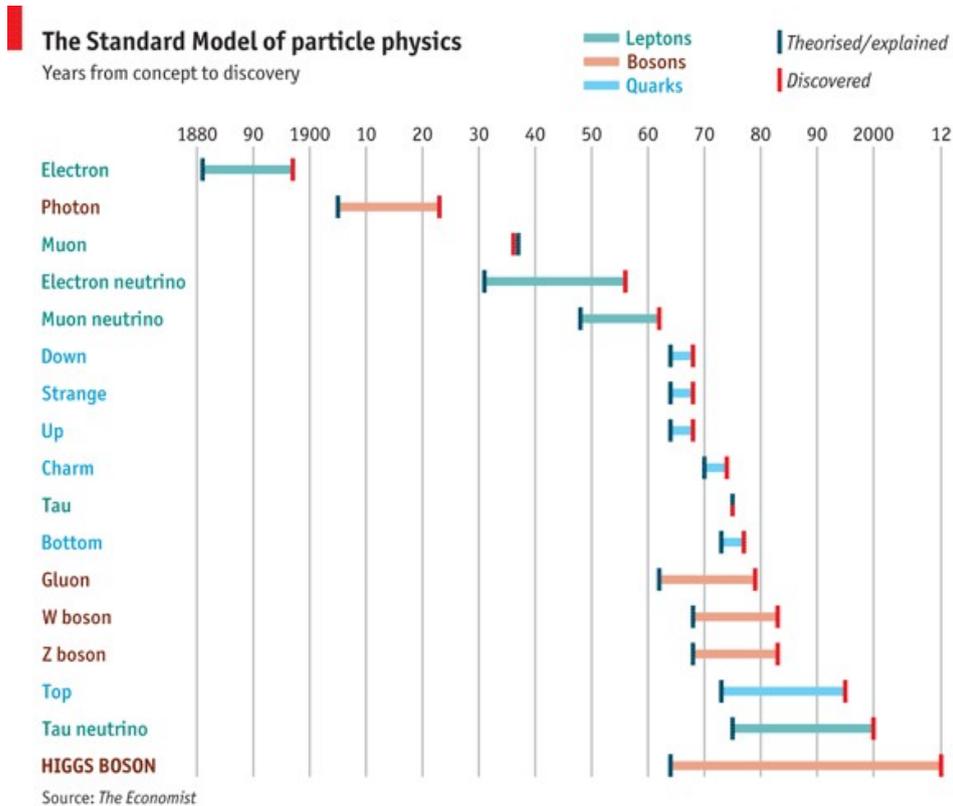
La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 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...

Une longue quête

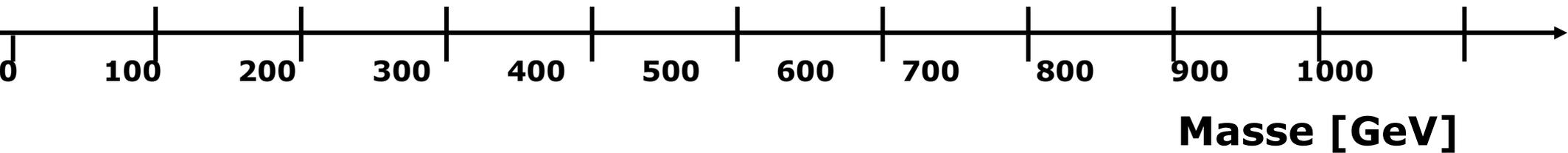


© The Economist

- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse ! Il faut donc chercher partout...

La chasse au boson de Higgs

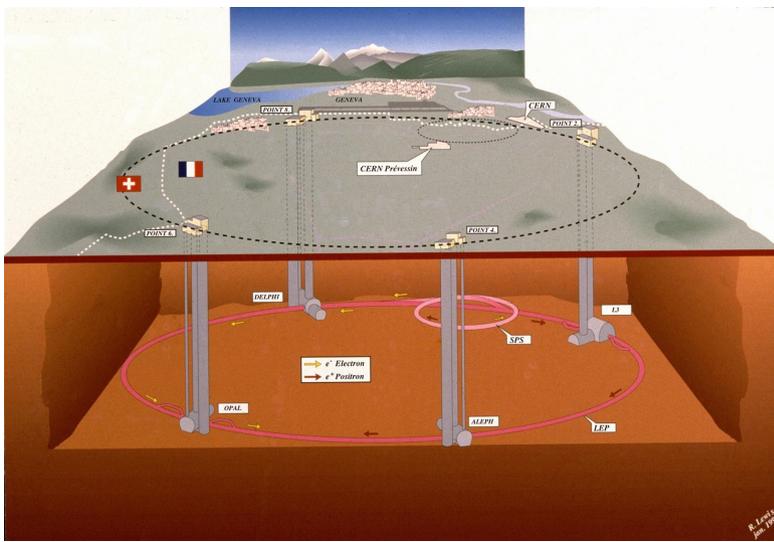
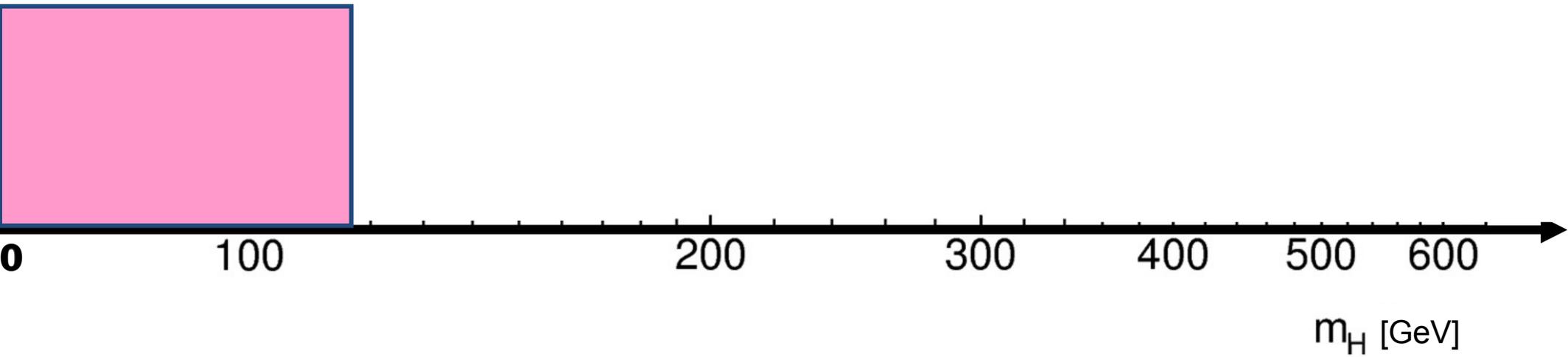
?



- Seule contrainte théorique : masse < 1000 GeV

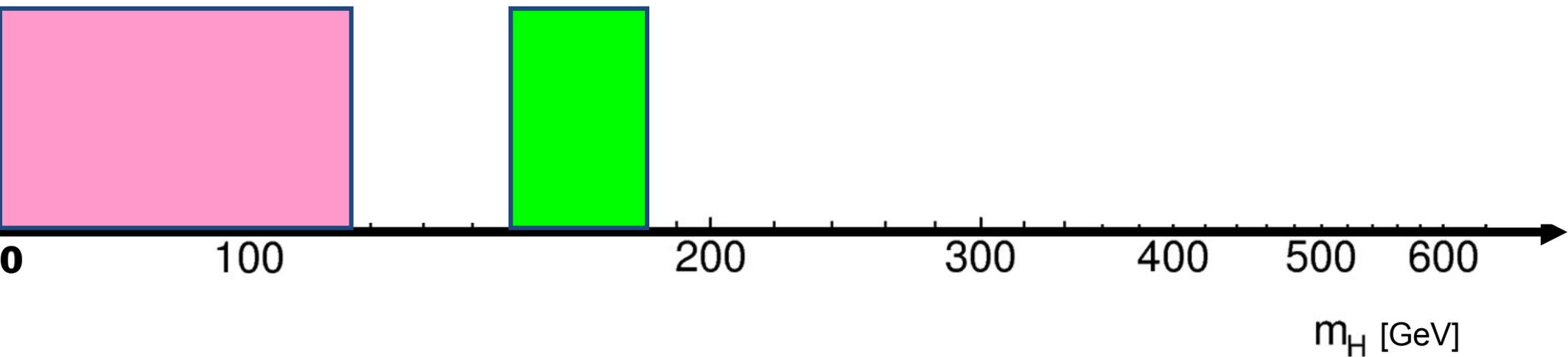
La chasse au boson de Higgs

LEP
1989-2000



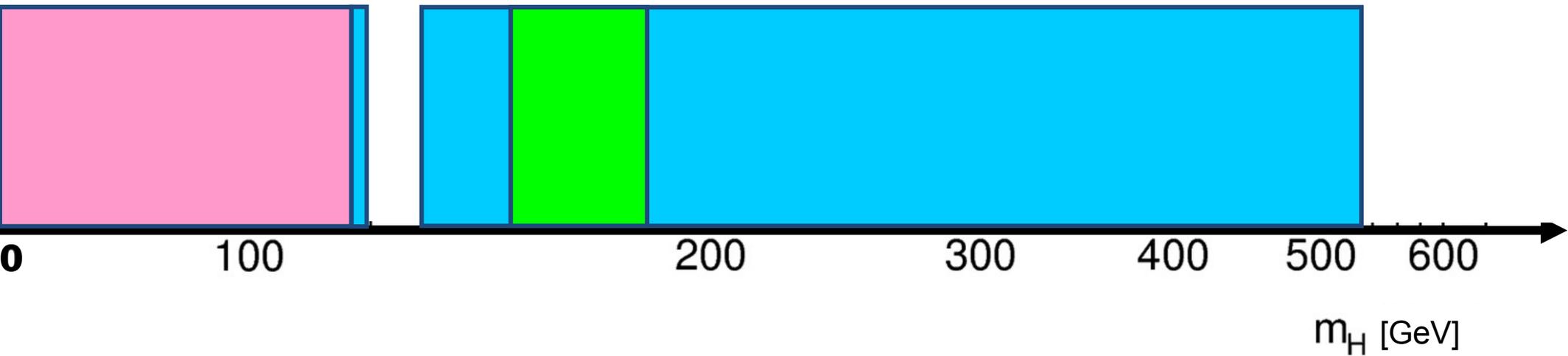
La chasse au boson de Higgs

Tevatron
1983-2011

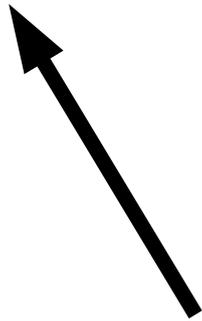
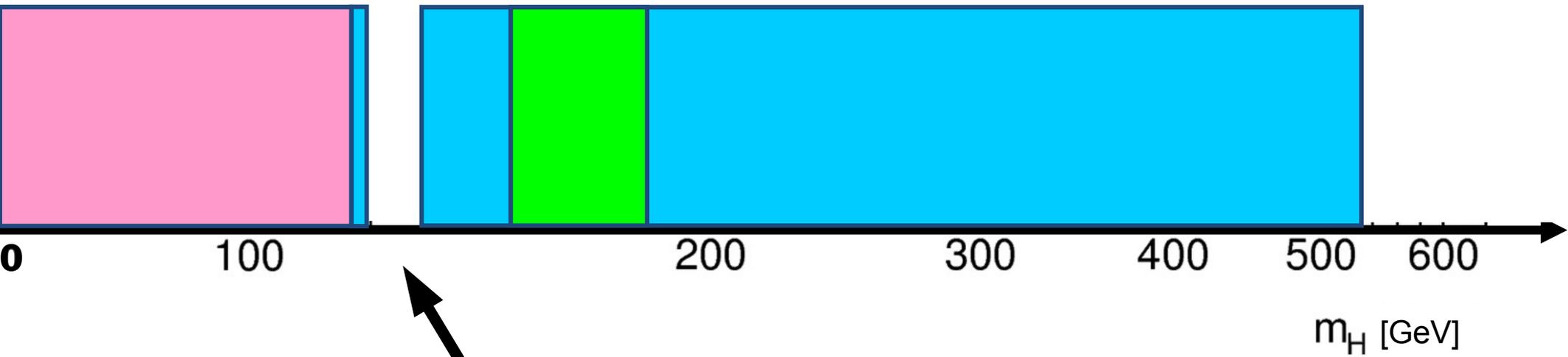


La chasse au boson de Higgs

LHC
2009-2011



La chasse au boson de Higgs



?



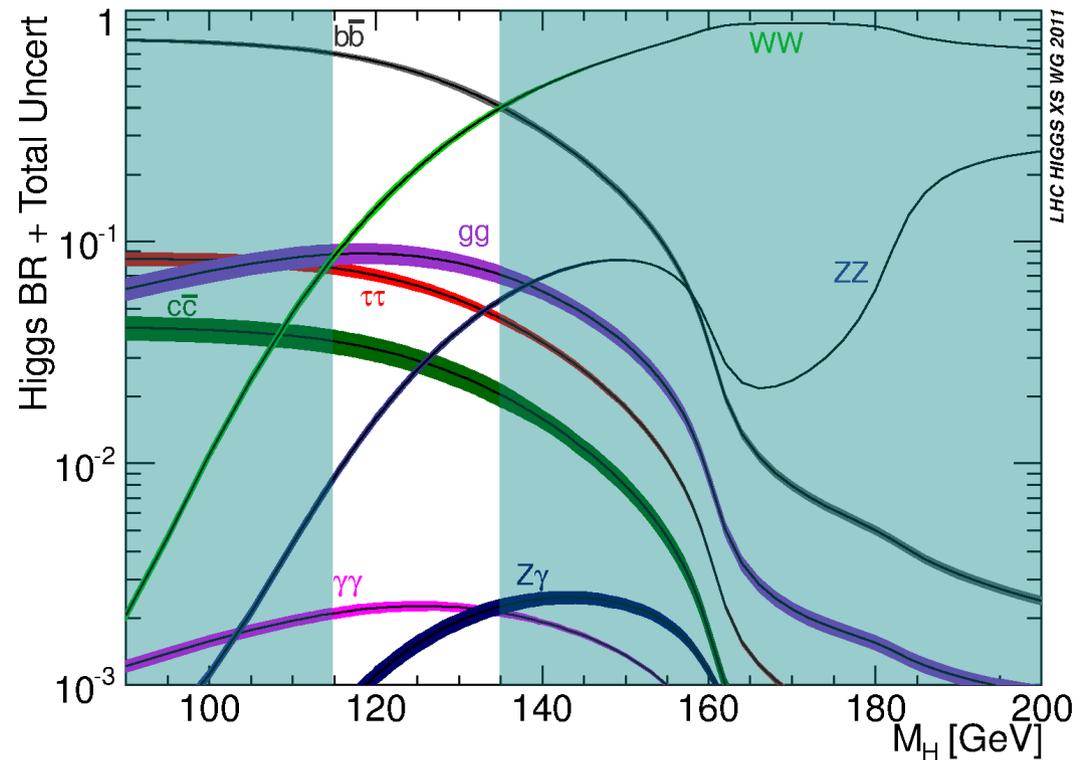
Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons $\rightarrow (E = mc^2) \rightarrow$ création d'un boson de Higgs, une fois sur 10 milliards

- Ensuite il se désintègre, différemment suivant sa masse. Exemple à 126 GeV :

- ▶ 56 fois sur 100 en $b\bar{b}$
- ▶ 23 fois sur 100 en WW
- ▶ 3 fois sur 100 en ZZ
- ▶ 2 fois sur 1000 en $\gamma\gamma$

- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer



Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

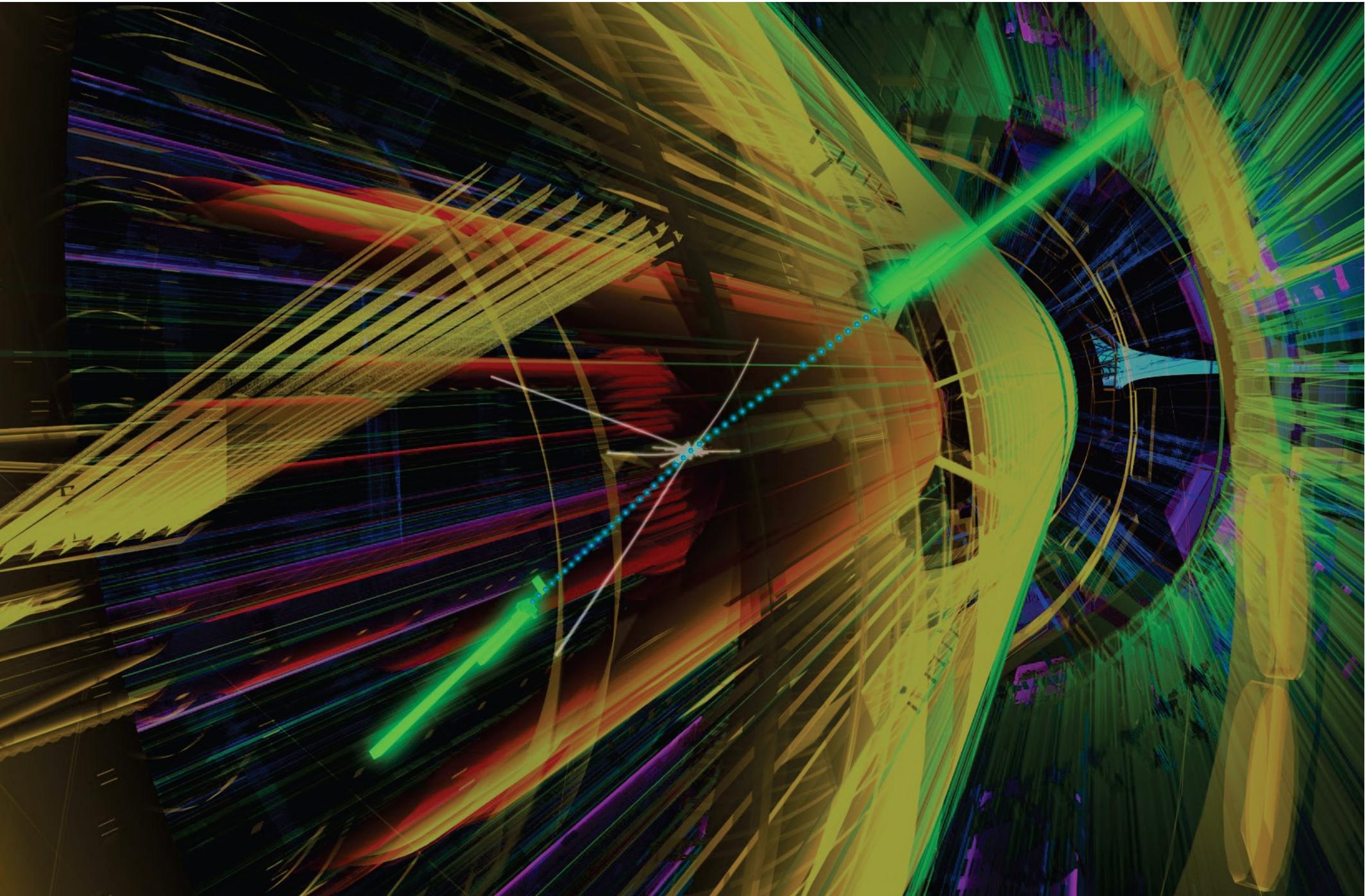
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, c'est le bruit de fond



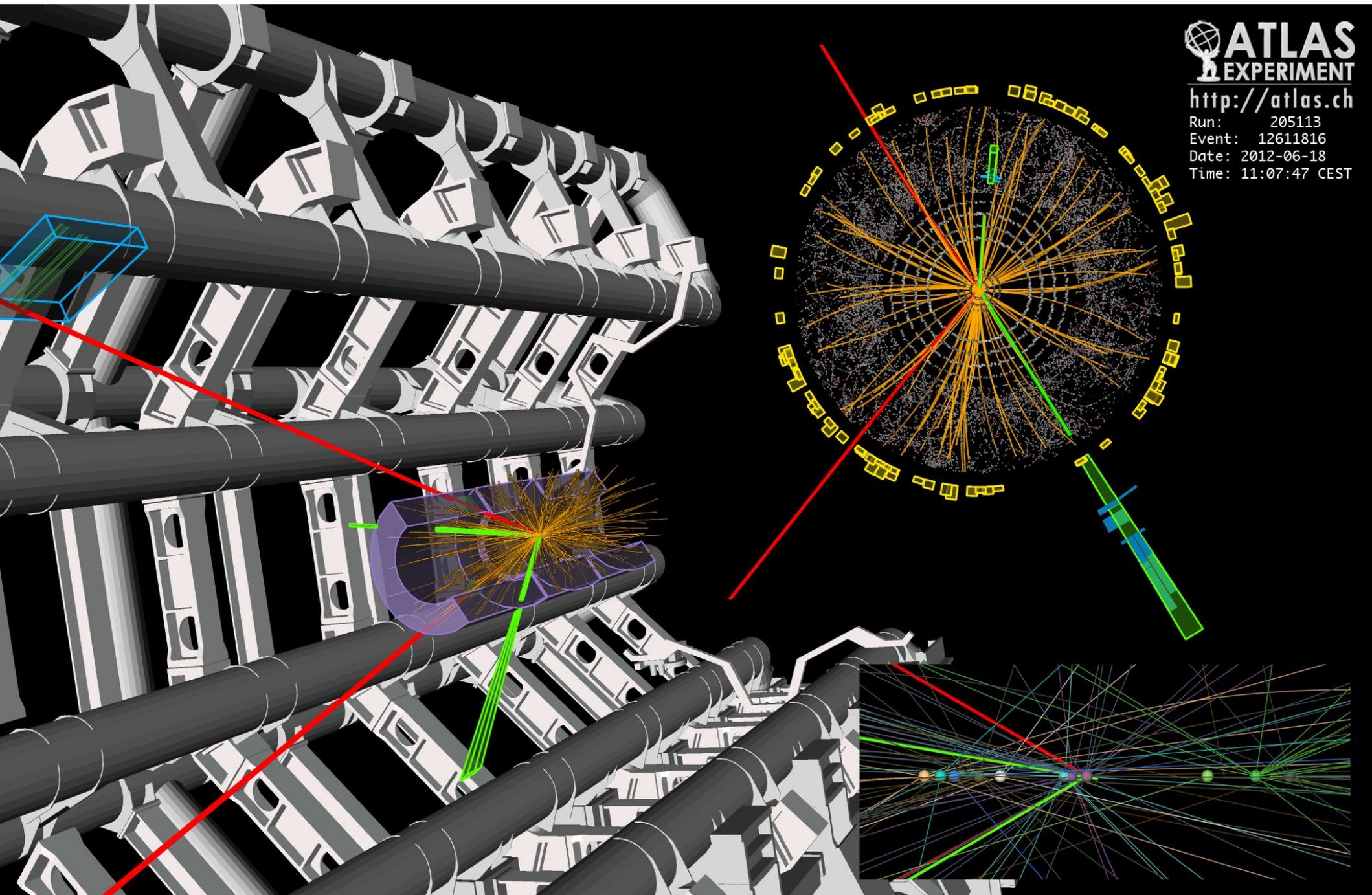
Boson de Higgs dans ATLAS



Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



ATLAS
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

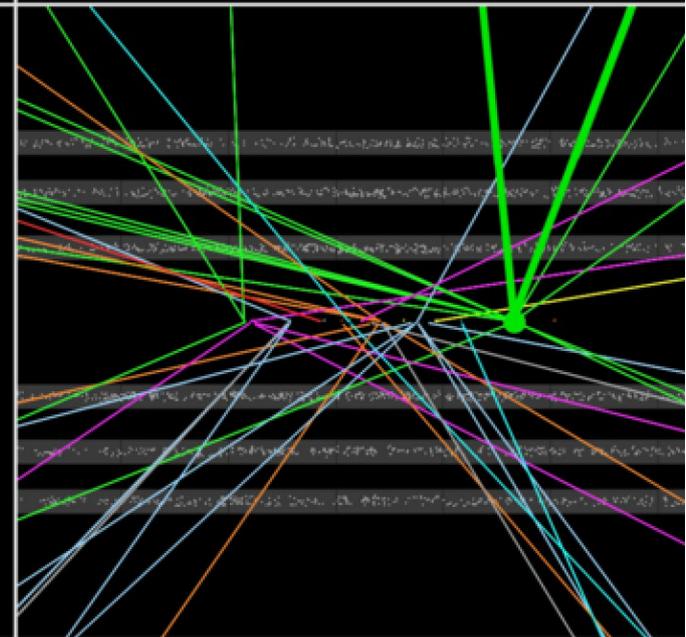
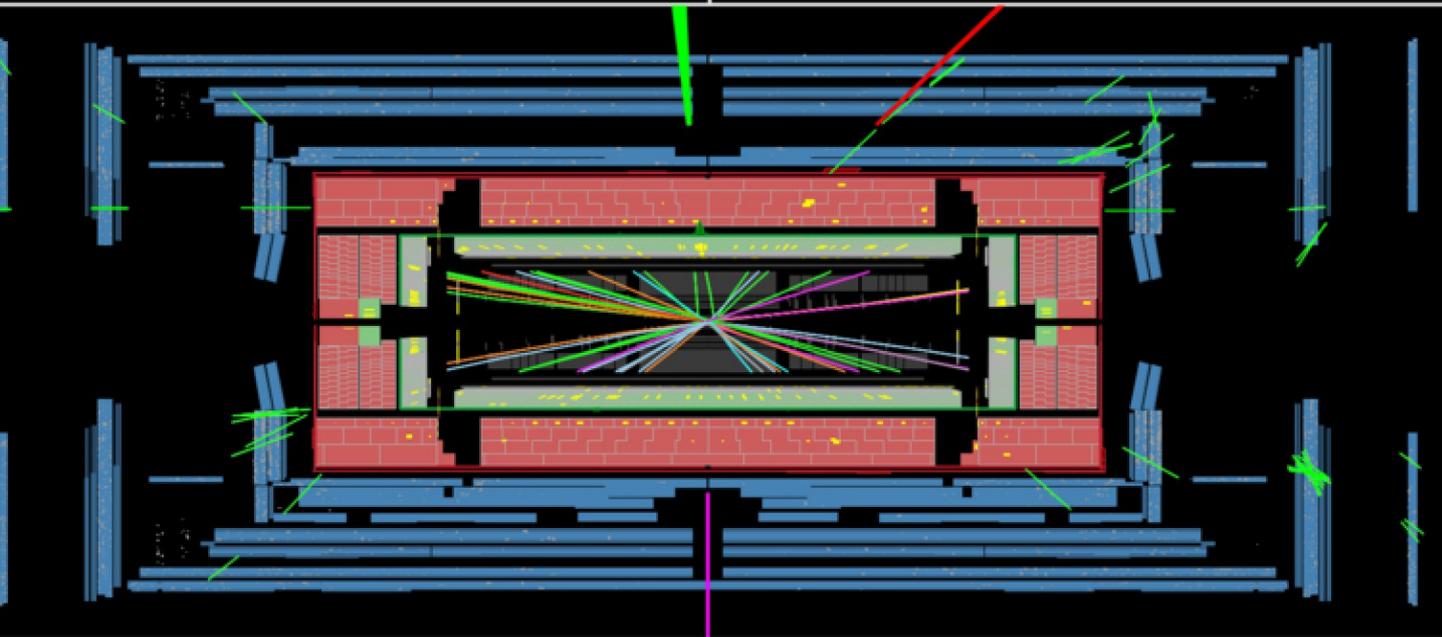
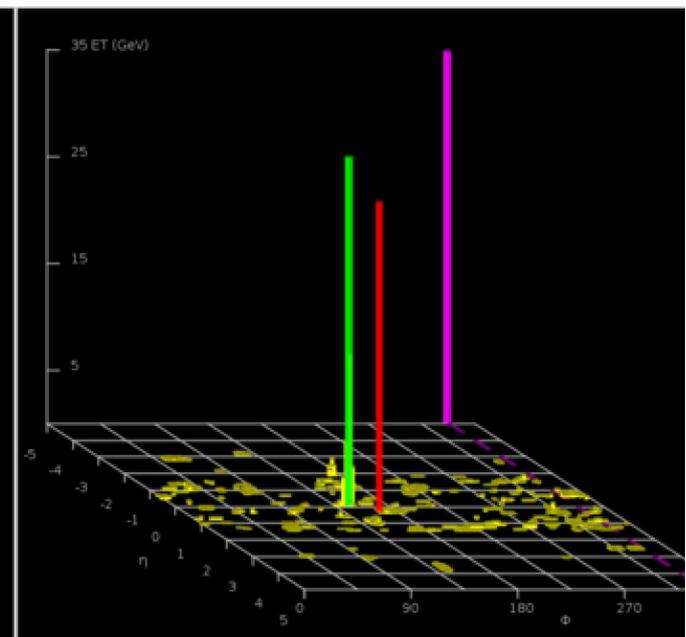
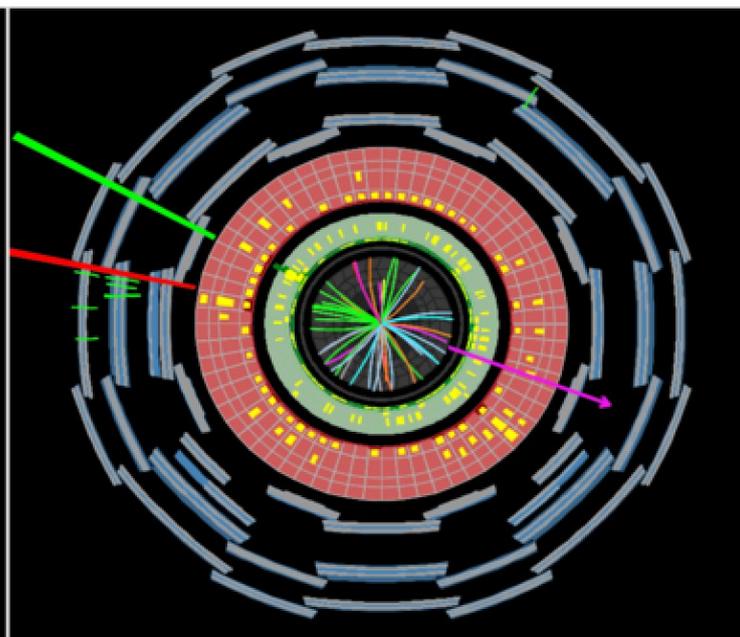
Run: 205113
Event: 12611816
Date: 2012-06-18
Time: 11:07:47 CEST

Candidat $H \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$



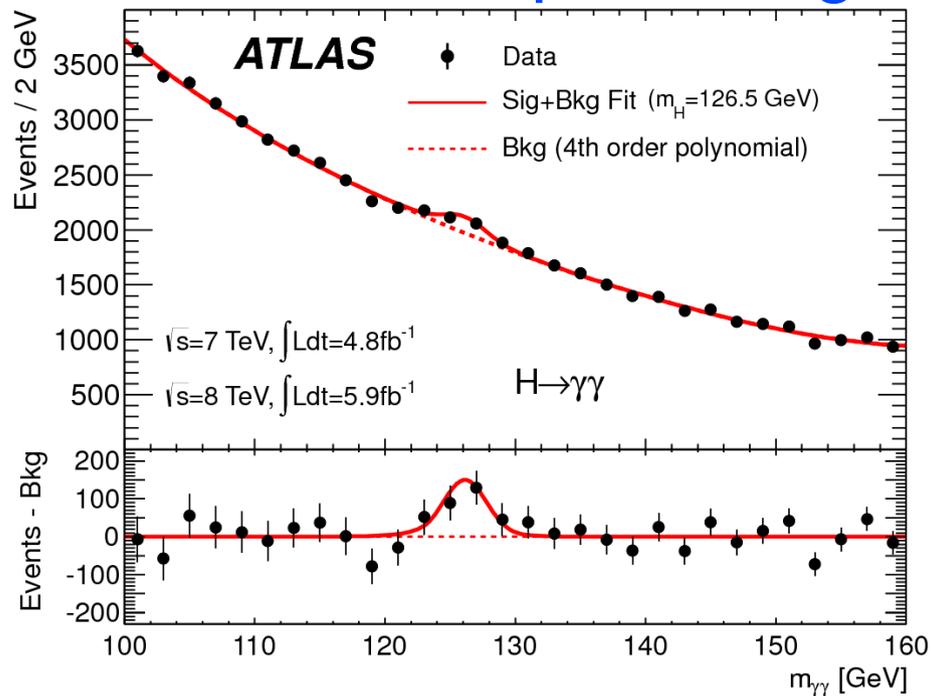
ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 204026, Event Number: 33133446
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST

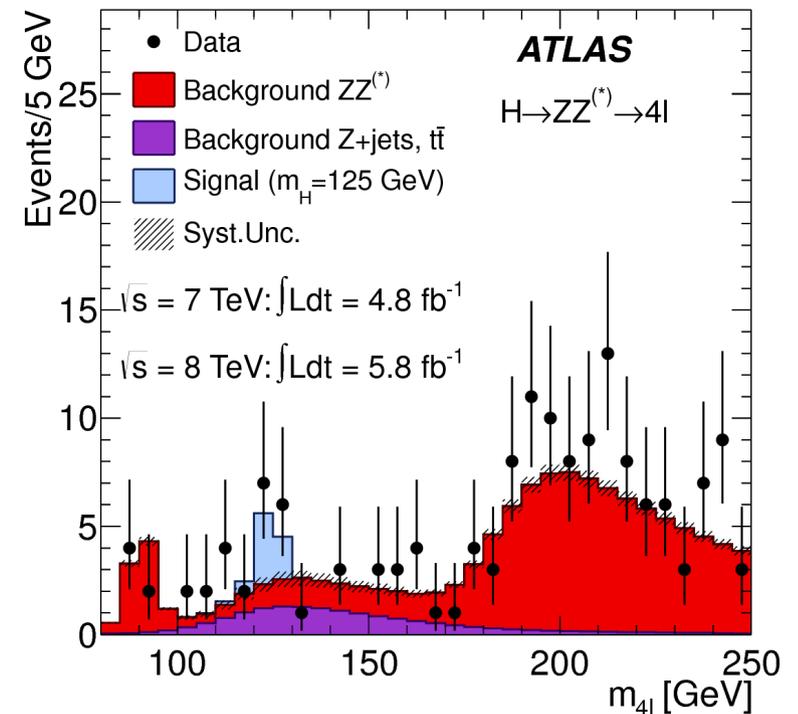


Mesure

- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

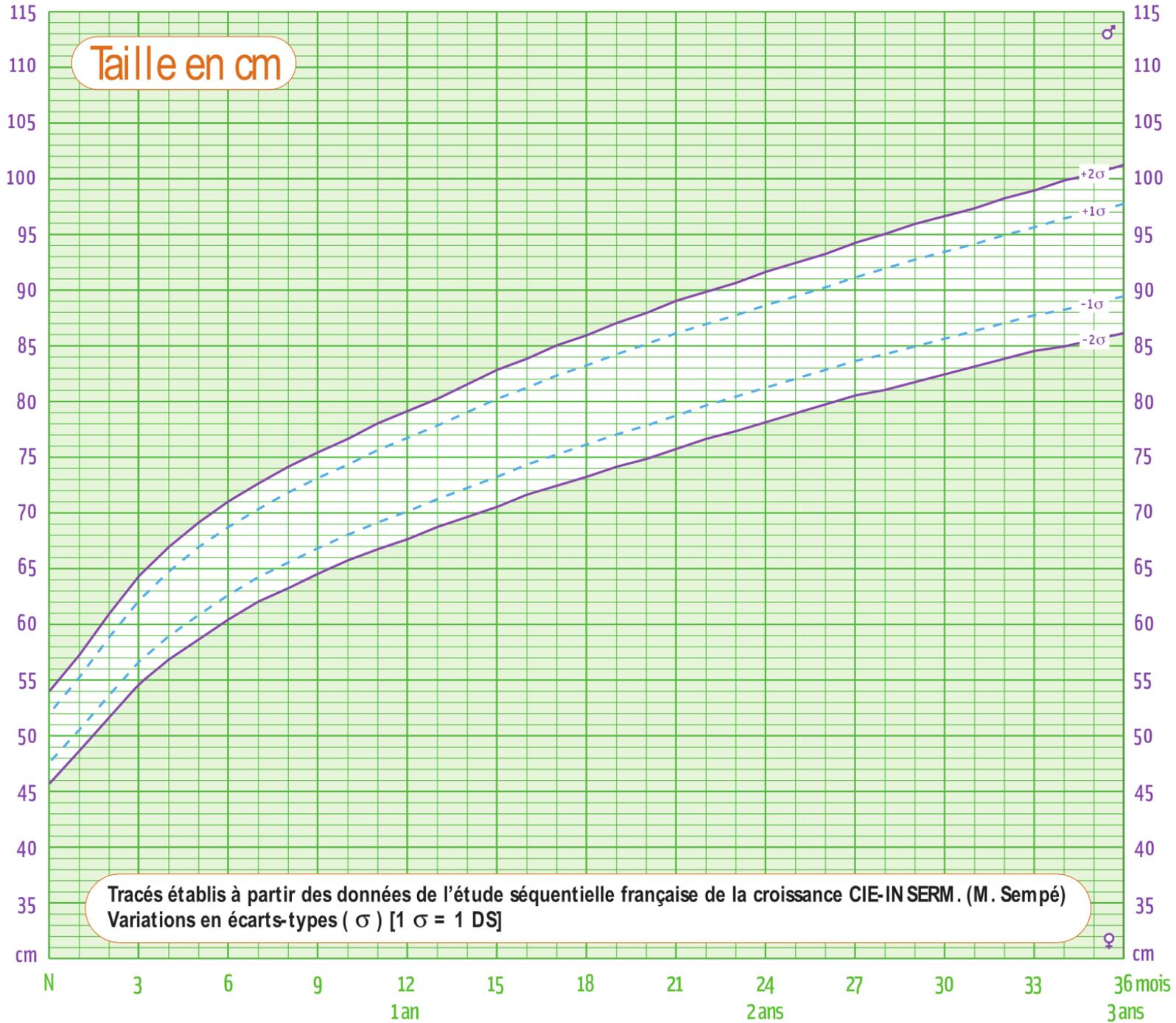


- Higgs en ZZ
 - ▶ Très peu de bruit de fond
 - ▶ Très peu d'événements

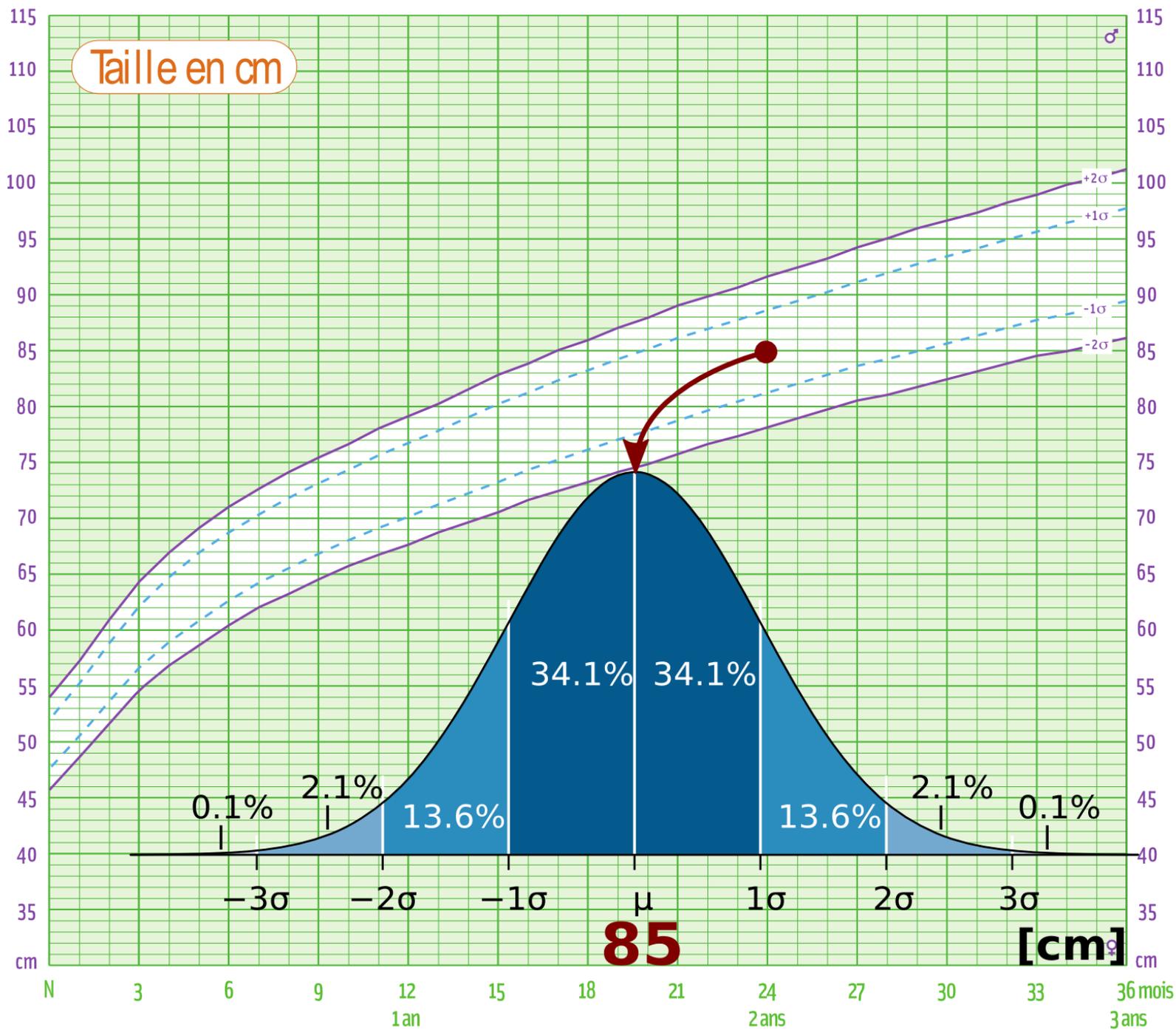


- Est-ce que cela est significatif ?
- Outils statistiques pour répondre

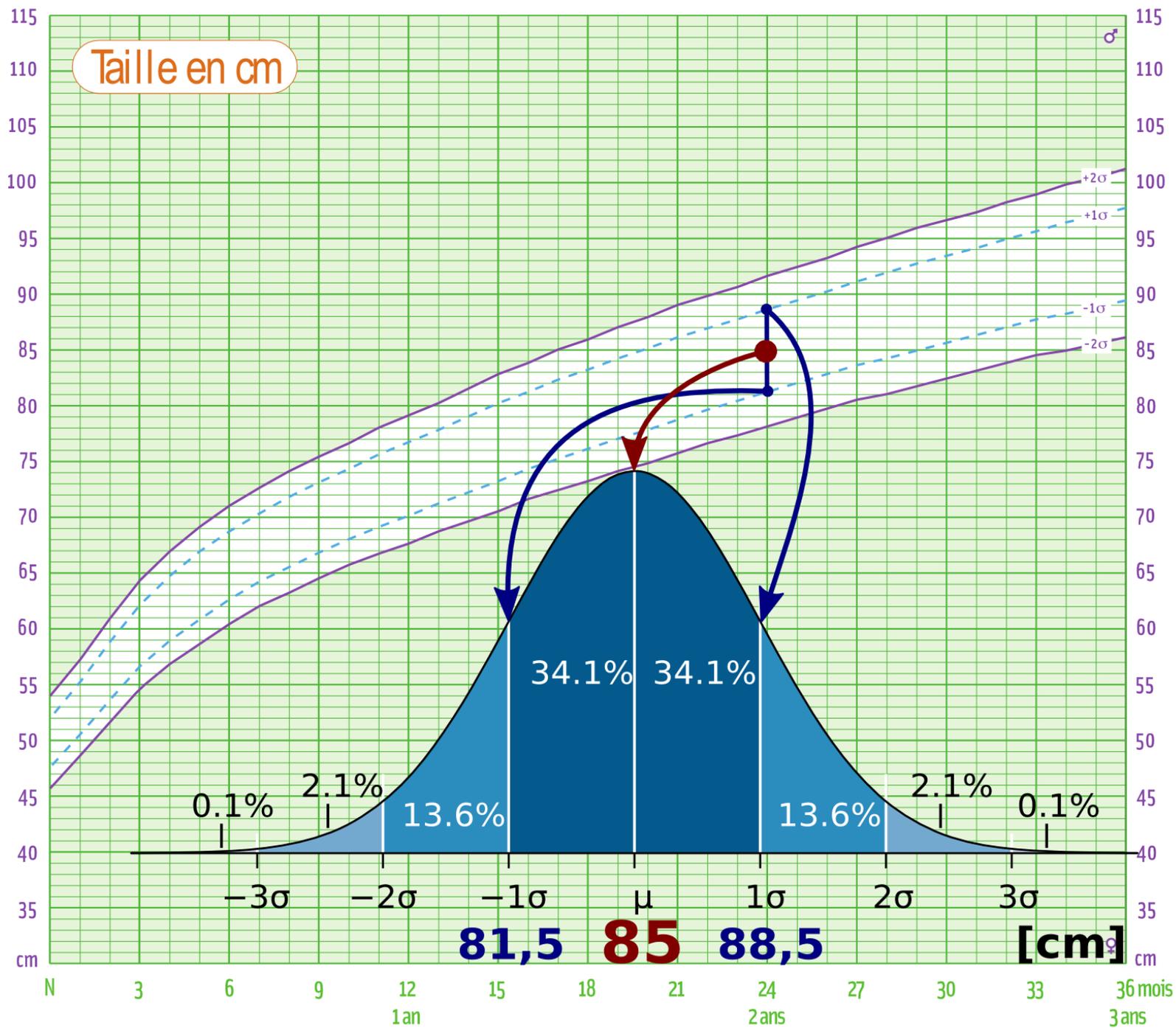
La Gaussienne



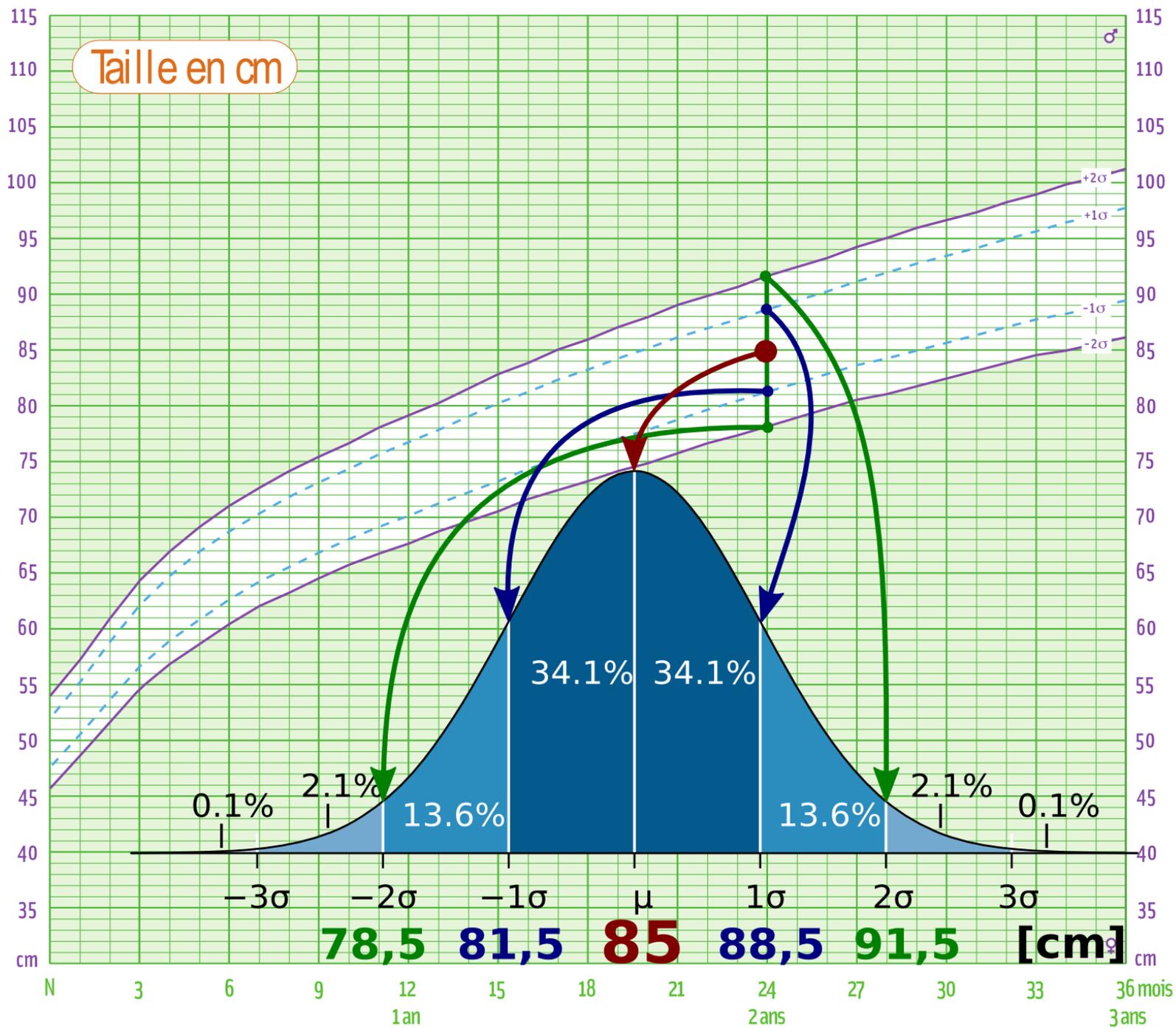
La Gaussienne



La Gaussienne



La Gaussienne

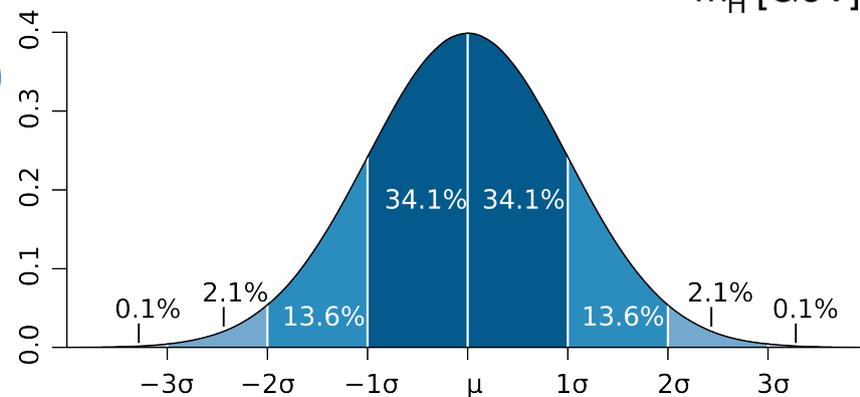
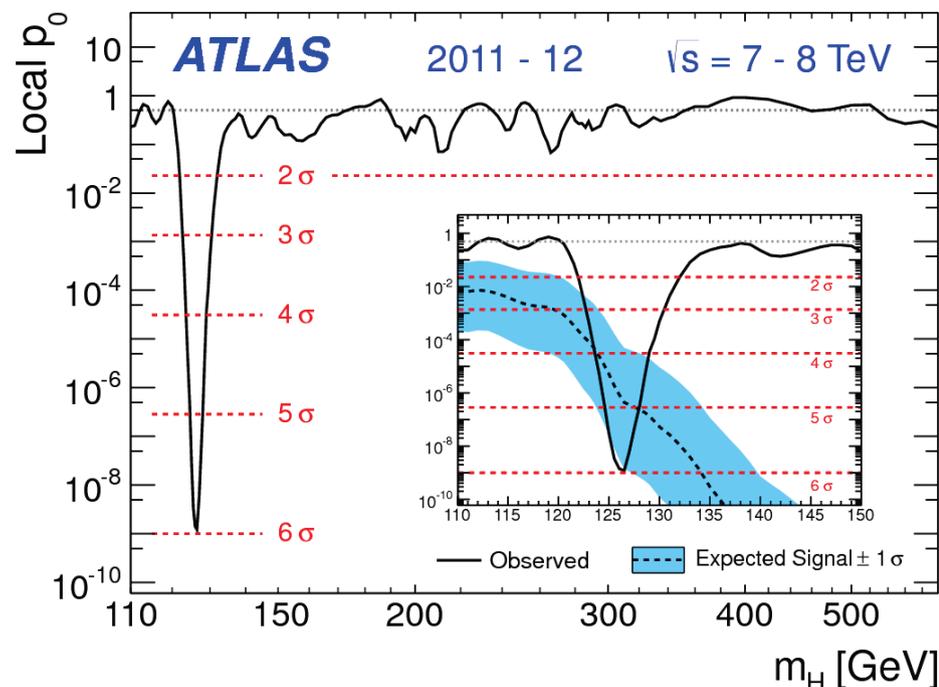


Significance statistique

- p_0 : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché
- Quantifié en nombre de déviations standard :

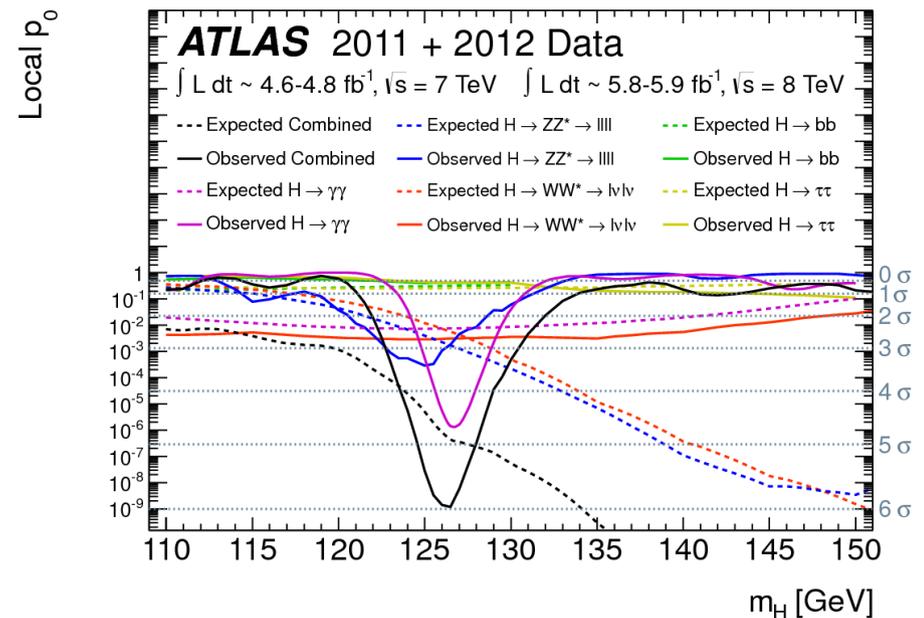
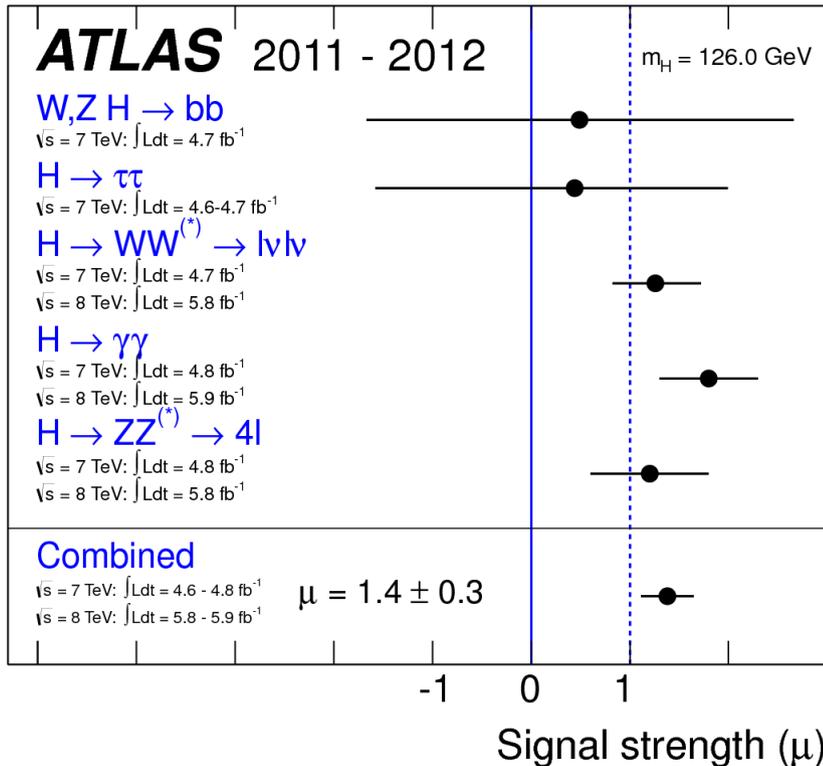
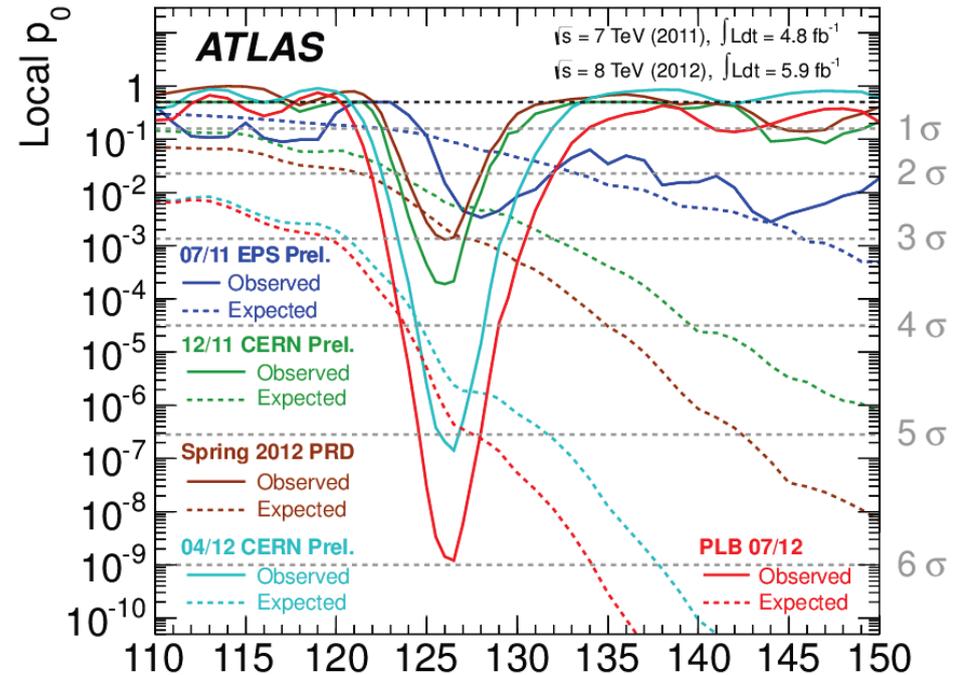
- ▶ 1σ : 1 chance sur 3
- ▶ 3σ (évidence) : 3 chances sur 1000
- ▶ 5σ (observation) : 1 chance sur 2 millions
- ▶ $5,9\sigma$: 3 chances sur 1 milliard

- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose



Est-ce consistant ?

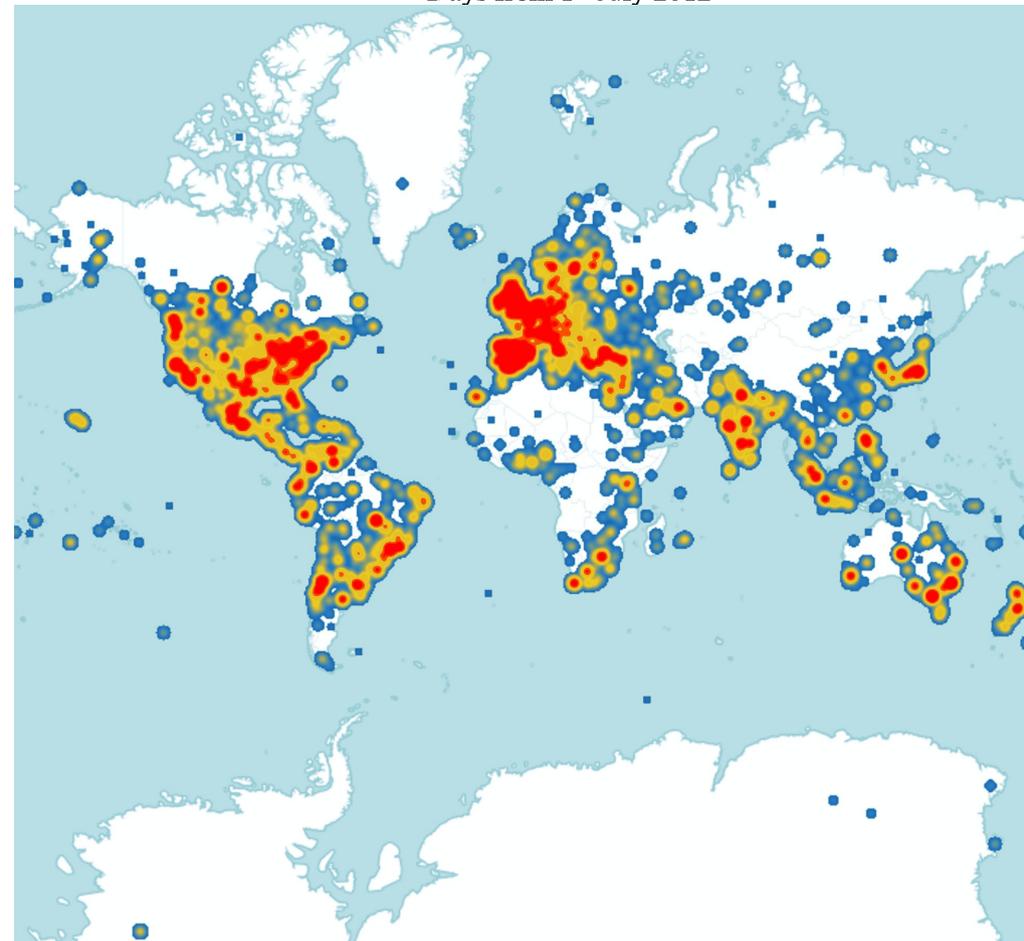
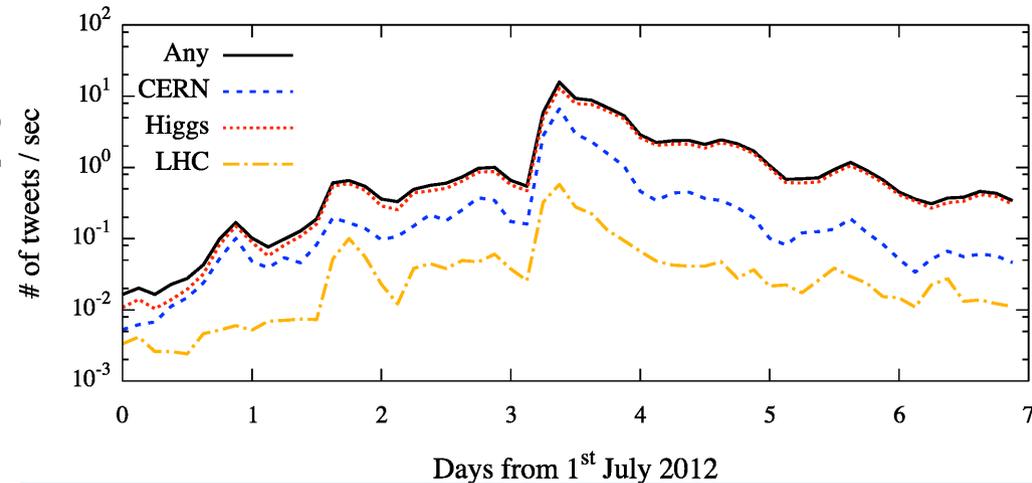
- Evolution dans le temps
- Mesure dans les différents canaux de désintégration, qui dépendent de différentes parties du détecteur
- ATLAS et CMS voient la même chose



Résultats

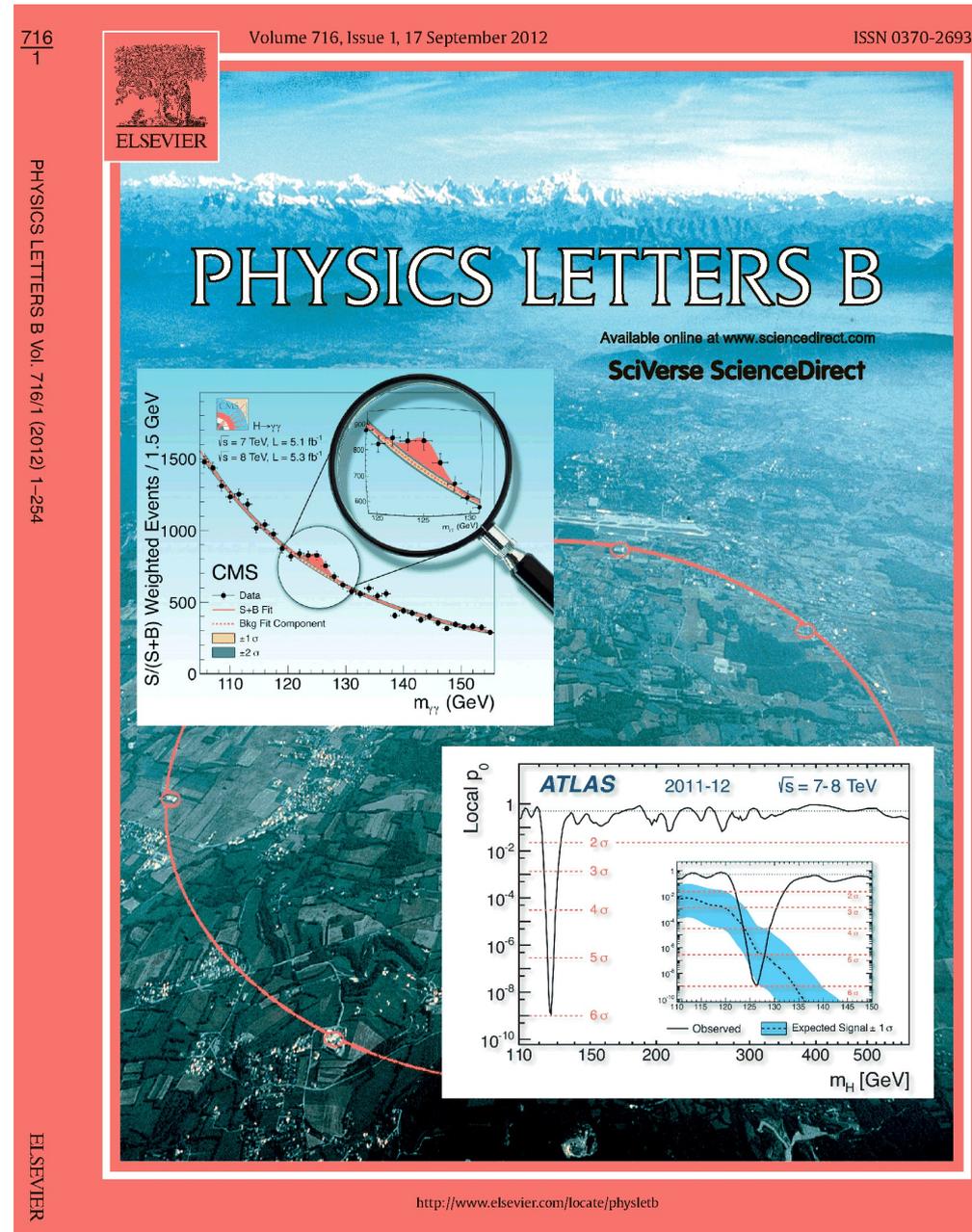
- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN

- ▶ 55 médias sur place
- ▶ 500 000 connexions webcast
- ▶ Vu sur >1000 chaînes de télévision
- ▶ Plus d'un million de tweets (gazouillis)



Résultats

- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN
 - ▶ 55 médias sur place
 - ▶ 500 000 connexions webcast
 - ▶ Vu sur >1000 chaînes de télévision
 - ▶ Plus d'un million de tweets (gazouillis)
- Publiés fin juillet
- Et depuis ?



Évolution dans le temps



film

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



film

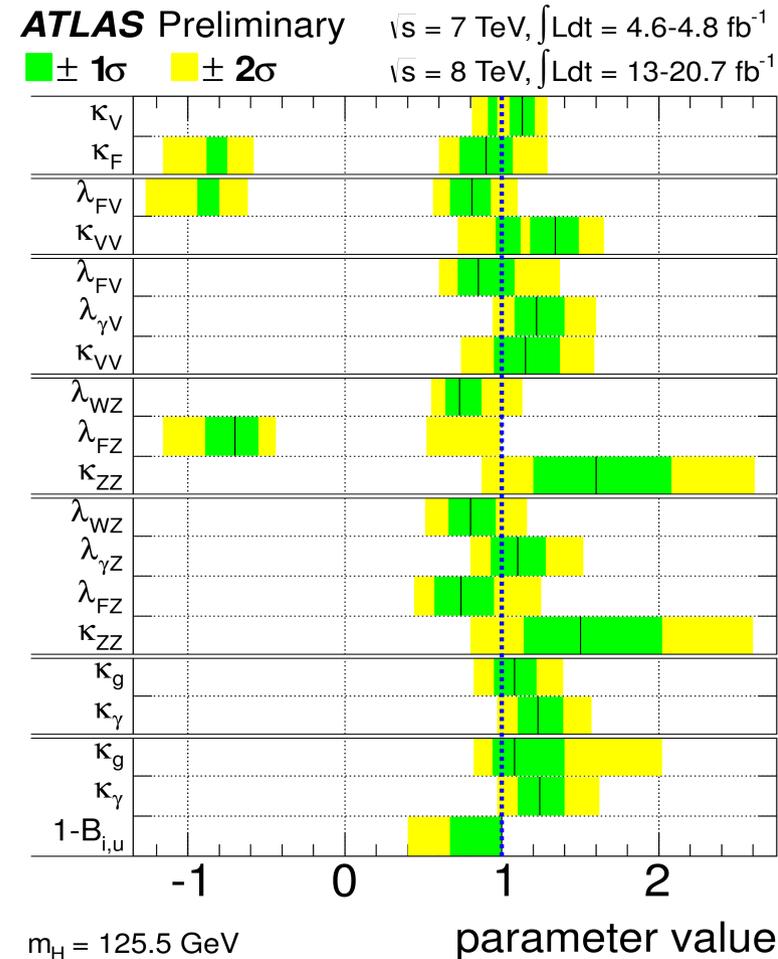
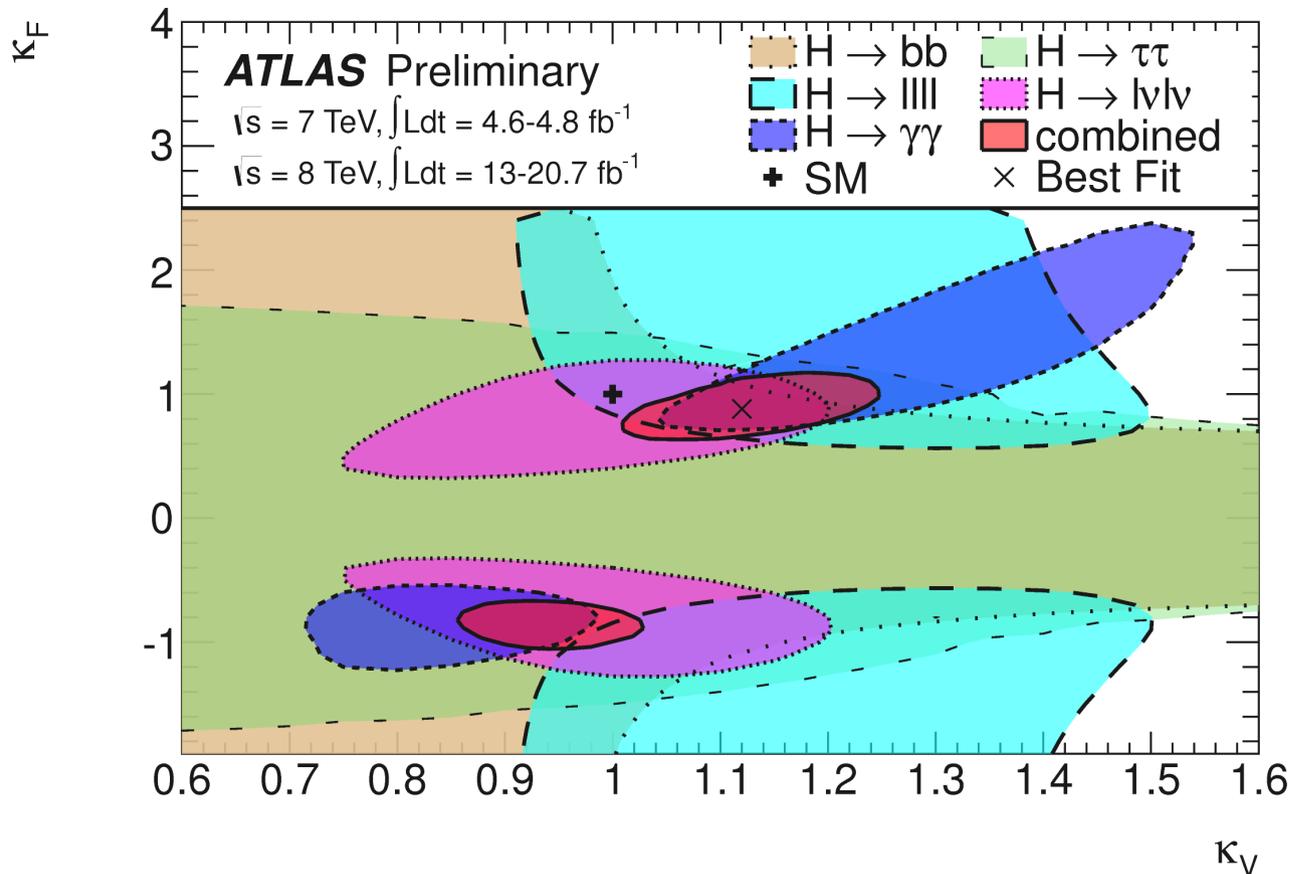
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard, **$\sim 126 \text{ GeV}$** (134 fois la masse du proton)
- Derniers résultats présentés au mois d'avril 2013
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans plusieurs canaux de désintégration
- Résultats d'ATLAS et CMS consistants
- Mesure des propriétés :
 - ▶ Confirmation du modèle standard...
 - ▶ ... ou observation de petites divergences, signe de physique au delà du modèle standard

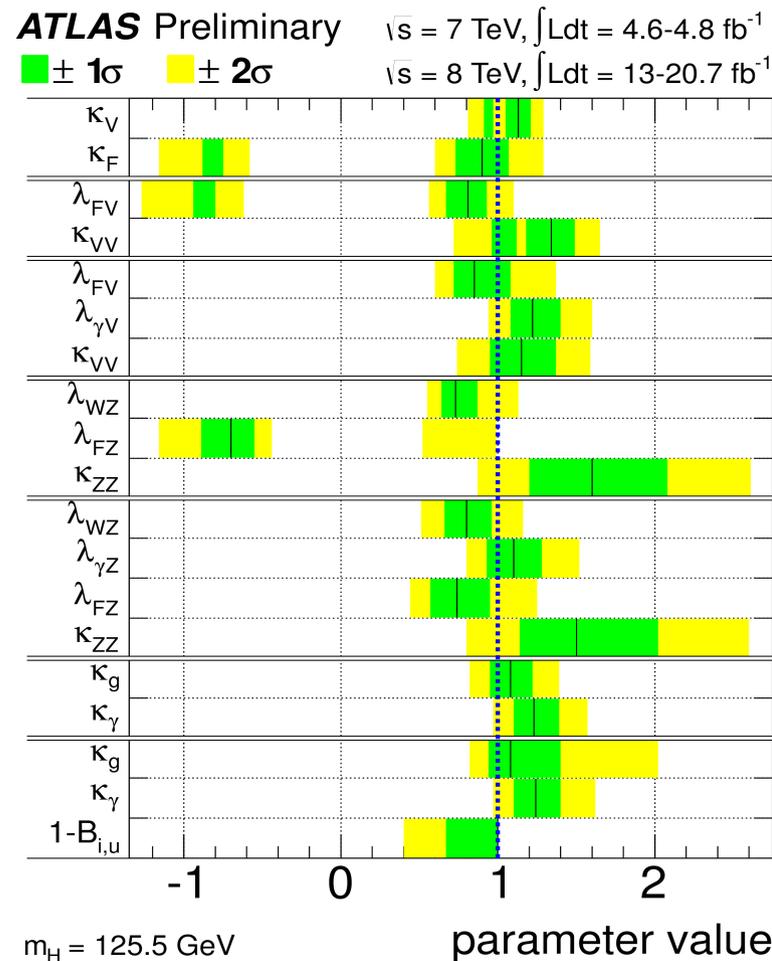
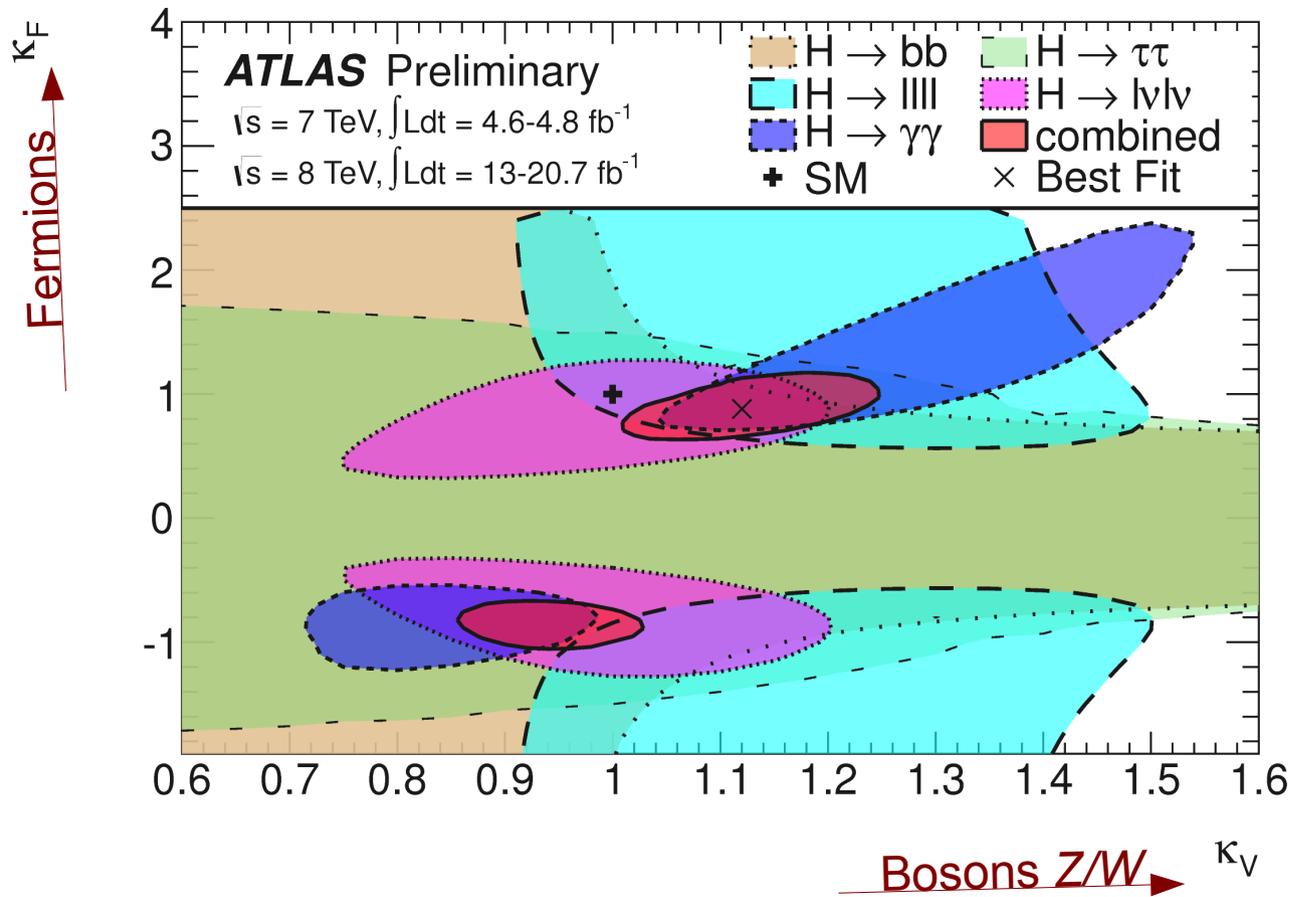
Couplage aux fermions et bosons

- Trop de paramètres à mesurer simultanément
 - Regrouper et mesurer le rapport à la prédiction du MS, κ
- Si $\kappa = 1$ la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard



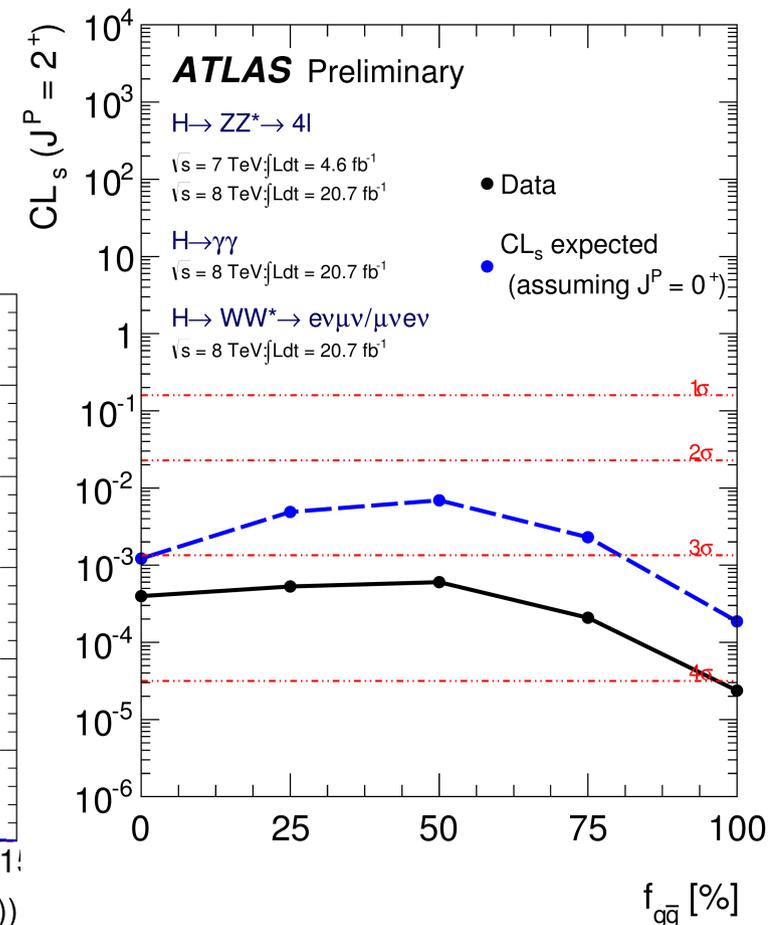
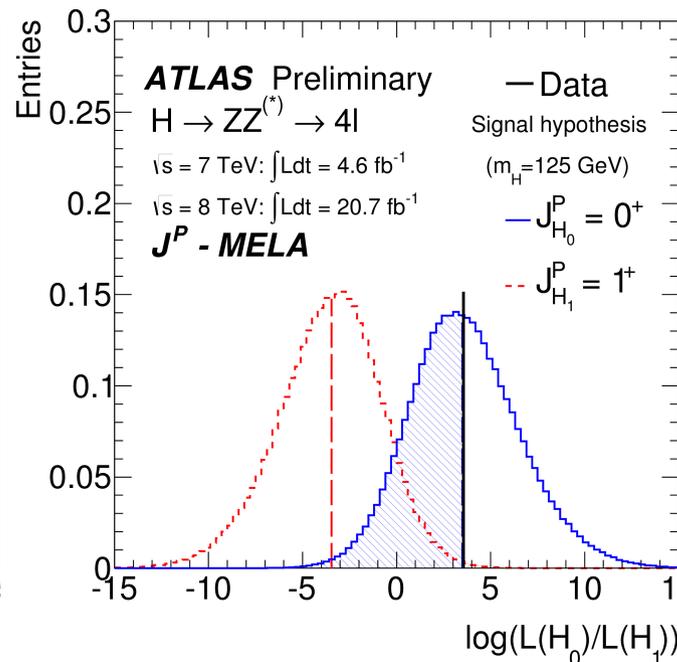
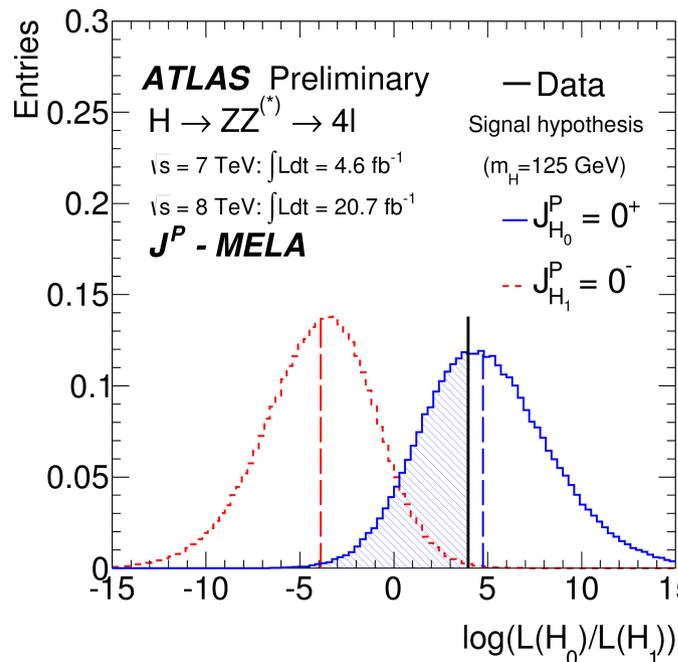
Couplage aux fermions et bosons

- Trop de paramètres à mesurer simultanément
 - Regrouper et mesurer le rapport à la prédiction du MS, κ
- Si $\kappa = 1$ la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard

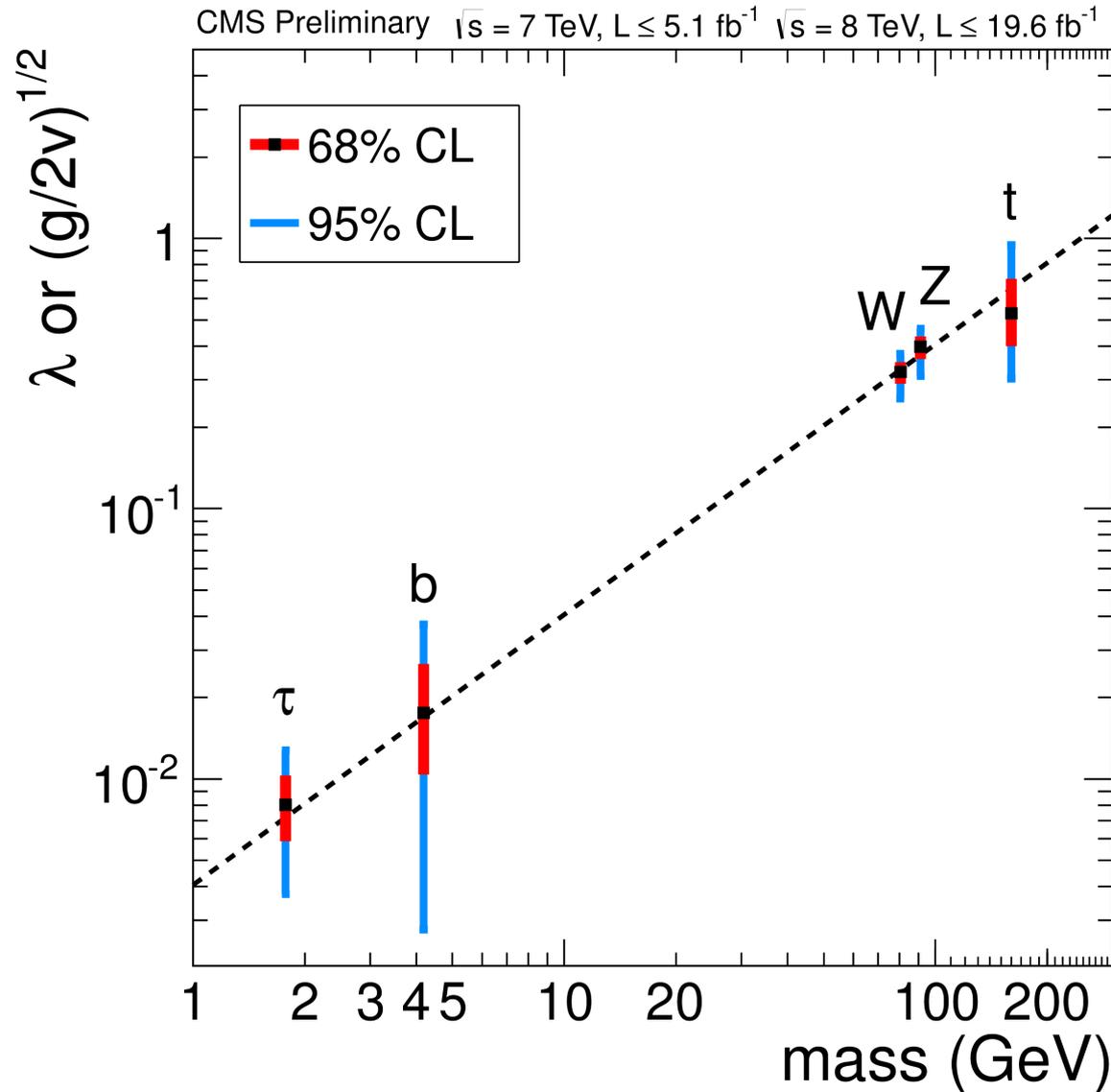


Spin et parité

- Observation de $H \rightarrow \gamma\gamma$ indique un spin entier, pas 1
- Exclusion de spin 1^+ , 1^- , 0^- , 2^+ de plus en plus claire
- A chaque fois consistant avec 0^+ : comme le boson de Higgs du modèle standard



Masse des particules et couplage au boson de Higgs



- Relation comme prévue par le modèle standard

Pour le moment, cette particule ressemble beaucoup au boson de Higgs du modèle standard.

Les nouvelles données à partir de 2015 devraient permettre de tout mesurer avec une bien meilleure précision, modèle standard ou au-delà

Autres théories

- Le modèle standard n'explique pas tout
- 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

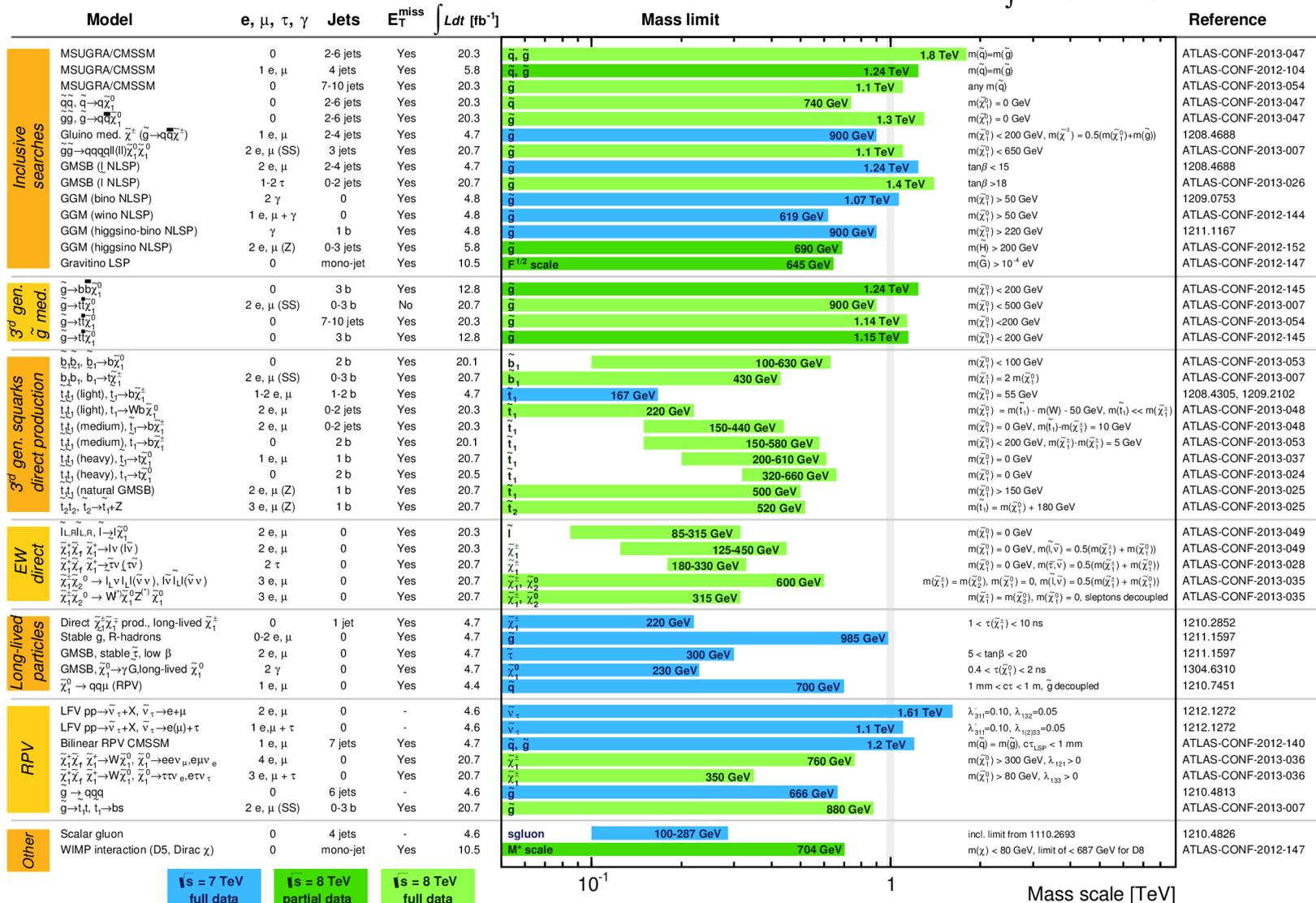
Supersymétrie : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

Status: LHCP 2013

ATLAS Preliminary

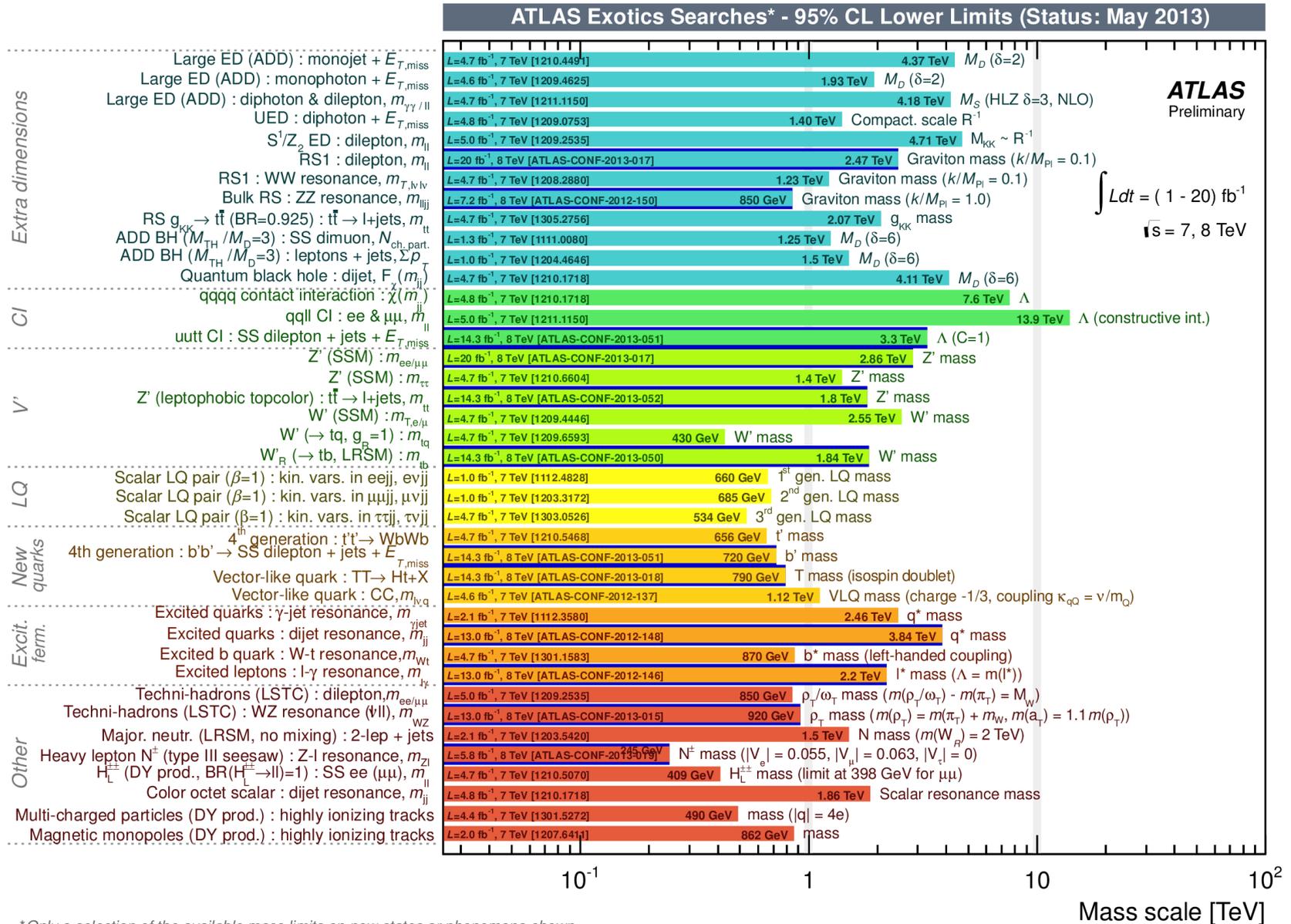
$$\int L dt = (4.4 - 20.7) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$



*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 !

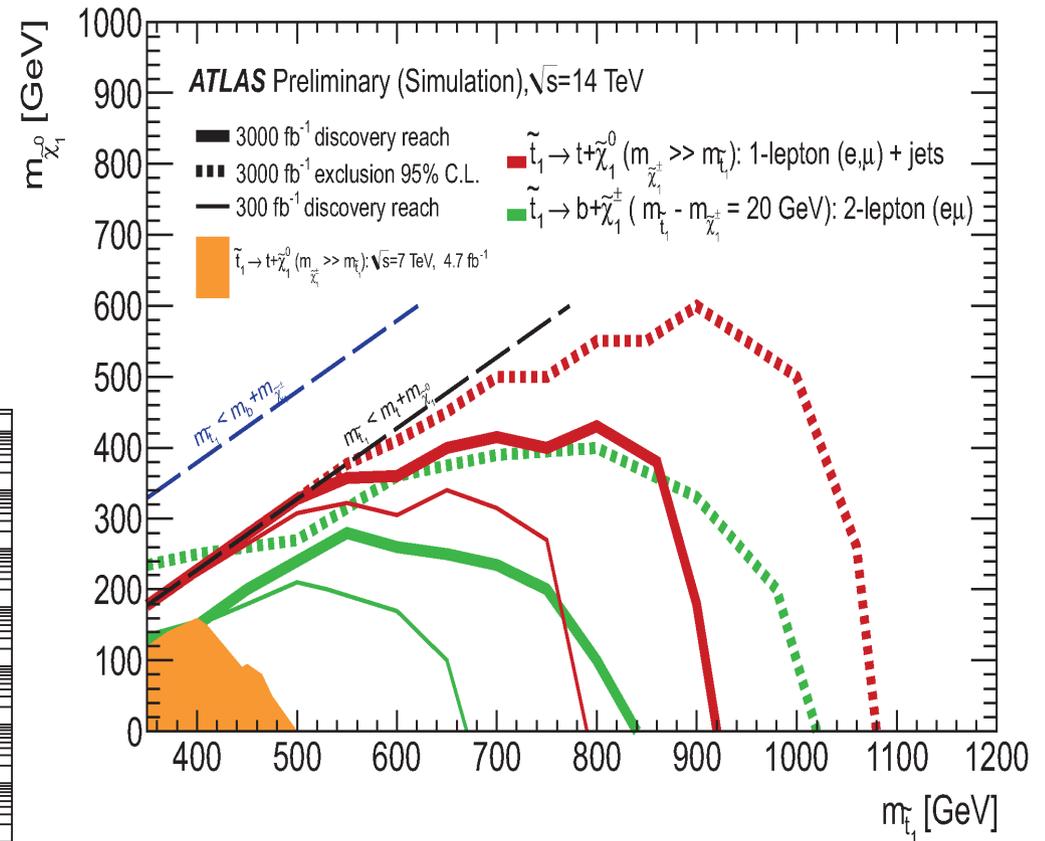
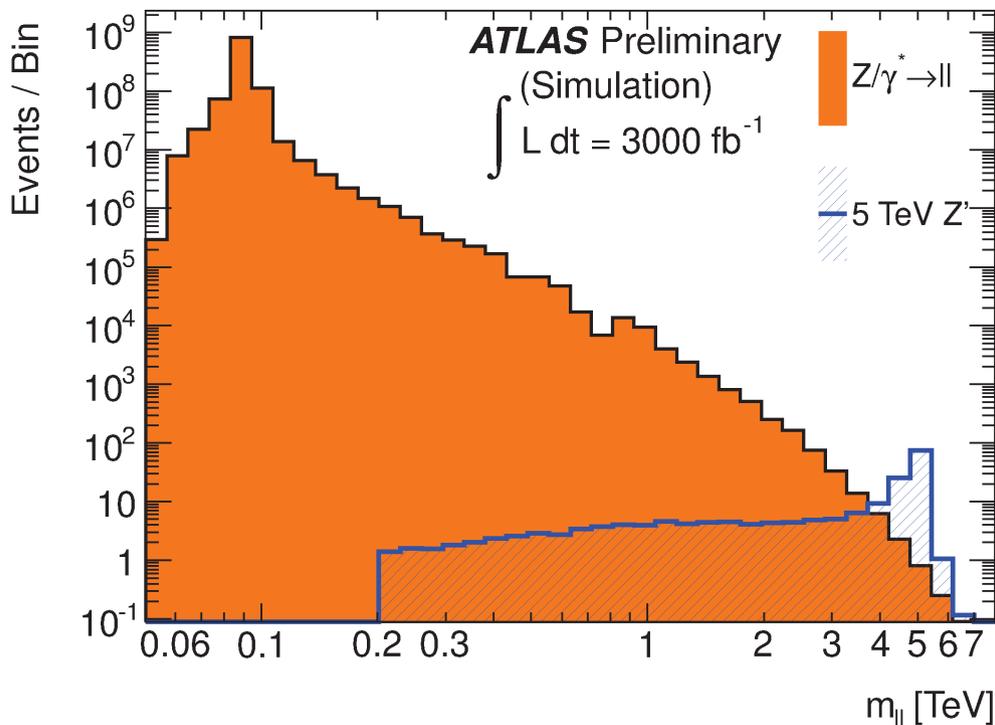
Exotiques : état des lieux



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

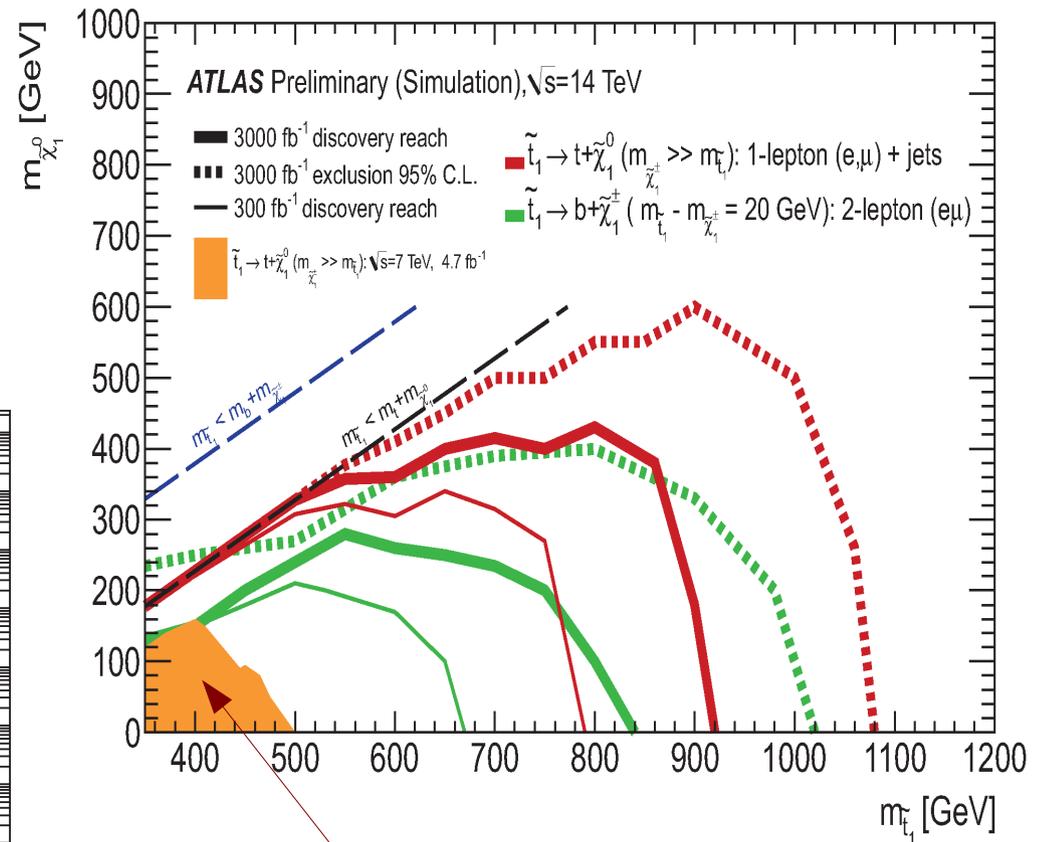
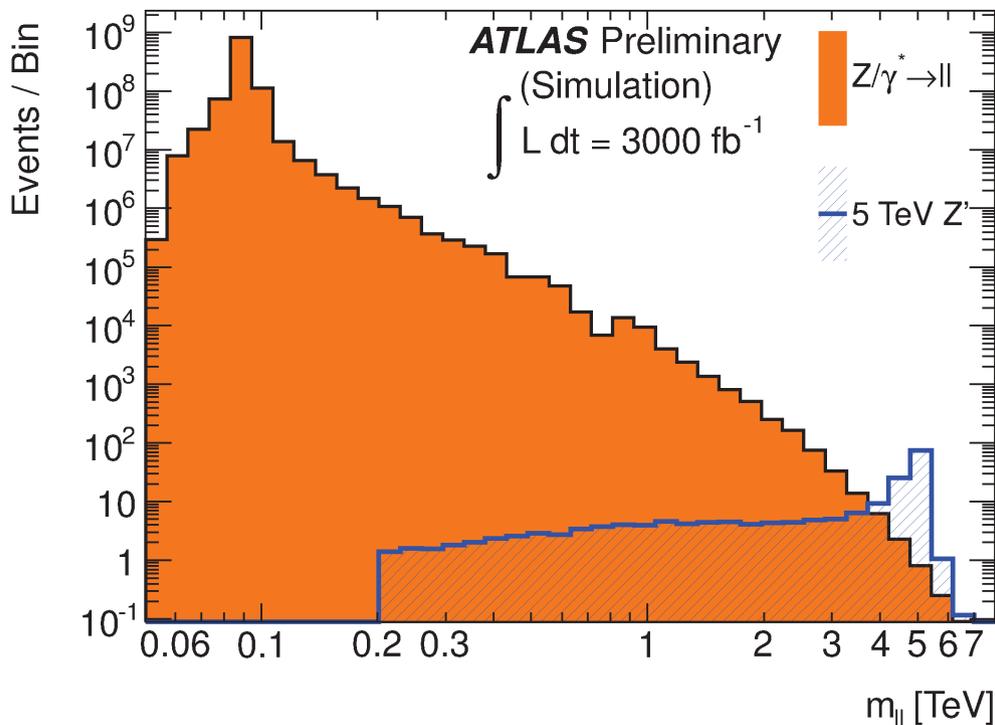
SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2020
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030



SUSY et exotiques : le futur

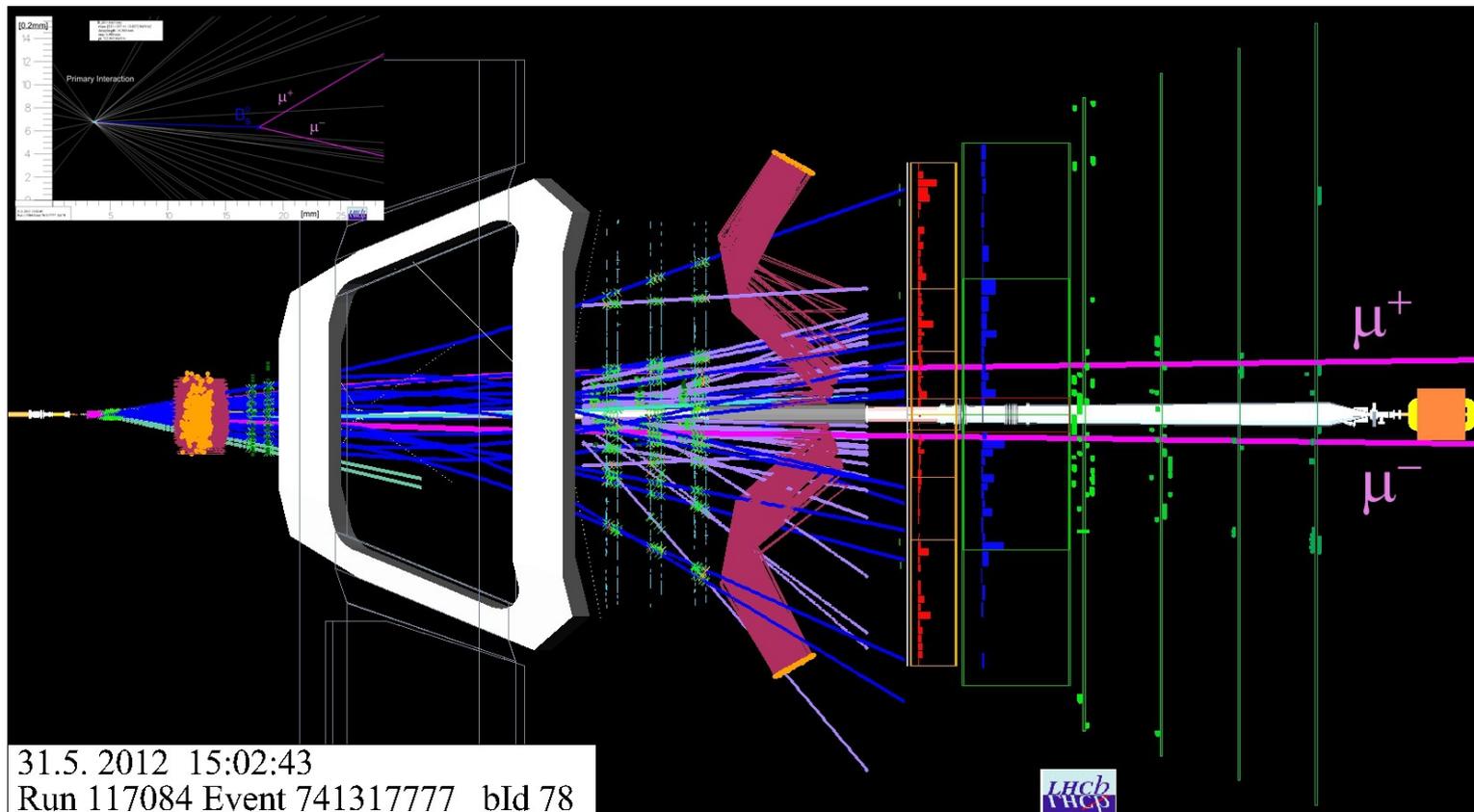
- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2020
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030



Exclus actuellement

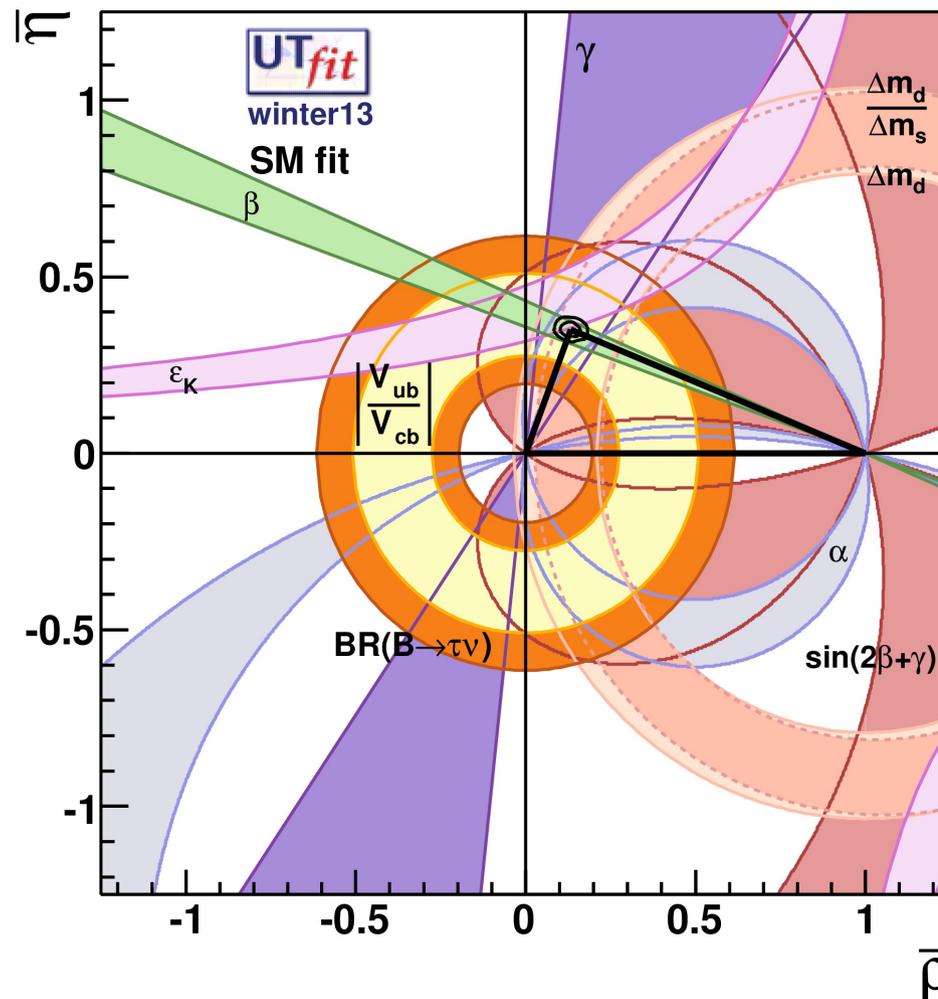
Nouvelle physique indirectement

- 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, $(3.2^{+1.5}_{-1.2}) \times 10^{-9} \dots$



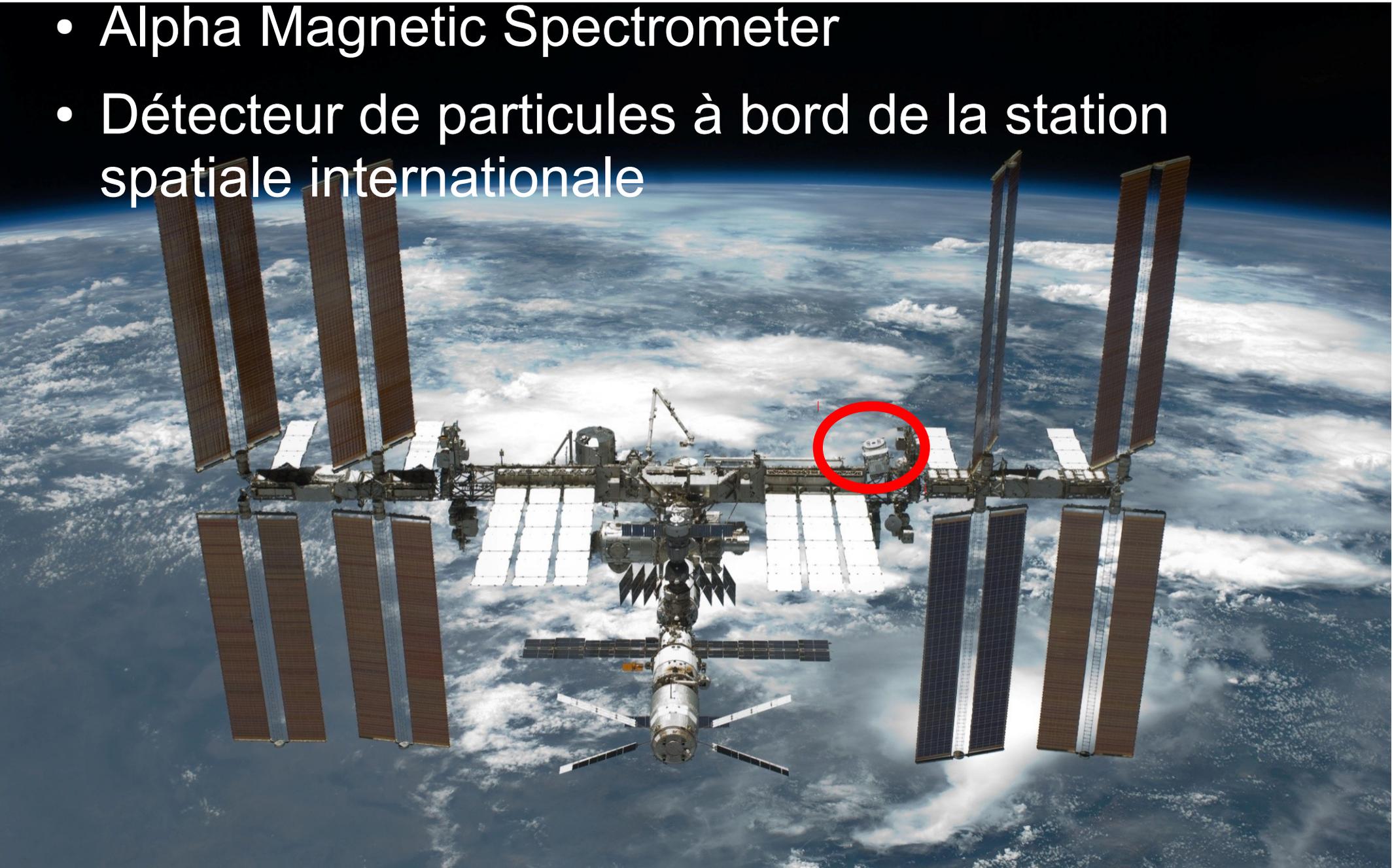
Asymétrie matière-antimatière

- LHCb fait des mesures de précision
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard, comme d'hab...



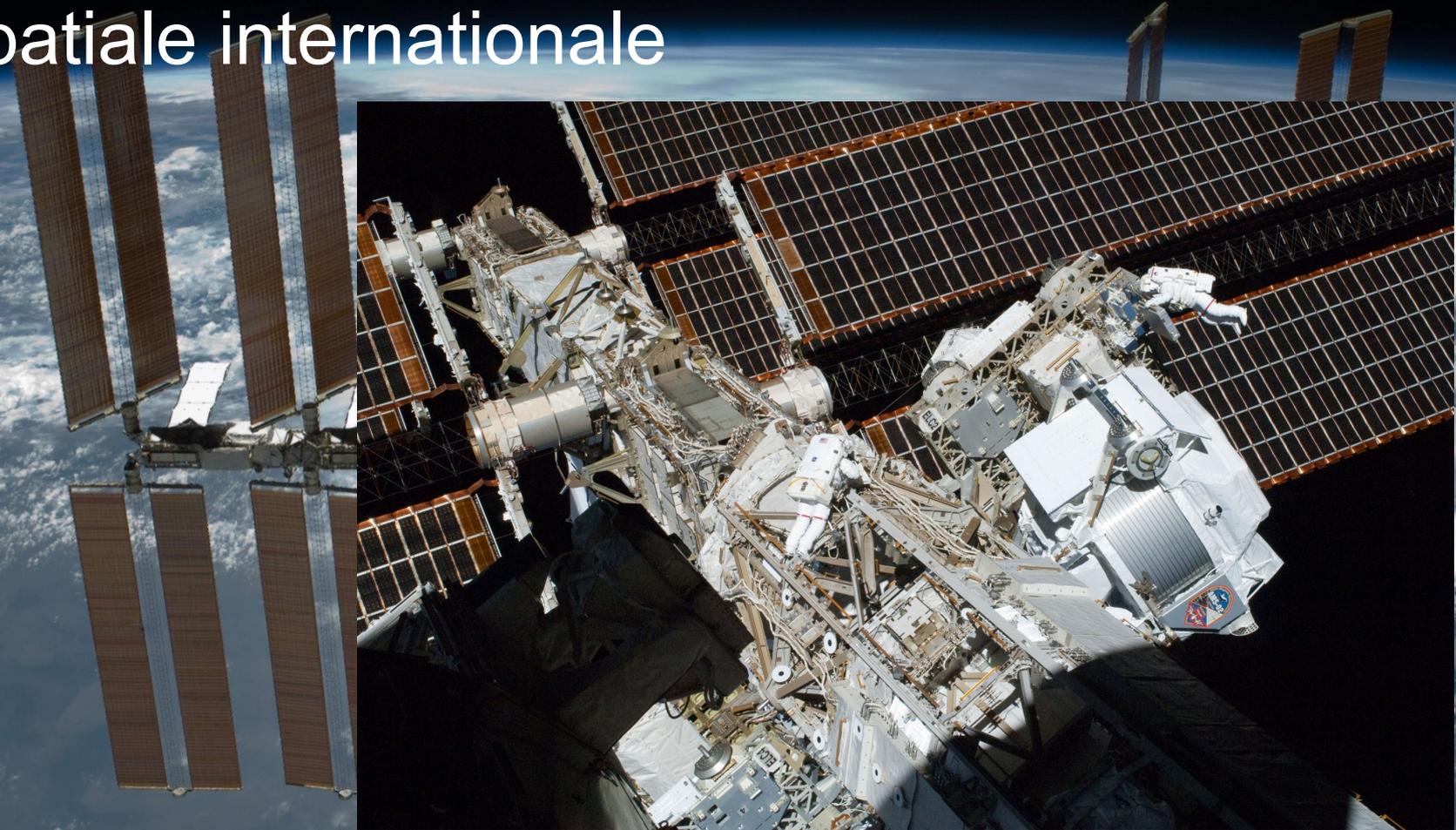
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

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



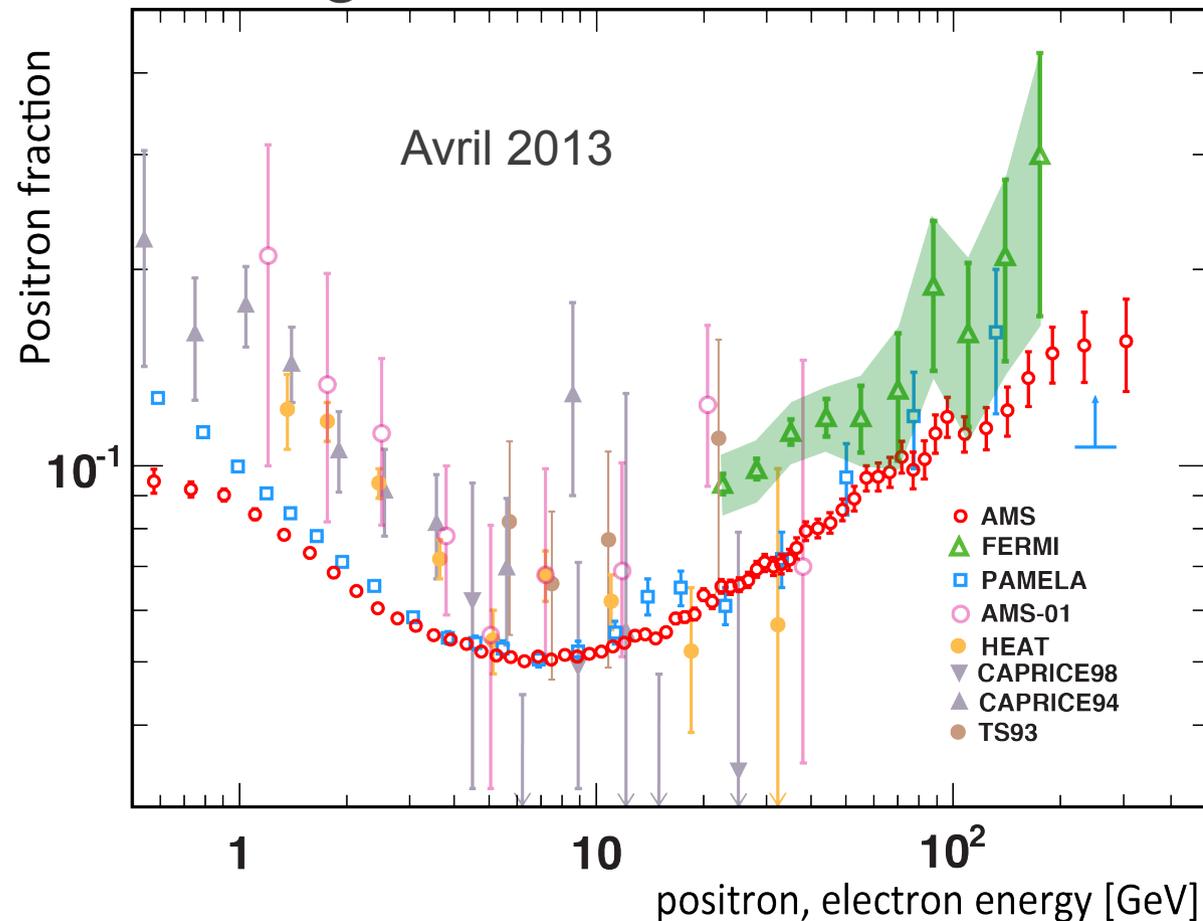
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- 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
- Bientôt des résultats à plus haute énergie, susceptibles d'indiquer la désintégration de matière noire

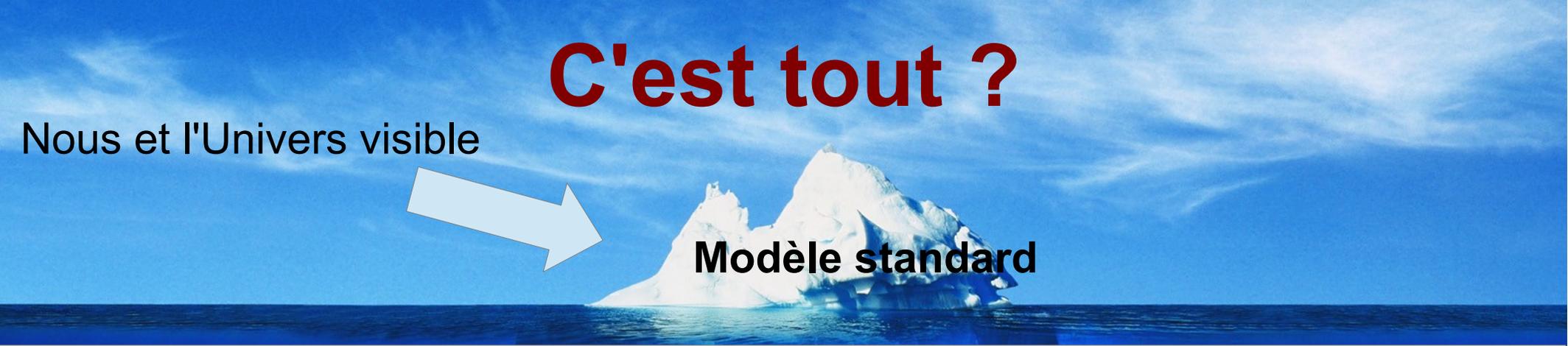


C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



Modèle standard

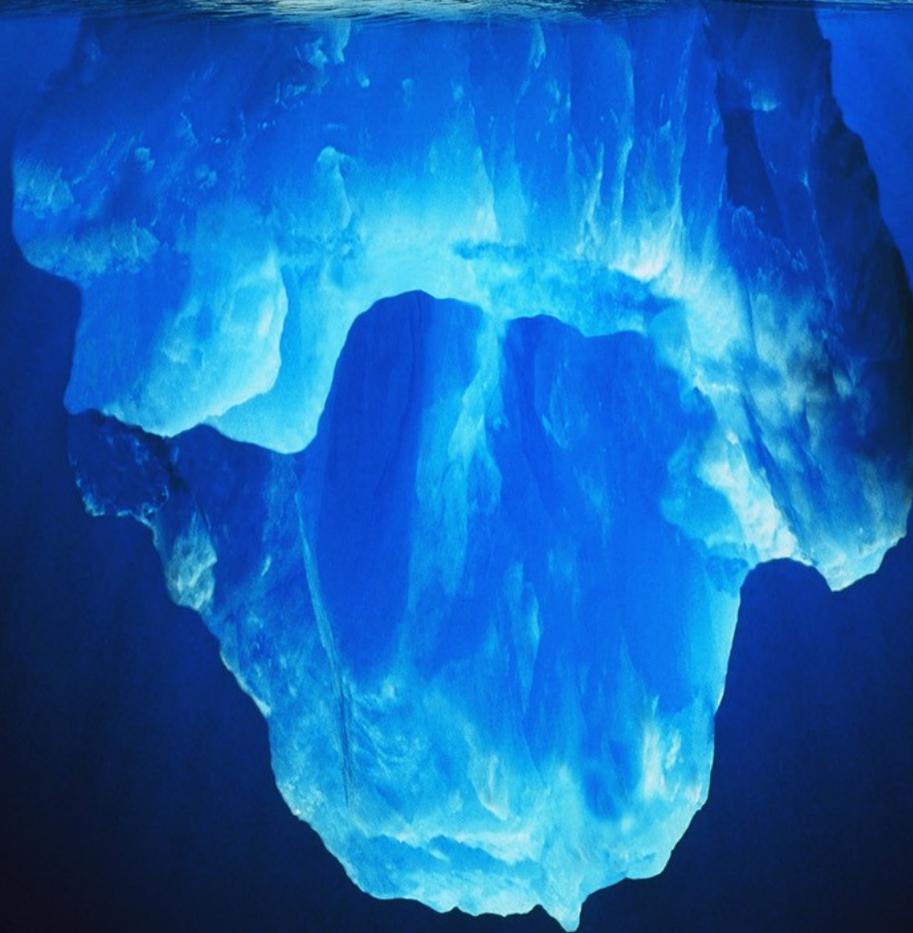


C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

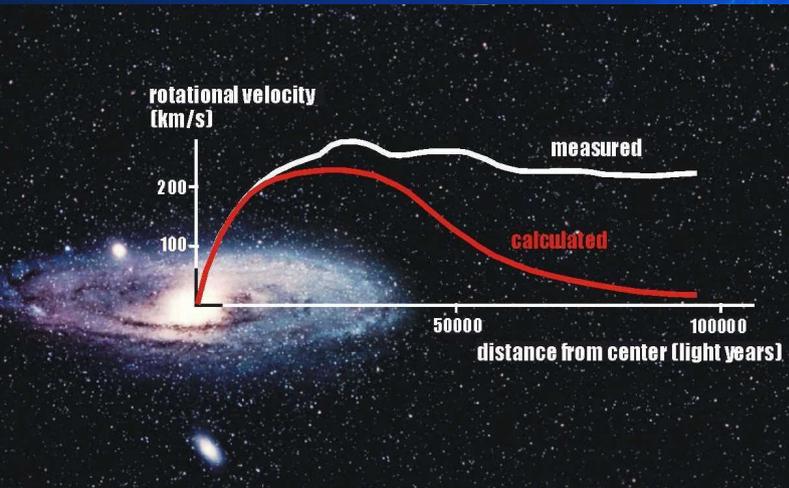


5% Modèle standard

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

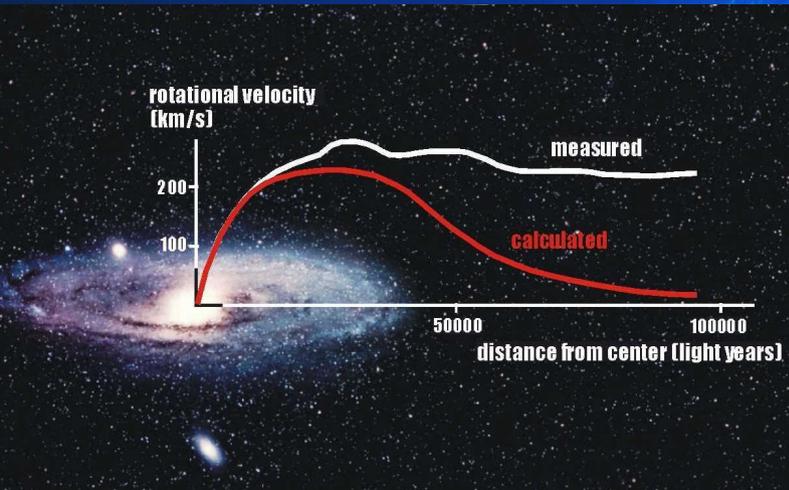


5% Modèle standard

27% Matière noire



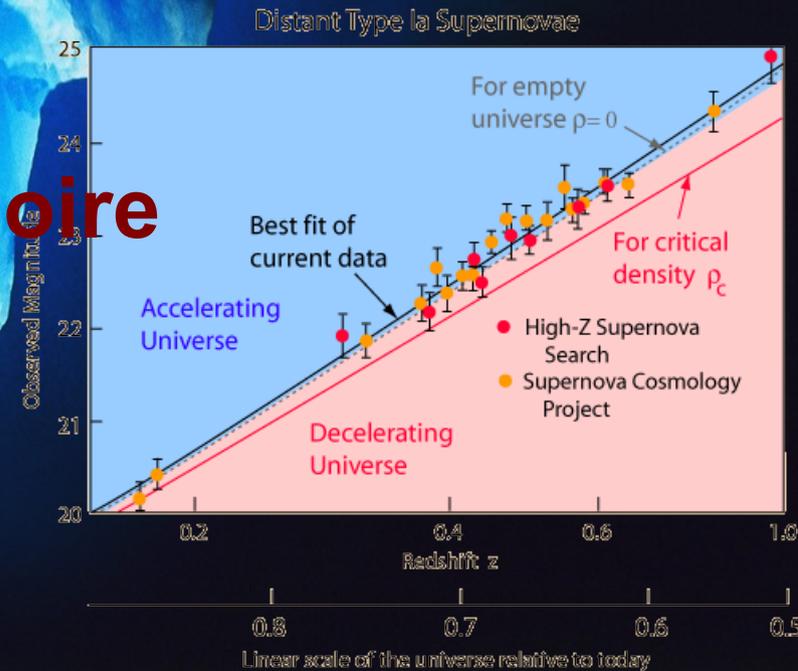
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



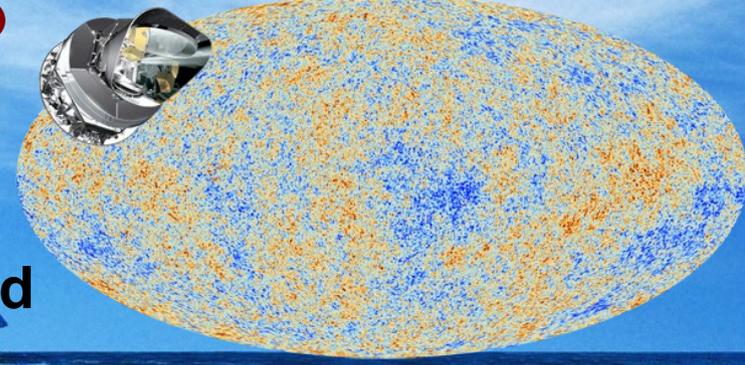
68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

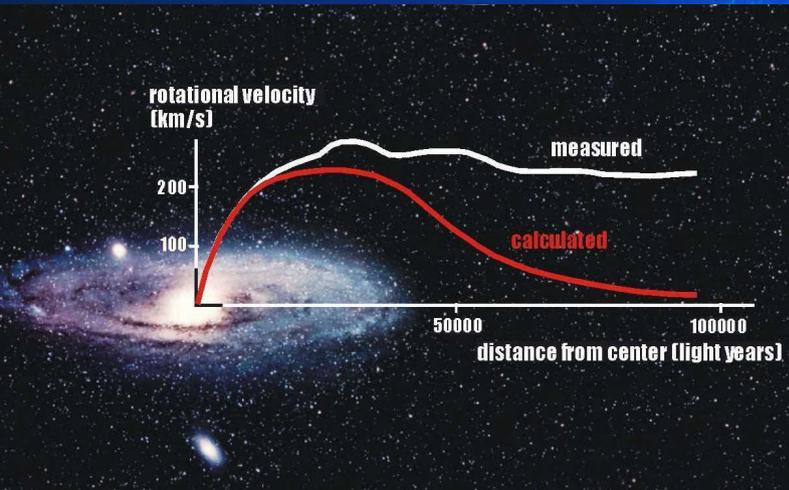


5% Modèle standard

27% Matière noire



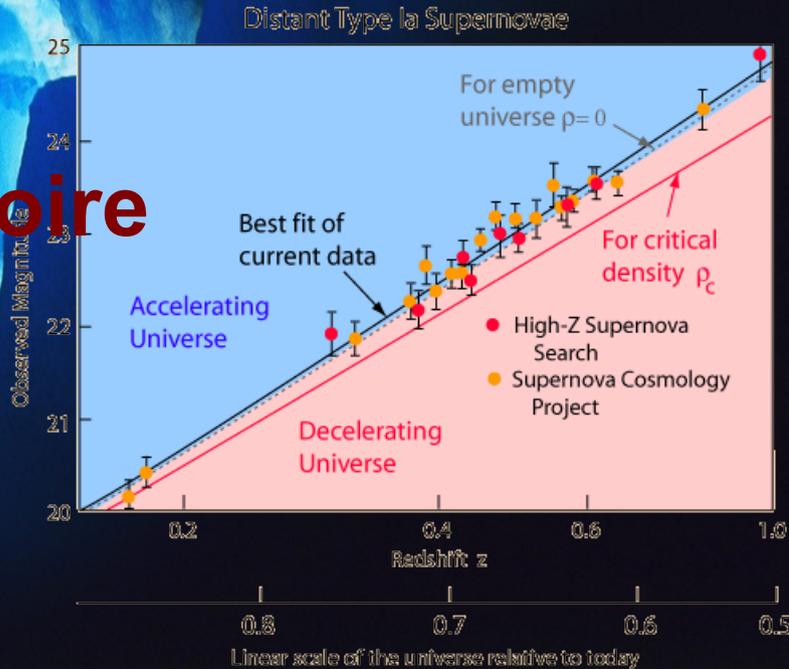
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

A Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map showing temperature variations across the sky. The map is overlaid with a complex network of colored lines (red, orange, yellow, green, blue) that represent particle tracks or paths. The tracks are most dense and concentrated in the central region of the map, where they appear to radiate outwards. The background is a dark blue field with lighter blue and white spots representing temperature fluctuations. The map is framed by a white grid of squares, suggesting a coordinate system.

Lien entre le boson de Higgs et l'inflation de l'Univers ?

Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit



Au LHC :

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

Liens

Nos présentations 

indico.in2p3.fr/event/OCEVU_SummerCamp2013

Les Masterclasses 

physicsmasterclasses.org

Le labex 

www.labex-ocevu.univ-amu.fr

ATLAS grand public 

atlas.ch

ATLAS en direct

atlas-live.cern.ch

ATLAS sur 

twitter.com/ATLASexperiment

ATLAS sur 

www.facebook.com/ATLASexperiment

ATLAS sur 

www.google.com/+ATLASexperiment

ATLAS sur 

www.youtube.com/theATLASExperiment

Site français du 

www.lhc-france.fr

Le CPPM 

marwww.in2p3.fr

Le CERN 

cern.ch

Le CERN sur 

twitter.com/cern