

[WWW.PHYSICSMASTERCLASSES.ORG](http://WWW.PHYSICSMASTERCLASSES.ORG)

# **INTERNATIONAL MASTERCCLASSES**

## **HANDS**

## **ON PARTICLE**

## **PHYSICS**

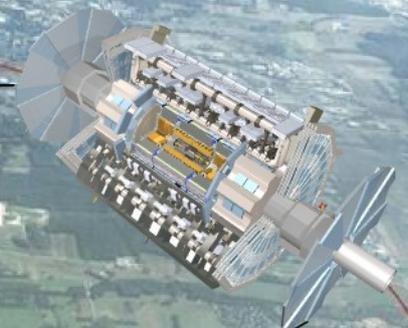
# ATLAS

## Cycle de vie d'une expérience

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

Ajaccio, 16 avril 2019







CENTRE DE PHYSIQUE DES  
PARTICULES DE MARSEILLE

**CPPM**

# Le Centre de Physique des Particules de Marseille

## Les tutelles :

- le CNRS/IN2P3

Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules



- Aix-Marseille Université



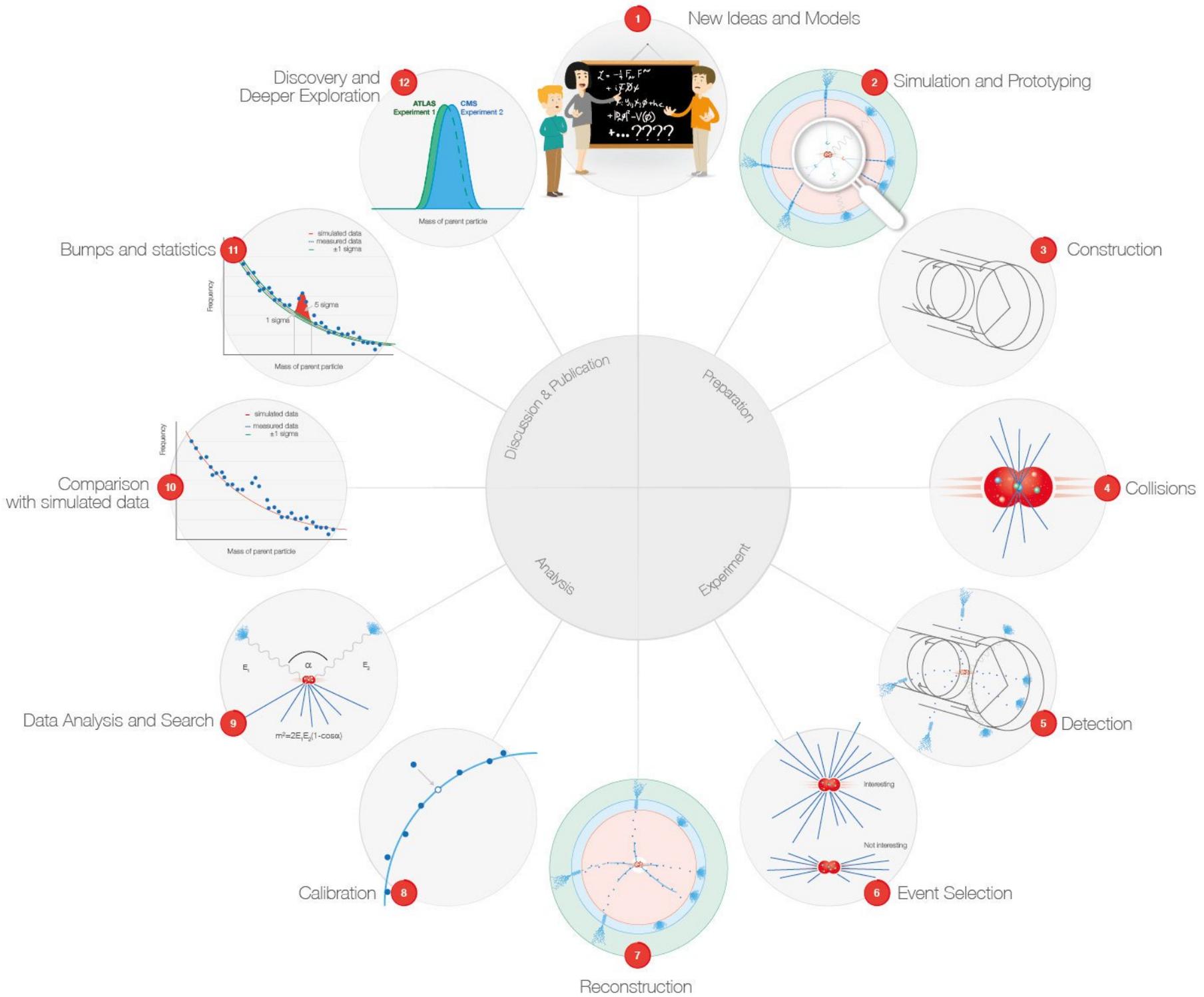
## Les laboratoires de l'IN2P3 :

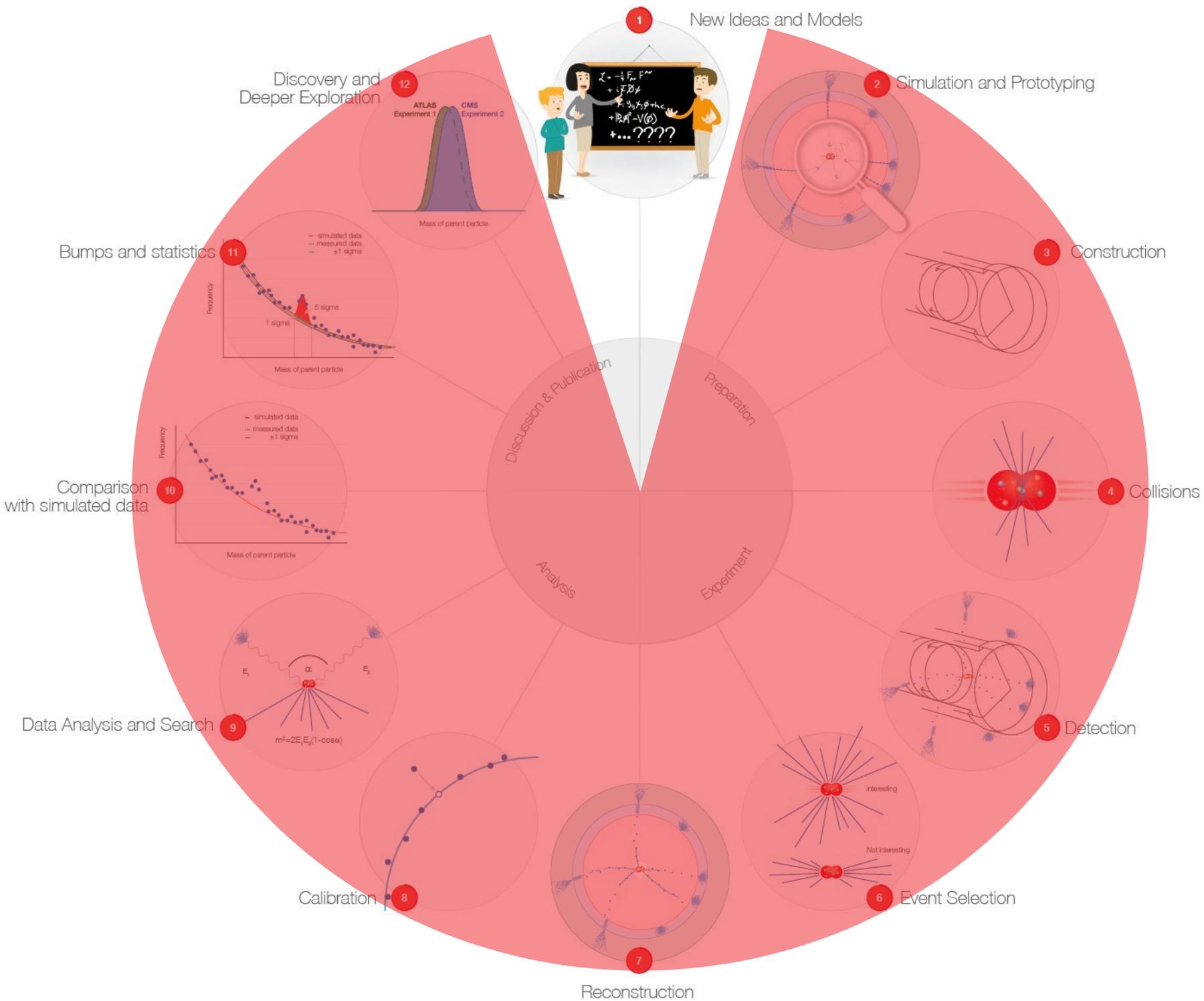


## Le personnel : ~ 160 personnes « permanentes »

- ~40 chercheurs et enseignants-chercheurs
- ~90 ingénieurs et techniciens
- ~30 doctorants
- + 60 visiteurs étrangers
- + 30 stagiaires



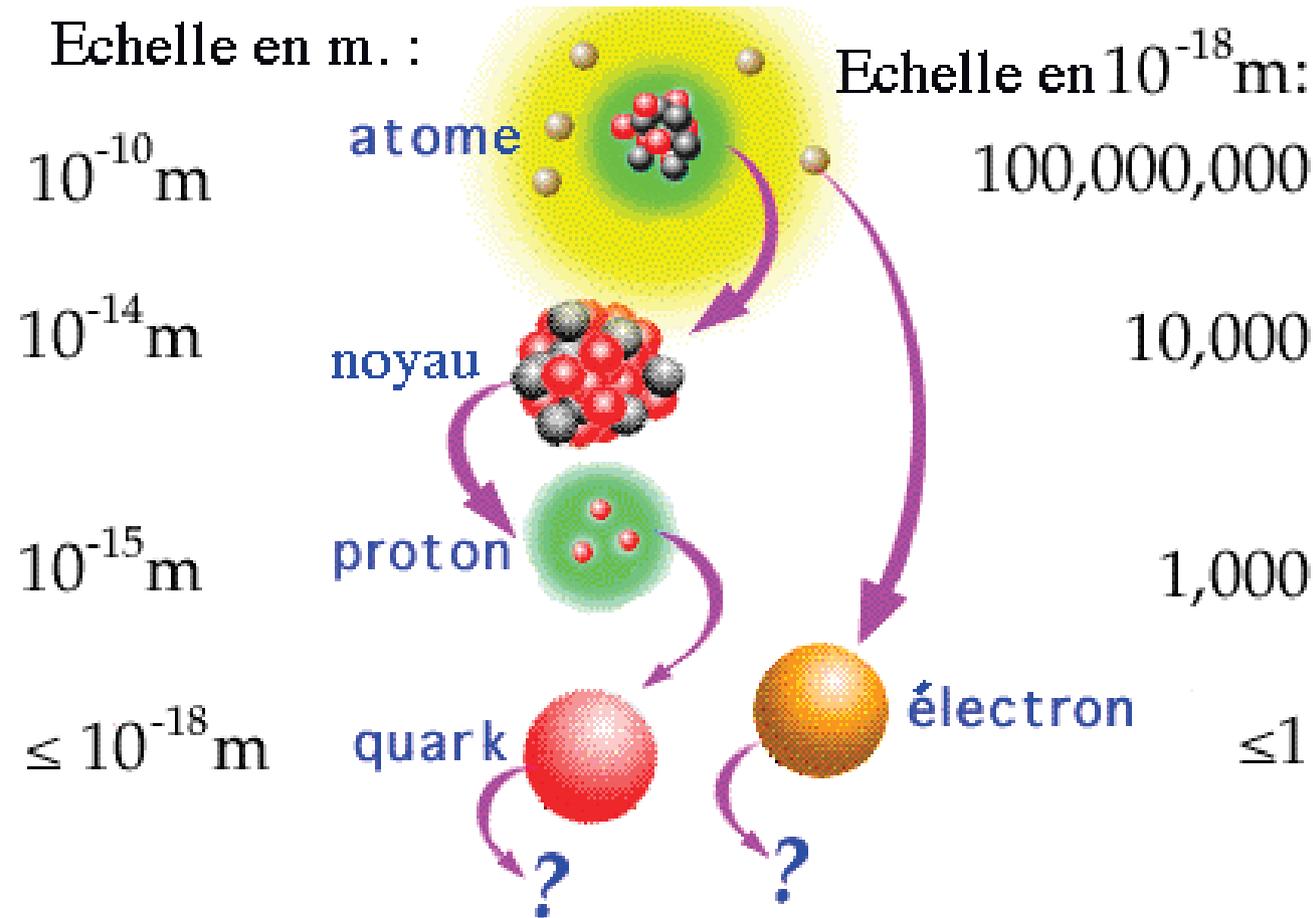




# De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



# Échelle des distances en physique des particules



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

# La physique des particules

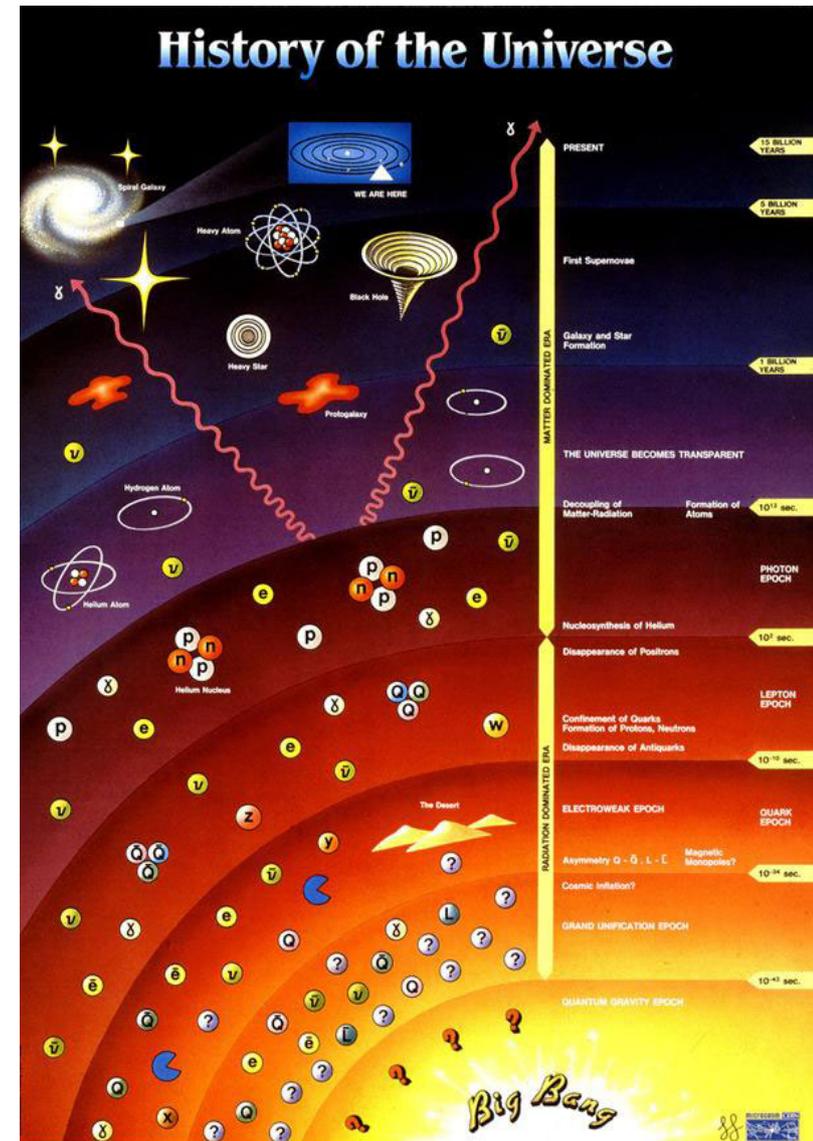
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

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

Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

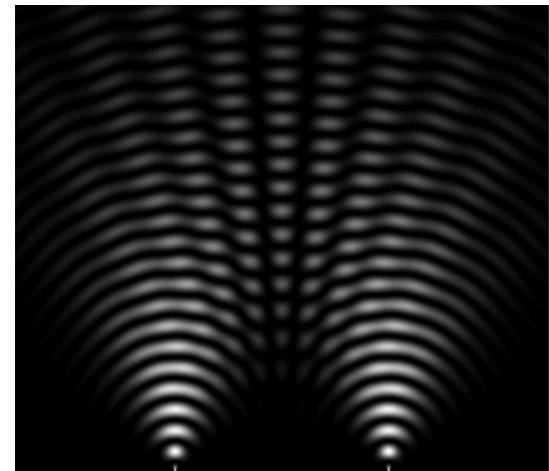
Dans l'univers « froid » d'aujourd'hui, la plupart de ces particules ont maintenant disparu

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



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

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



# Révolutions conceptuelles

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

# Relativité restreinte : espace-temps

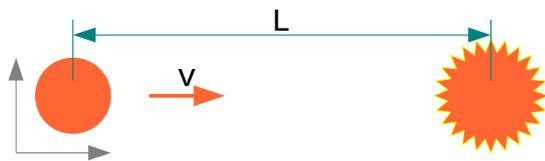
- Contraction des longueurs et dilatation du temps

- ▶ L'écoulement du temps dépend du référentiel

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

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

- ▶ Exemple : bombe programmée pour exploser après 1 s



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

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

# Relativité restreinte : masse et énergie

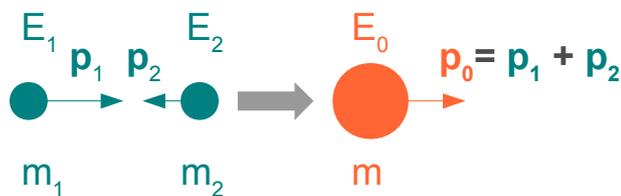
- Équivalence masse-énergie

- ▶ La masse est une forme d'énergie

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

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

- ▶ Transformation de l'énergie cinétique en masse

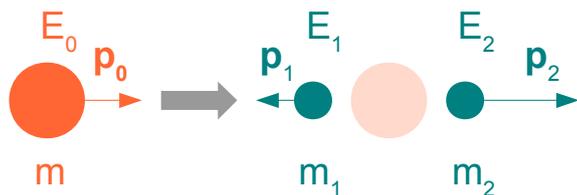


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

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

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

- ▶ Transformation de la masse en énergie cinétique



$$m^2 = E_0^2 - p_0^2 = [\sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)}]^2 - [p_1 + p_2]^2$$

exemple : désintégration de particules instables

En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.  
 En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

# Les unités

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

# Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

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

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

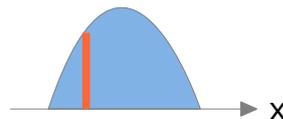
constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s

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

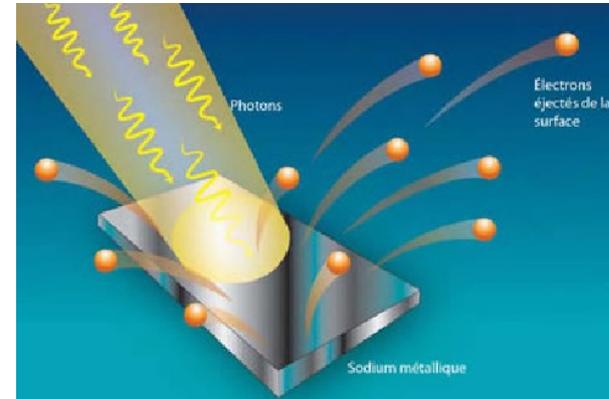
- Deux descriptions antagonistes !

- **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- **onde** : objet étendu pouvant interférer
- ▶ **objet quantique** : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

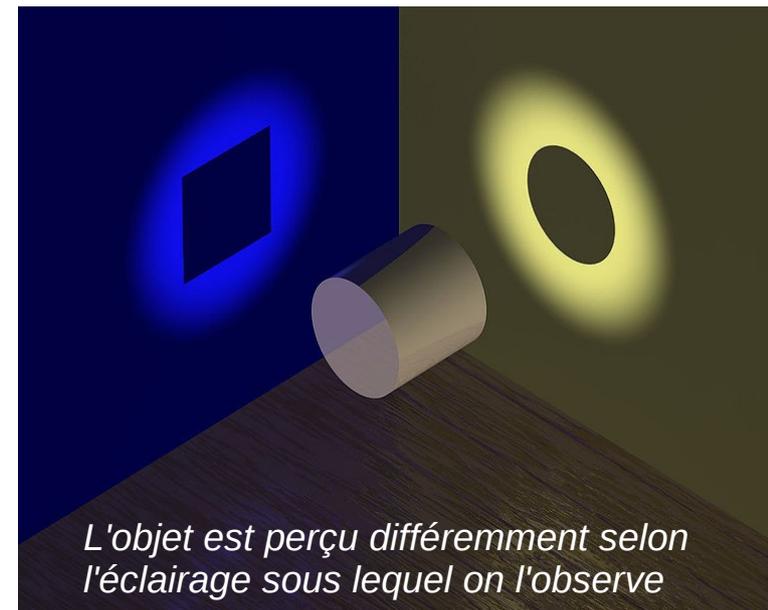
ex : la position d'une particule



Effet photo-électrique, Einstein, 1905

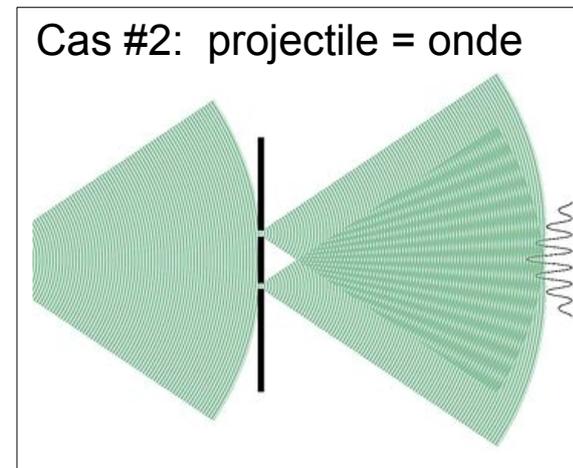
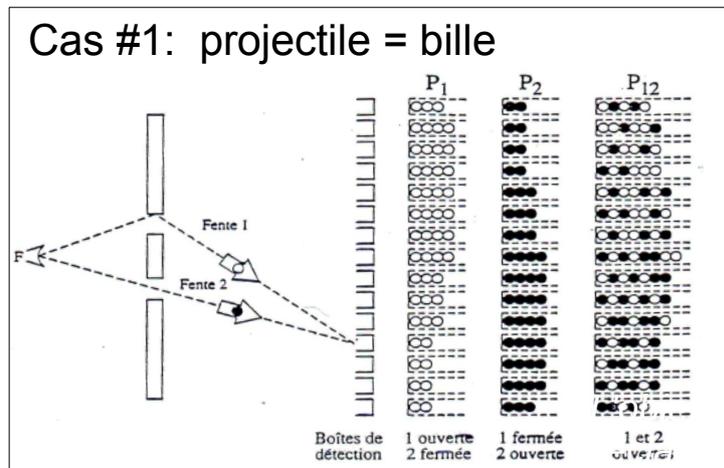
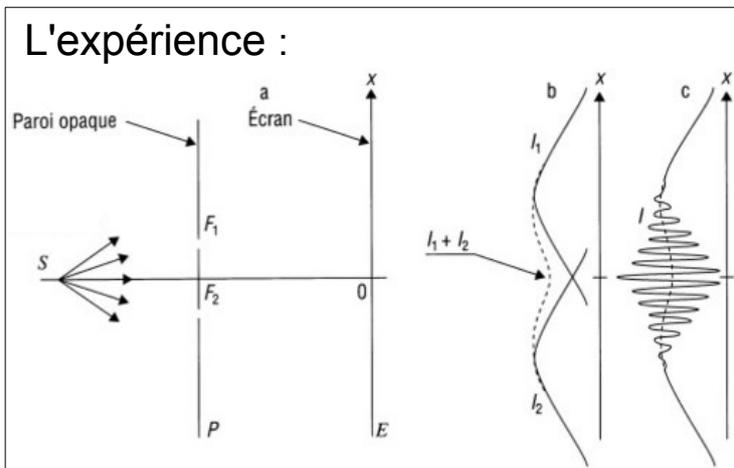


L'énergie de l'onde électromagnétique est portée par le photon



# Mécanique quantique : illustration

## L'expérience des fentes d'Young



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

- On peut observer les impacts individuels...
- et les franges d'interférences !

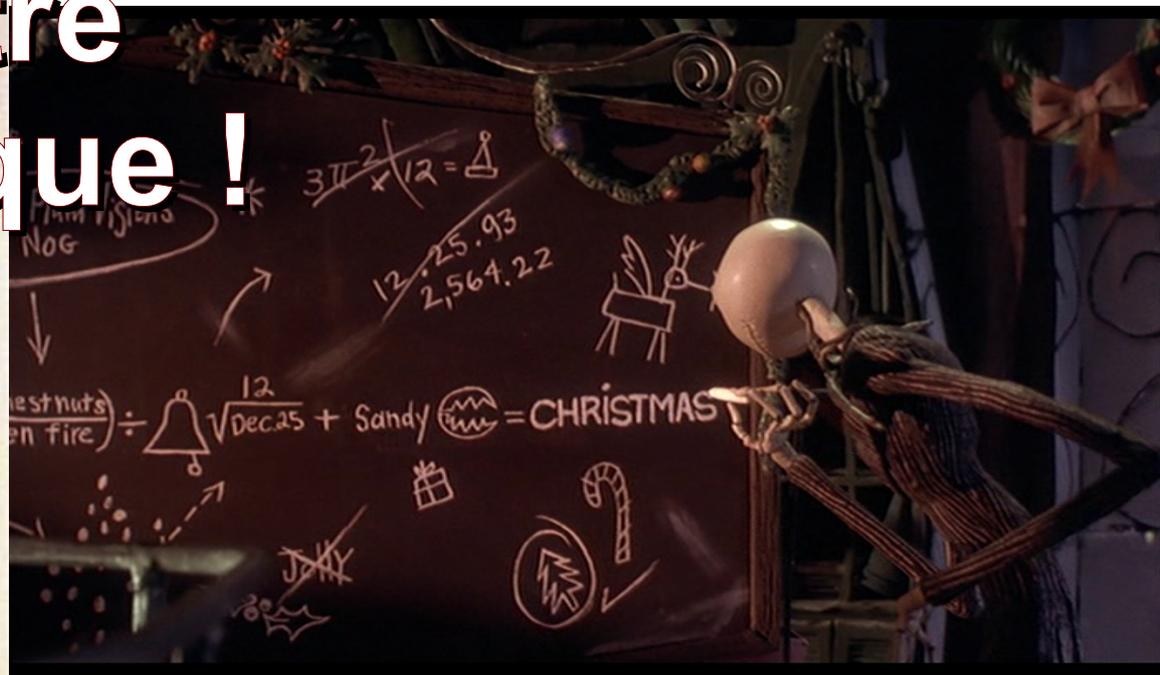
© New Journal of Physics, Volume 15, March 2013

- Remarque : si on détecte par quelle fente la particule passe, l'interférence disparaît !

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



**un être  
quantique !**



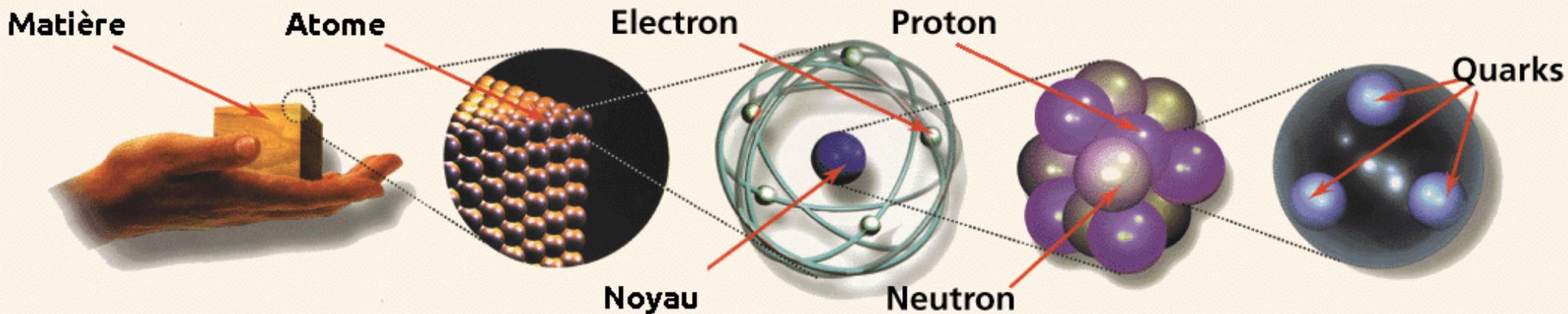
À LA GAÏTÉ MONPARNASSE  
26 RUE DE LA GAÏTÉ 14° Tél 322.16.18  
Tous les JOURS 22h. DIMANCHE 20h 30 RELÂCHE LUNDI

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

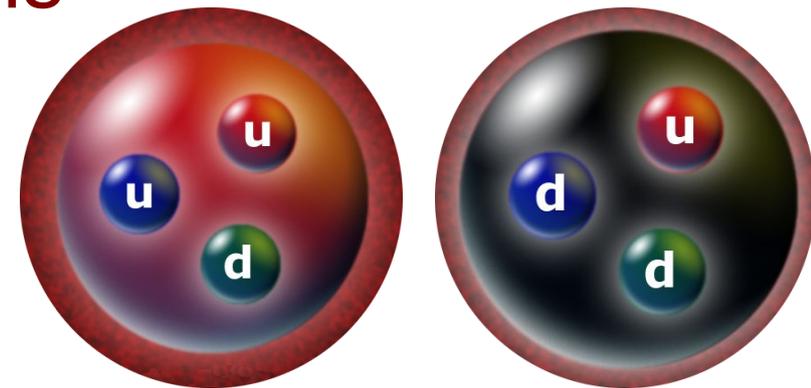
# Mécanique quantique : interprétation

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

# De quoi est fait l'Univers visible ?



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



# Le positron

- Équation du mouvement d'un électron

[1928, Dirac]

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

- Observation :

[1932, Anderson]

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

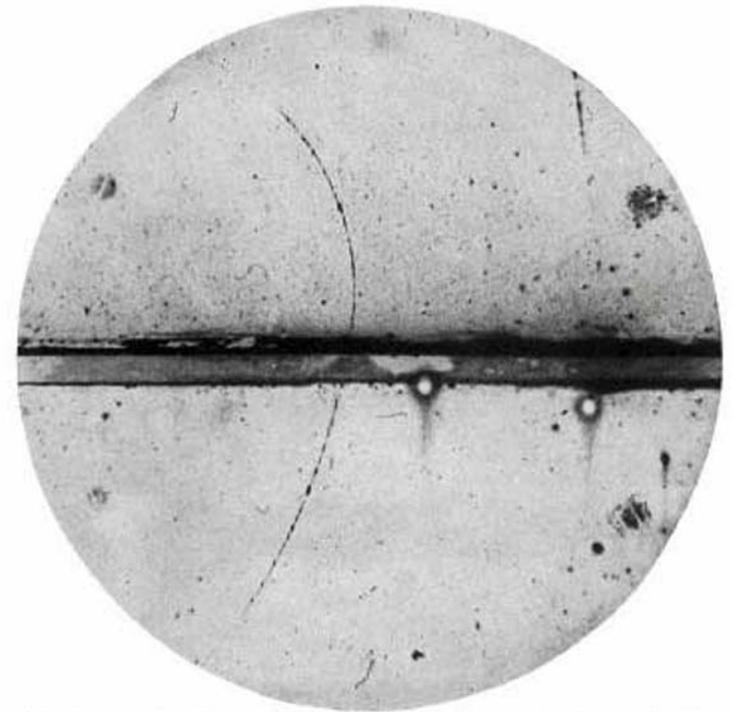
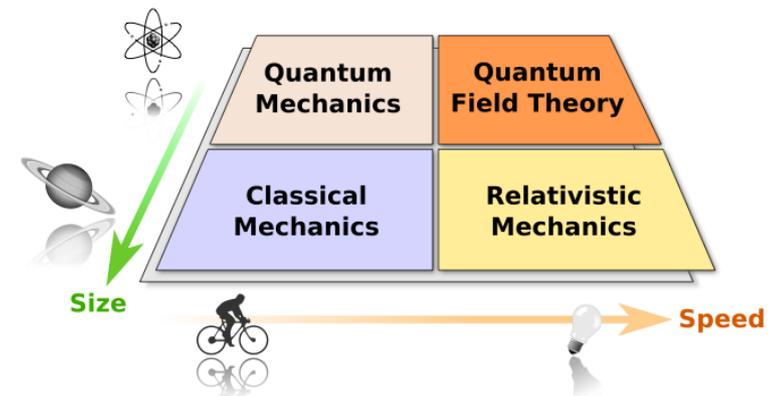
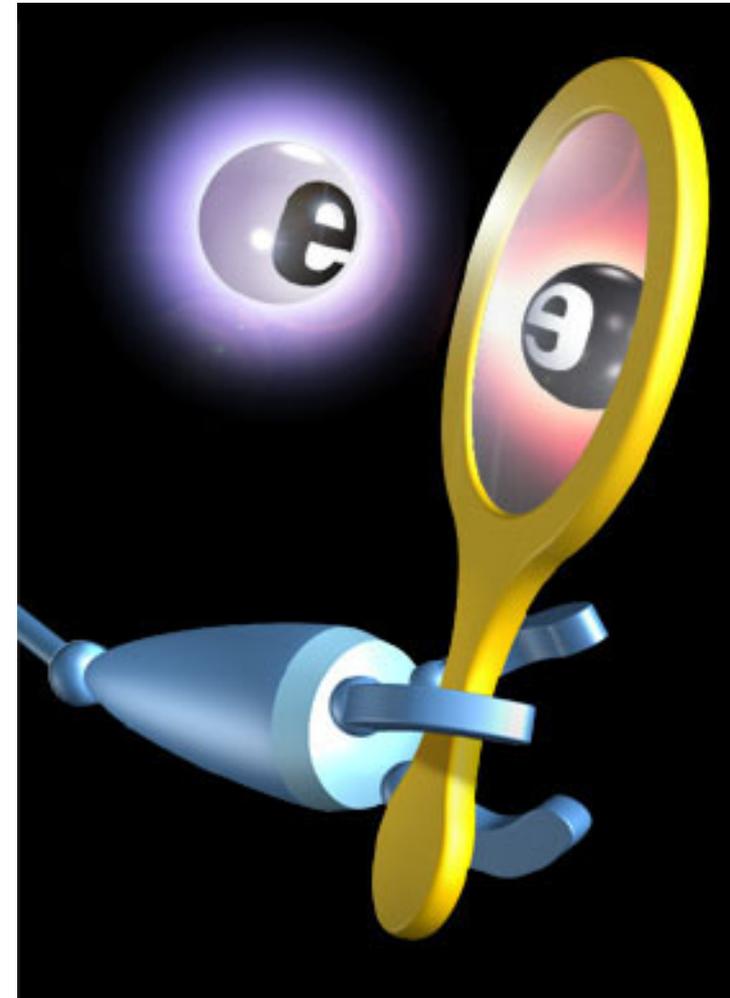


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# L'anti-matière

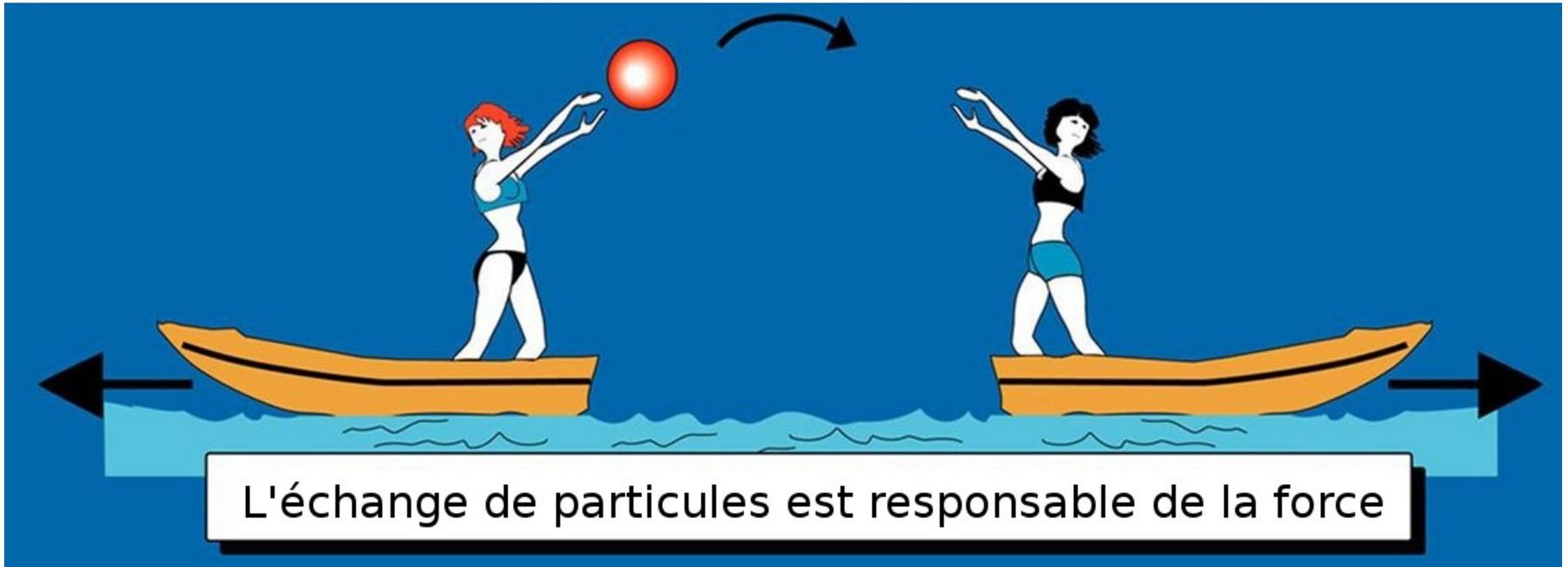
- La découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'anti-matière
  - ▶ positron = anti-électron
- Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :
  - ▶ de même masse
  - ▶ de même *spin* (moment angulaire interne)
  - ▶ de charge(s) opposée(s)
- L'anti-matière se comporte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



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

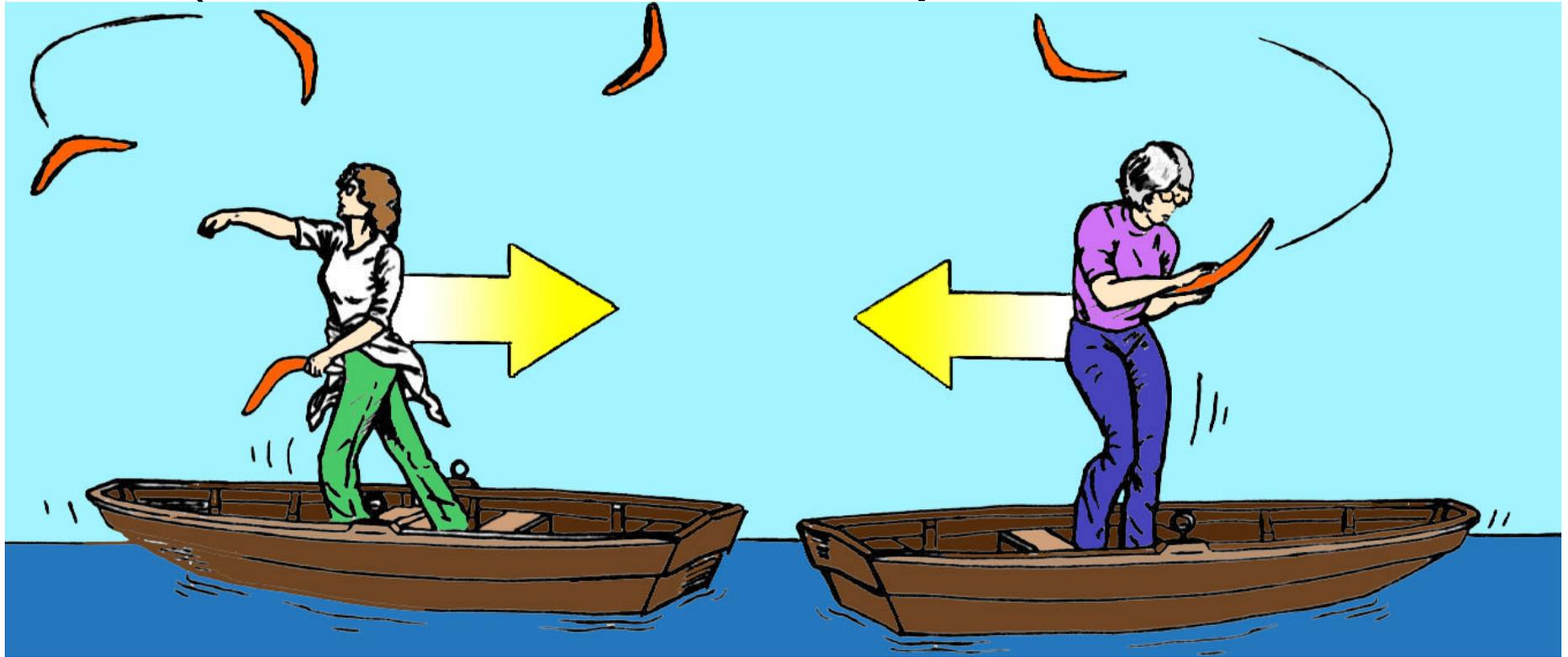
# Interaction fondamentale

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



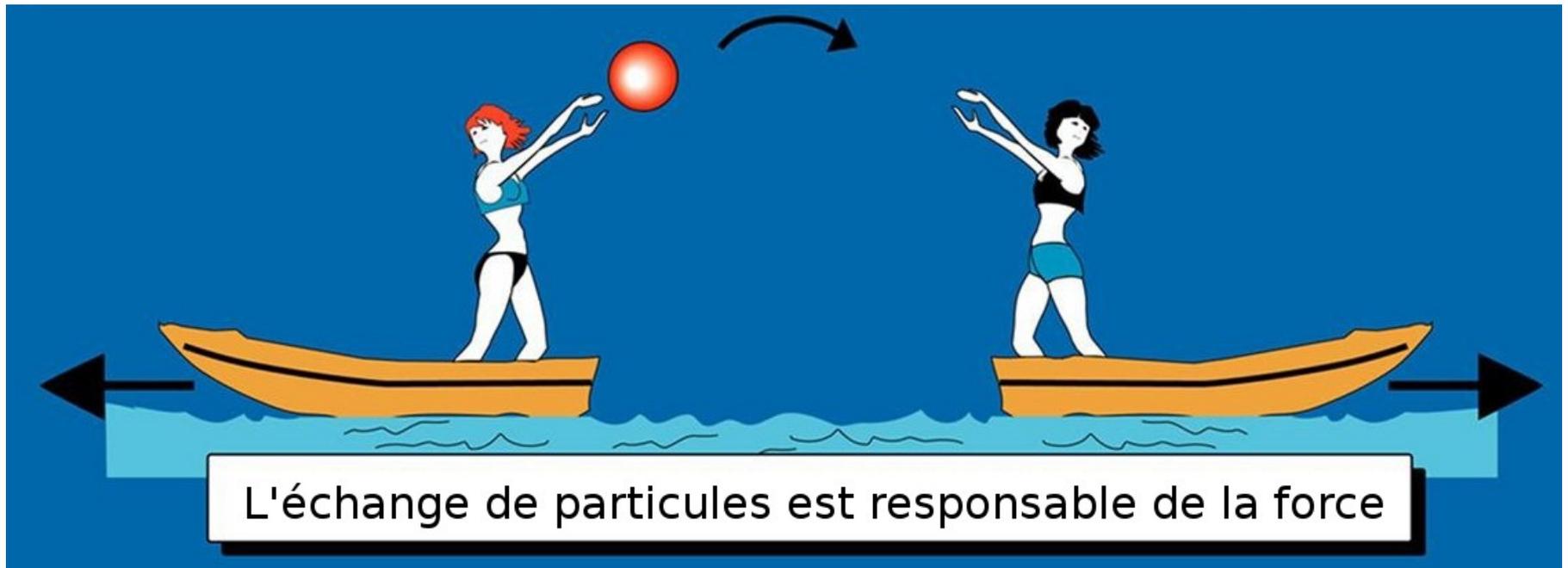
# Interaction fondamentale

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

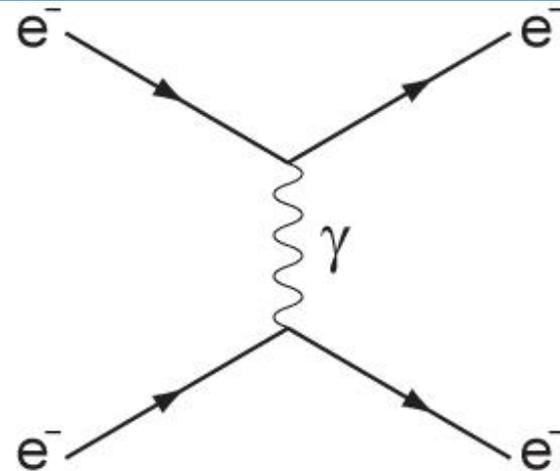


# Interaction fondamentale

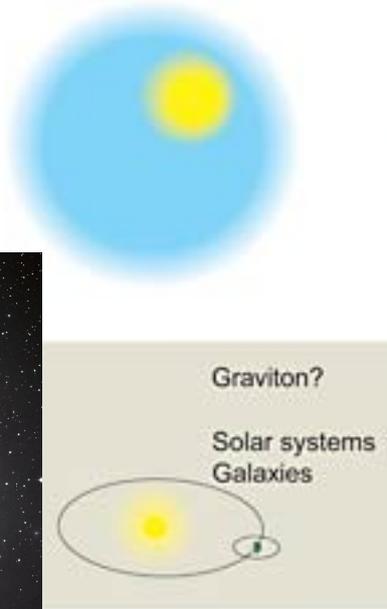
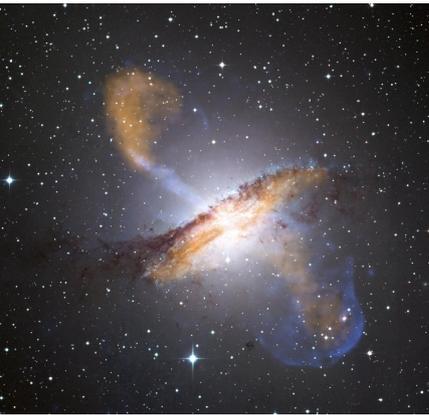
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



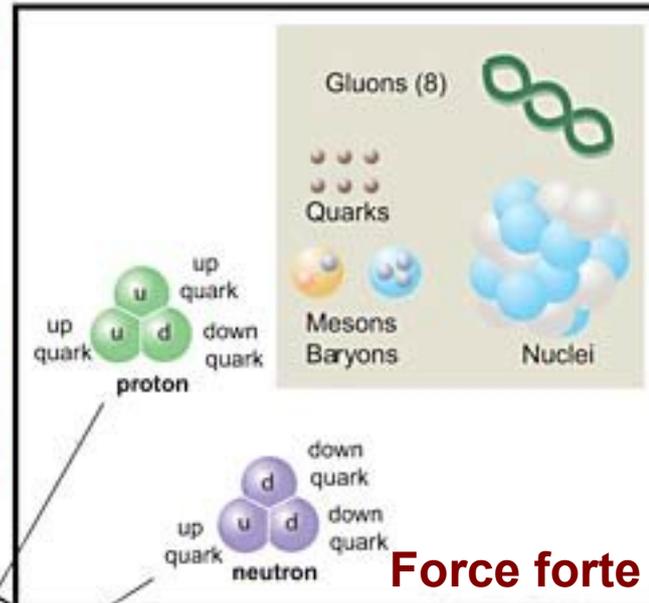
En physique des particules :



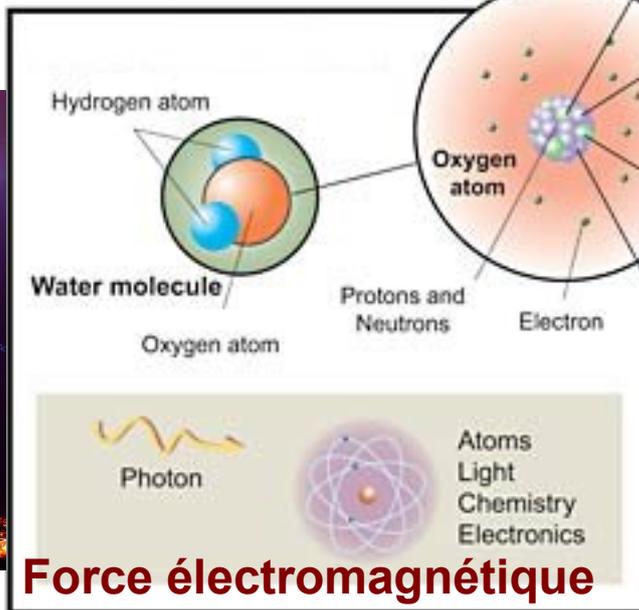
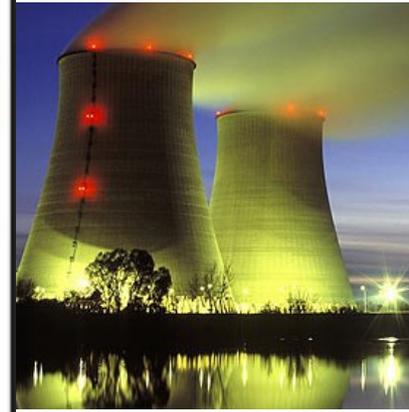
# Les forces



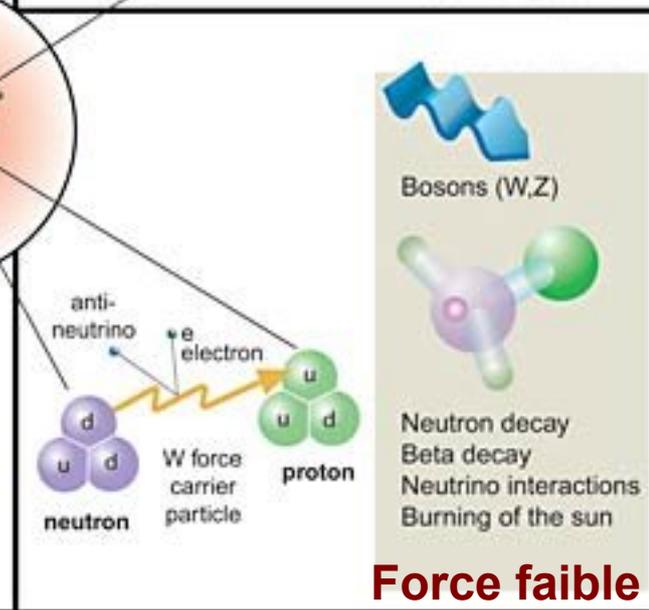
**Force gravitationnelle**



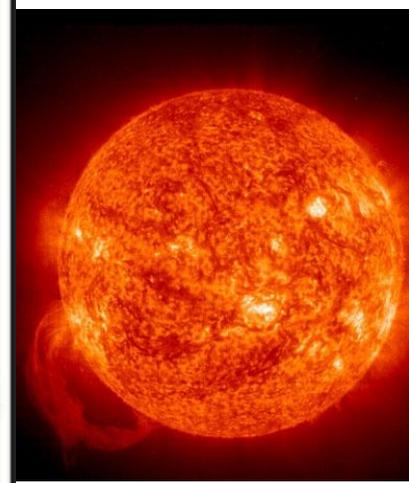
**Force forte**



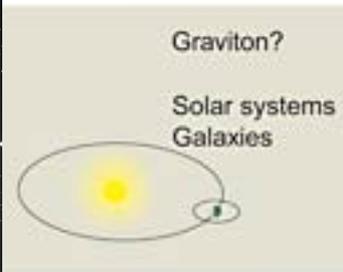
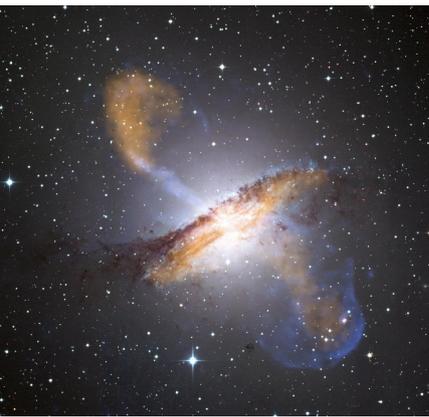
**Force électromagnétique**



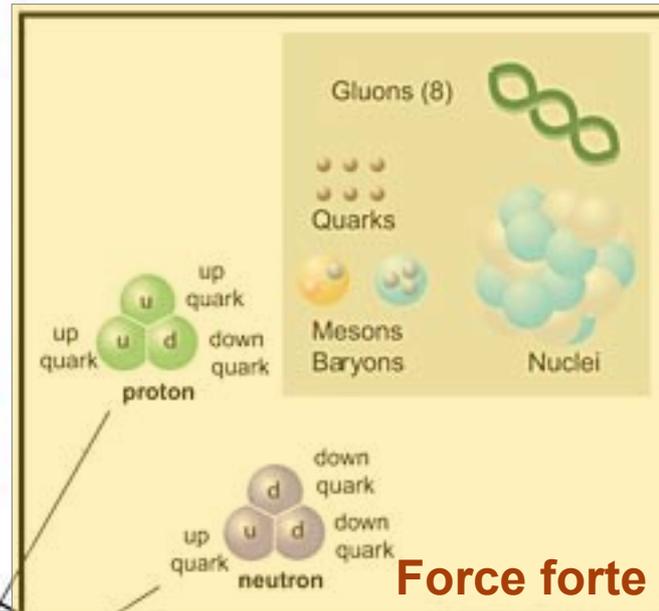
**Force faible**



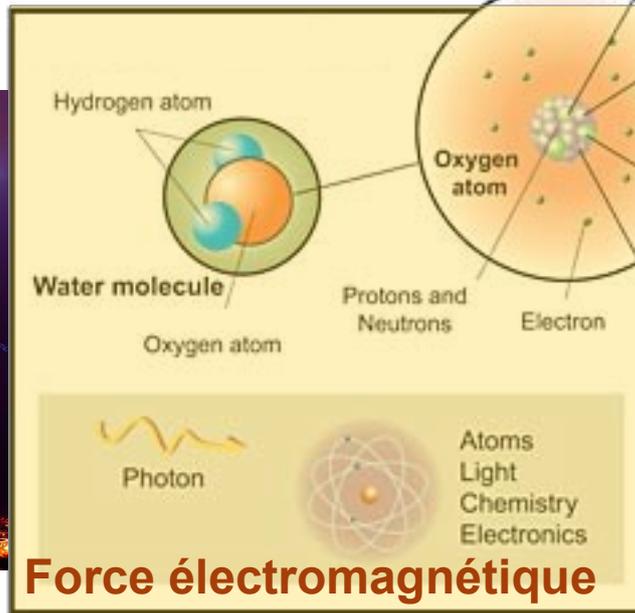
# Les forces



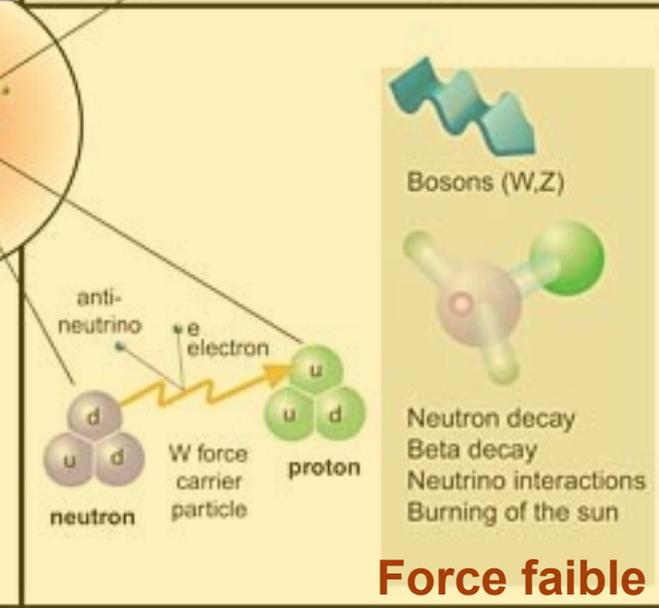
**Force gravitationnelle**



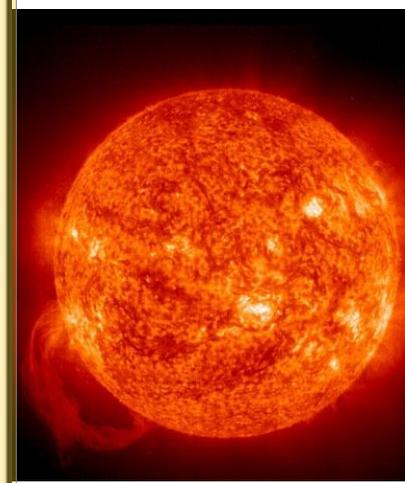
**Force forte**



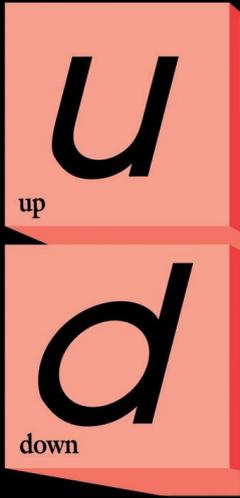
**Force électromagnétique**



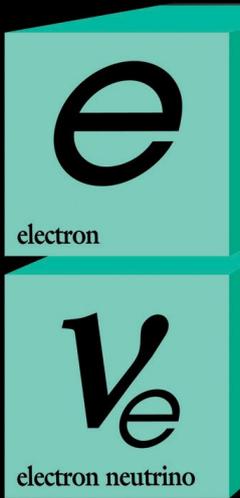
**Force faible**



# Quarks



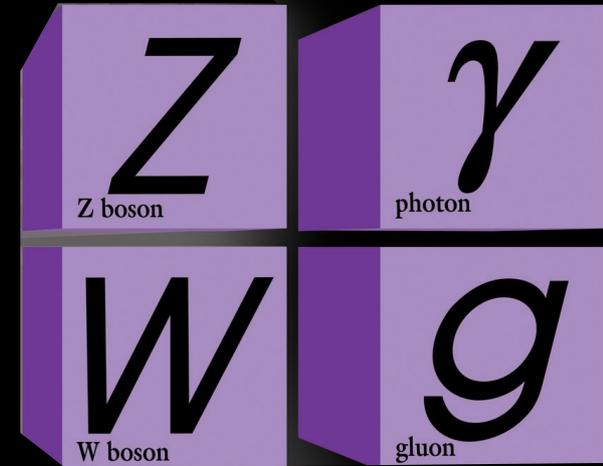
+ anti-matière



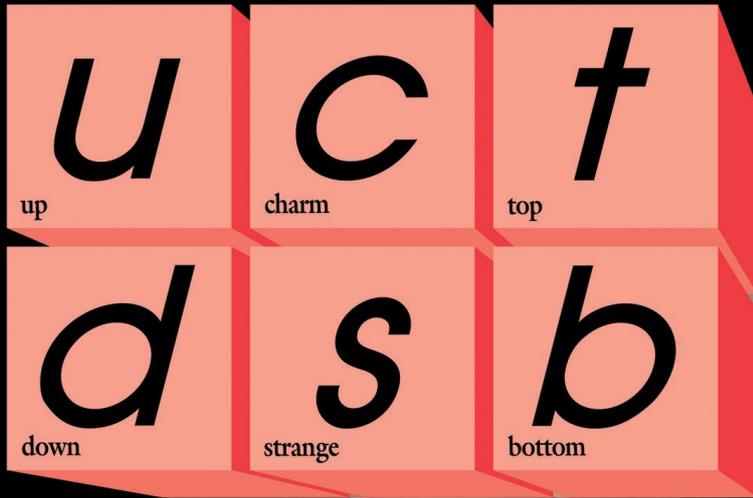
# Leptons

# Le modèle standard

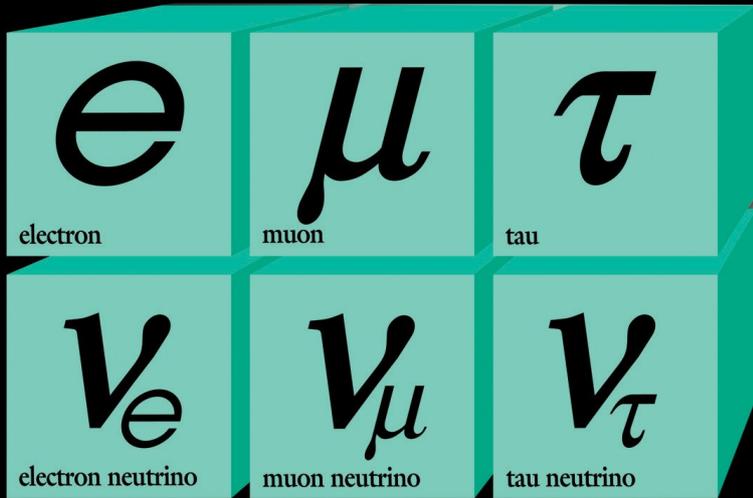
# Forces



# Quarks



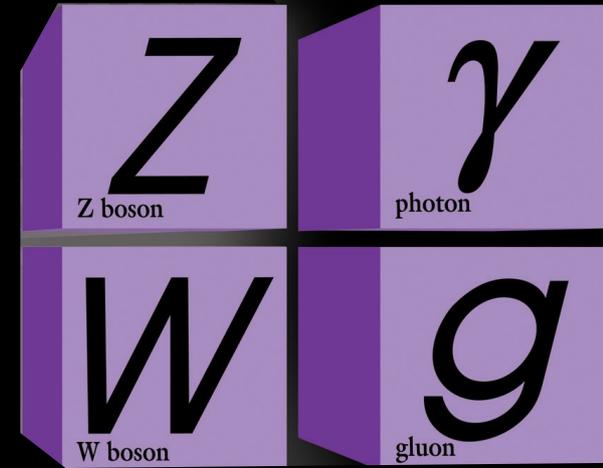
+ anti-matière



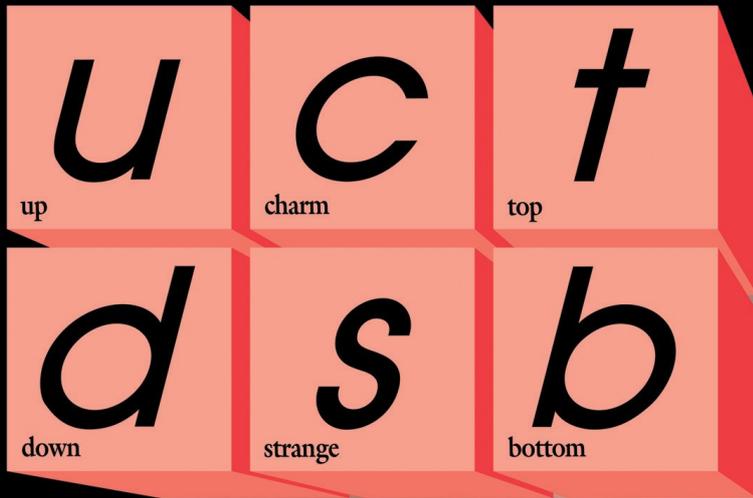
# Leptons

# Le modèle standard

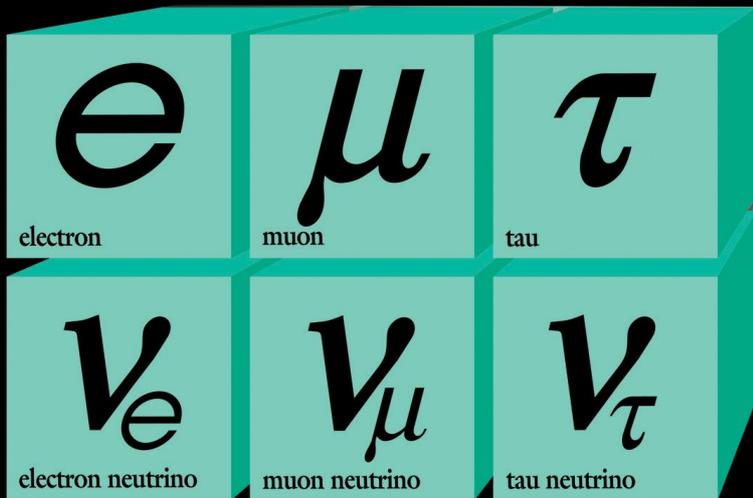
# Forces



# Quarks



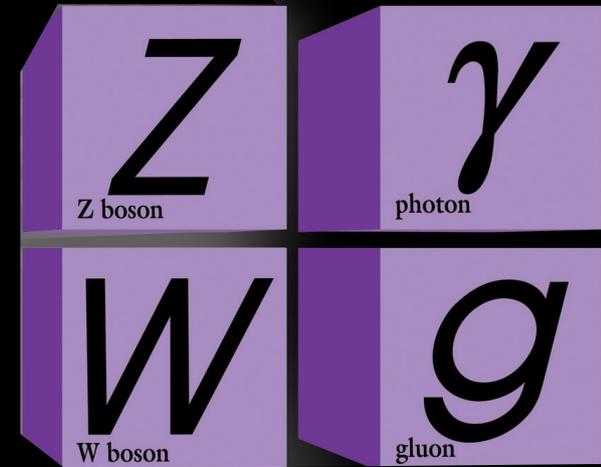
+ anti-matière



# Leptons

# Le modèle standard

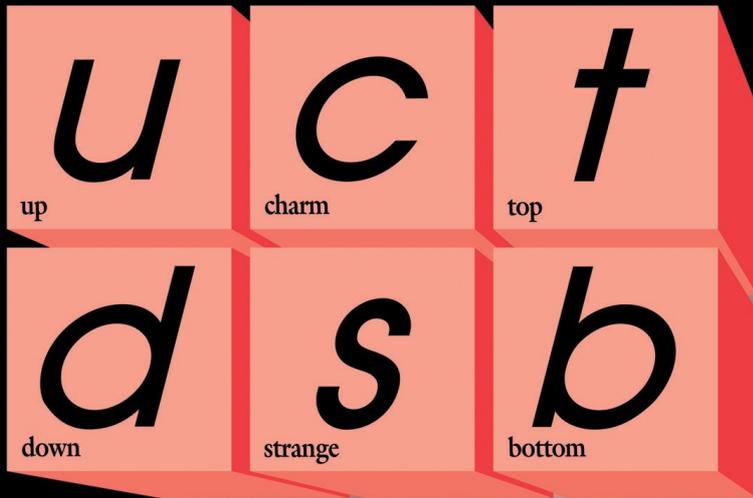
# Forces



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

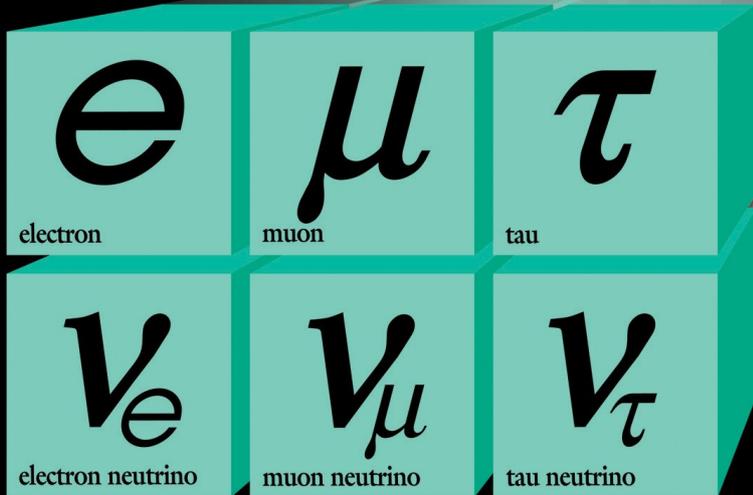
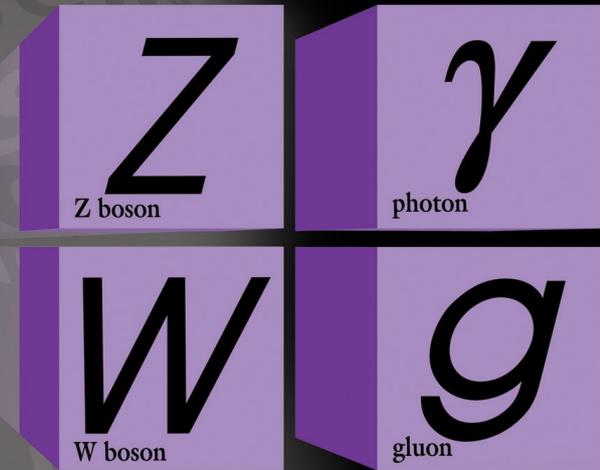
# Quarks

# Le modèle standard



+ anti-matière

# Forces



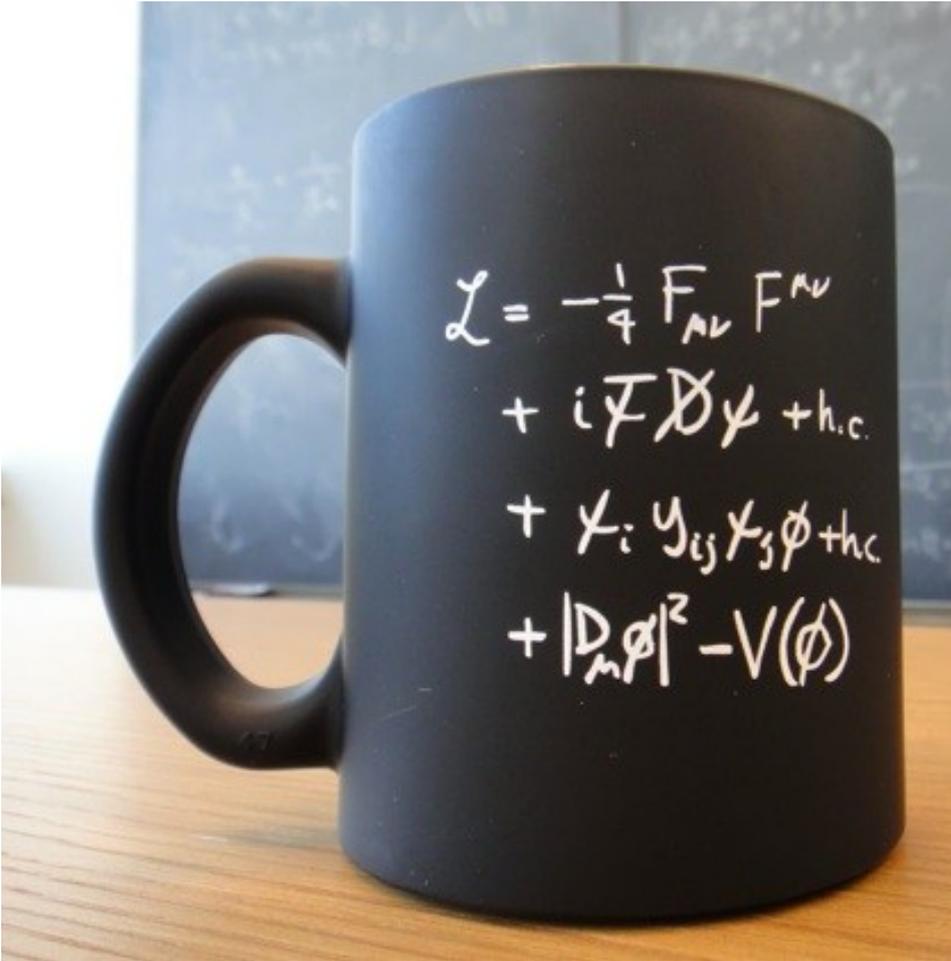
# Leptons

Solution : rajouter un champ de Higgs

# Le modèle standard

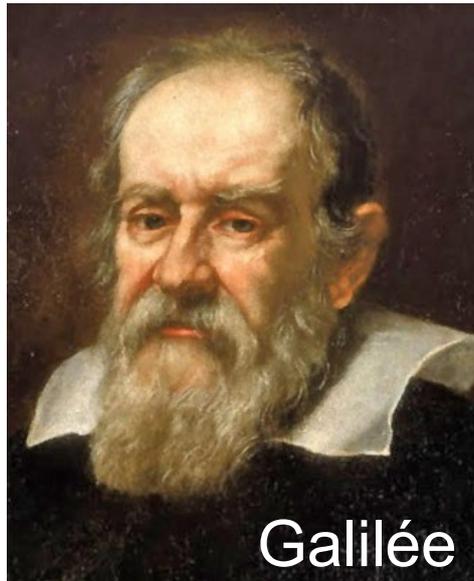
- Version synthétique

- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^\alpha + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \\
 & \frac{1}{2} \partial_\mu \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2} m_h^2 \mathbf{H}^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} \mathbf{H} + \frac{1}{2} (\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & i g c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
 & Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\
 & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^+ W_\mu^- W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g \alpha [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - g M W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{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^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - 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^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} i g^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \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{2}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} [\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + 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^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} 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{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

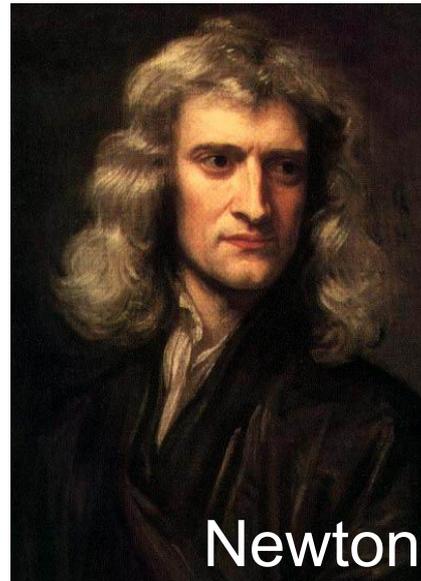
# La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

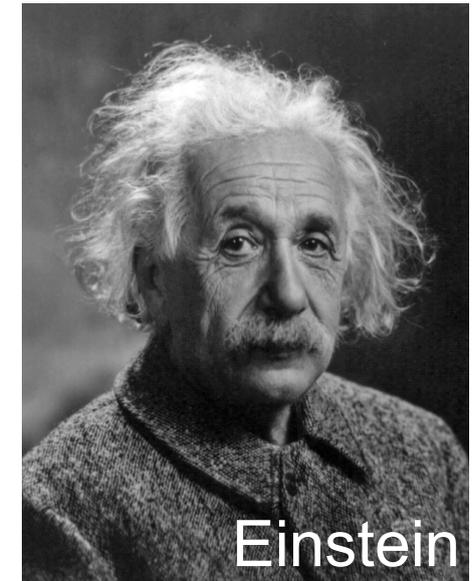
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

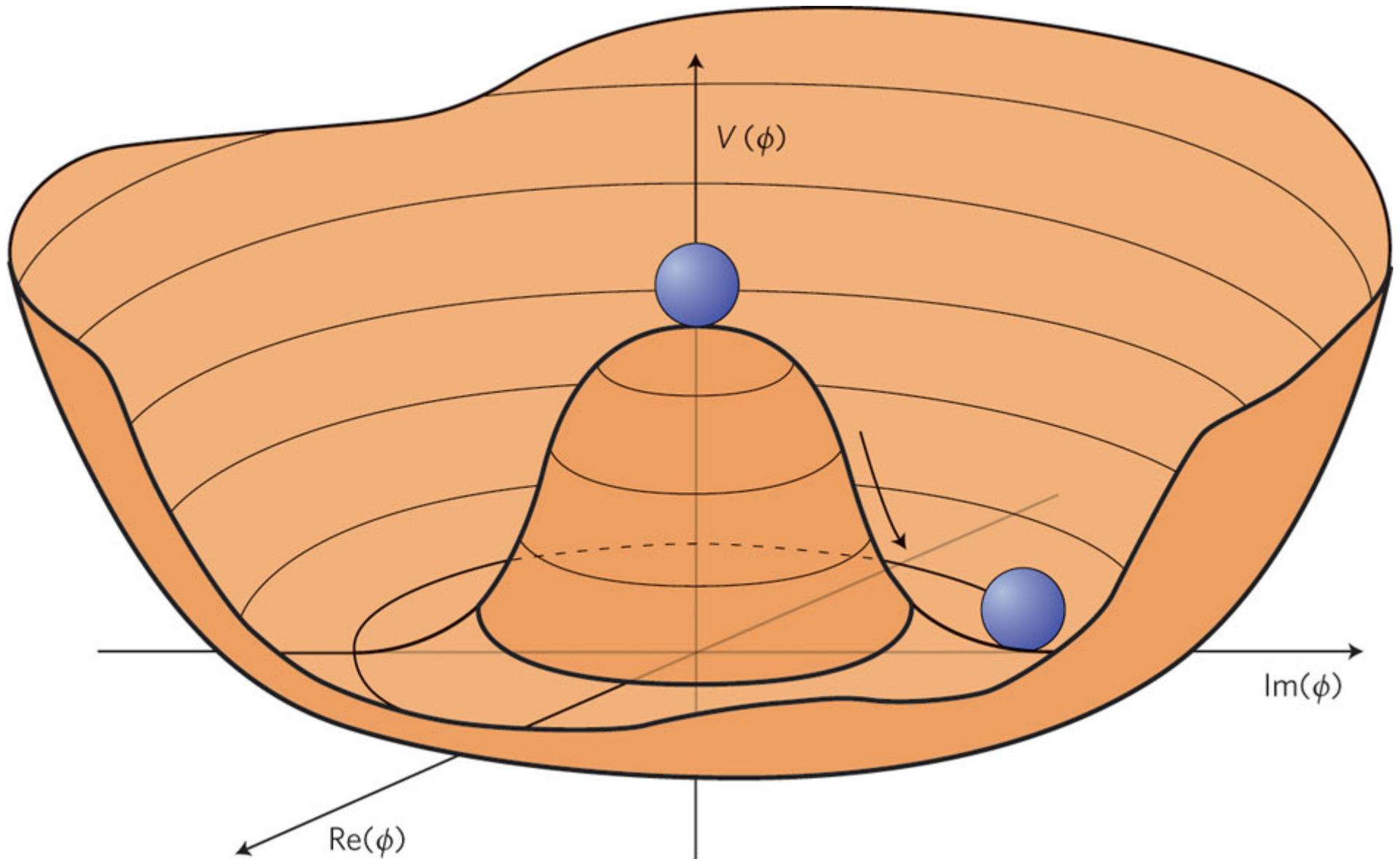
- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

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

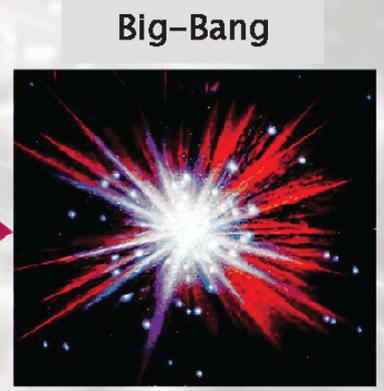
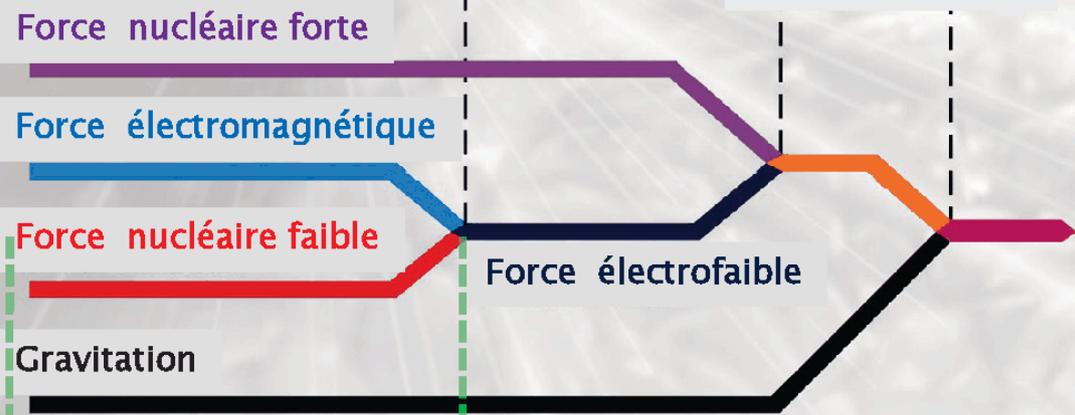
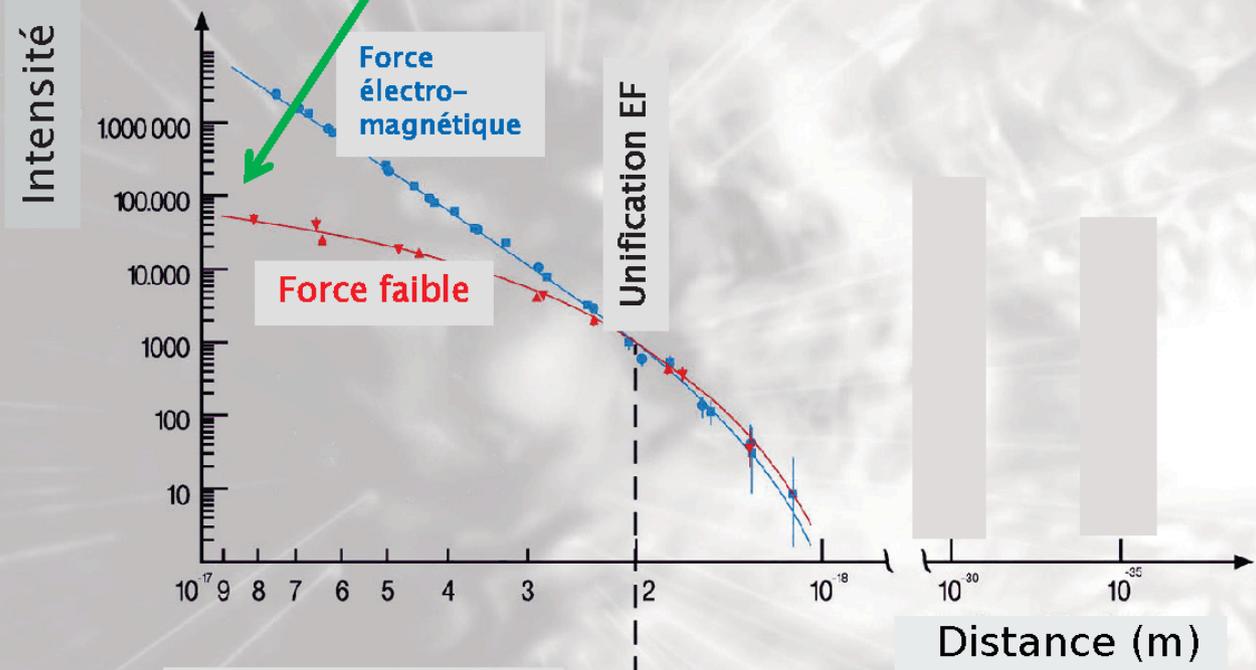
# Brisure spontanée de la symétrie électrofaible

Le potentiel de Higgs : le « chapeau mexicain »



# Unification électrofaible

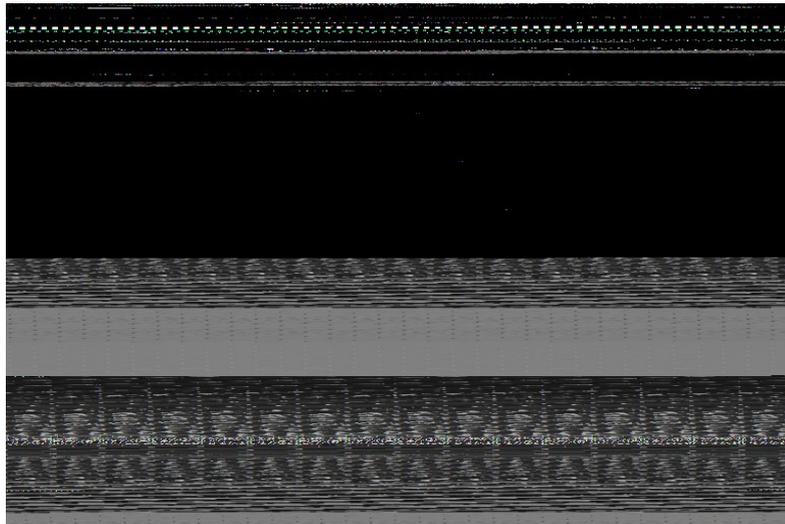
basse énergie: différences entre  $\gamma$  et  $W/Z$   
pas de différence dans le formalisme mathématique !



13,7 milliards d'années (2,7 K)

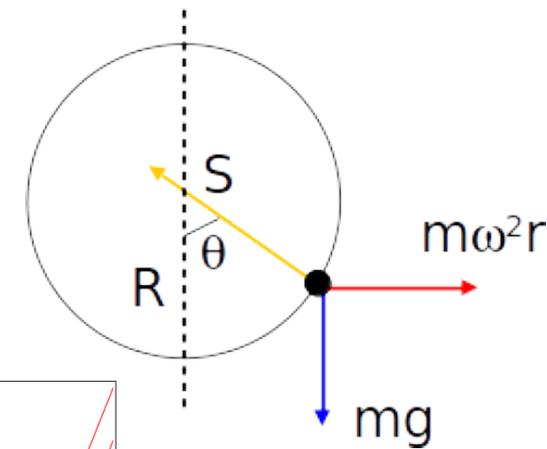
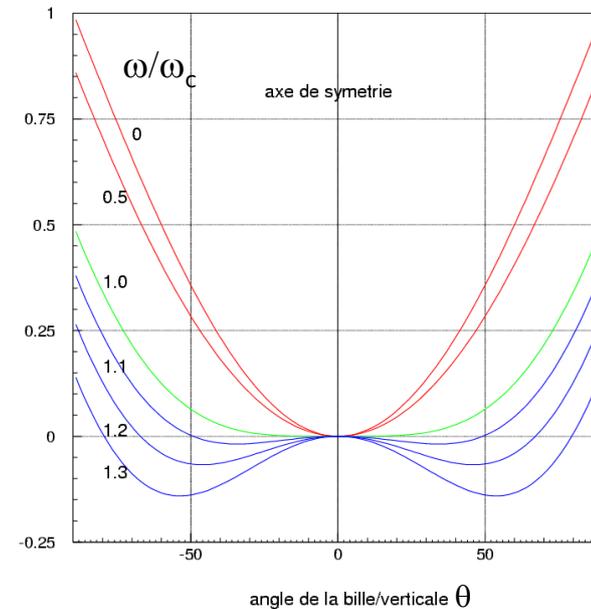
$10^{-12}$  s ( $10^{15}$  K)

# Brisure spontanée de symétrie



© M. Davier

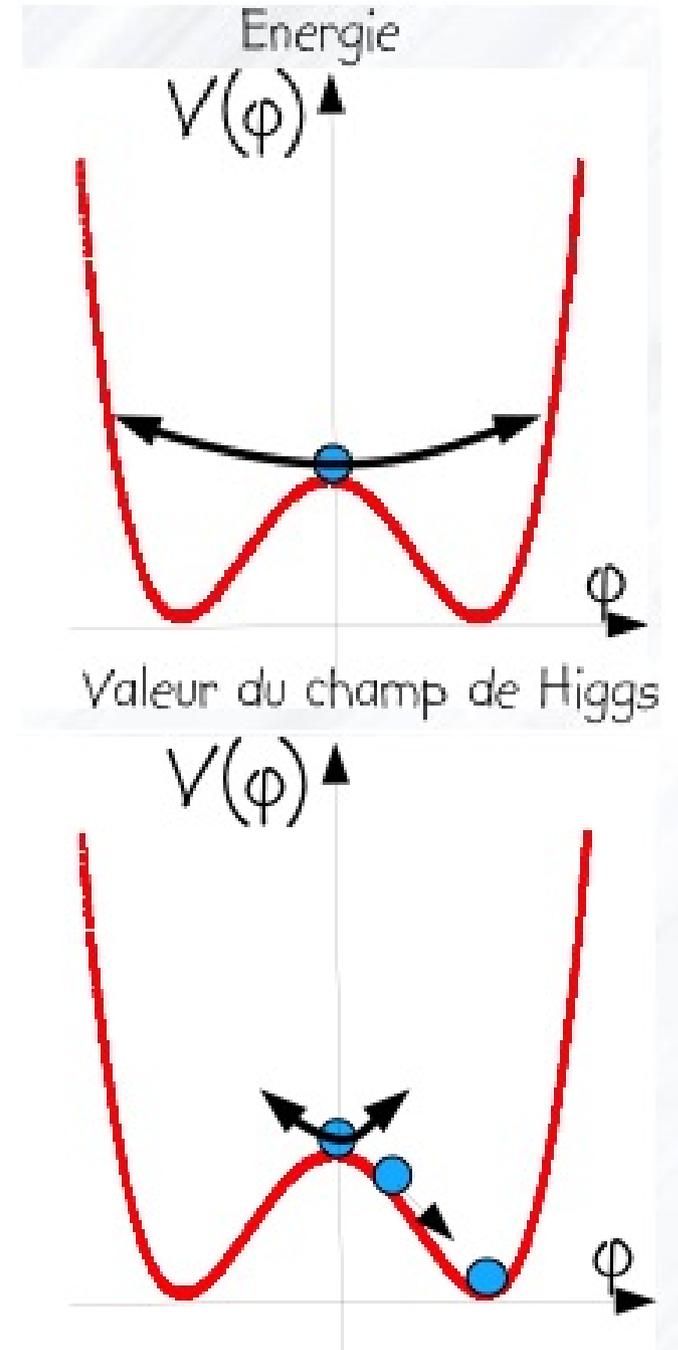
energie potentielle de la bille



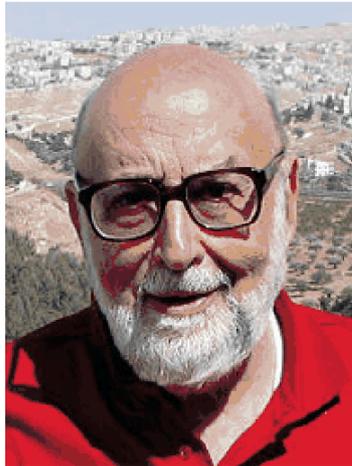
- vitesse angulaire de rotation  $\omega \Rightarrow$  vitesse critique  $\omega_c$ 
  - ▶ si  $\omega < \omega_c$  : bille sur l'axe de symétrie
  - ▶ si  $\omega > \omega_c$  : 2 positions stables. La bille doit « choisir » l'une des deux  $\Rightarrow$  brisure spontanée de symétrie

# Brisure de la symétrie électrofaible

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



# 1964 : Le mécanisme de Higgs



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

F. Englert and R. Brout

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

(Received 26 June 1964)

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

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

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

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

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

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

## BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

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

(Received 31 August 1964)

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

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

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

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

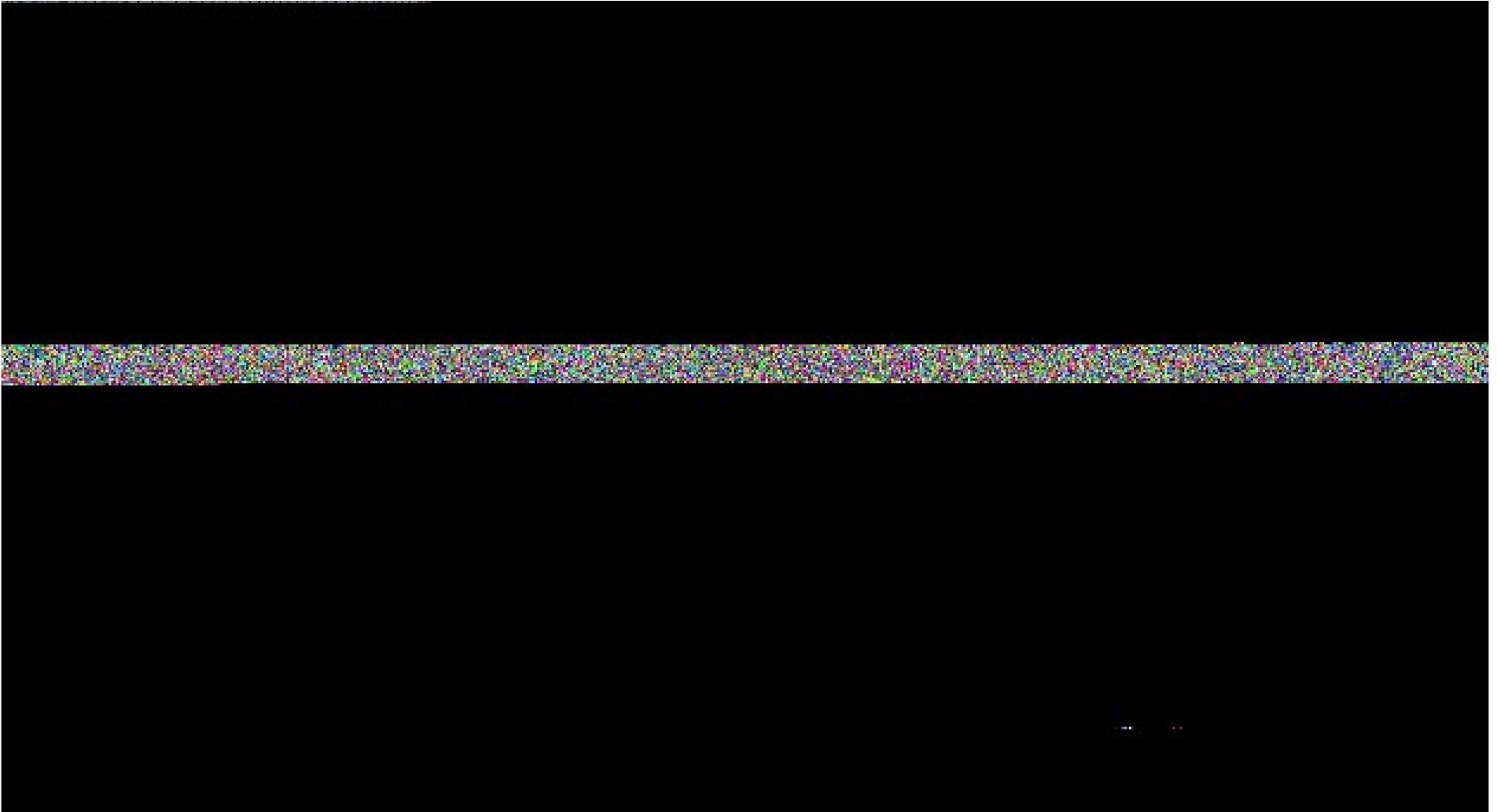
$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

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

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

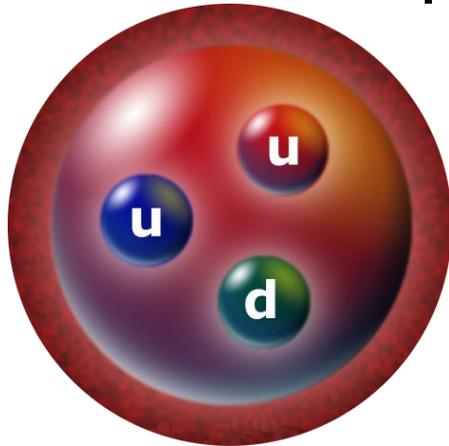
- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

# Interactions avec le boson de Higgs



# La masse

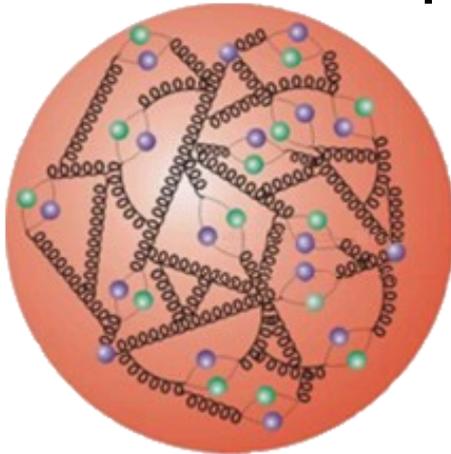
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1 \text{ GeV}$



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

# La masse

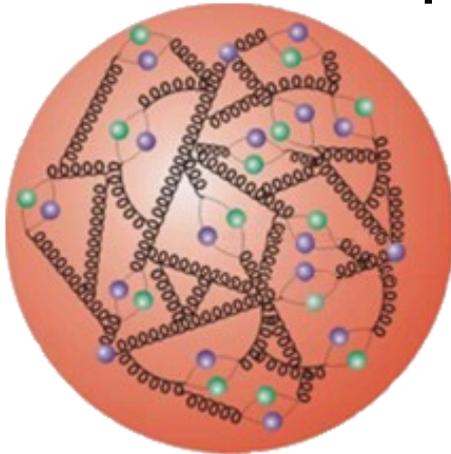
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



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

# La masse

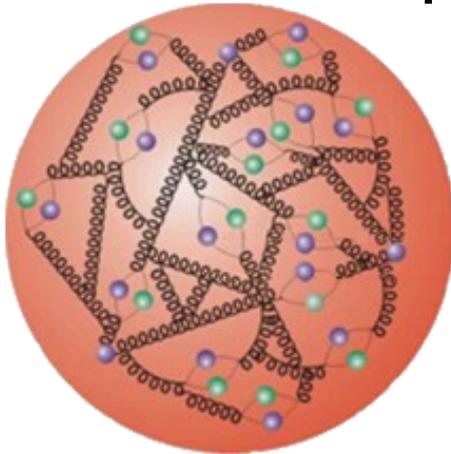
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



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

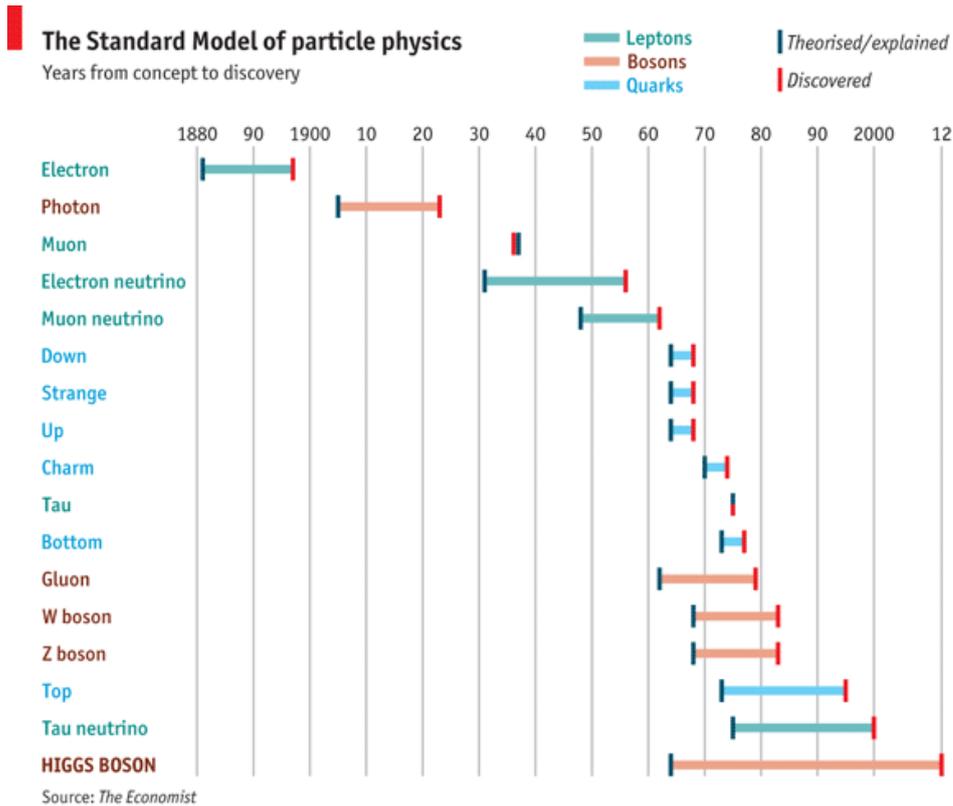
# La masse

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



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

# Une longue quête expérimentale



© 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...

1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

11 Bumps and statistics

12 Discovery and Deeper Exploration

Discussion & Publication

Analysis

Experiment

New Ideas and Models

Simulation and Prototyping

Construction

Collisions

Detection

Event Selection

Reconstruction

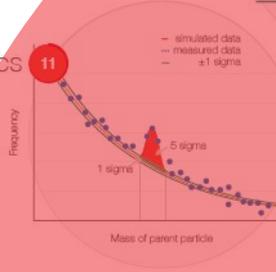
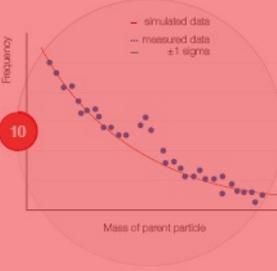
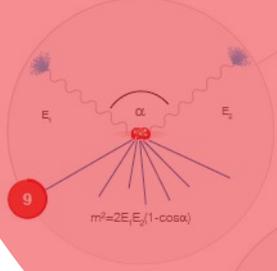
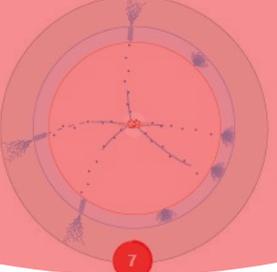
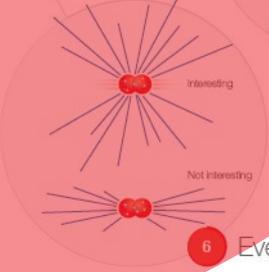
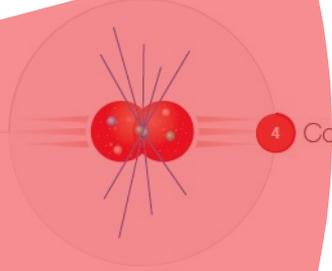
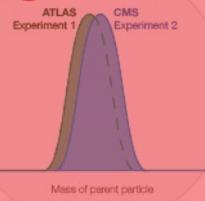
Calibration

Data Analysis and Search

Comparison with simulated data

Bumps and statistics

Discovery and Deeper Exploration



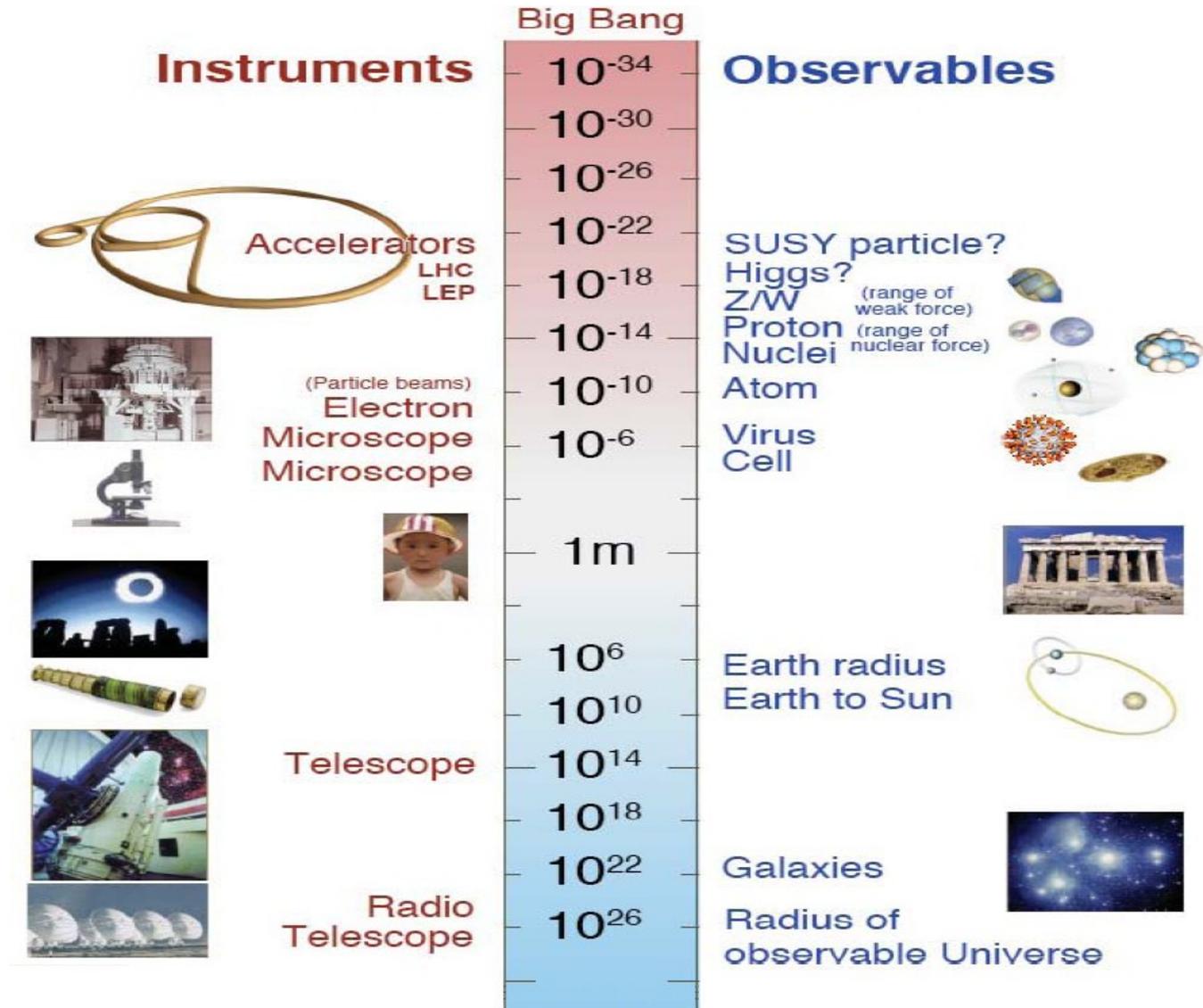
# Pourquoi des accélérateurs de particules ?

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

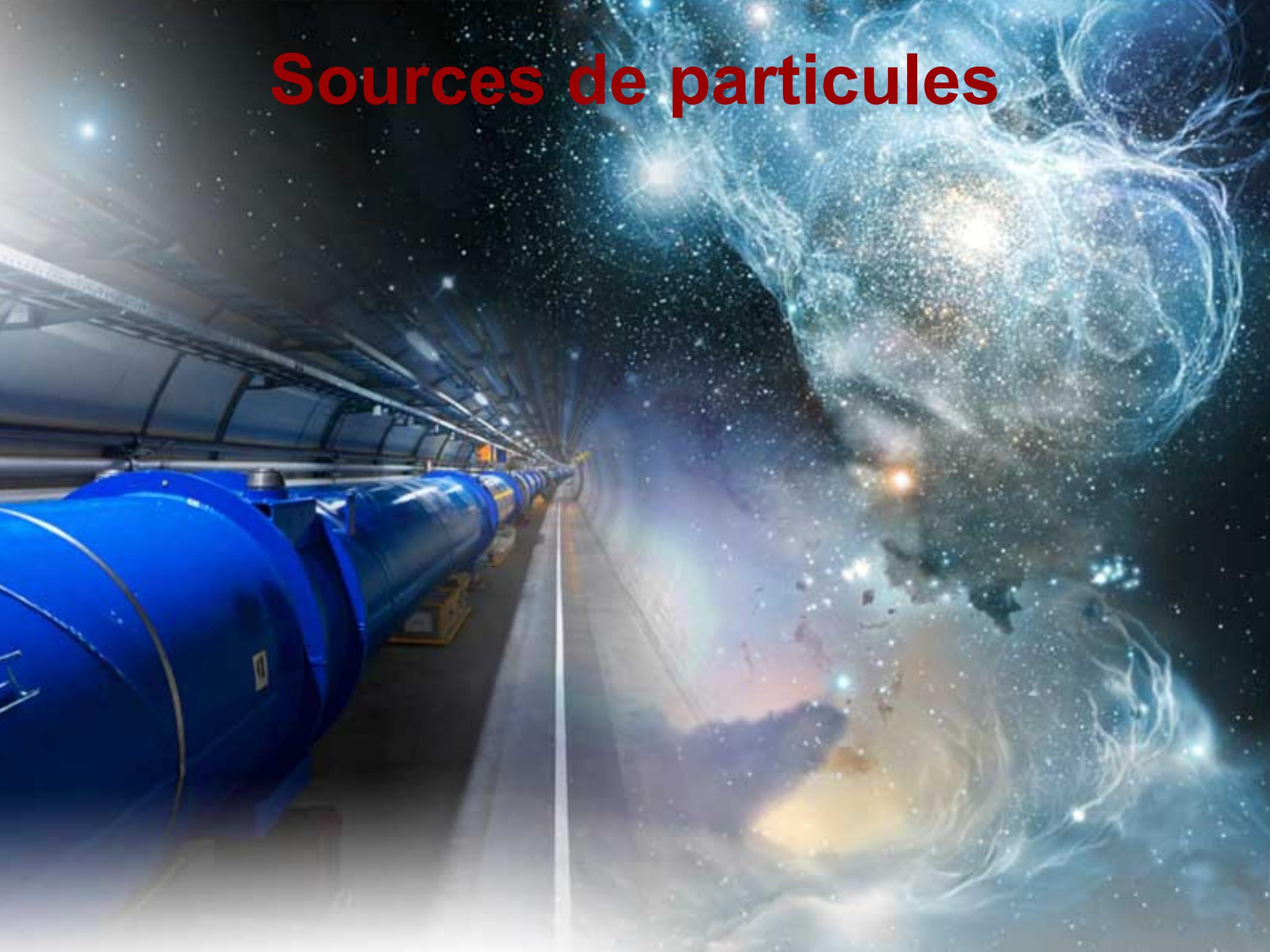
- ▶ longueur d'onde associée  $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶  $E = mc^2$

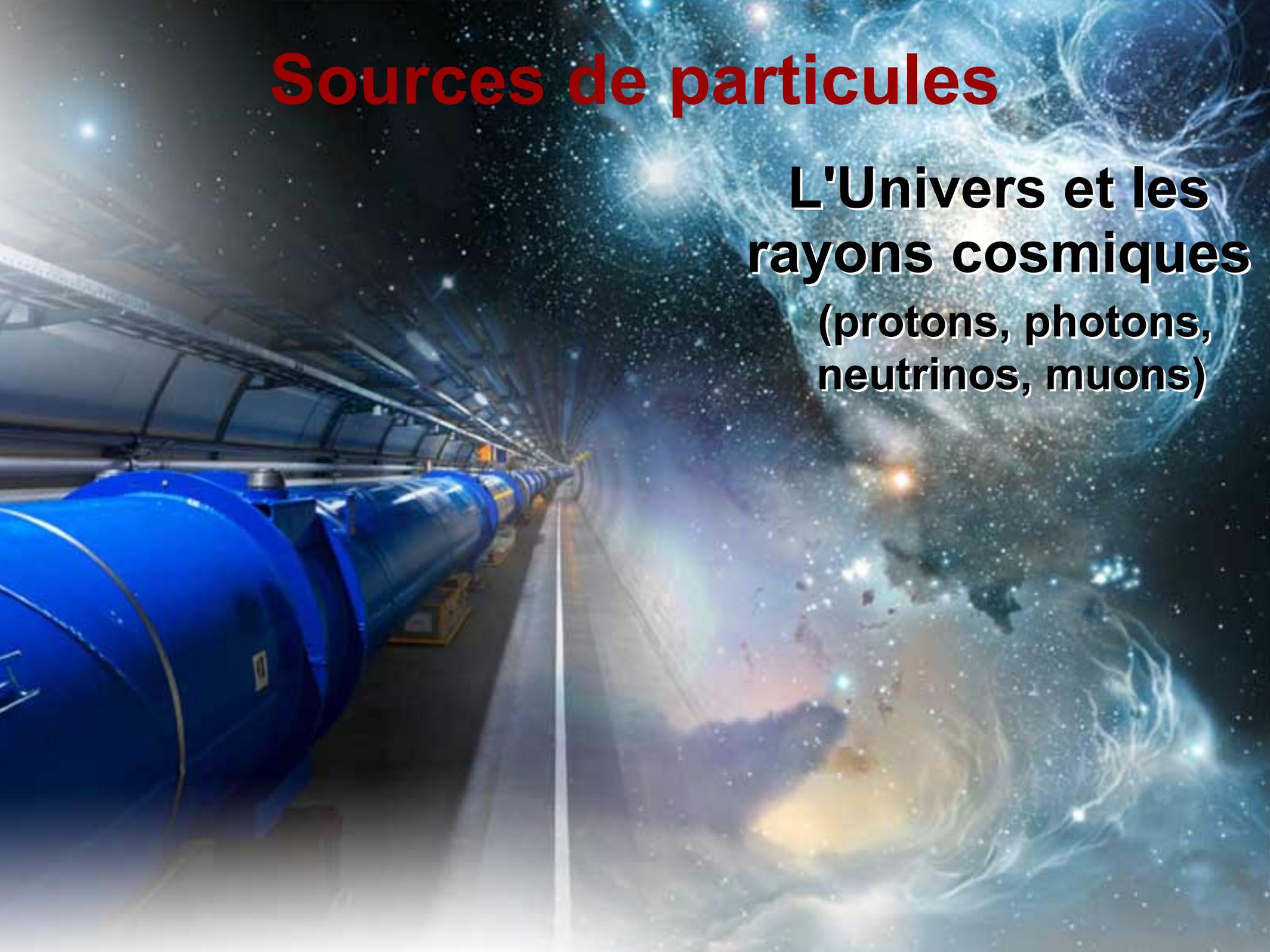


# Sources de particules



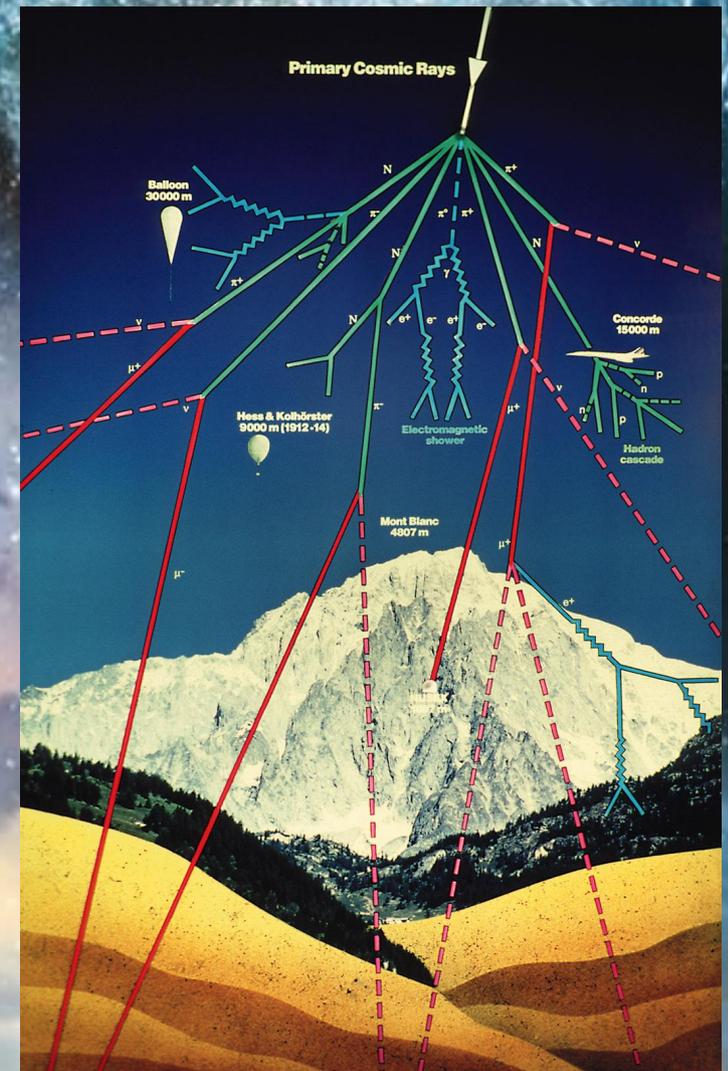
# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



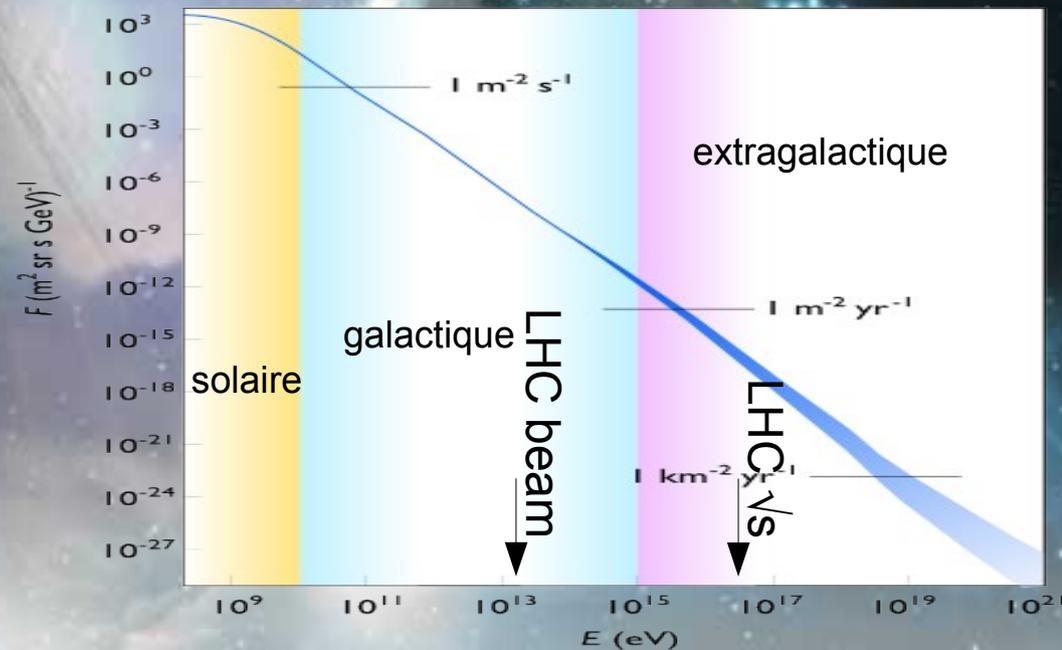
# Sources de particules

## L'Univers et les rayons cosmiques



# Sources de particules

L'Univers et les  
rayons cosmiques  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)

**Les accélérateurs  
de particules**  
(protons, photons,  
électrons, muons,  
pions, kaons, etc)

# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

LHCb

ATLAS

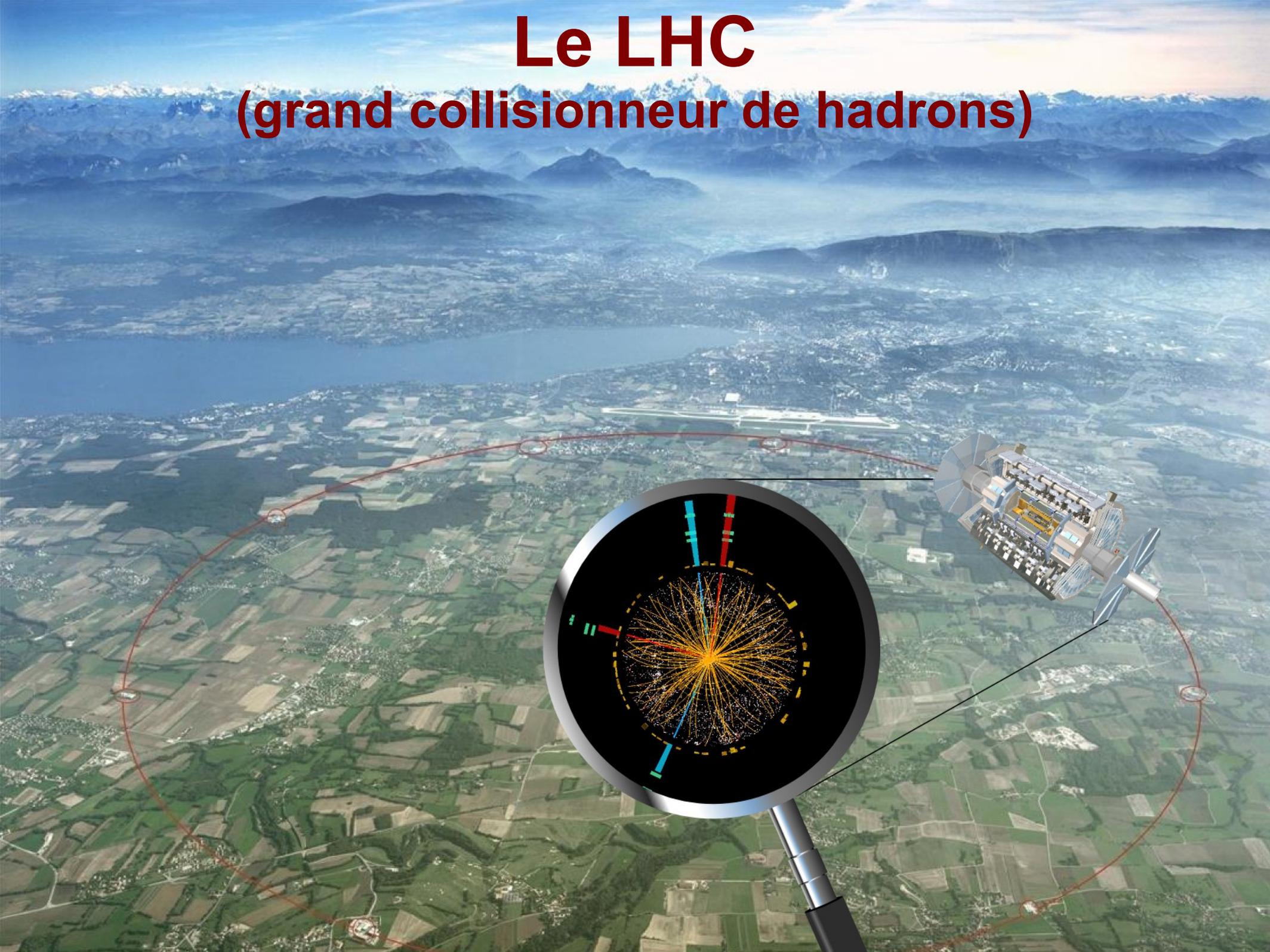
CMS

ALICE



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

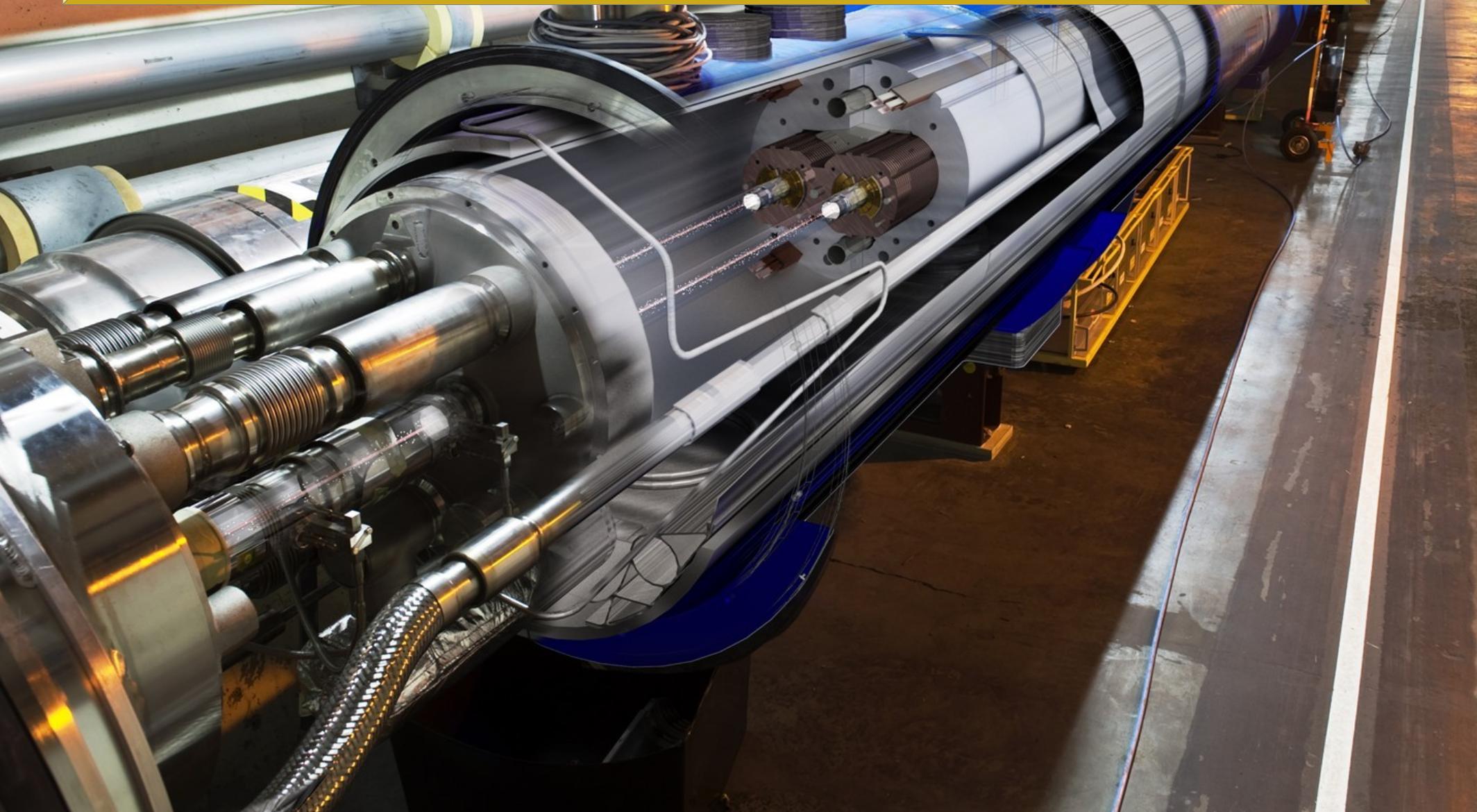


# Le LHC : la machine à superlatifs



# 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



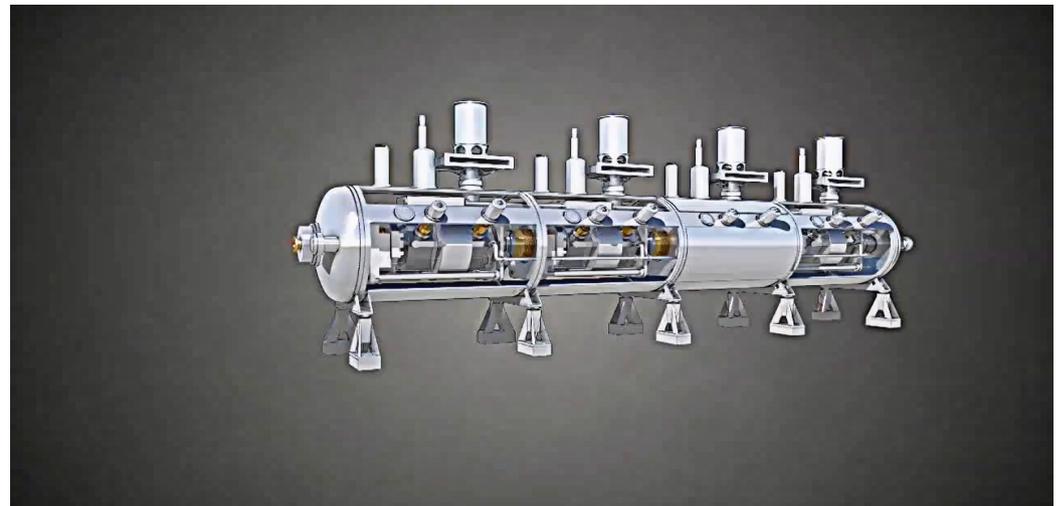
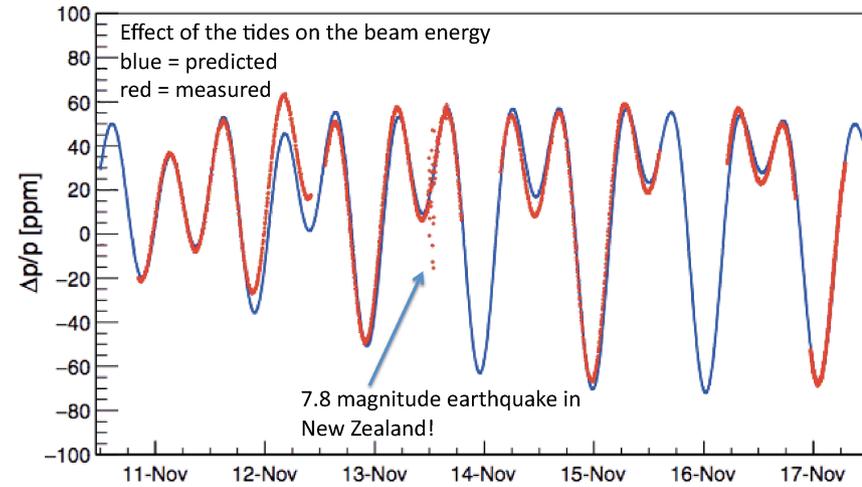
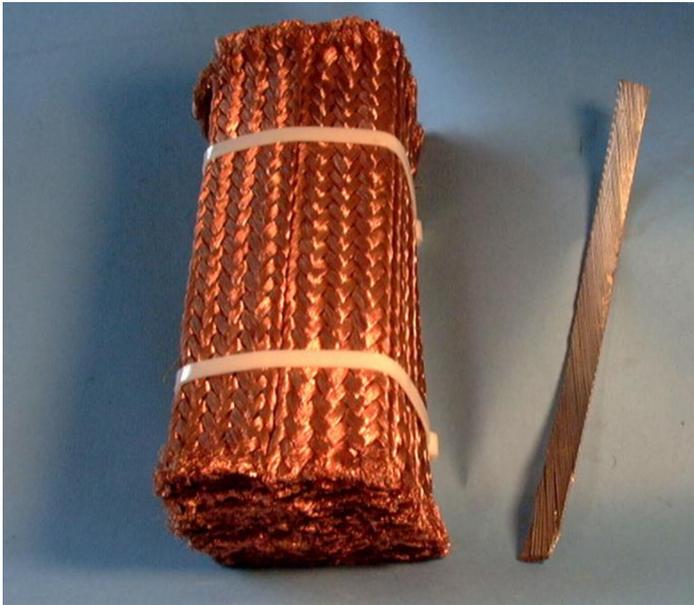
Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol, mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !  
▶ Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

# Le LHC : la machine à superlatifs

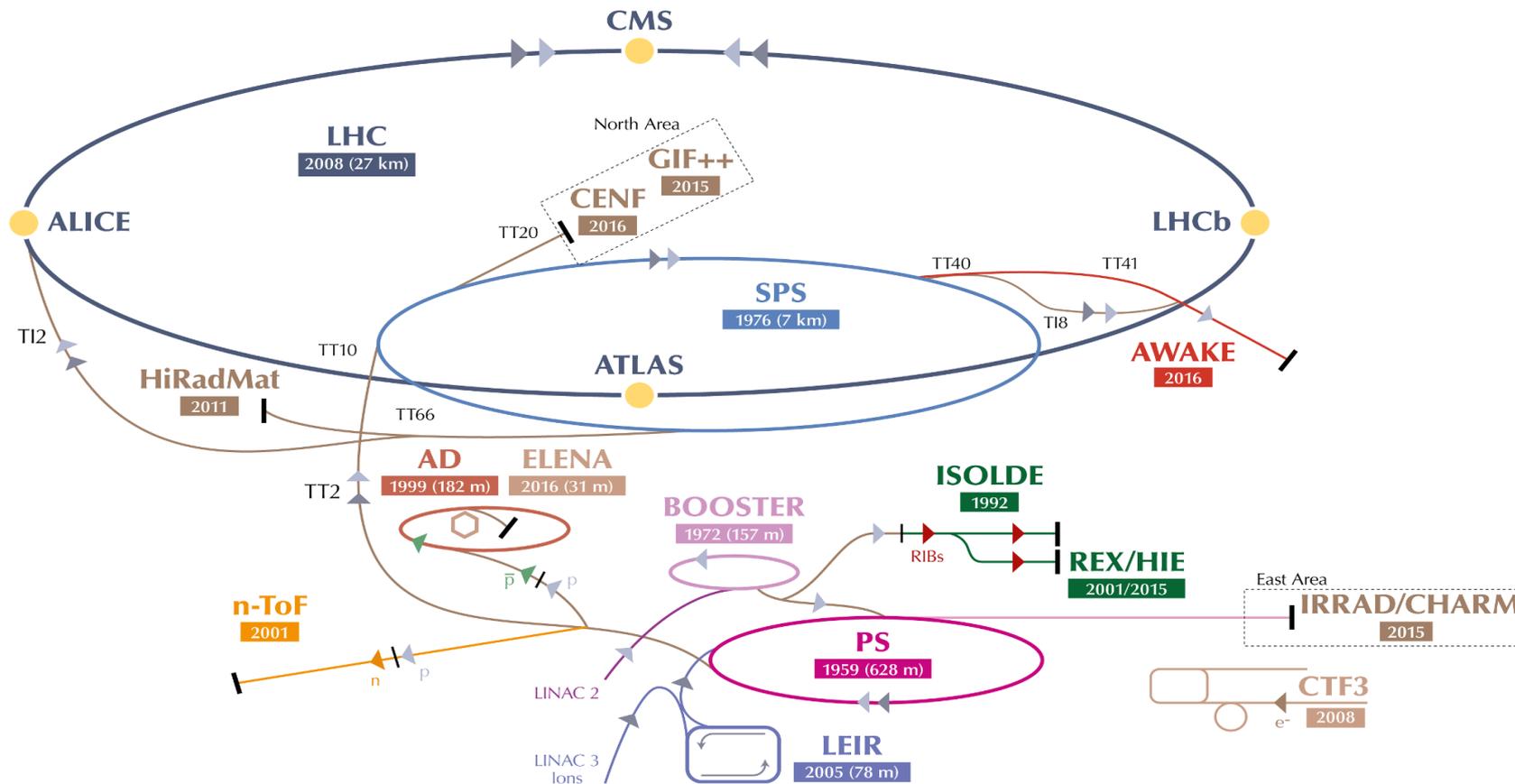
A long, complex tunnel filled with superconducting magnets and pipes, part of the LHC facility. The tunnel is dimly lit, with overhead lights illuminating the machinery. The magnets are large, cylindrical structures with blue and silver components. A yellow cart is visible on the right side of the tunnel. A warning sign is visible on the left wall.

Consommation électrique :  
Tous les foyers du canton de Genève

# Aimants et cavités



# Le CERN : les accélérateurs



▶ p (protons)   
 ▶ ions   
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)   
 ▶ n (neutrons)   
 ▶  $\bar{p}$  (antiprotons)   
 ▶  $e^-$  (electrons)

LHC Large Hadron Collider   
 SPS Super Proton Synchrotron   
 PS Proton Synchrotron   
 AD Antiproton Decelerator   
 CTF3 Clic Test Facility

AWAKE Advanced WAKEfield Experiment   
 ISOLDE Isotope Separator OnLine   
 REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

LEIR Low Energy Ion Ring   
 LINAC LINear ACcelerator   
 n-ToF Neutrons Time Of Flight   
 HiRadMat High-Radiation to Materials

CHARM Cern High energy AcceleraTOR Mixed field facility   
 IRRAD proton IRRADIation facility   
 GIF++ Gamma Irradiation Facility

CENF CErn Neutrino platForm



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	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
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)	

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



25 ans de préparation

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

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
Fin 2018	Fin du Run 2
2021	Début du Run 3
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	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
	Septembre 2008	Mise en service
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



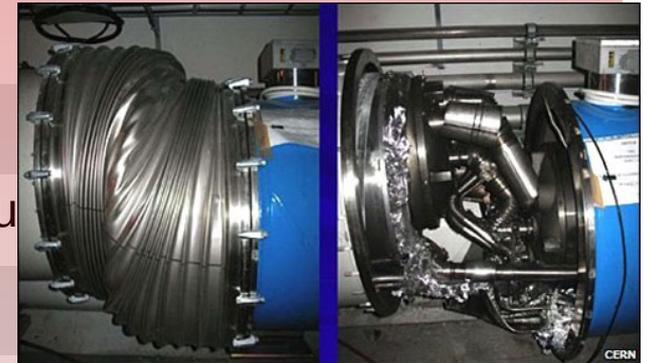
# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

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

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
Fin 2018	Fin du Run 2
2021	Début du Run 3
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	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
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)	



# Le CERN



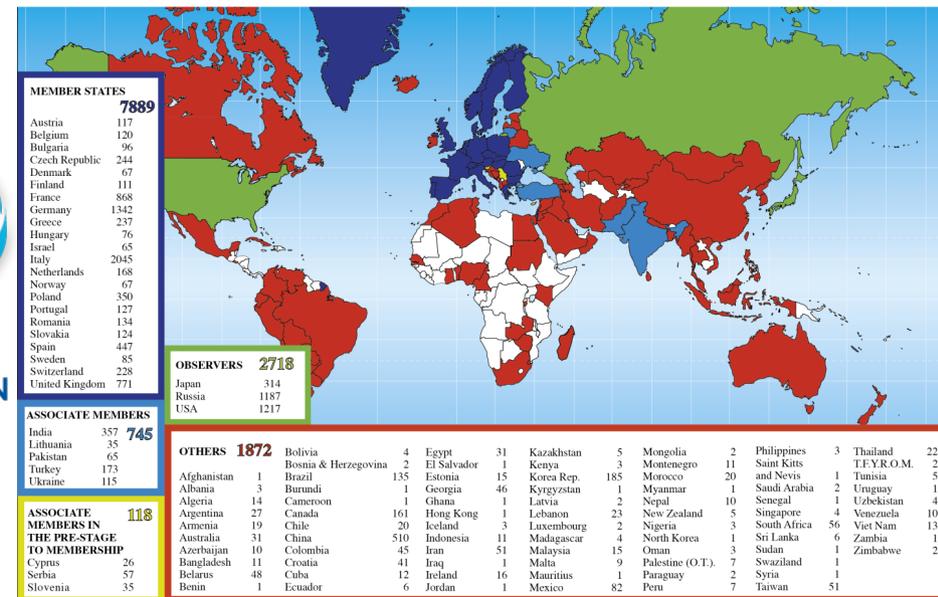
*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954 (festivités pour ses 60 ans en 2014)
- 23 état membres
- Emploie ~2500
- ~13 000 utilisateurs
- 500 instituts, 80 pays

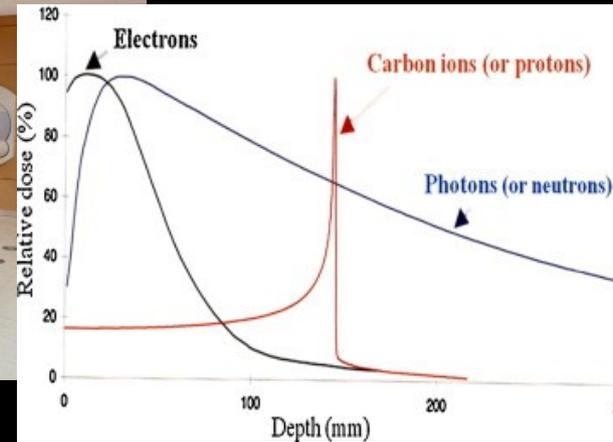
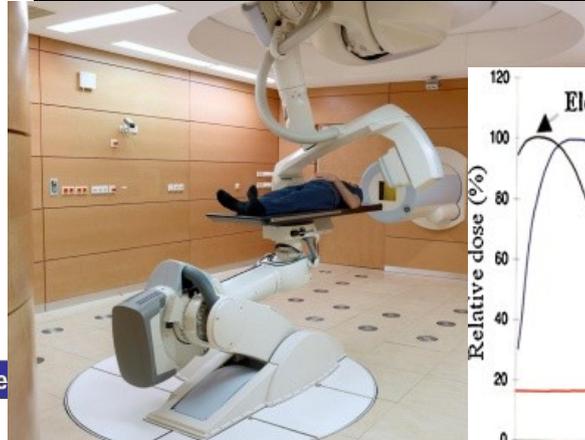
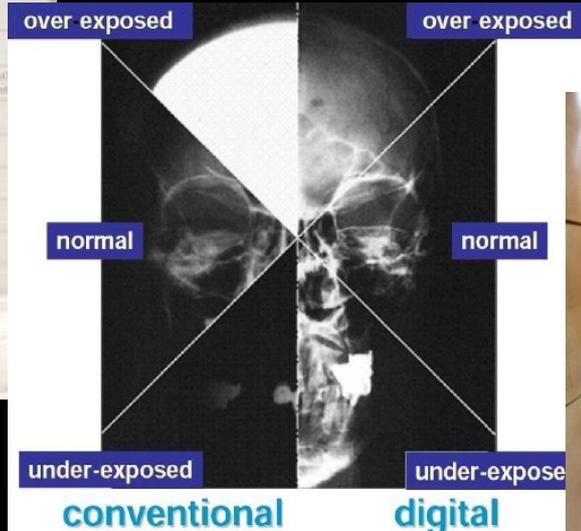


Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

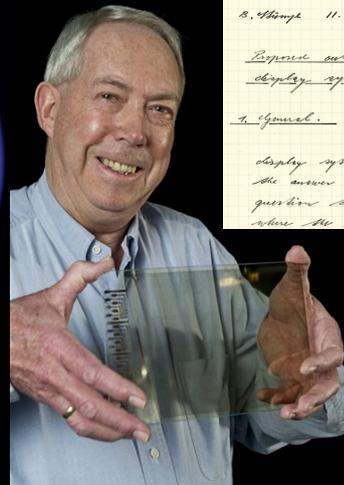


- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été

# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

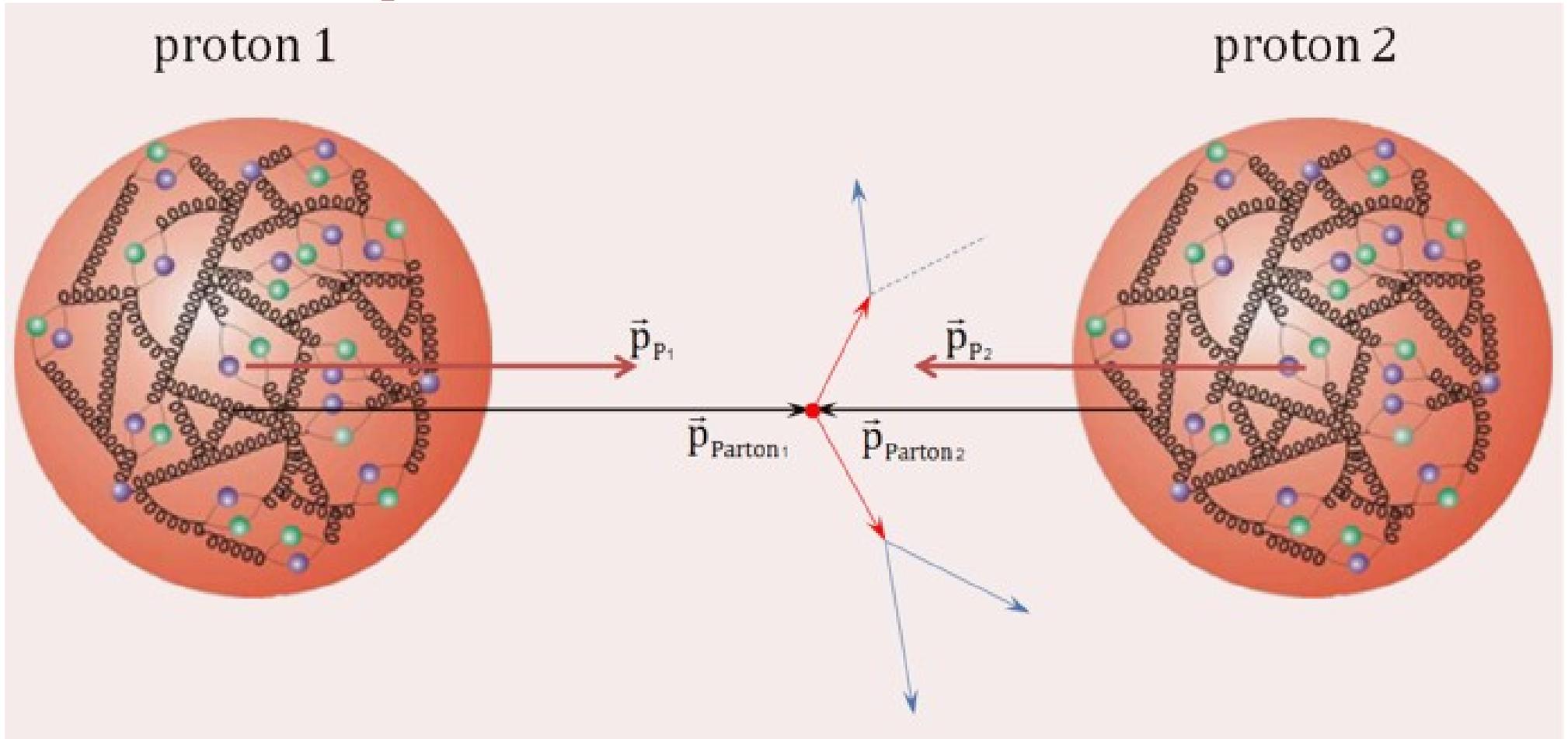


B. Thompson 11.03.1972 PAGE 7.  
Expense outline for a fast interactive computer display system\*  
1. General: *early all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to*



► 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

1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

11 Bumps and statistics

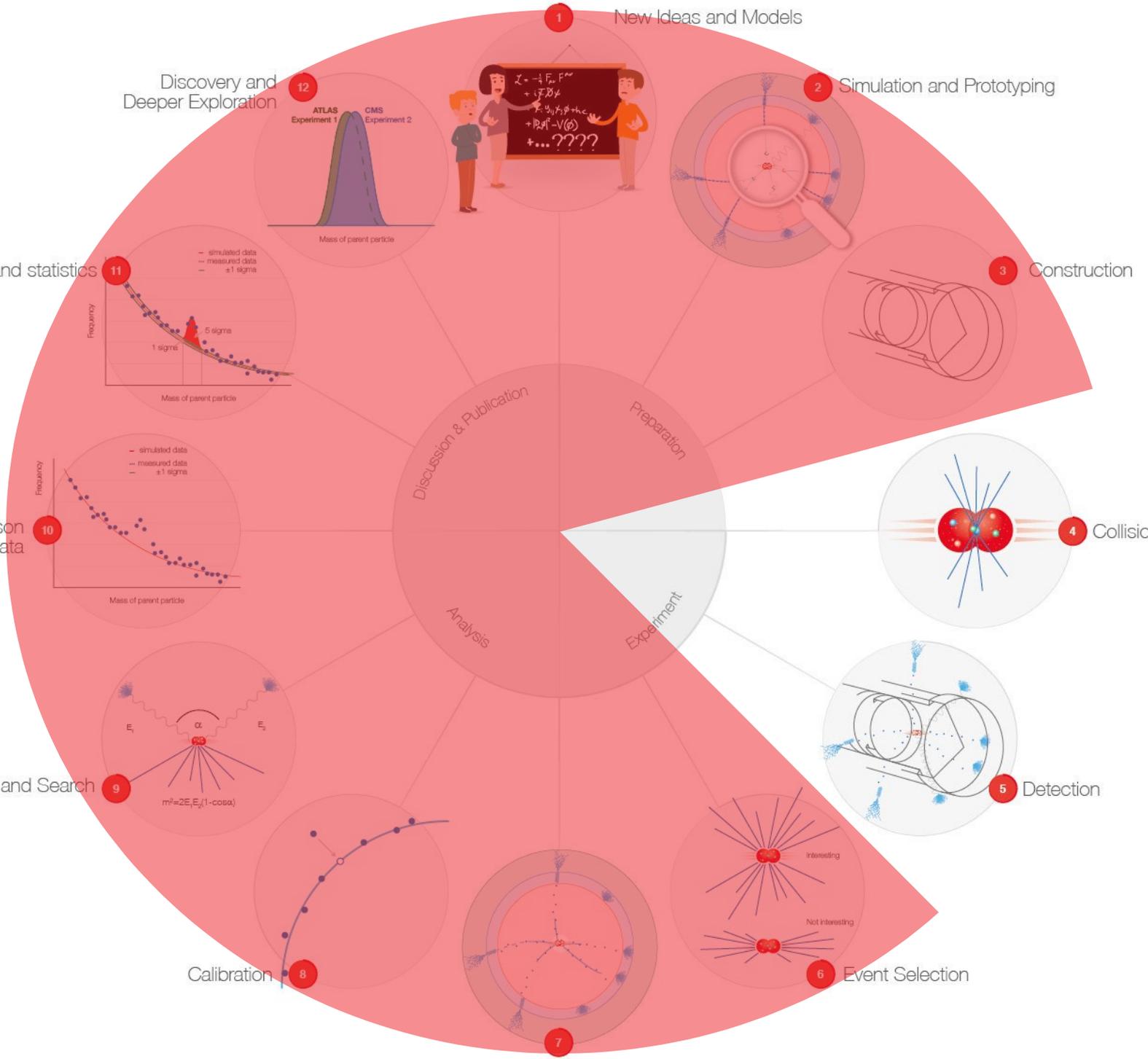
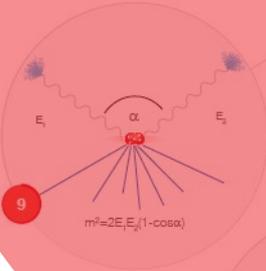
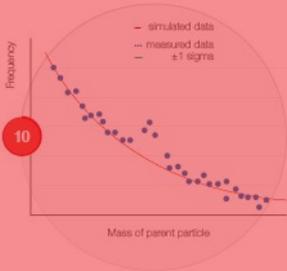
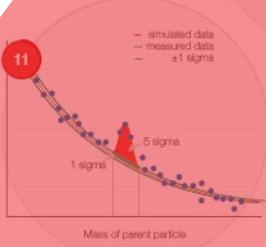
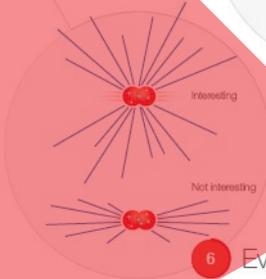
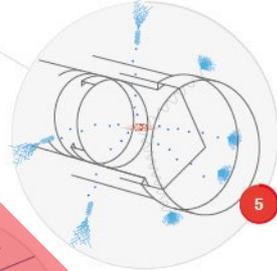
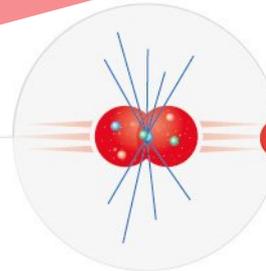
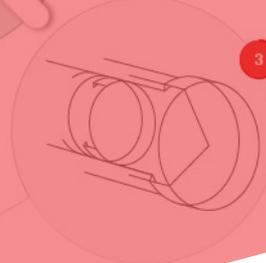
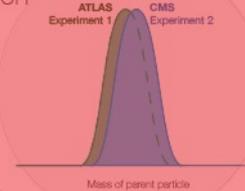
12 Discovery and Deeper Exploration

Discussion & Publication

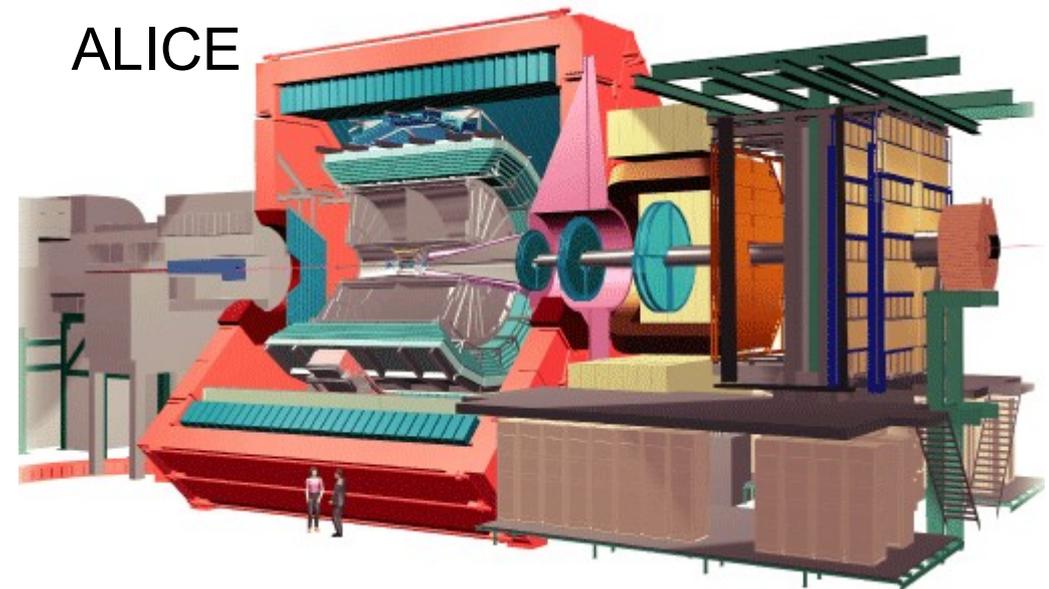
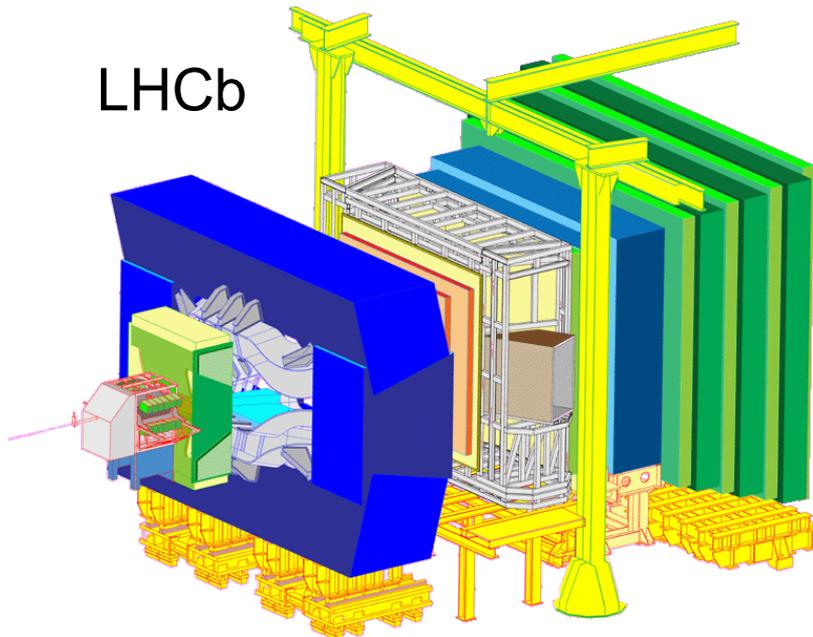
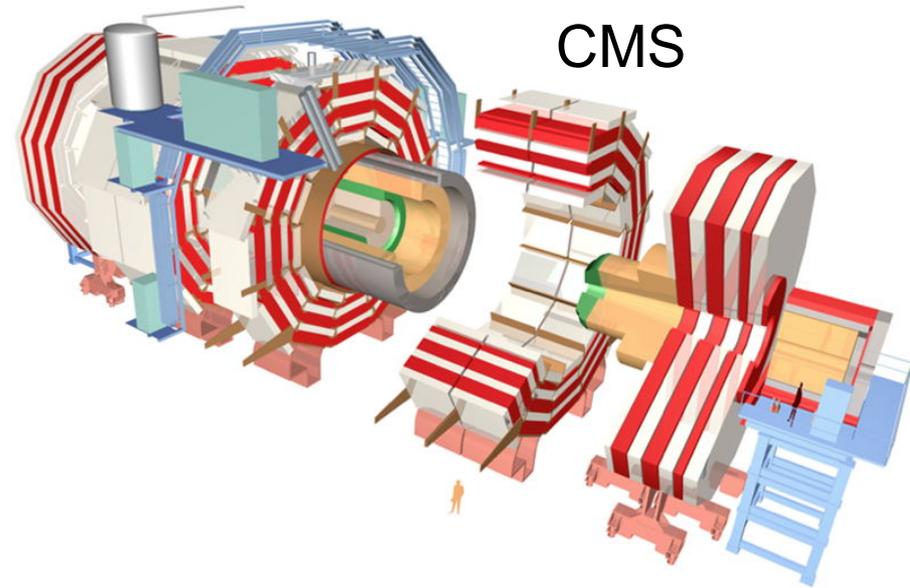
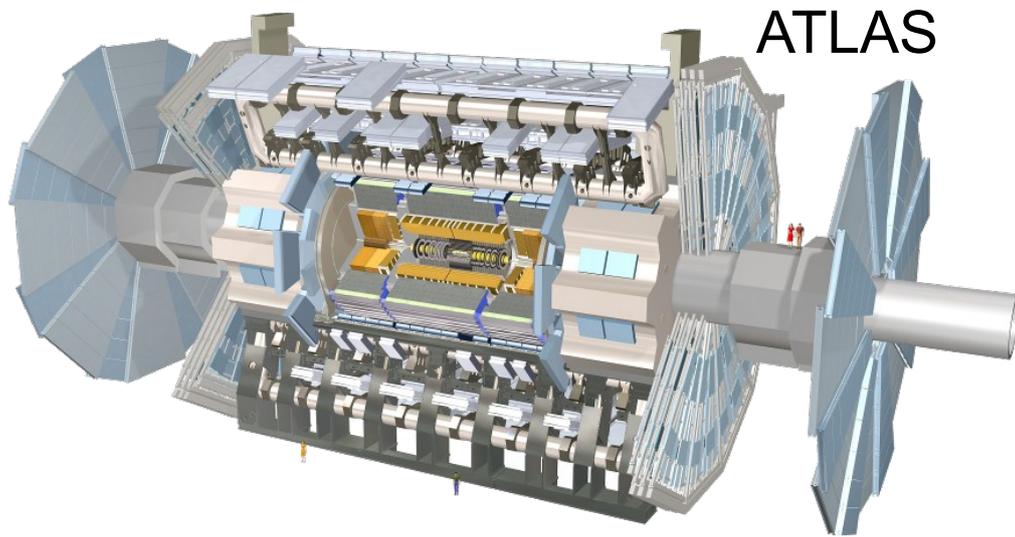
Preparation

Experiment

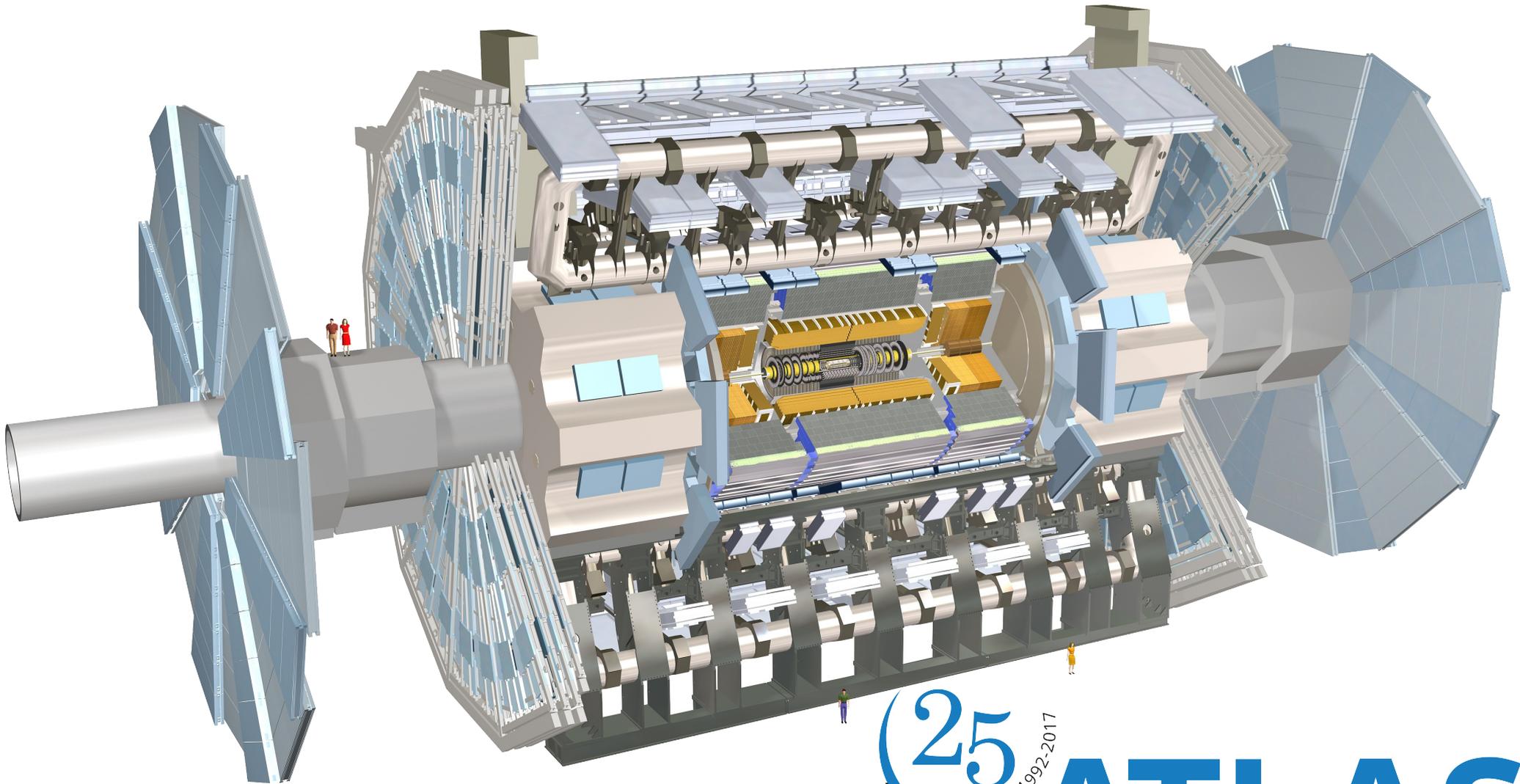
Analysis



# Les détecteurs géants du LHC



# Le détecteur ATLAS



**ATLAS**  
EXPERIMENT

# La collaboration ATLAS



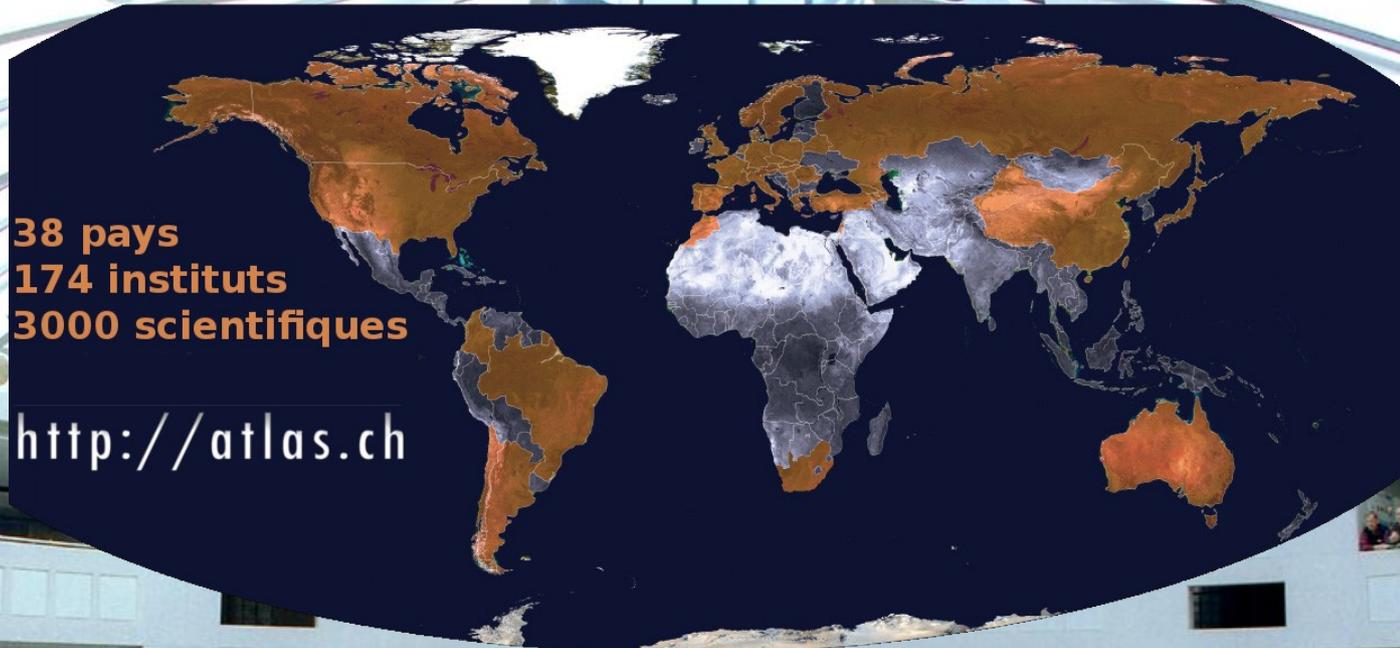
C

D

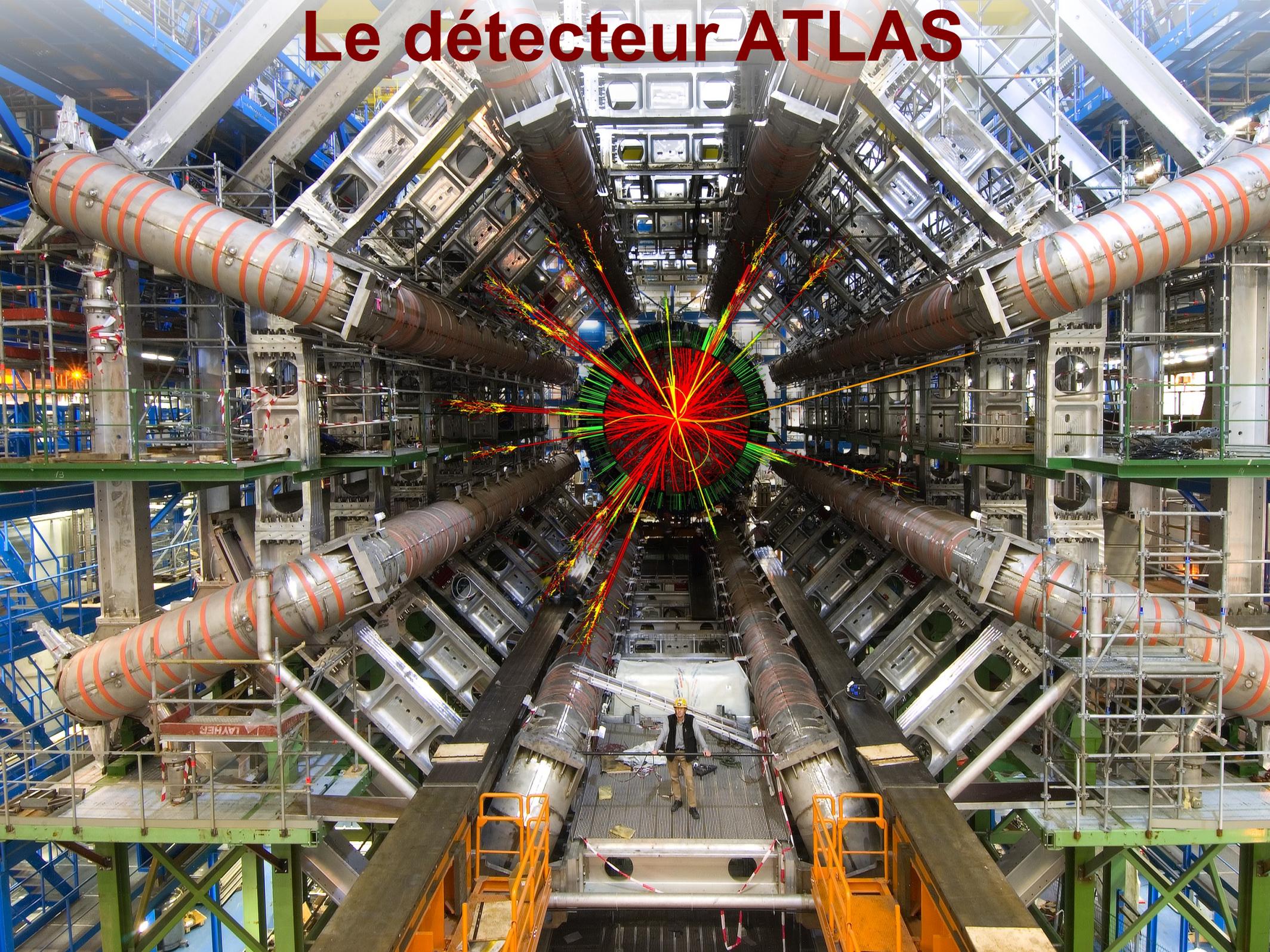
# La collaboration ATLAS

38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

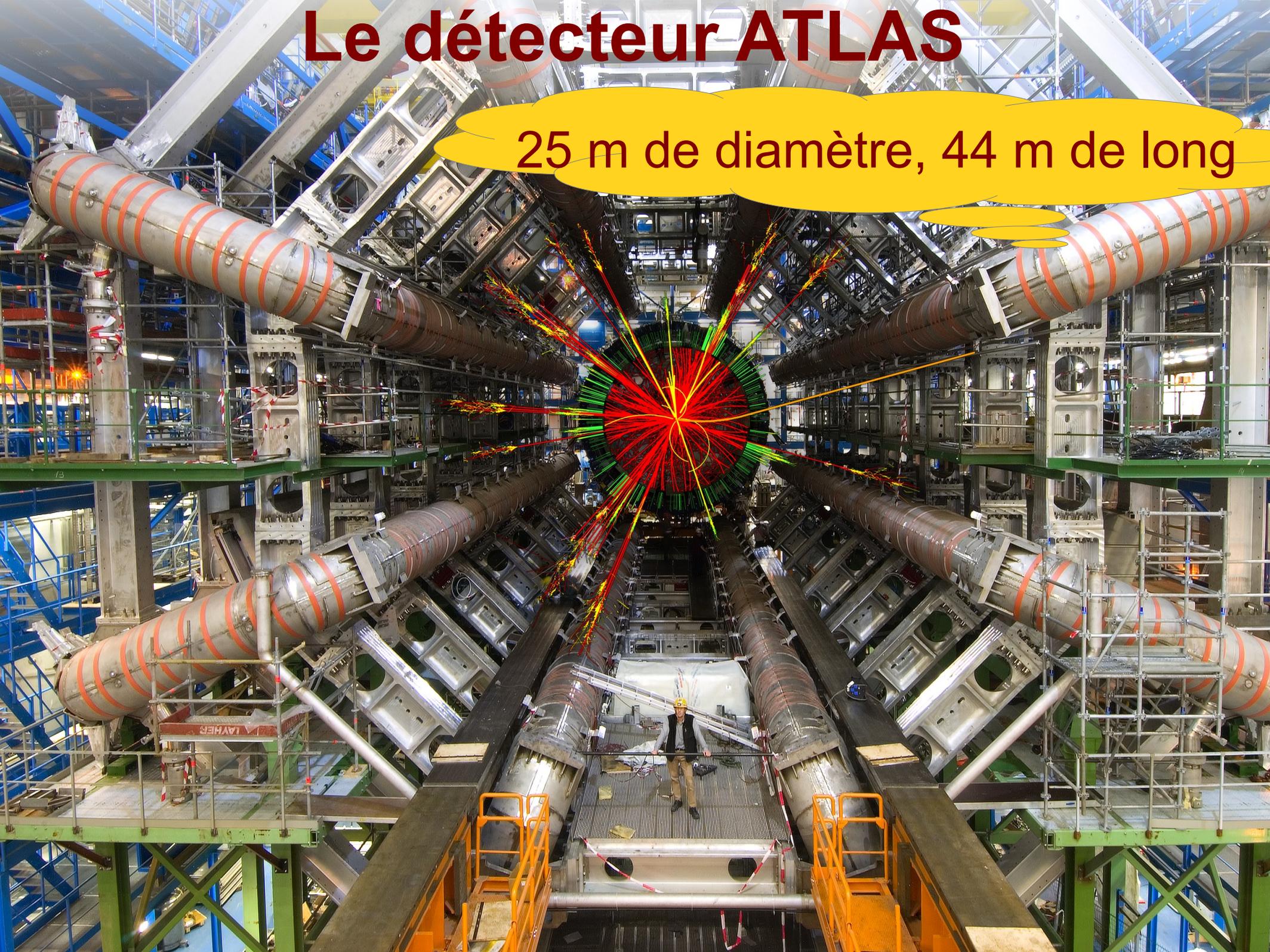


# Le détecteur ATLAS



# Le détecteur ATLAS

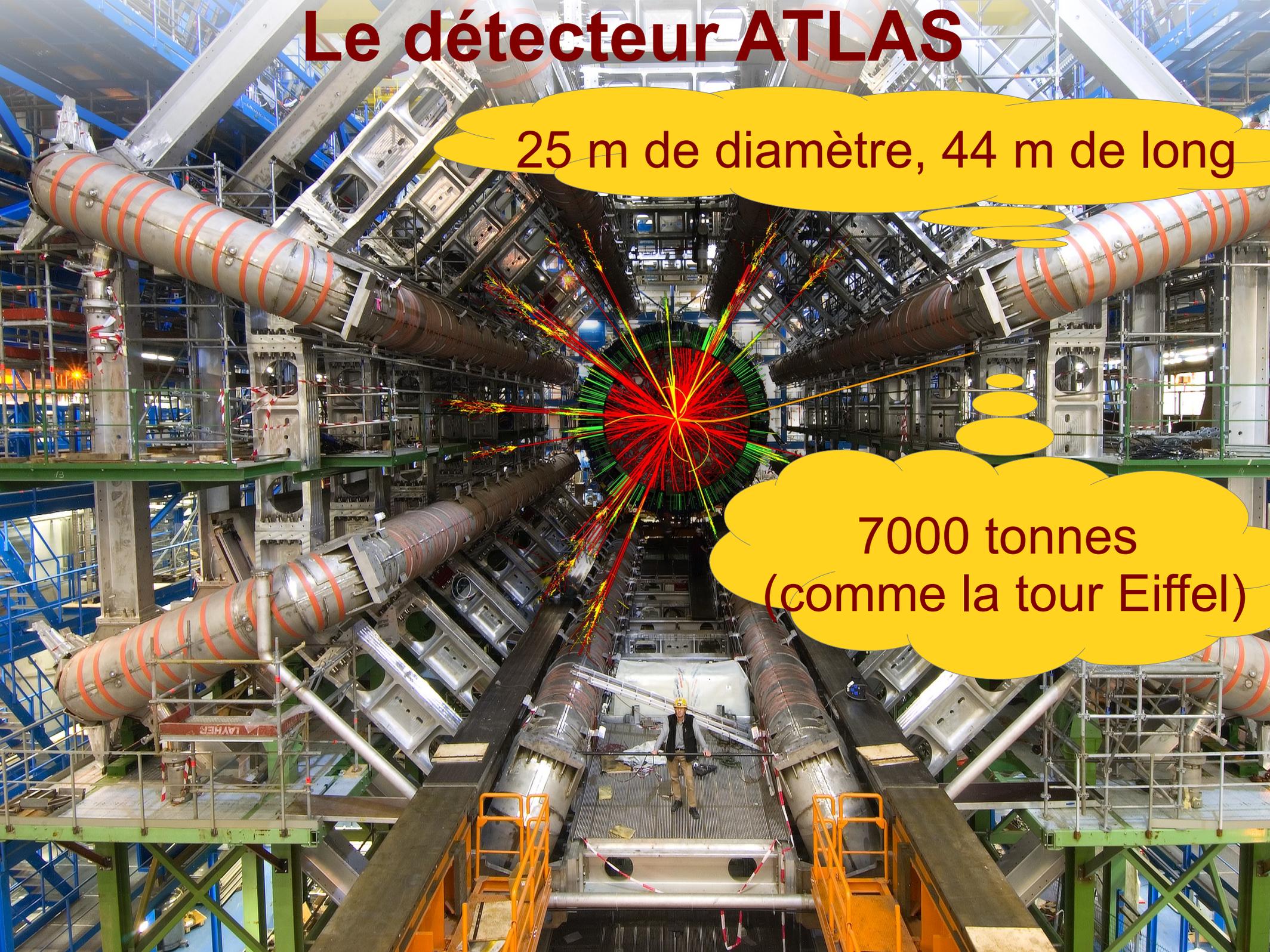
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

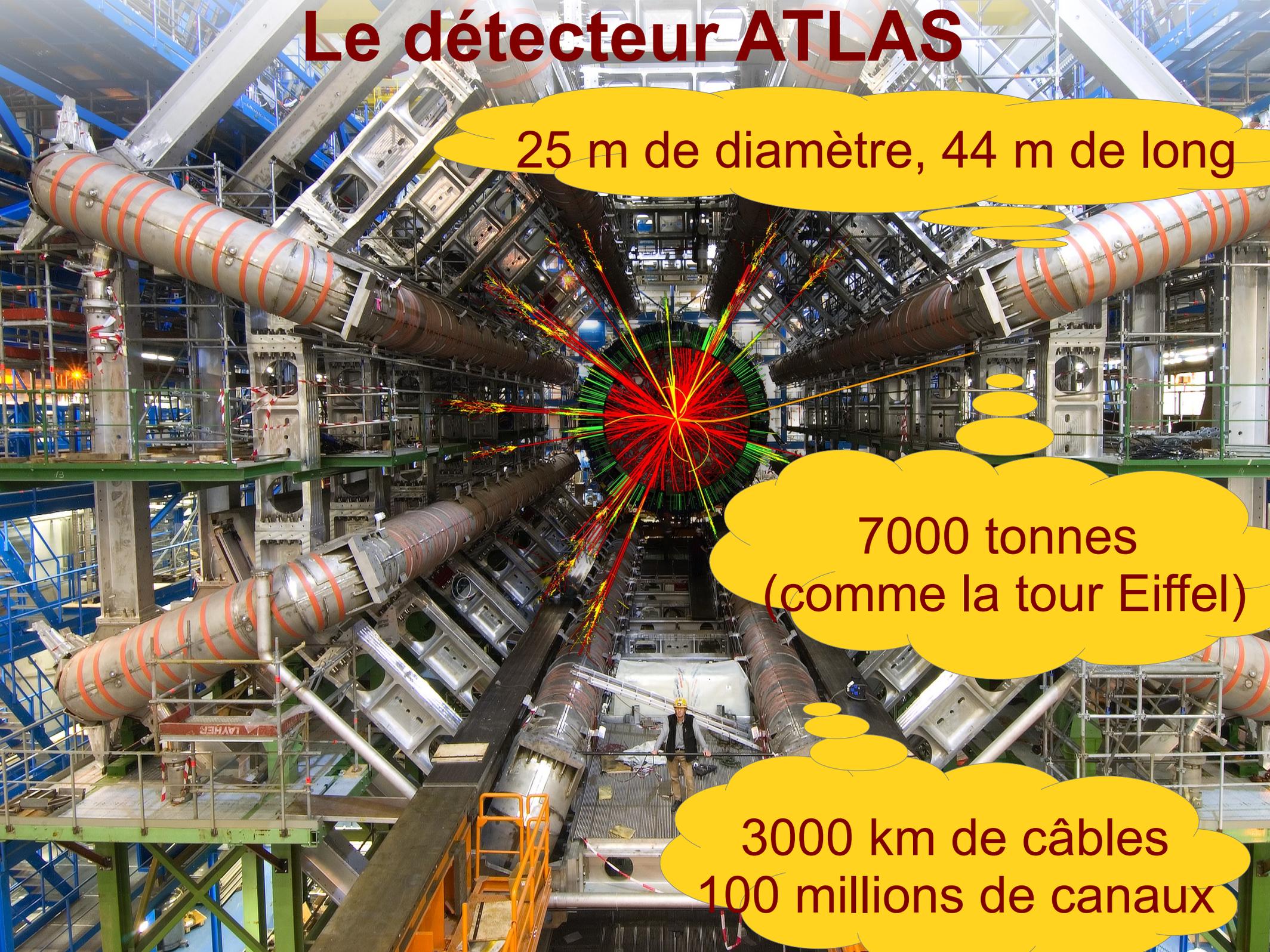


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux



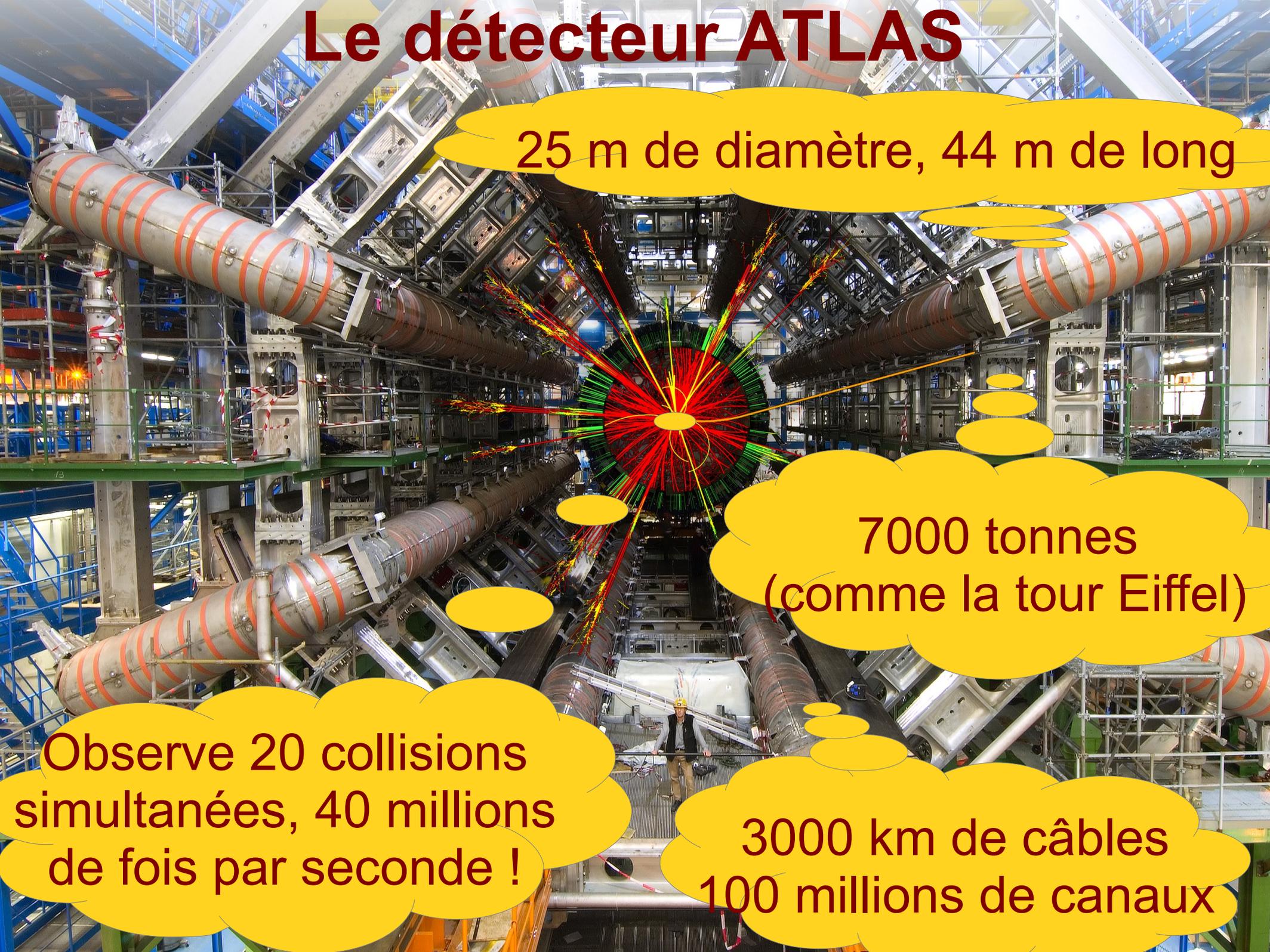
# Le détecteur ATLAS

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

The image shows the interior of the ATLAS detector tunnel. The central feature is a large, circular calorimeter with a complex internal structure. The tunnel is lined with various sub-detectors and support structures. A person is visible in the distance, providing a sense of scale. The overall environment is industrial and highly technical.

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

1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

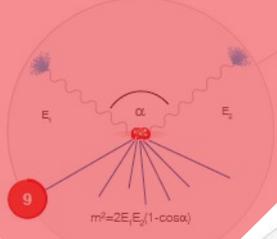
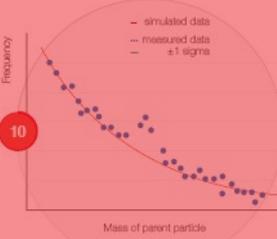
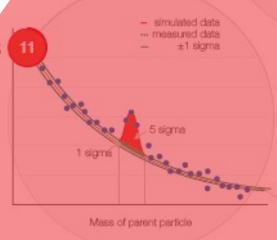
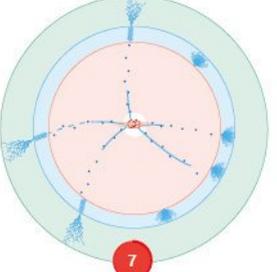
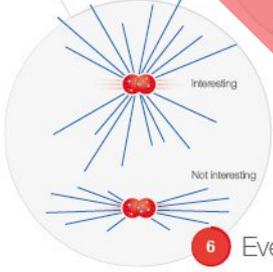
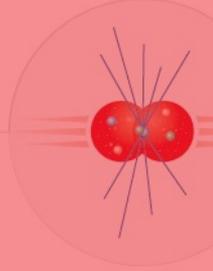
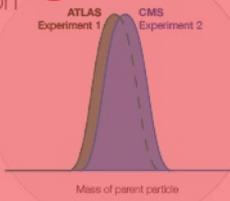
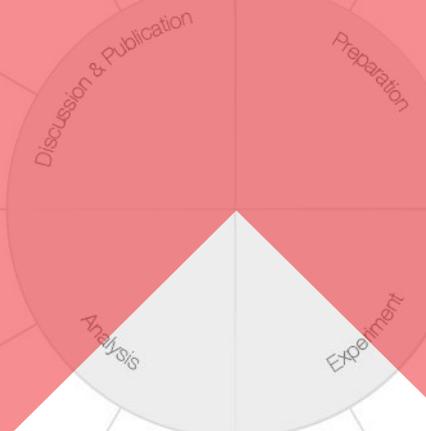
8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

11 Bumps and statistics

12 Discovery and Deeper Exploration



Discovery and Deeper Exploration

ATLAS Experiment 1  
CMS Experiment 2

Mass of parent particle

Mass of parent particle

Mass of parent particle

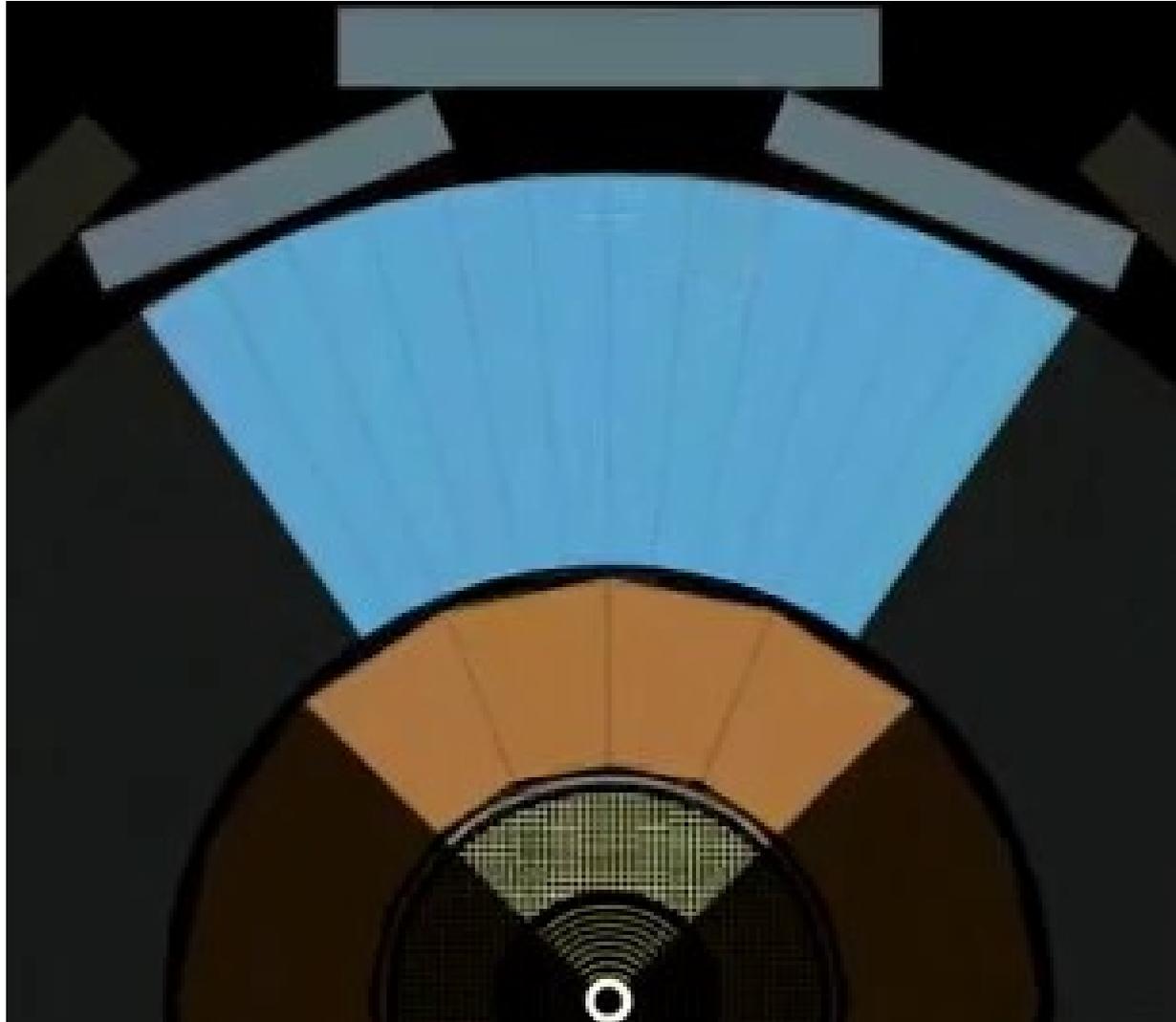
$m^2 = 2E_1E_2(1 - \cos\alpha)$

Mass of parent particle

Interesting

Not interesting

# Interaction des particules avec le détecteur



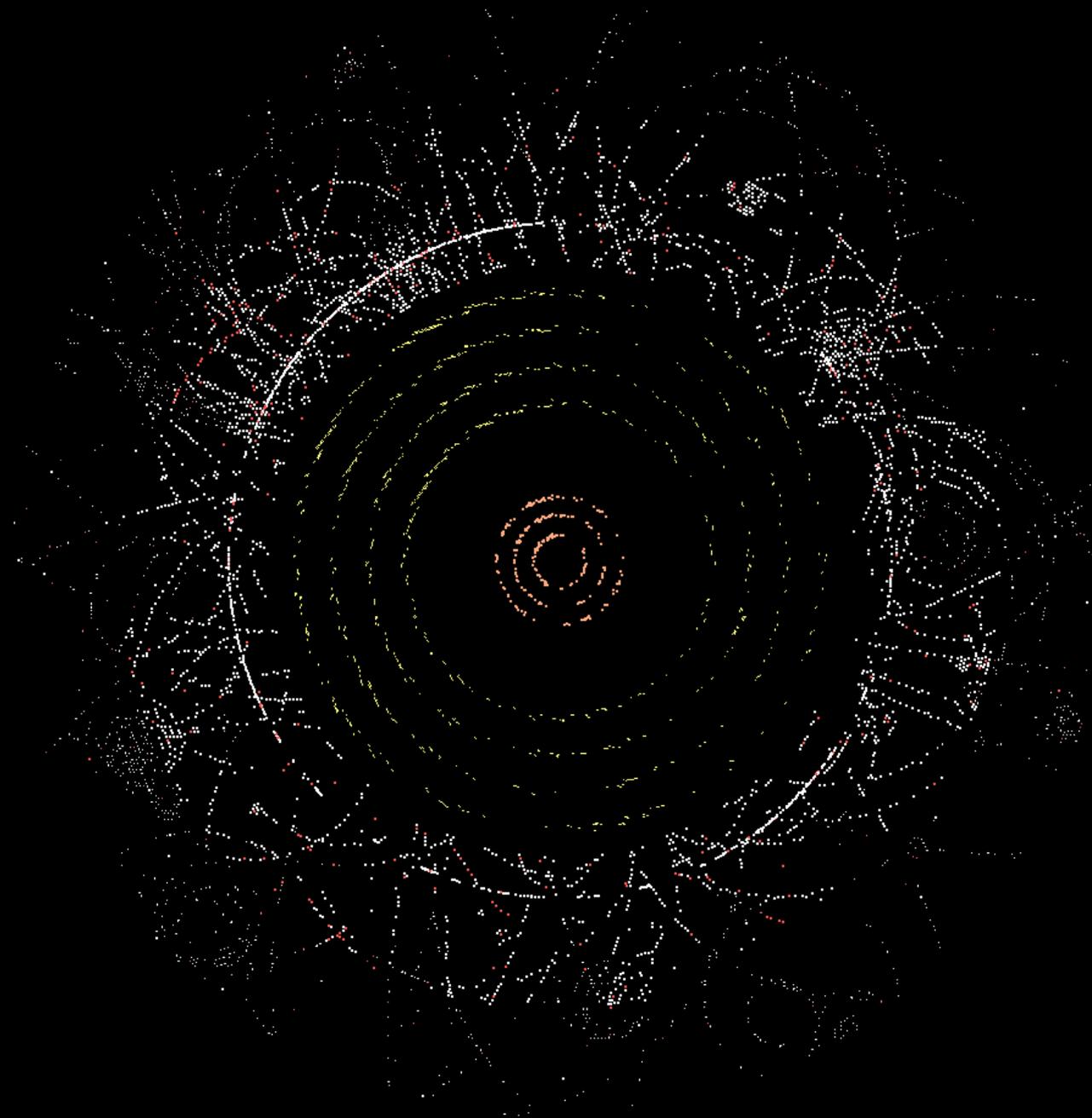
# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



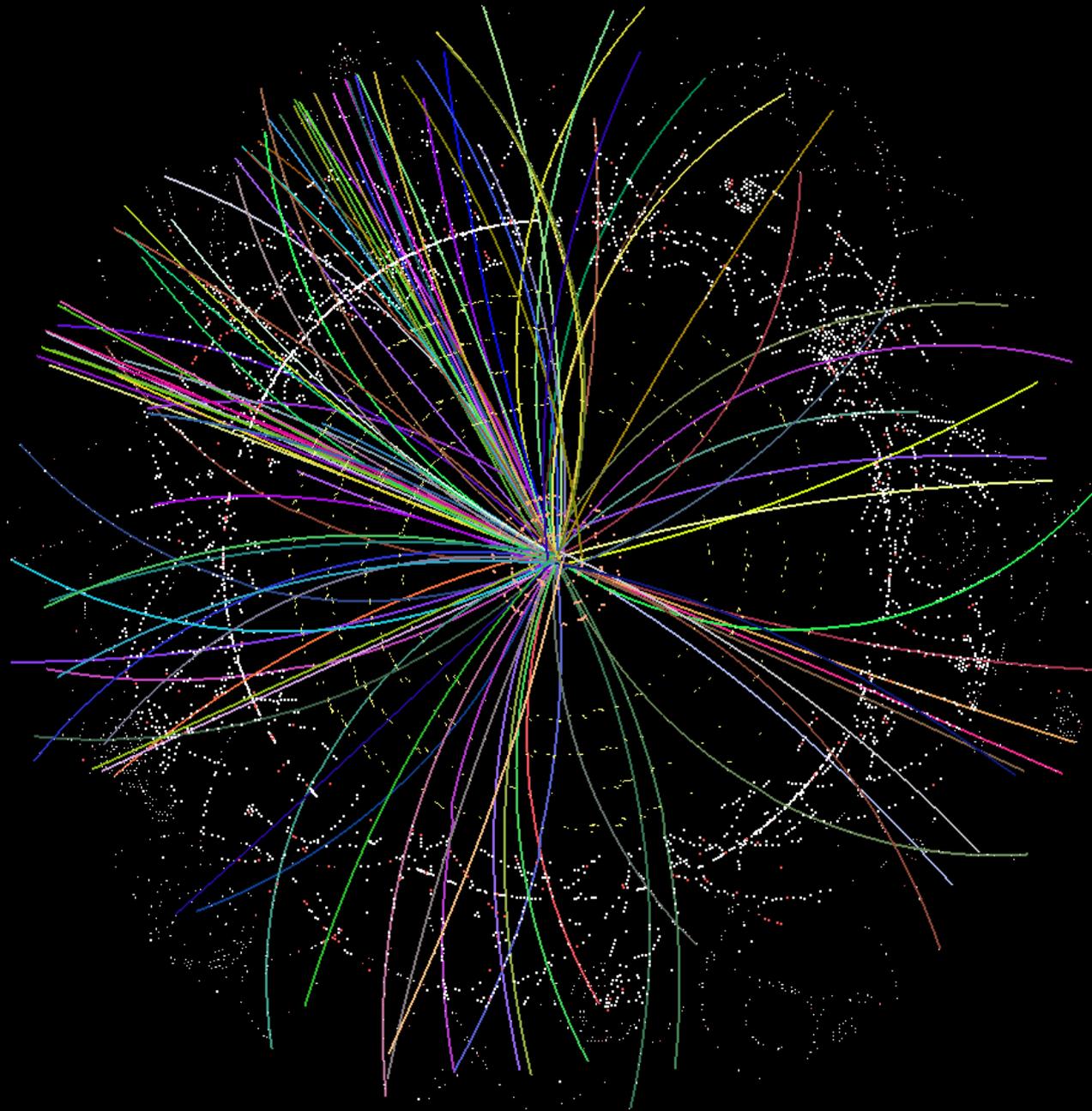
- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m<sup>2</sup> de silicium

© CERN

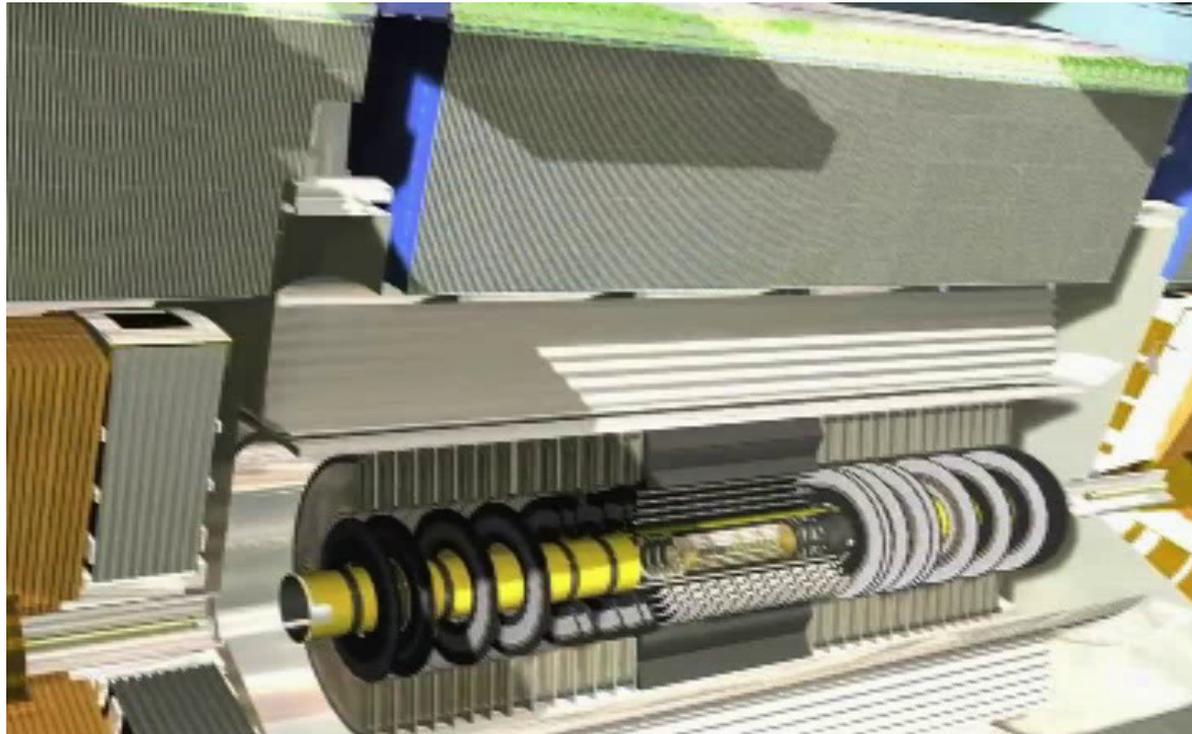
# Passage des particules



# Reconstruction des trajectoires



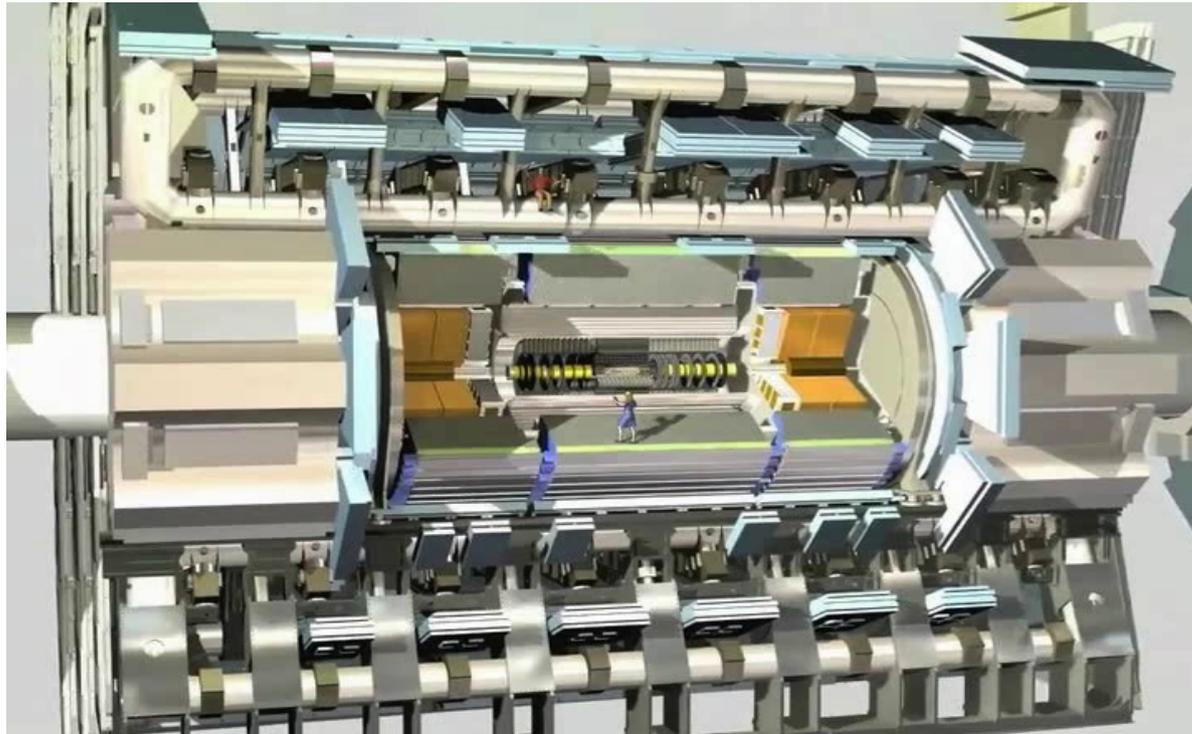
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



© CERN

- Argon liquide à  $-183^{\circ}\text{C}$

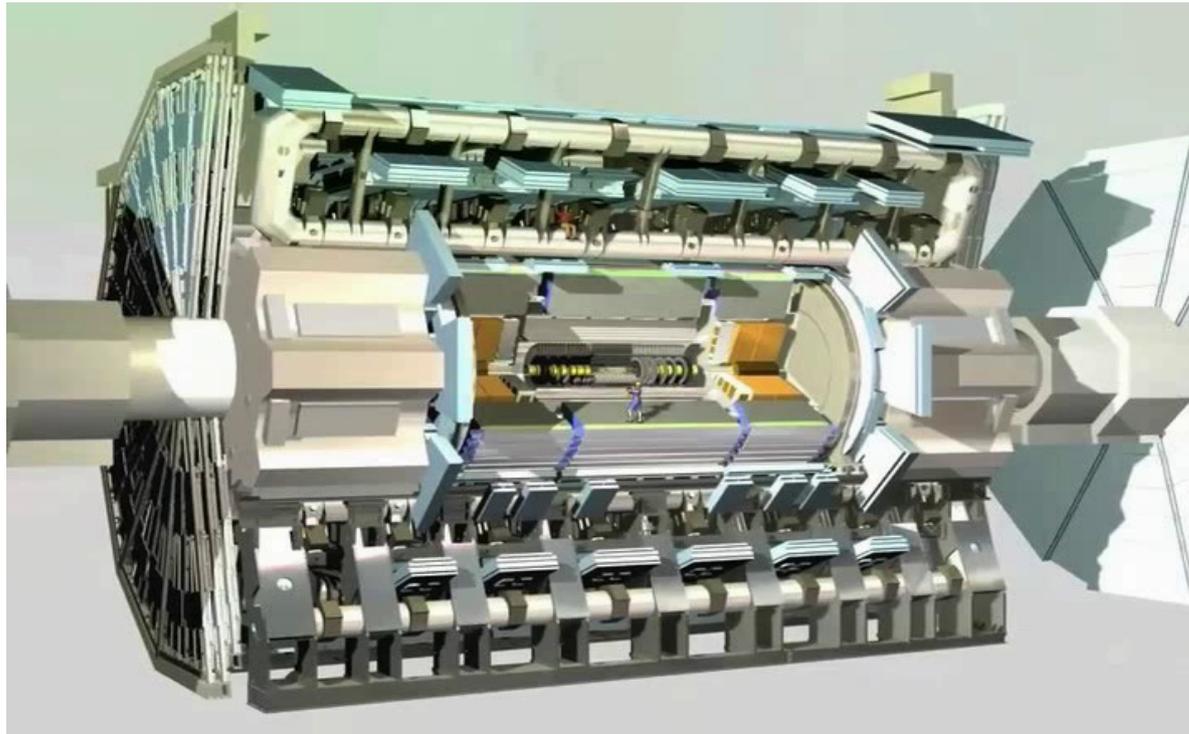
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



© CERN

- 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

© CERN

1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

11 Bumps and statistics

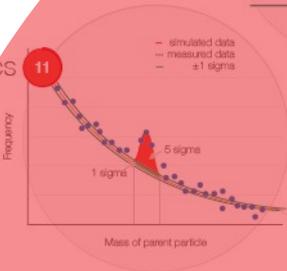
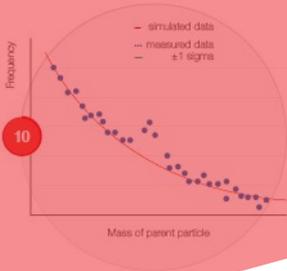
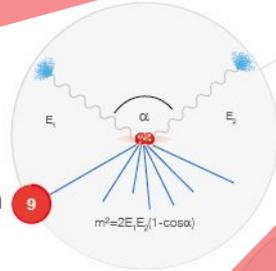
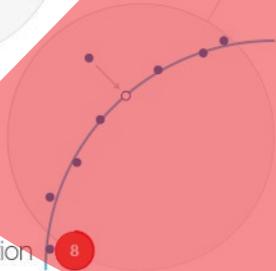
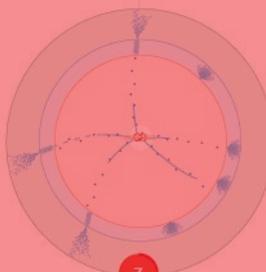
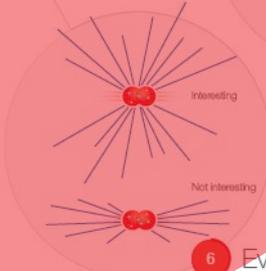
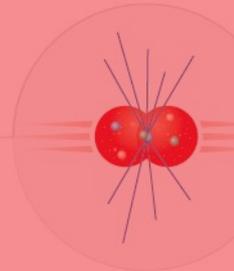
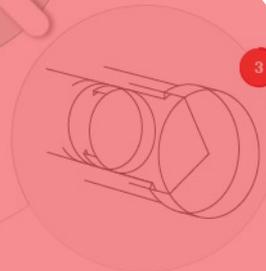
12 Discovery and Deeper Exploration

Discussion & Publication

Preparation

Experiment

Analysis



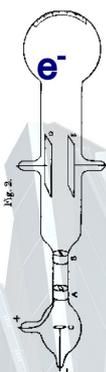
# Le LHC en action



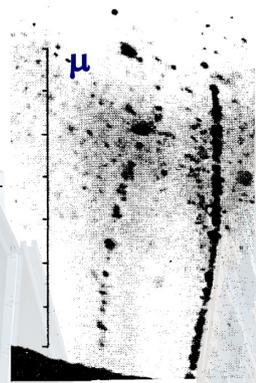
# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

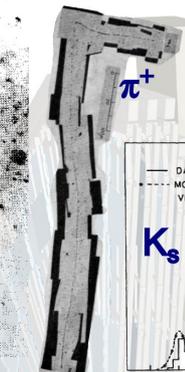
Découverte historique



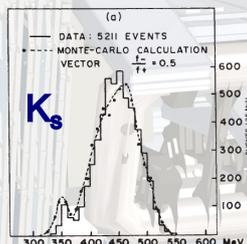
1897



1937



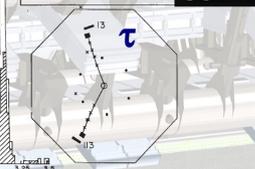
1947



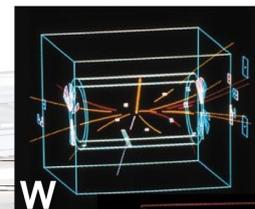
1964



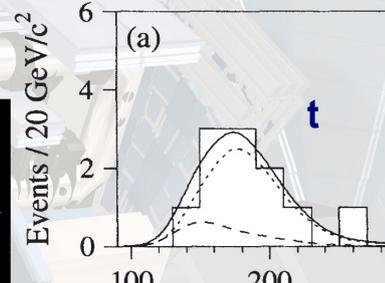
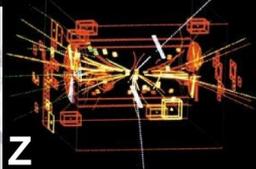
1974



1976



1983

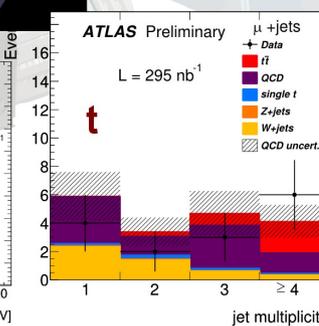
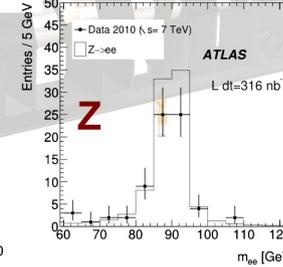
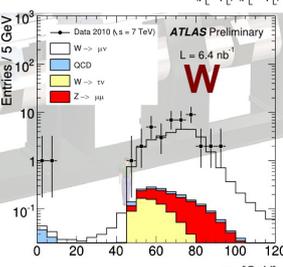
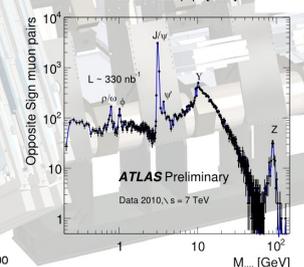
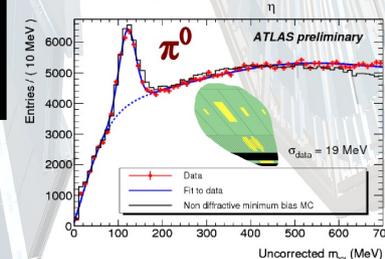
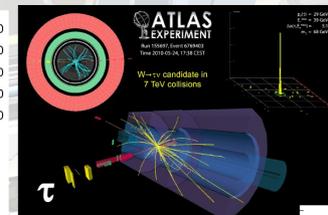
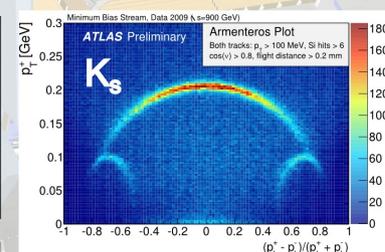
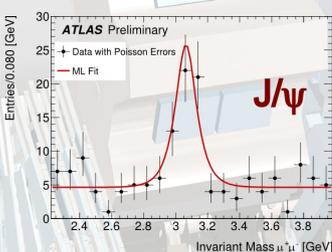
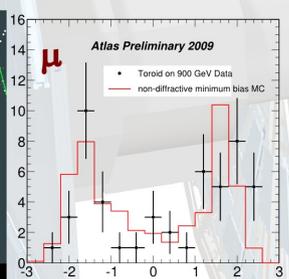


1995

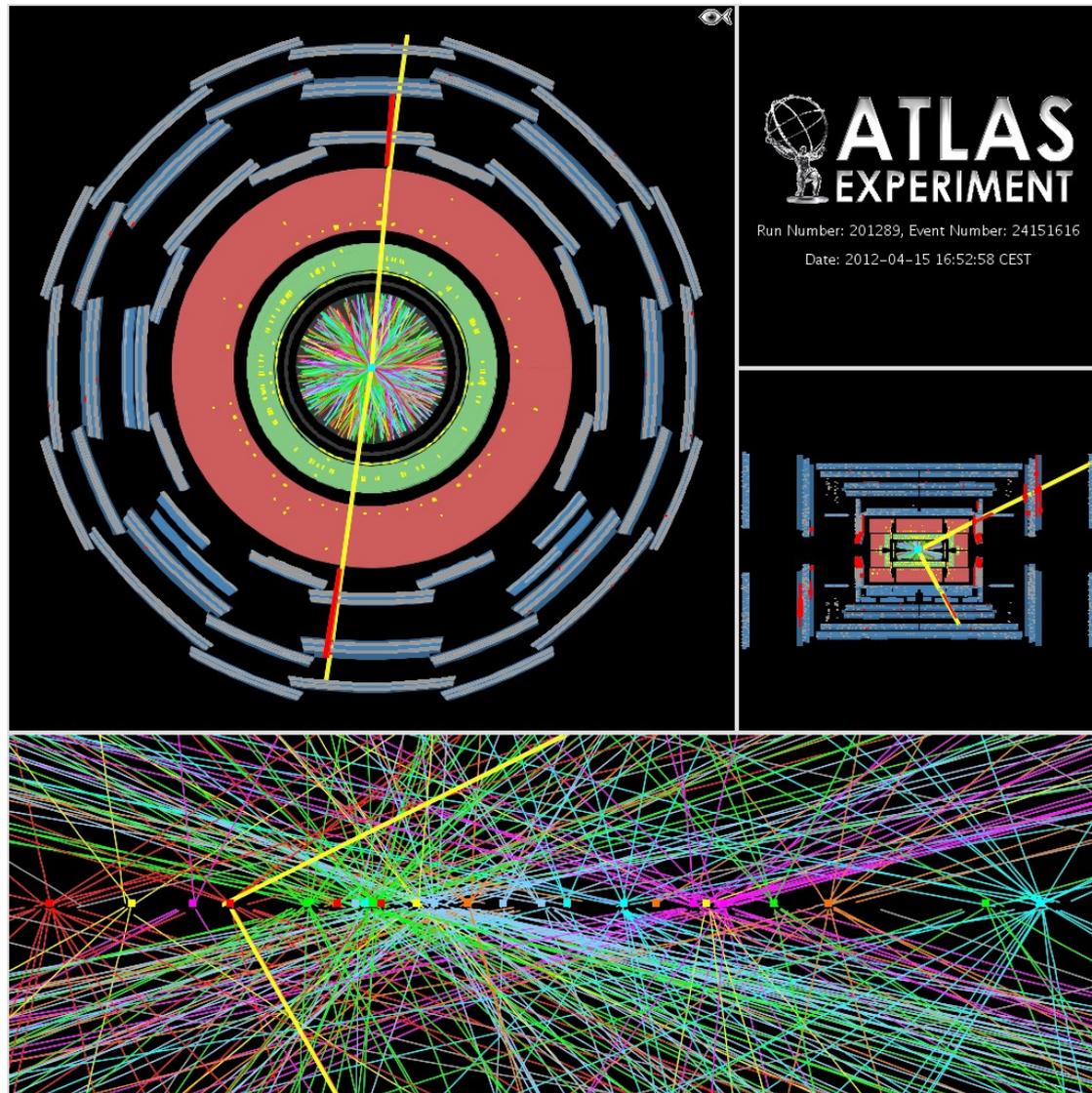
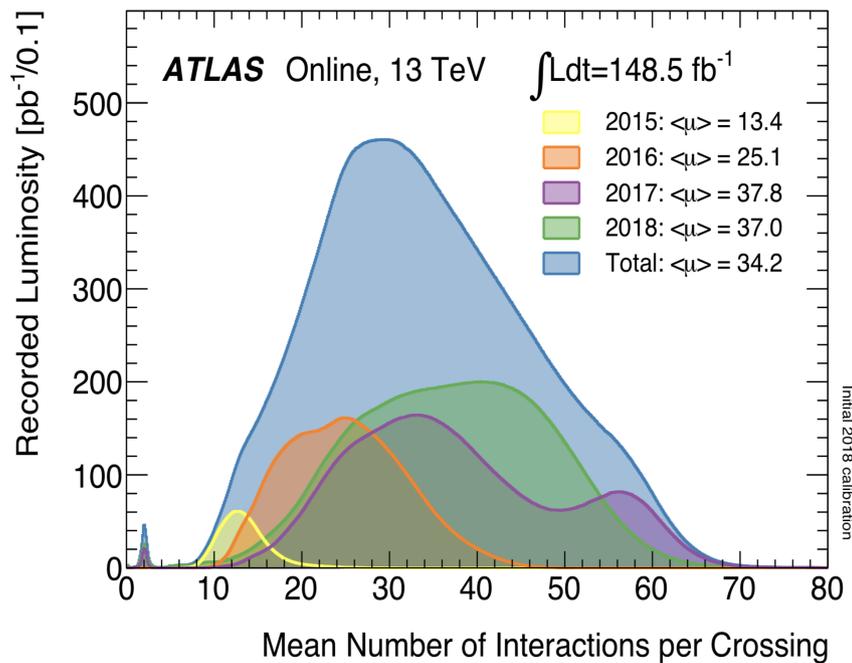
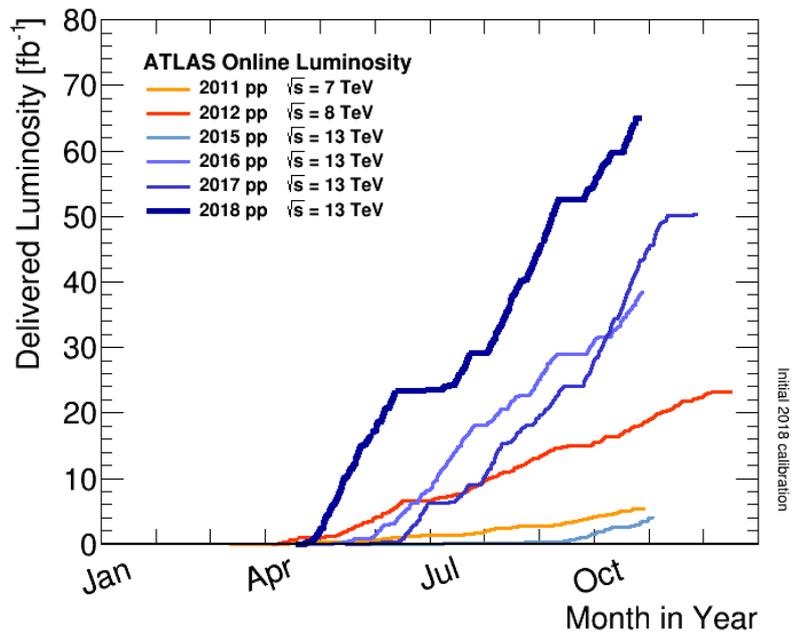
déc 2009

août 2010

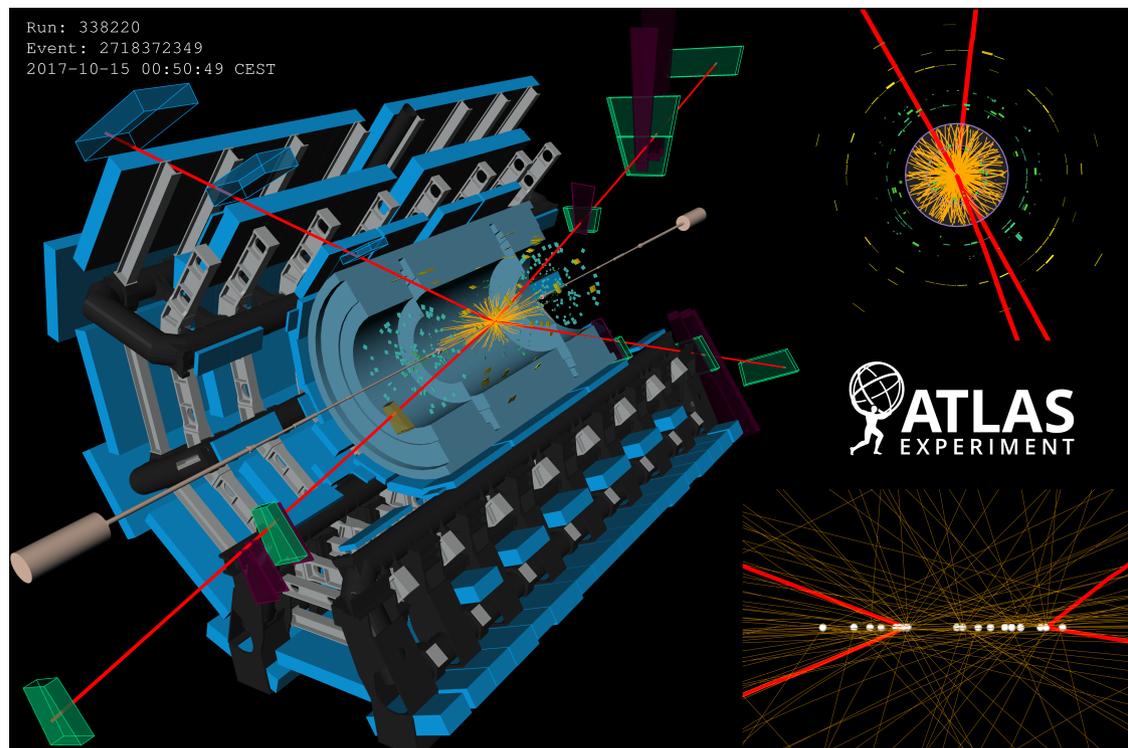
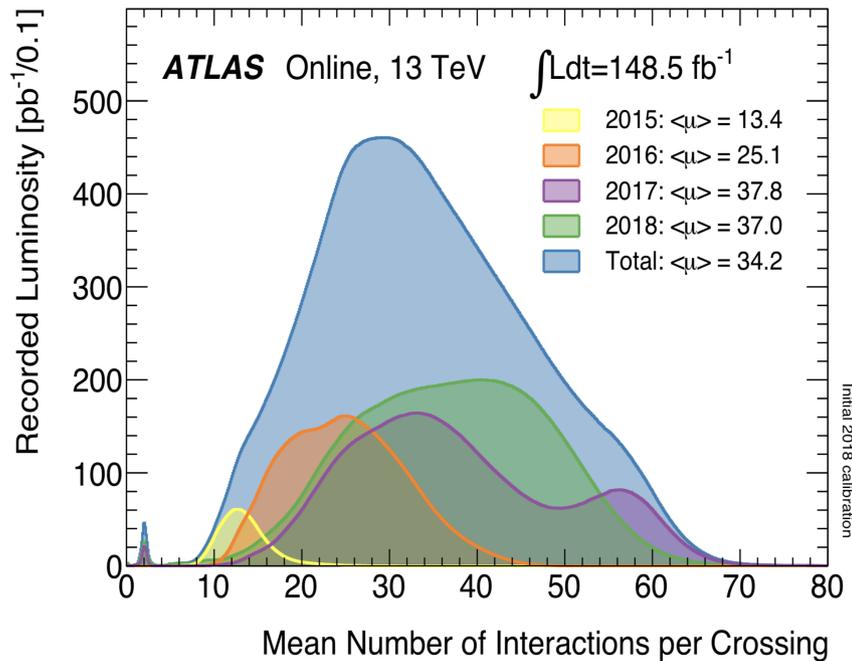
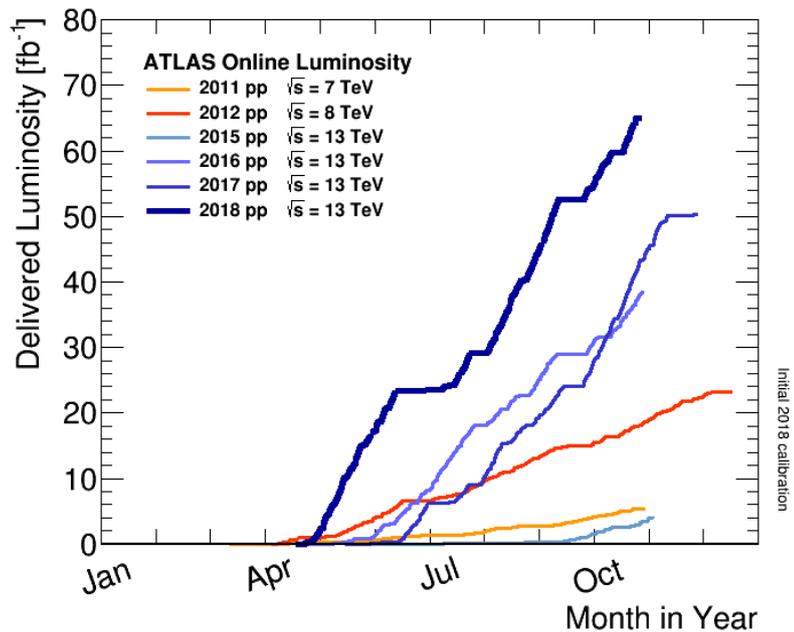
Redécouverte par ATLAS



# Accumulation des données

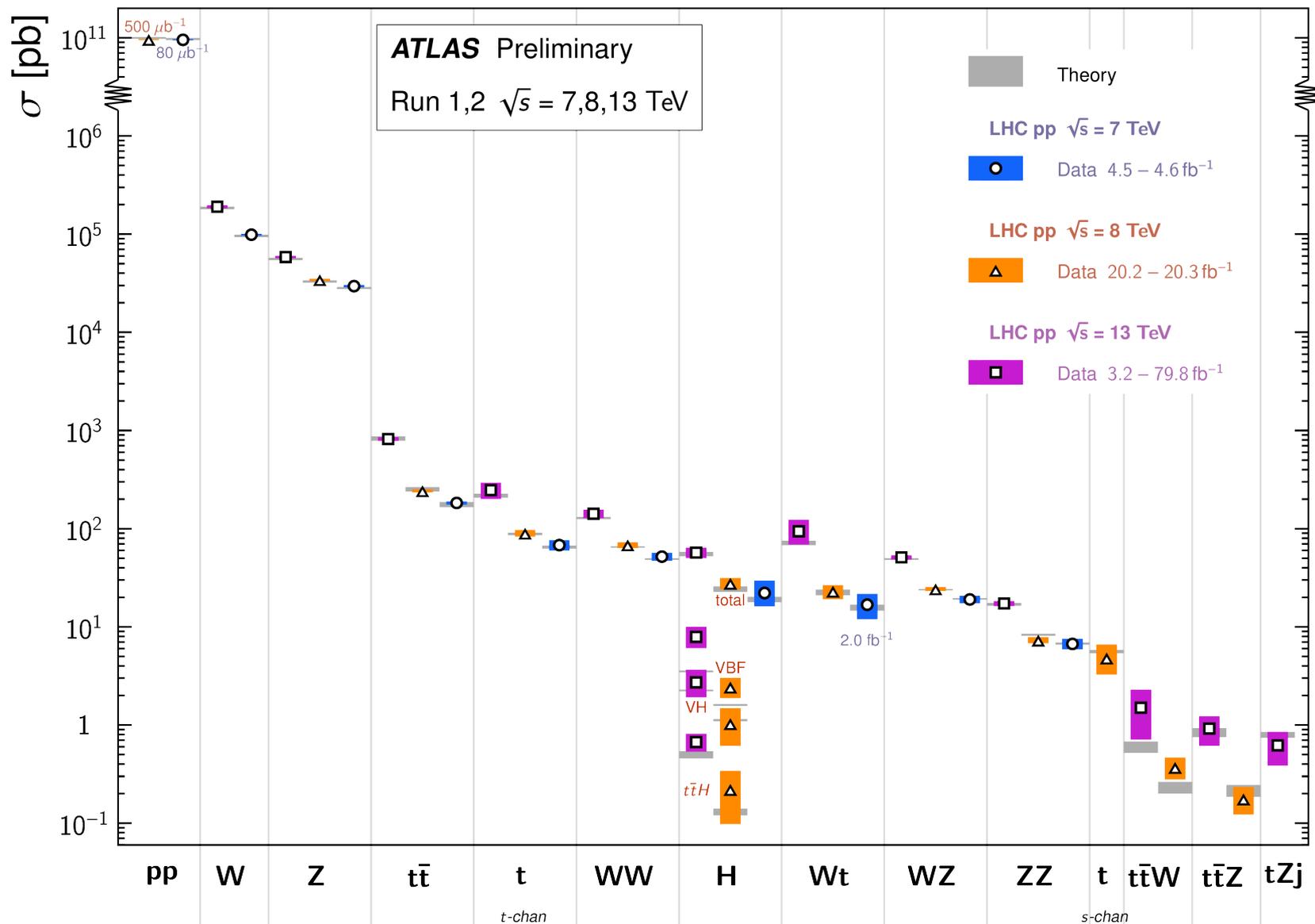


# Accumulation des données



# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements *Status: July 2018*

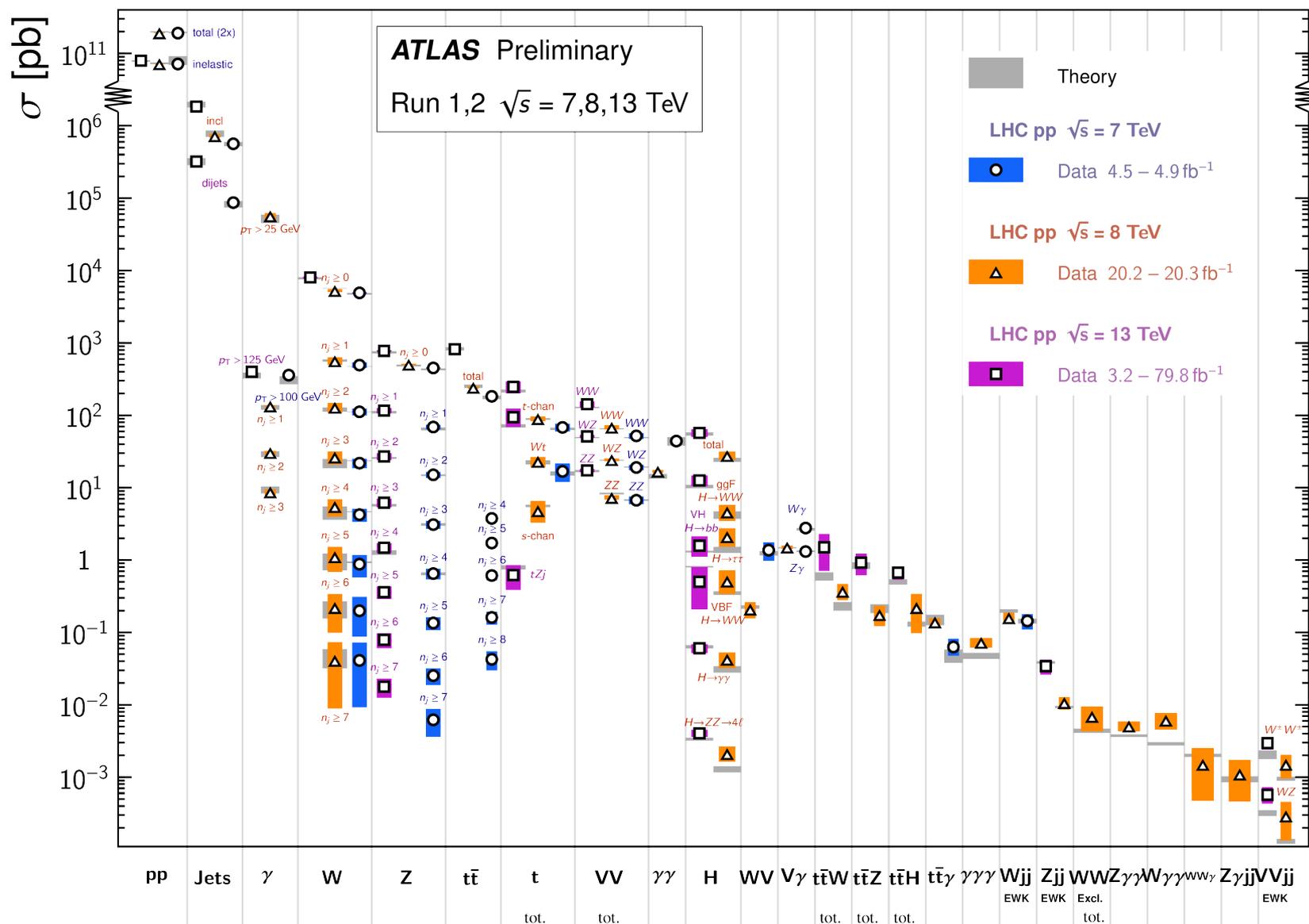


- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

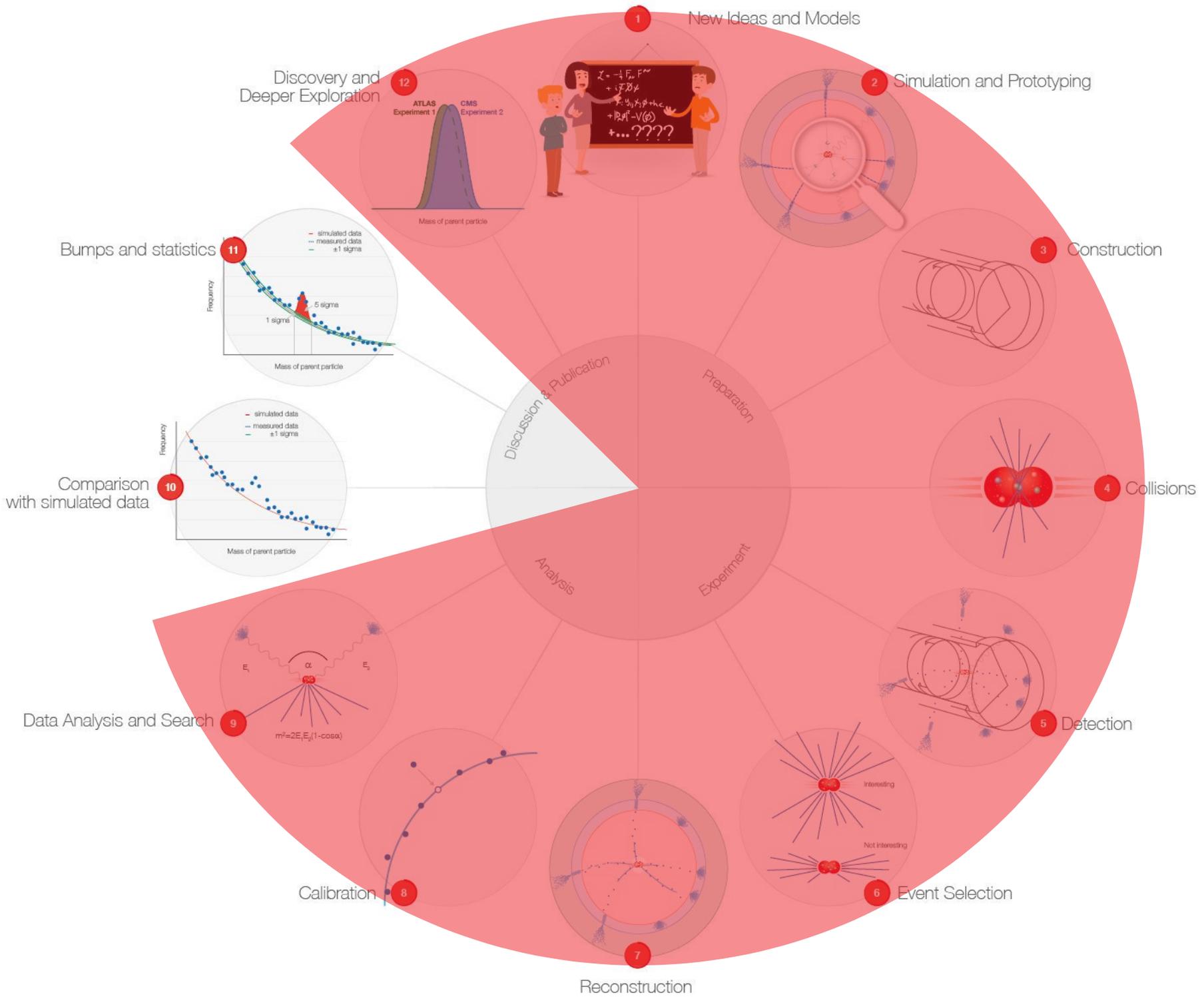
# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2018



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !



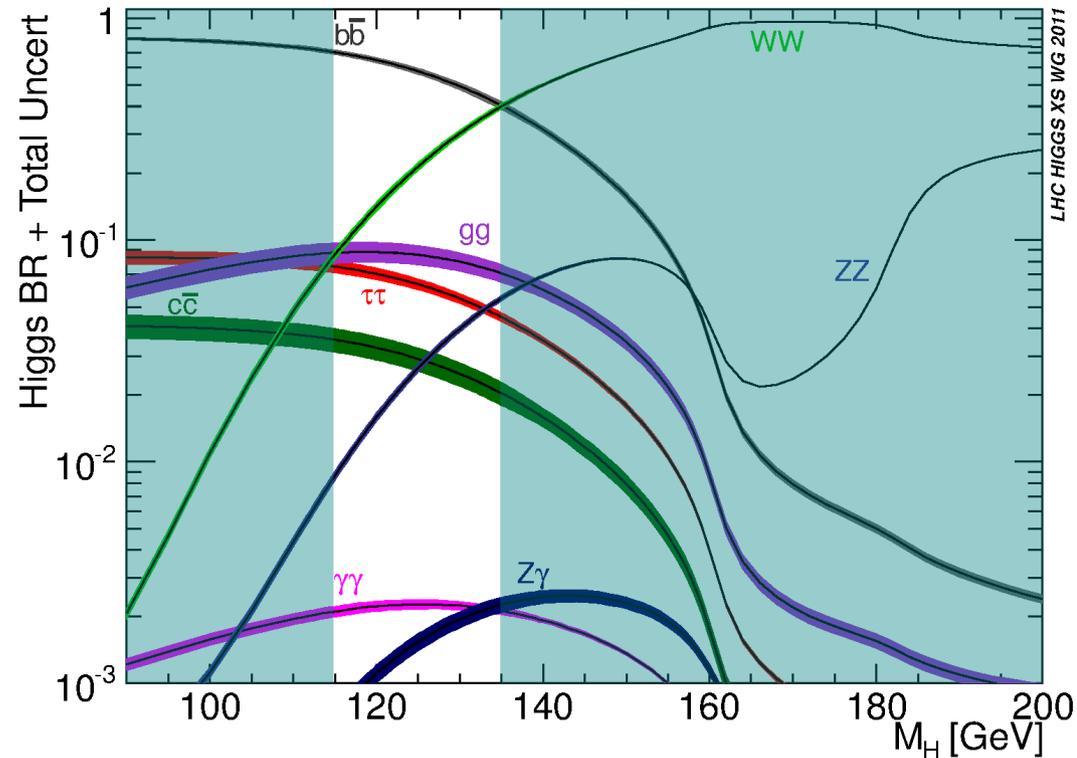
# Comment s'y prend-on ?

- 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 125 GeV :

- ▶ 58 fois sur 100 en  $b\bar{b}$
- ▶ 21 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

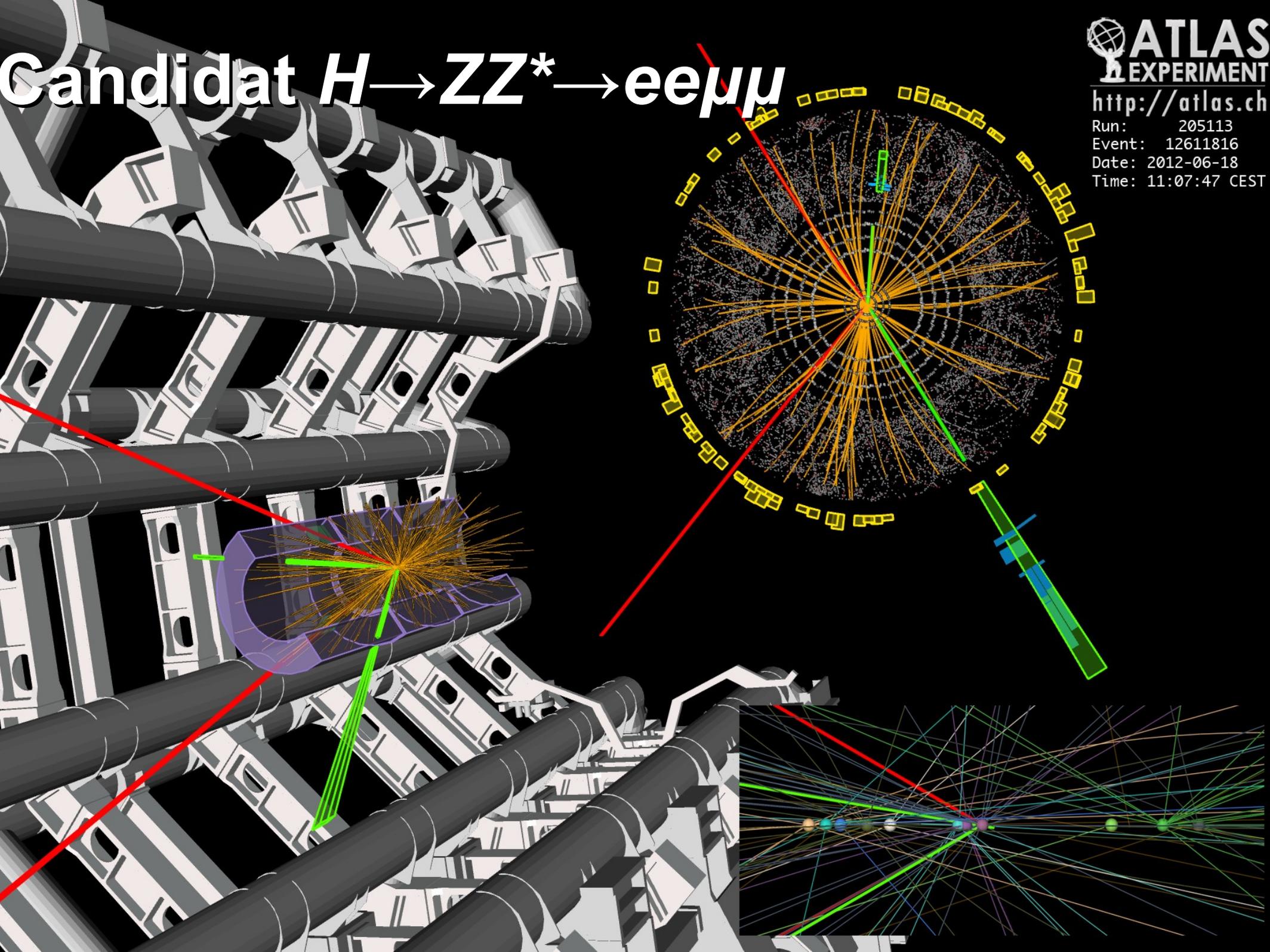
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



Candidat  $H \rightarrow \gamma\gamma$

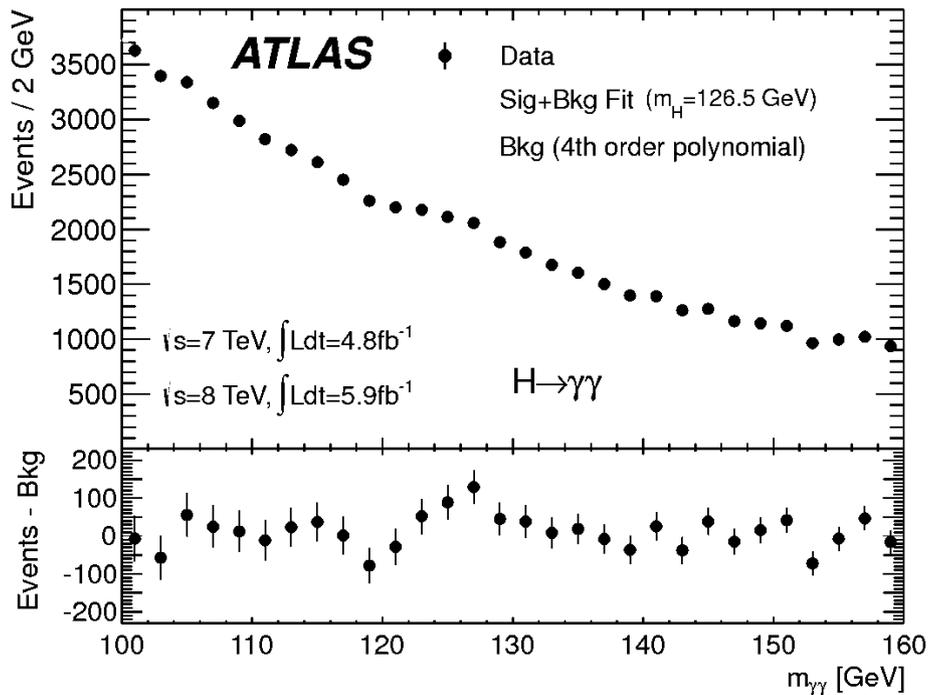


# Candidate $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



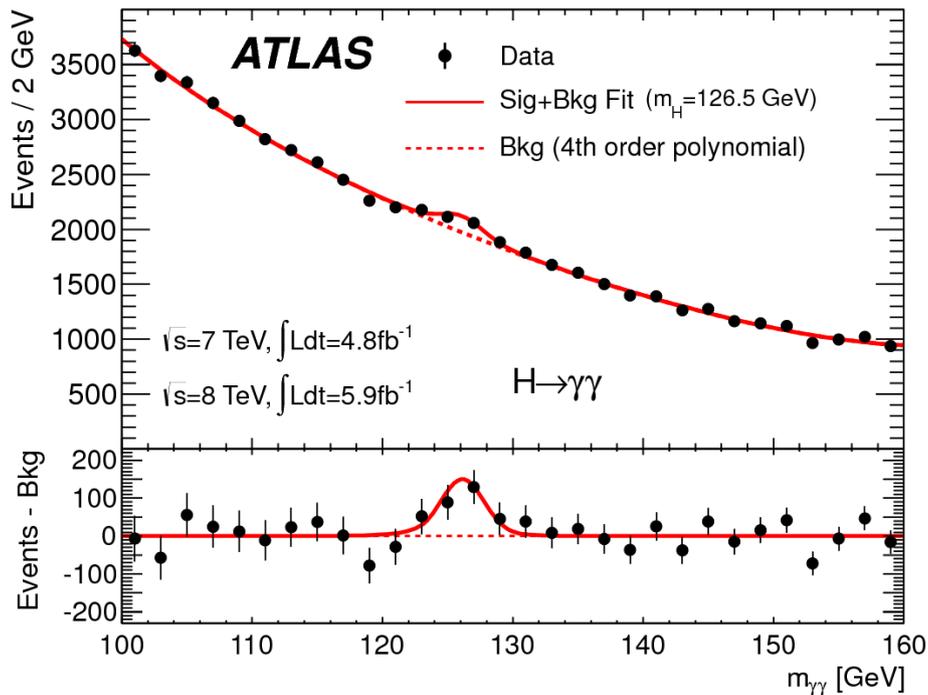
# Mesure

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



# Mesure

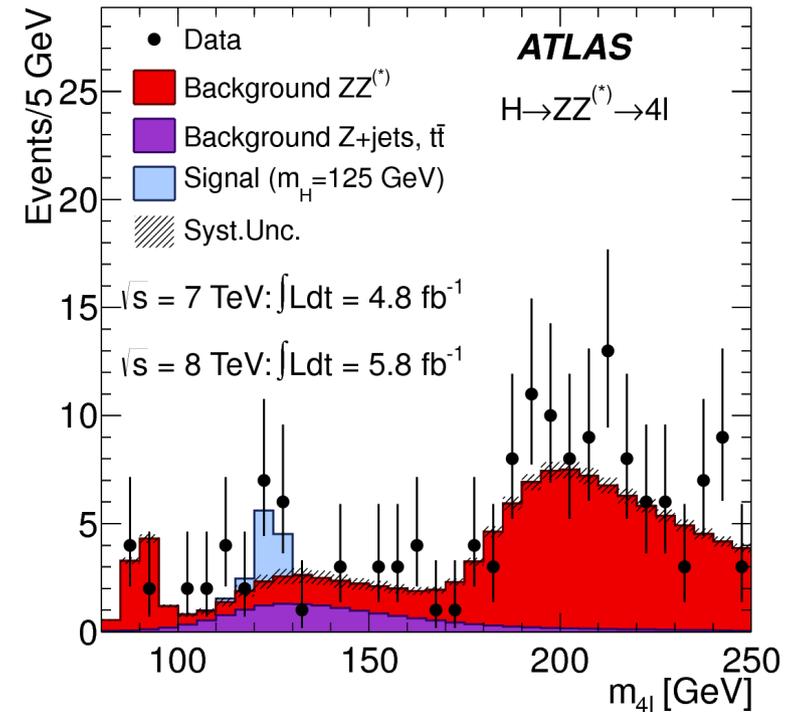
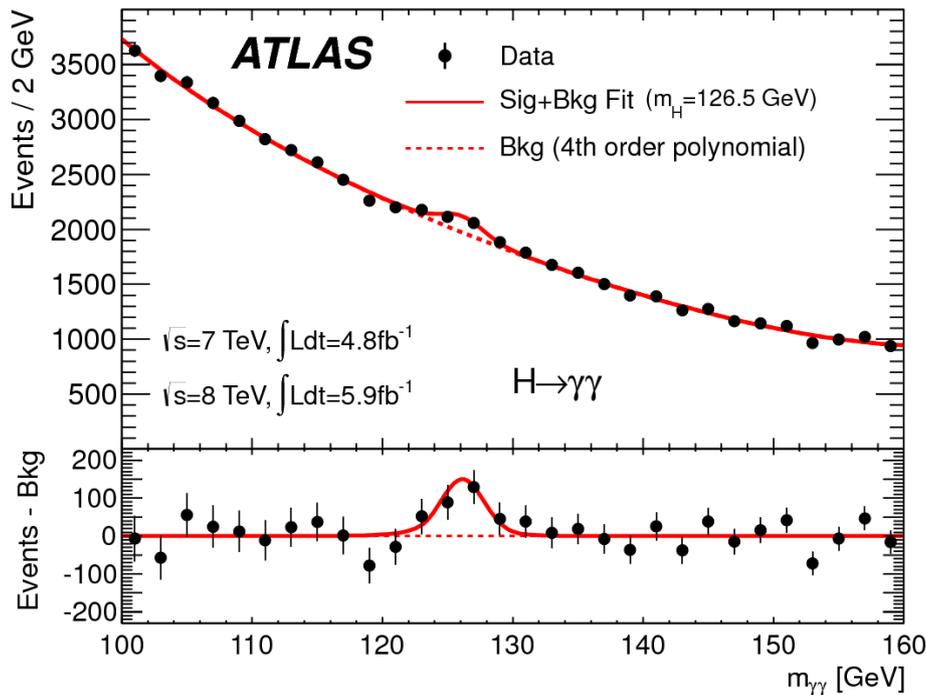
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



# Mesure

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

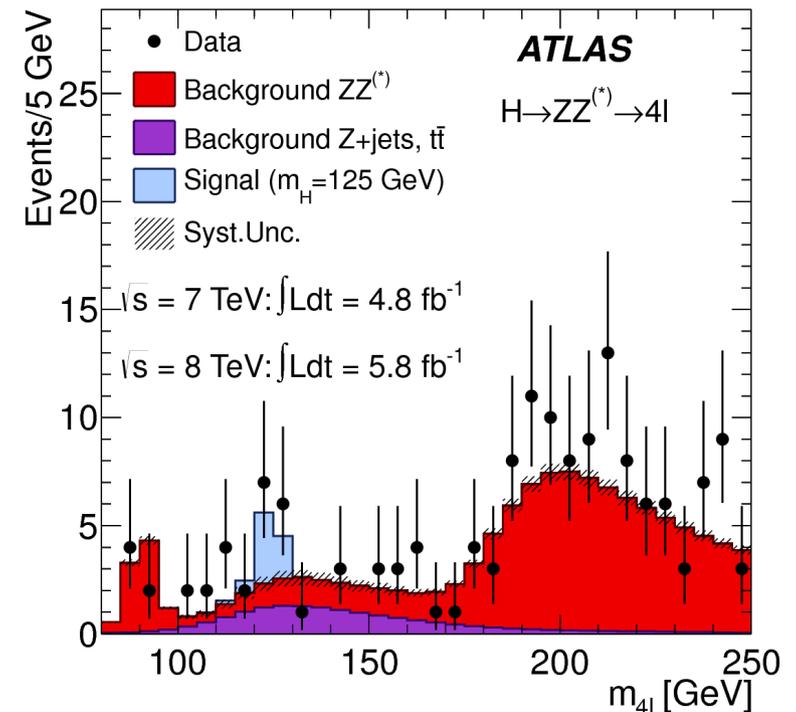
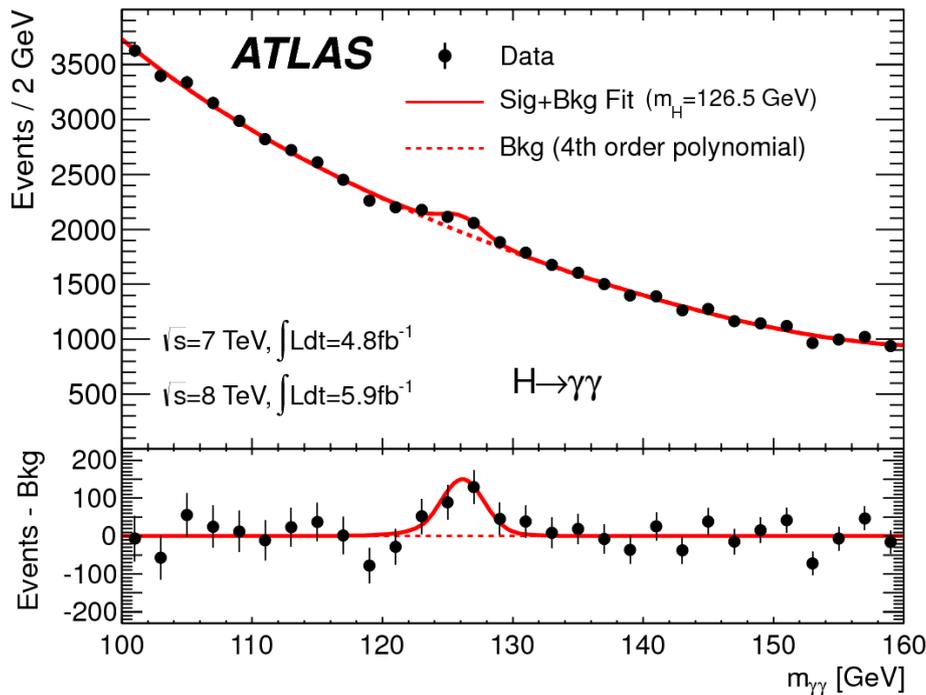
- Higgs en ZZ
  - ▶ Très peu de bruit de fond
  - ▶ Très peu d'événements



# Mesure

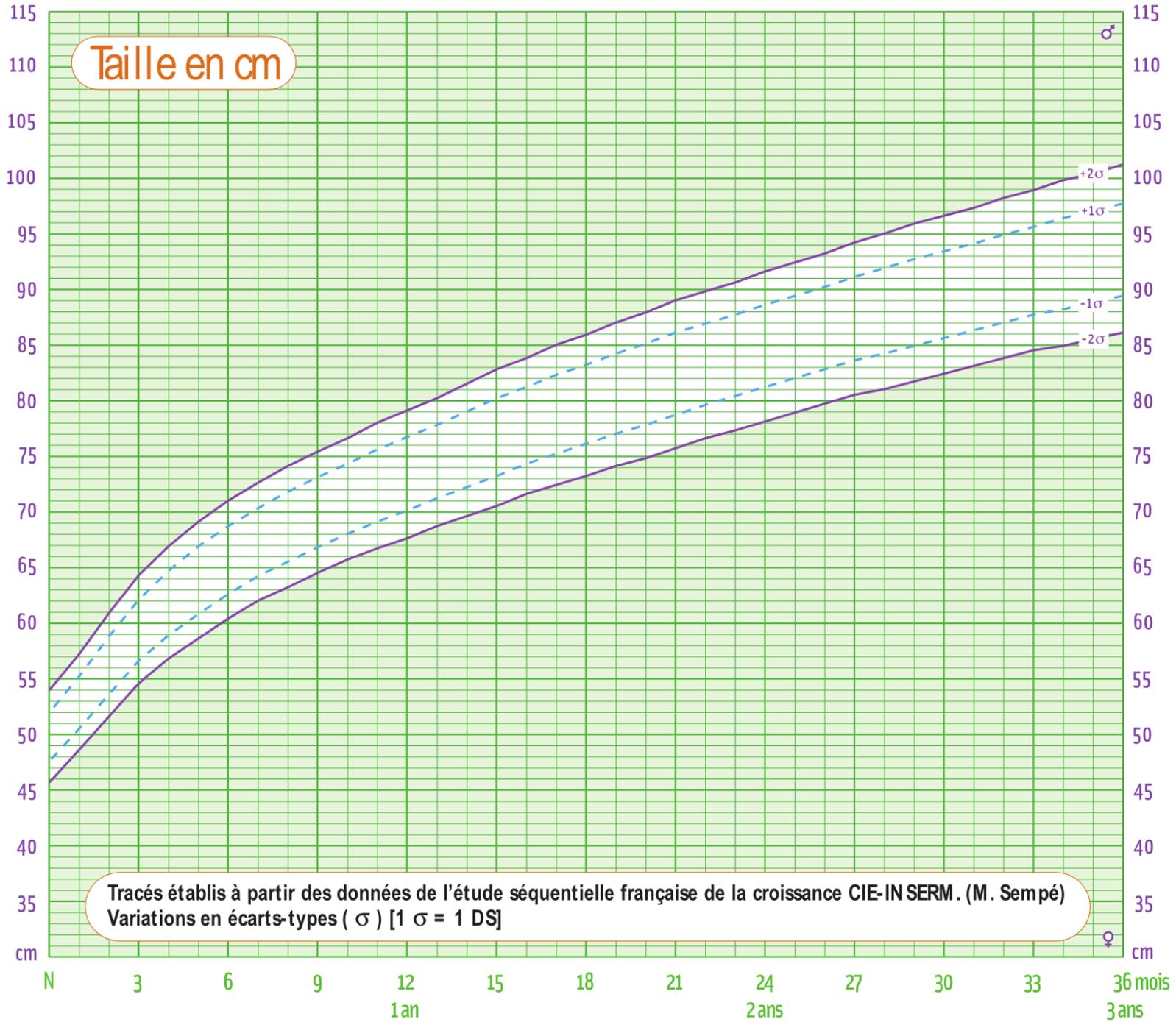
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

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

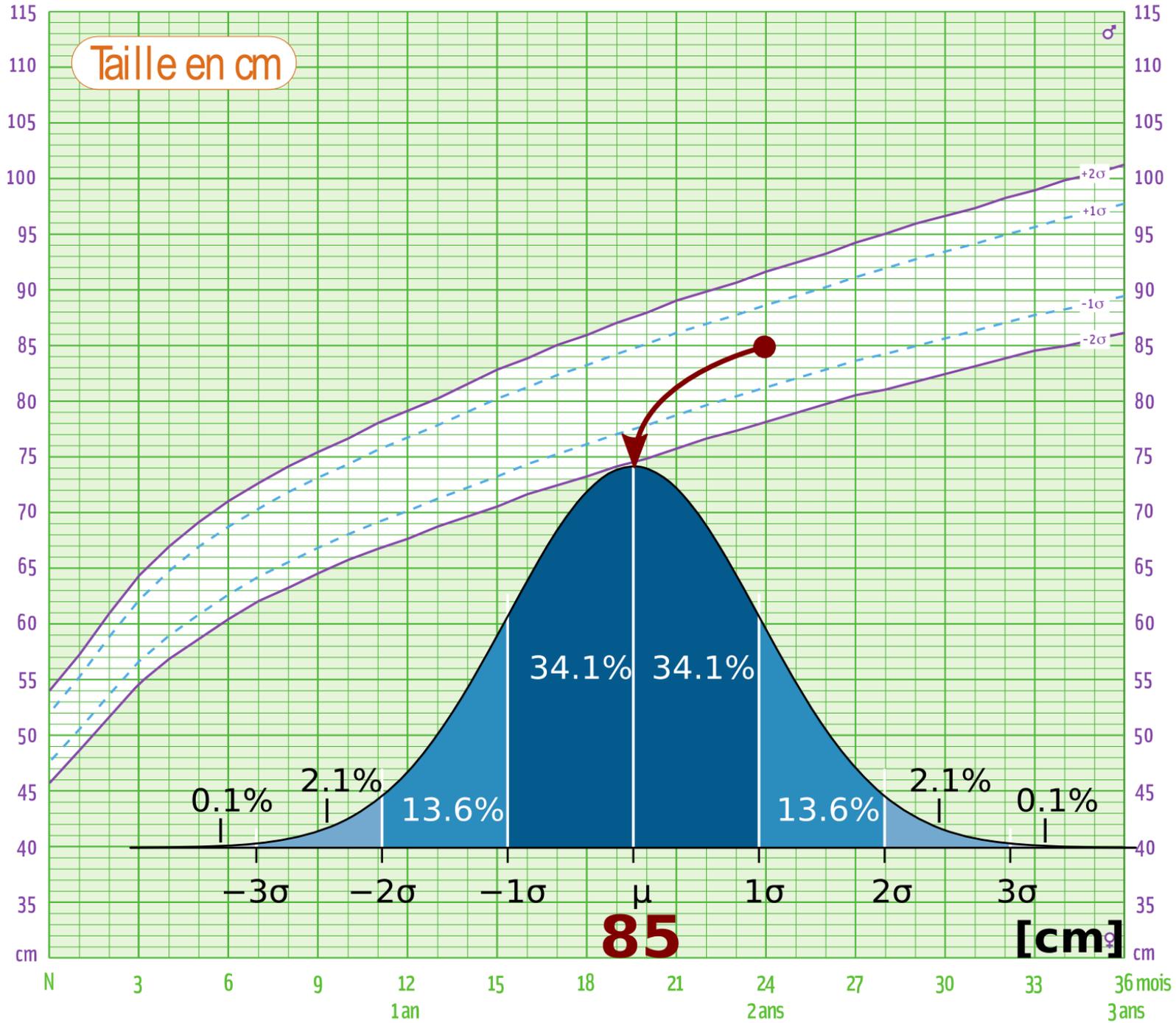


Est-ce que cela est significatif ?  
Outils statistiques pour répondre

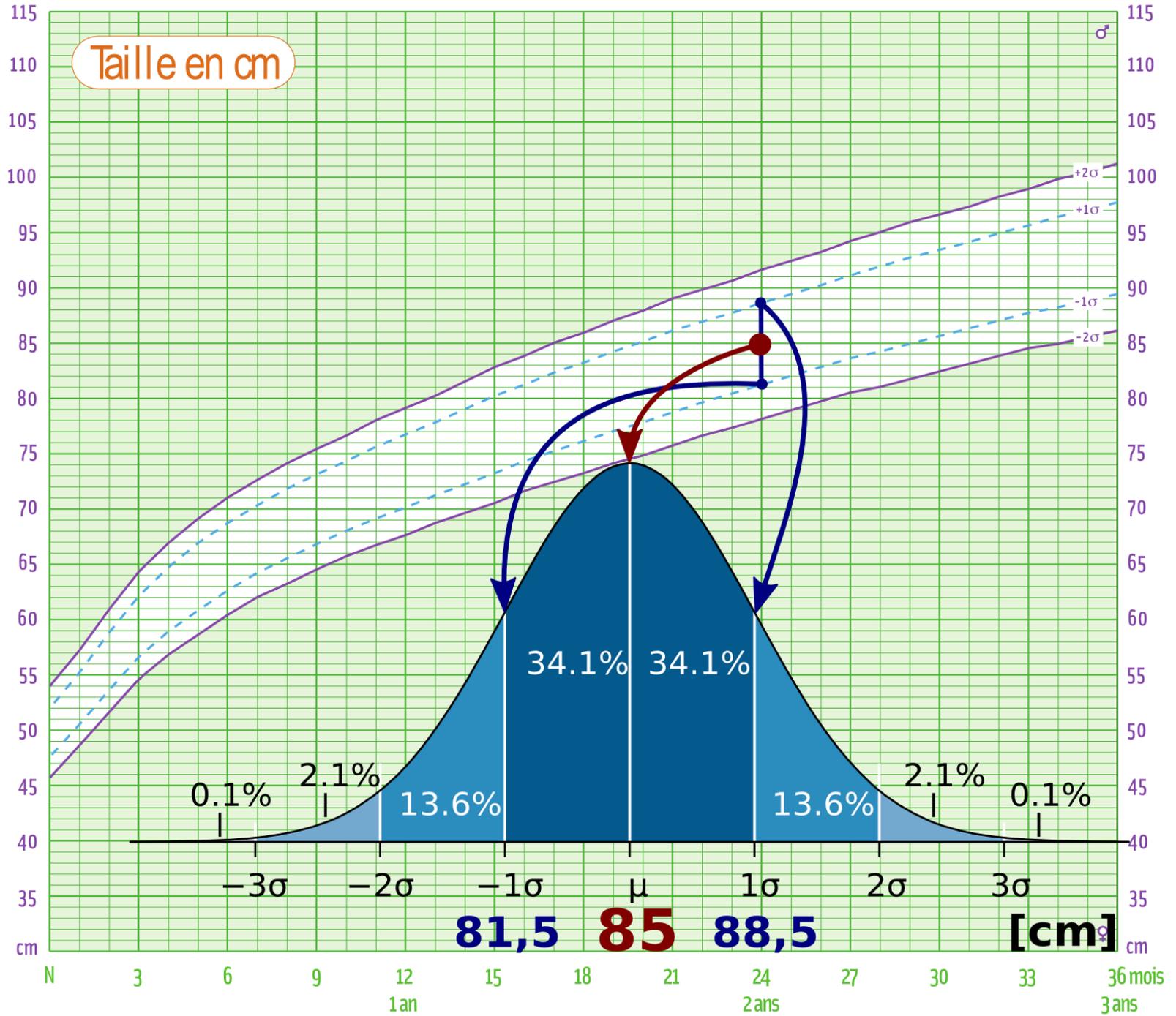
# La Gaussienne



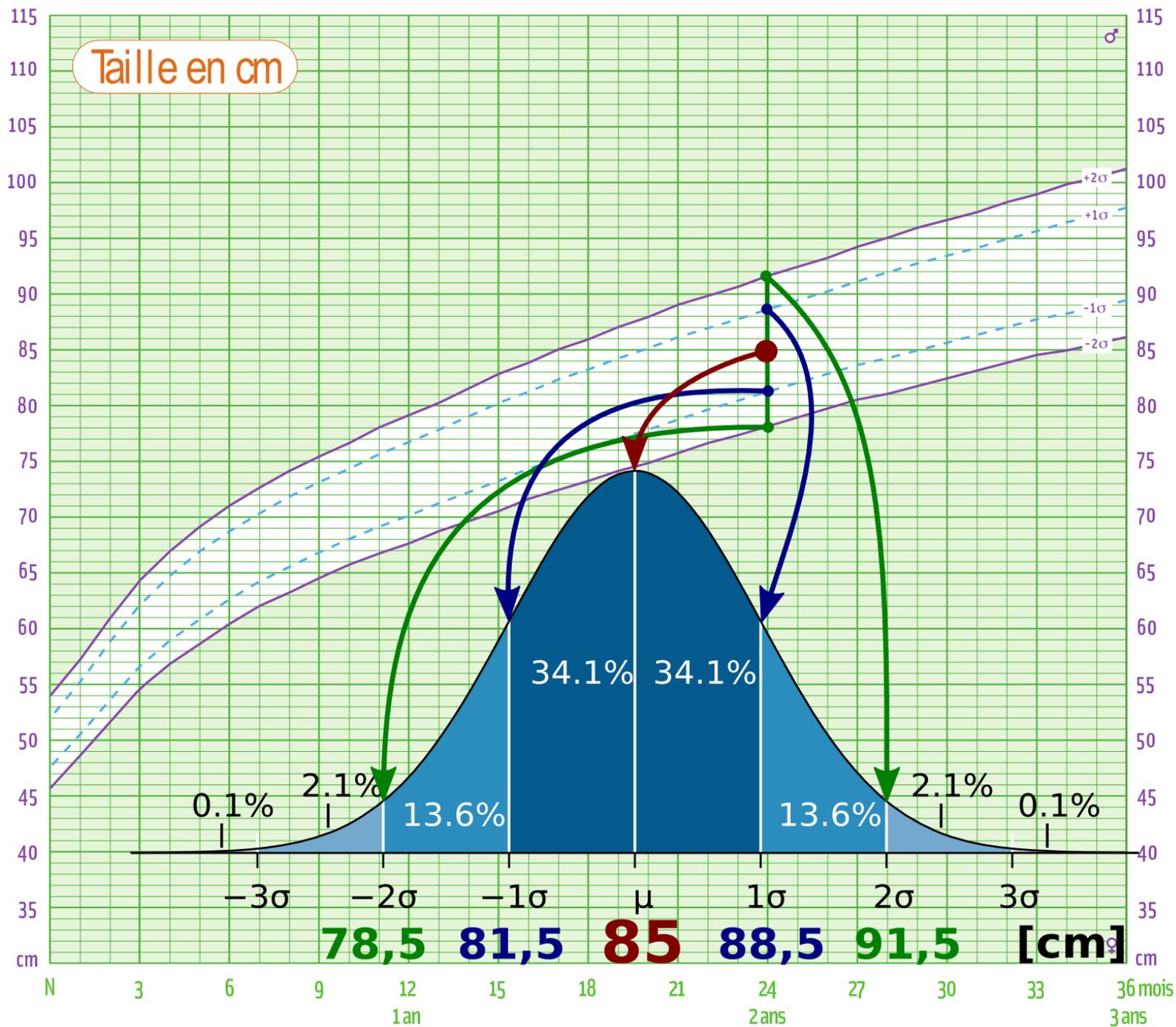
# La Gaussienne



# La Gaussienne



# La Gaussienne



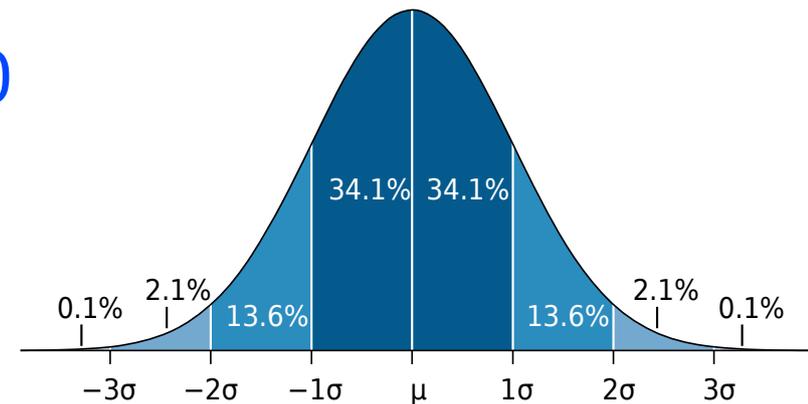
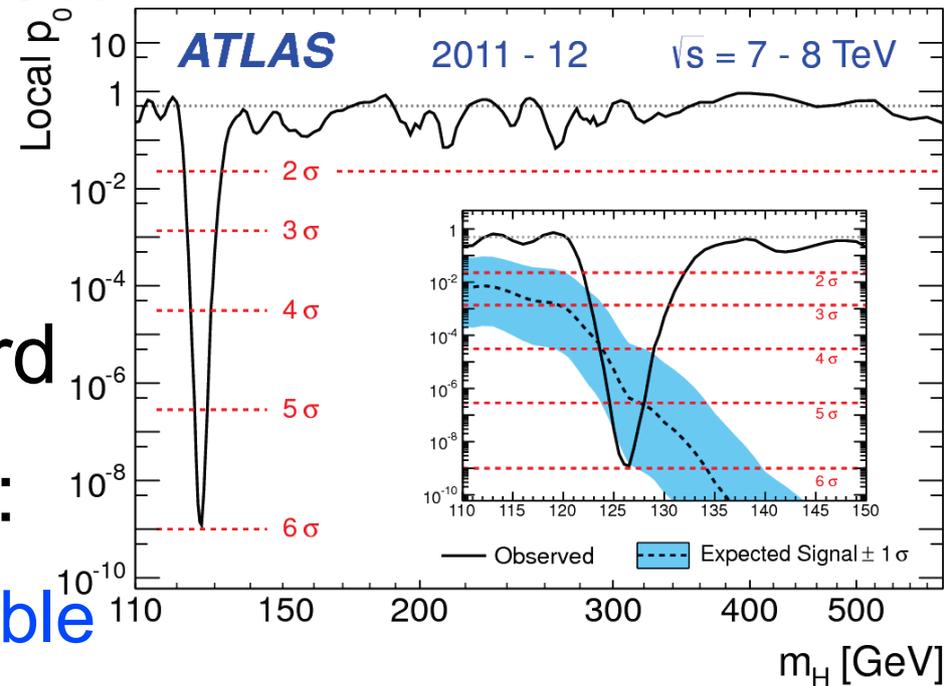
# Résultat sur le Higgs : est-ce significatif statistiquement ?

- p-value  $p_0$  : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché par hasard

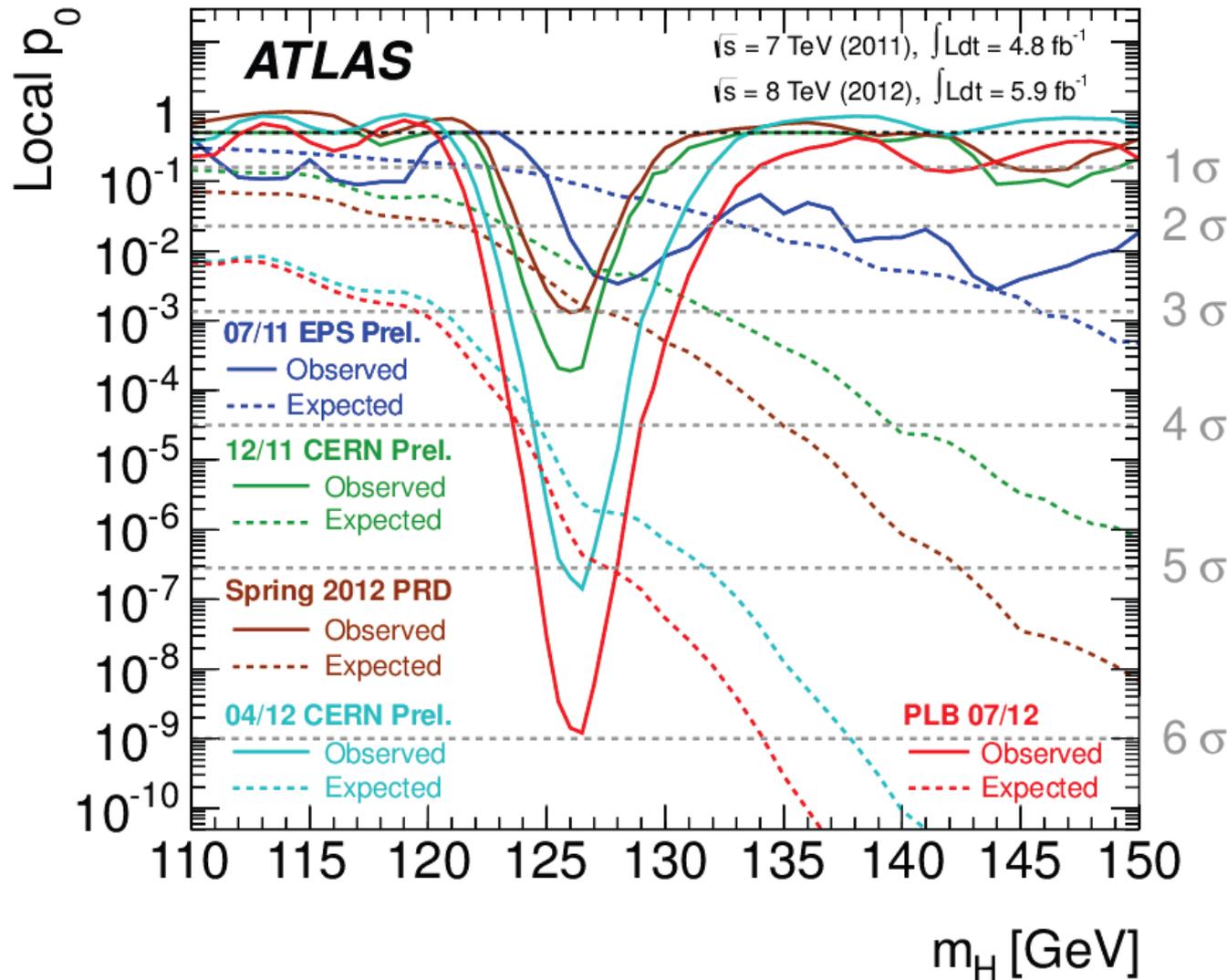
- Quantifié en nombre de «  $\sigma$  » :

- ▶  $1\sigma$  : 1 chance sur 3 (trop probable pour conclure quoi que ce soit)
- ▶  $3\sigma$  (évidence) : 3 chances sur 1000
- ▶  $5\sigma$  (observation) : 1 chance sur 2 millions
- ▶  $5,9\sigma$  : 3 chances sur 1 milliard

- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose

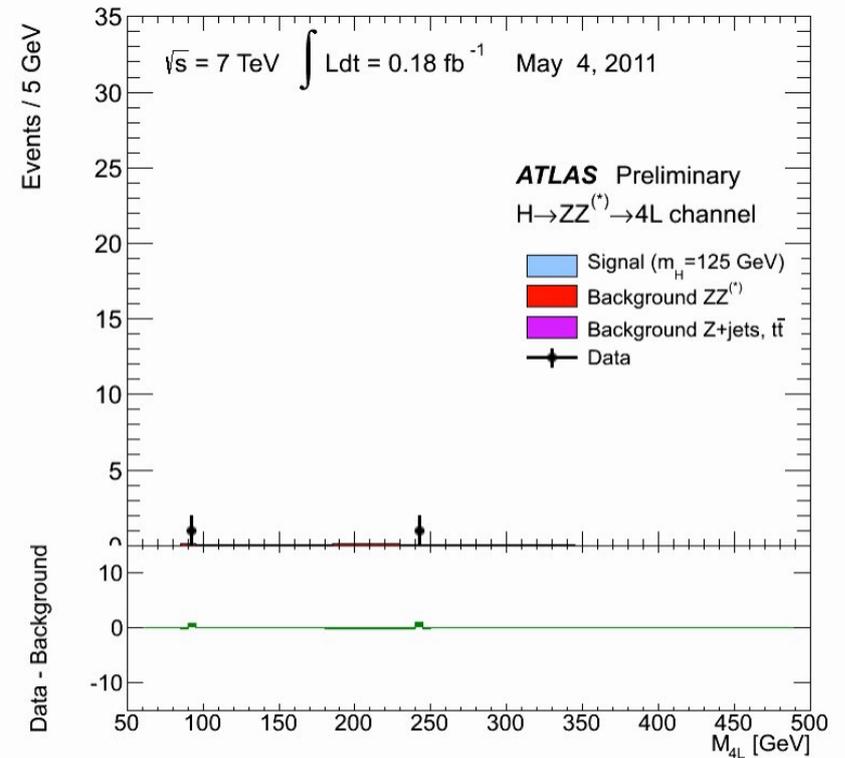
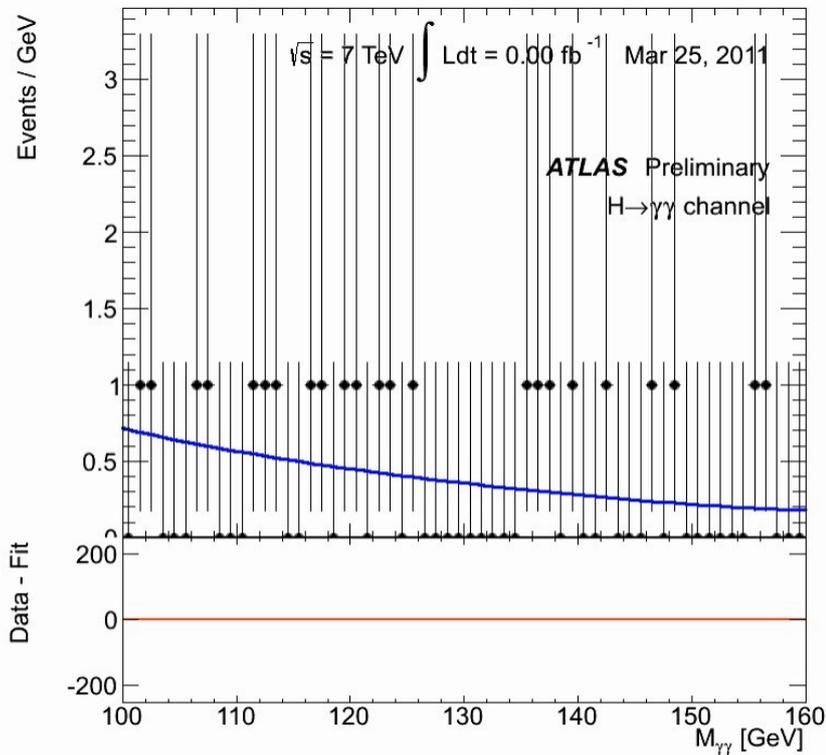


# Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

# Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)

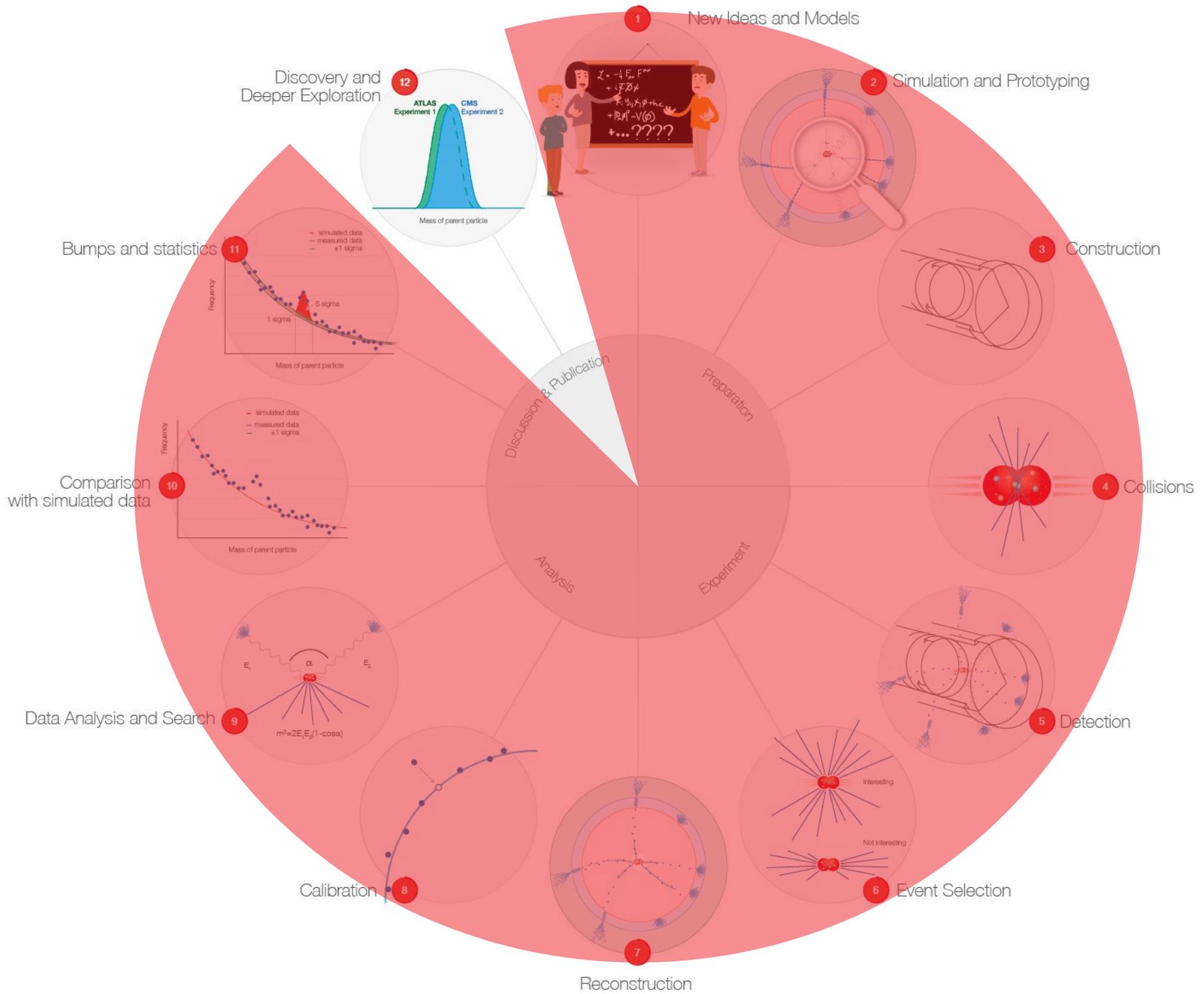


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

© CERN

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

© CERN



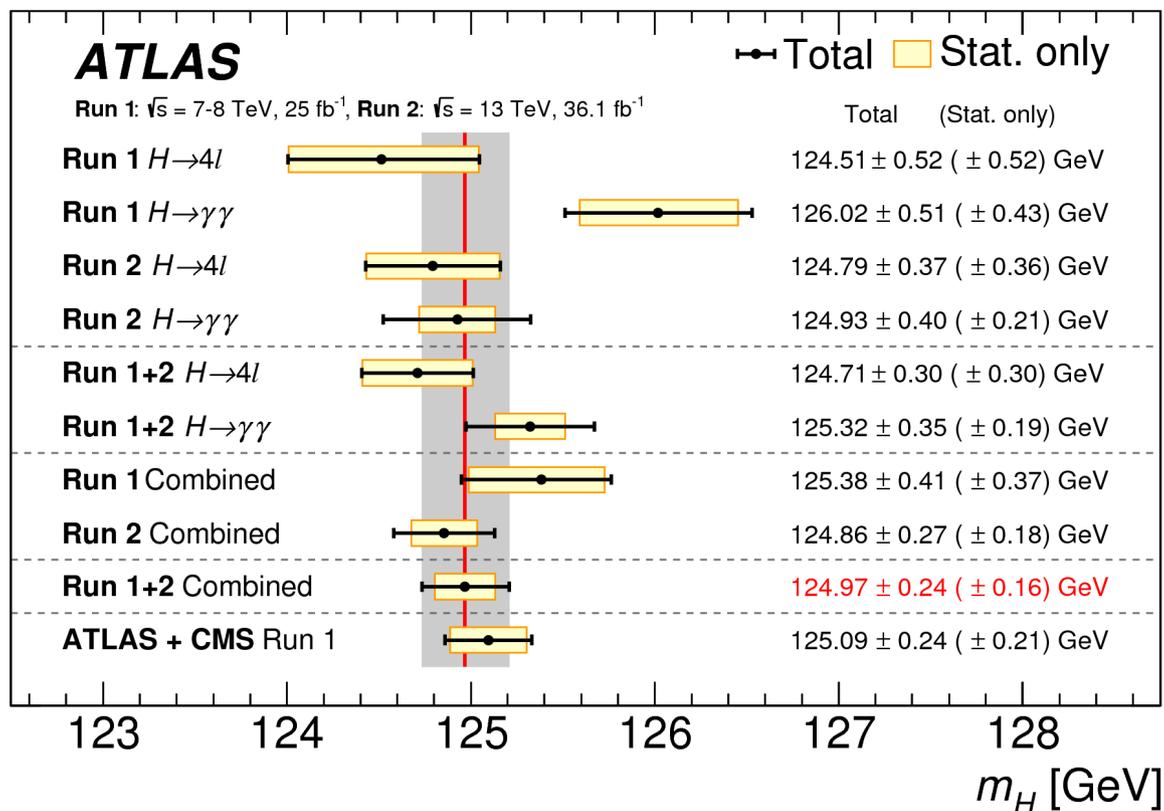
# Découverte du boson de Higgs annoncée le 4 juillet 2012



# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

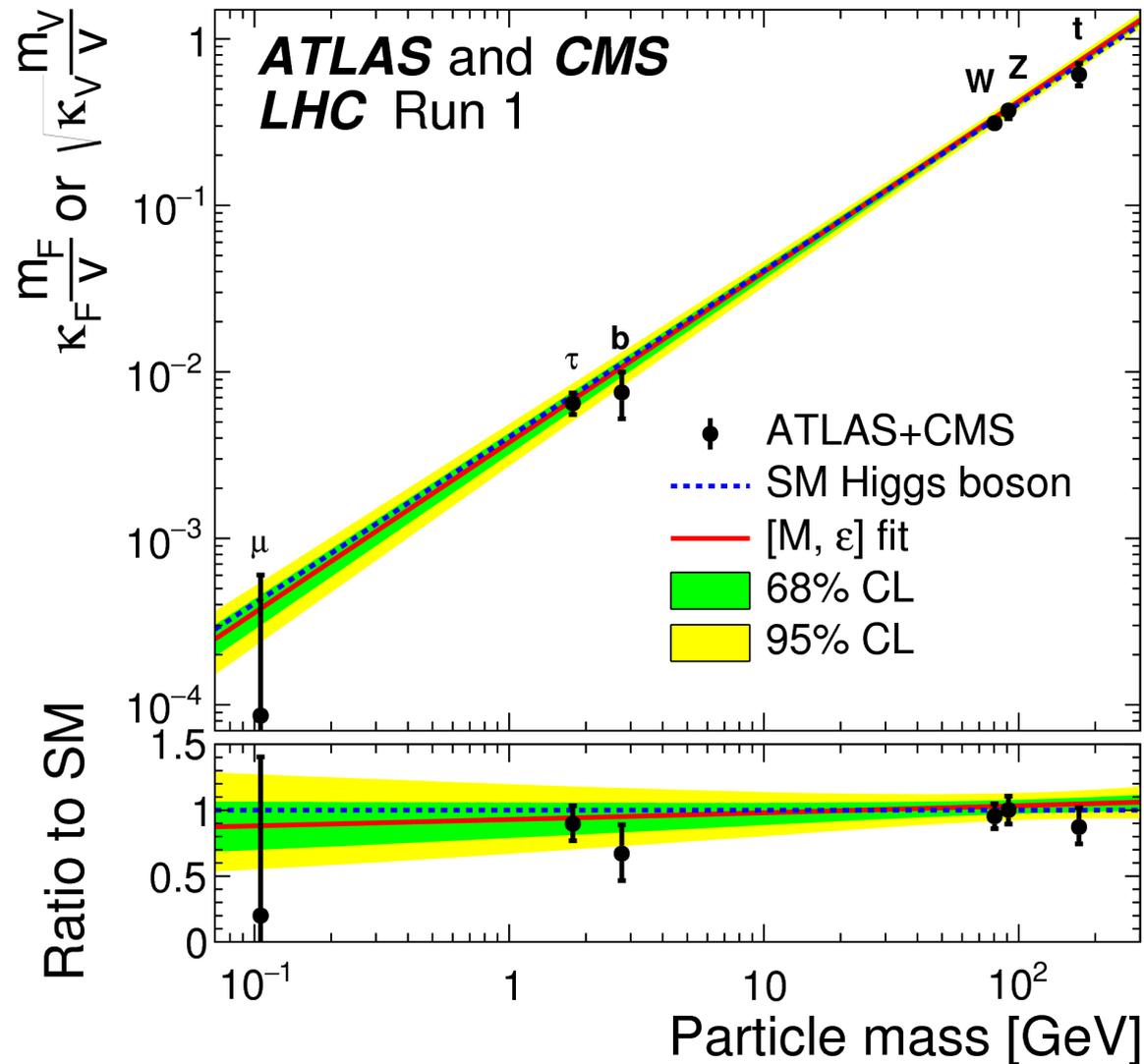
- ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]  
(134 fois la masse du proton)



# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :
  - ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]  
(134 fois la masse du proton)
- La signification statistique a continué d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Mesure des propriétés :
  - ▶ Canaux divers, modes de production, couplages, spin...
  - ▶ Confirmation du modèle standard...

# Masse des particules et couplage au boson de Higgs

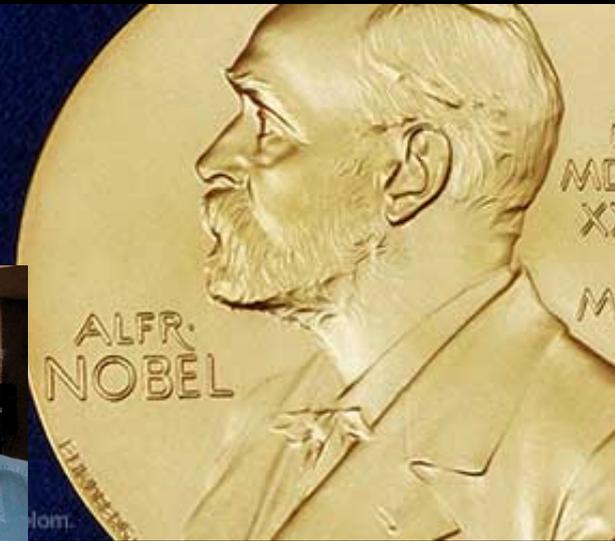
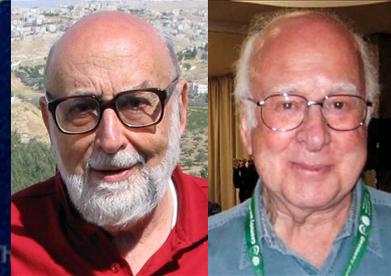


- Relation comme prévue par le modèle standard

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

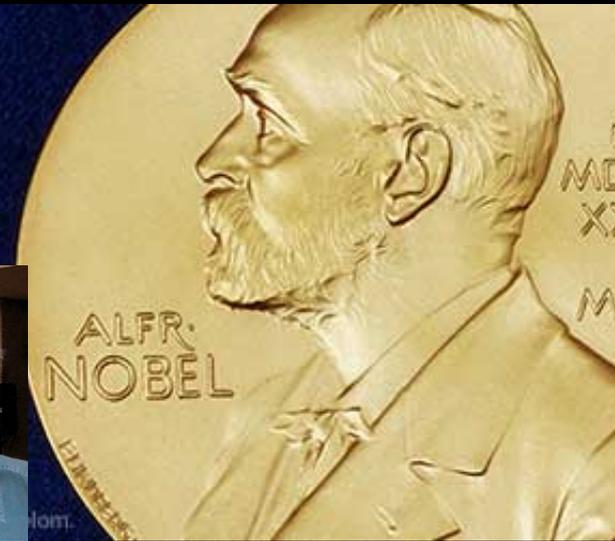
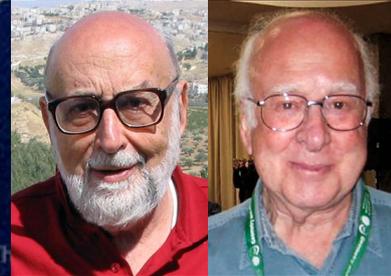


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

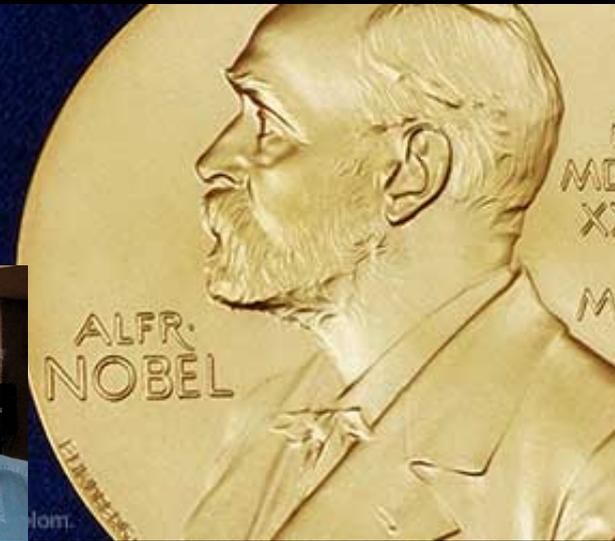
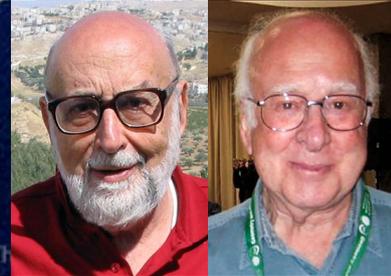


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



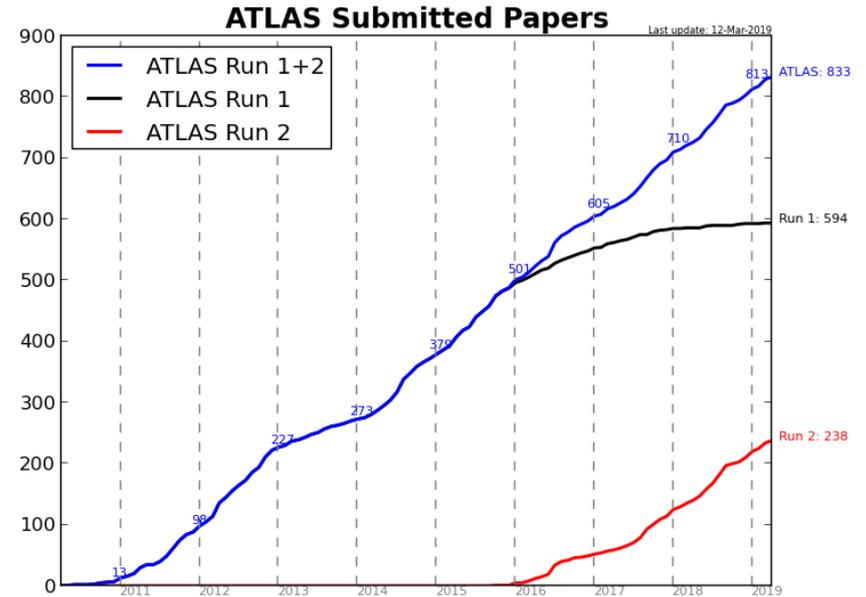
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



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

# Publications

- ATLAS :
  - ▶ > 840 publications
  - ▶ > 950 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ > 450 publications
- ALICE :
  - ▶ > 200 publications



**Toutes les publications du LHC  
sont accessibles gratuitement  
par tous**

Forte pression du CERN sur les journaux :  
Open Access

# C'est tout ?

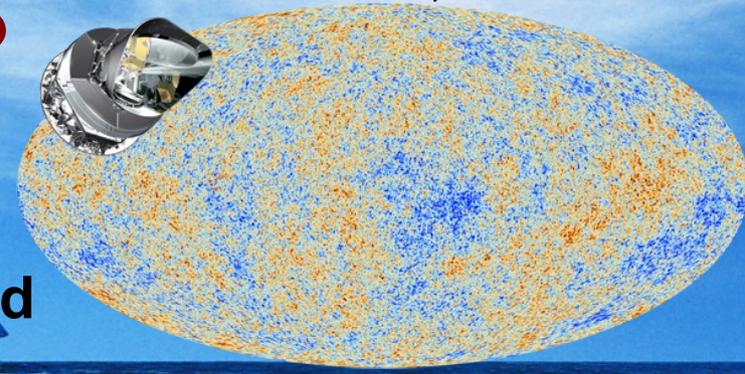
Nous et l'Univers visible



**Modèle standard**



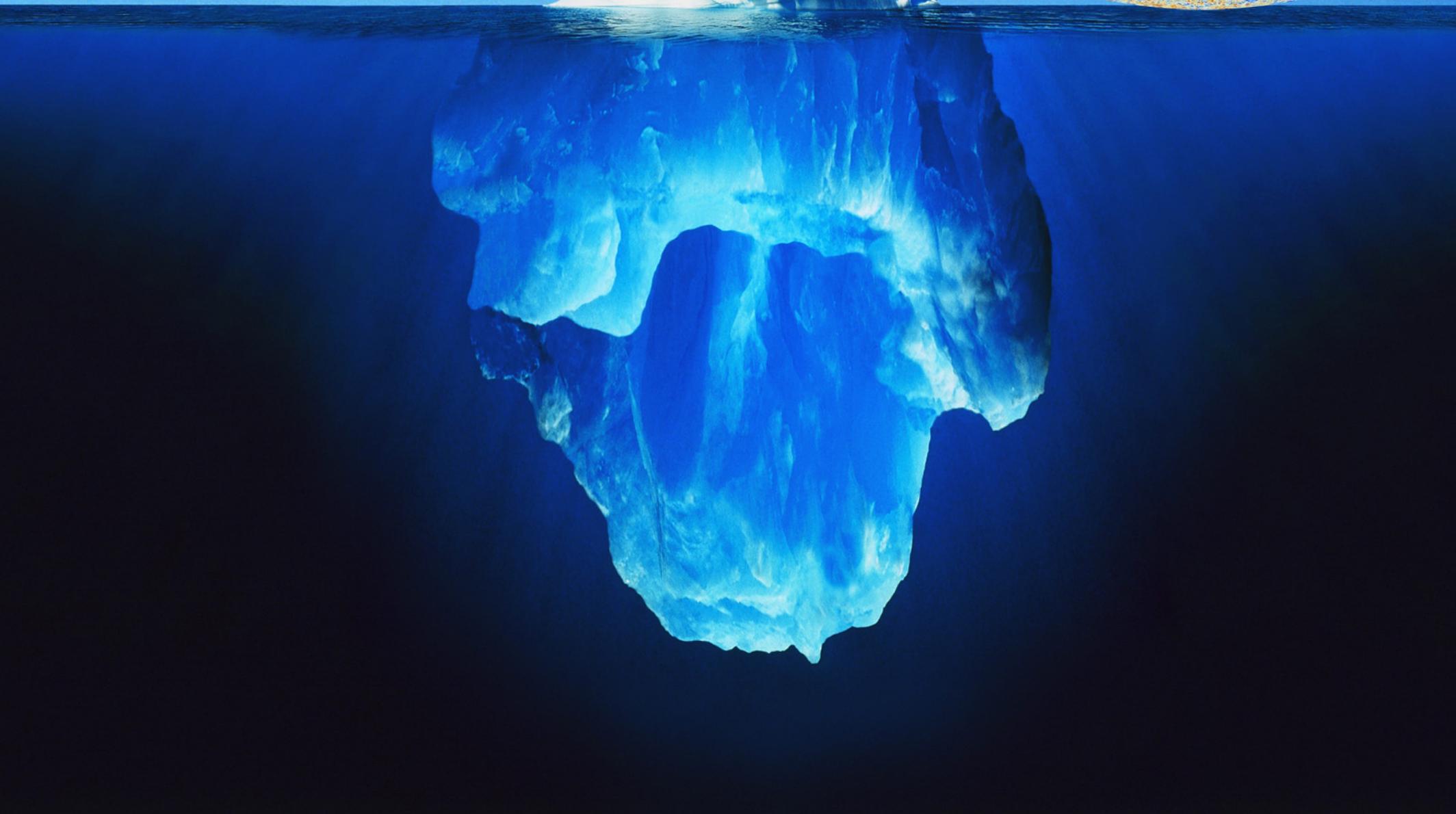
# C'est tout ?



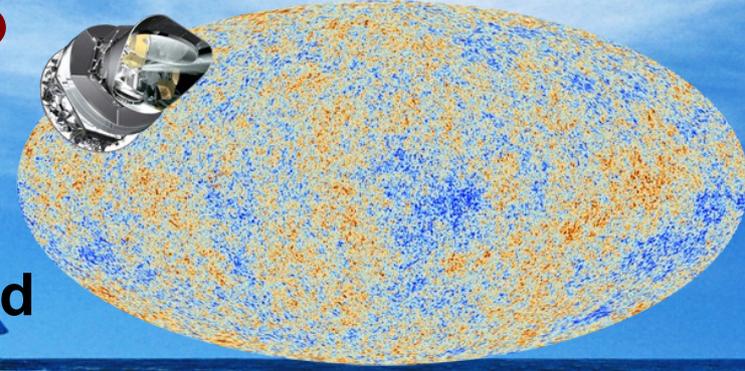
Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

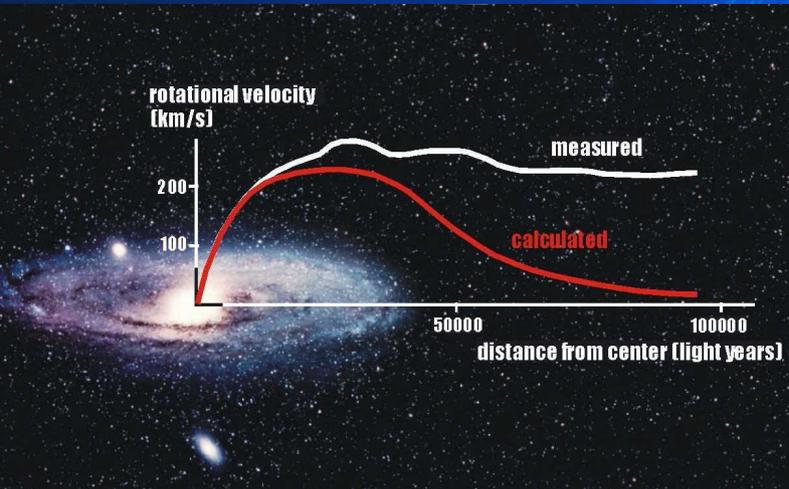


5% Modèle standard

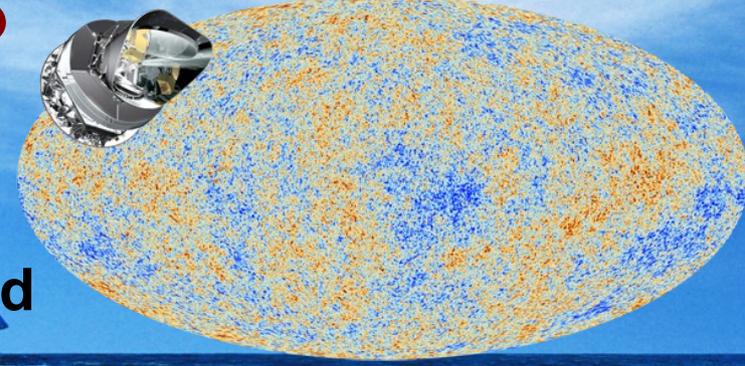
27% Matière noire



- 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

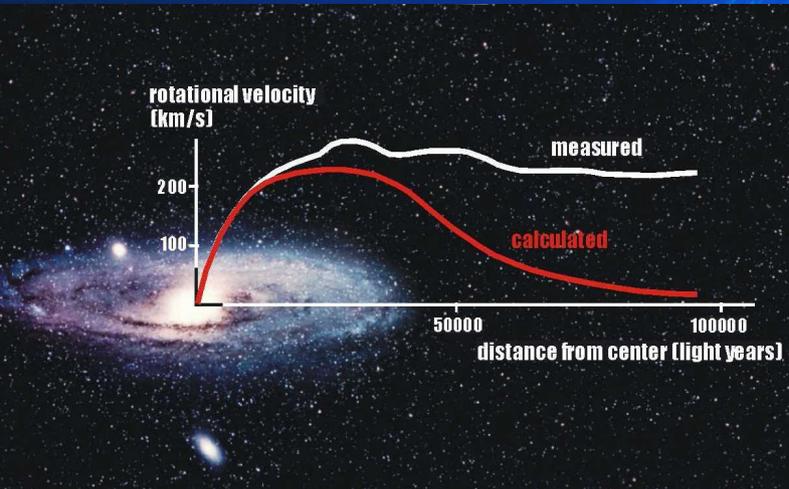


5% **Modèle standard**

27% **Matière noire**



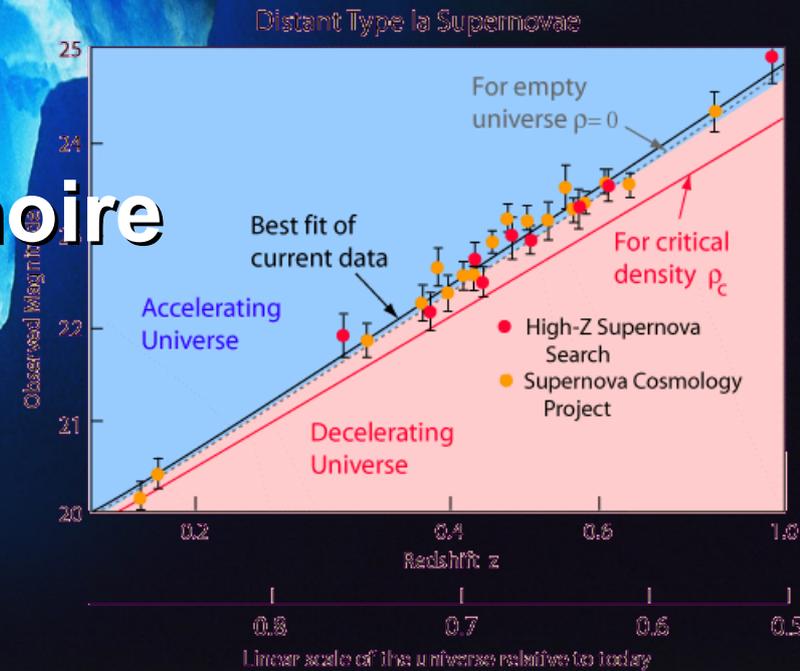
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...)?



68% **Énergie noire**



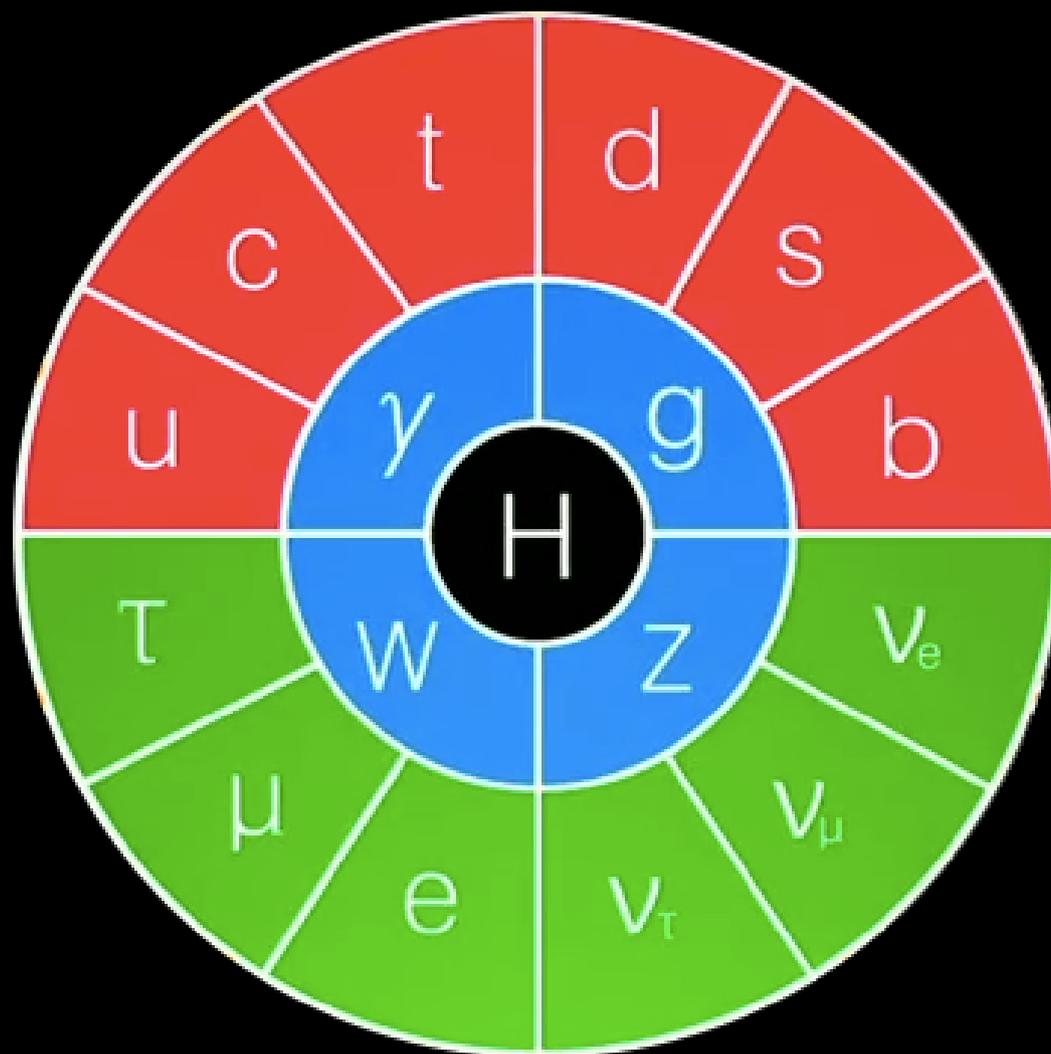
Pas la moindre idée de son origine !

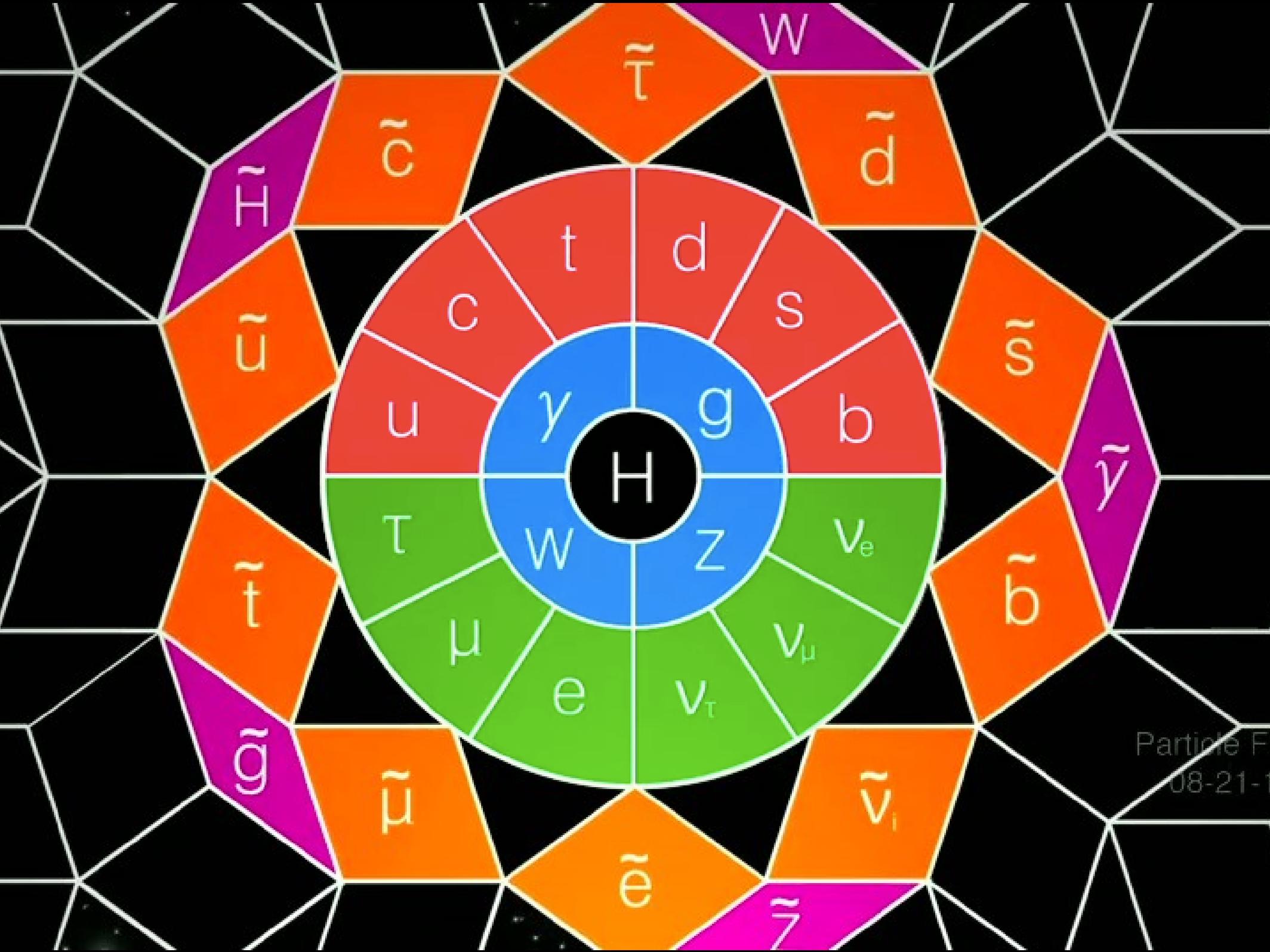




# Autres théories

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





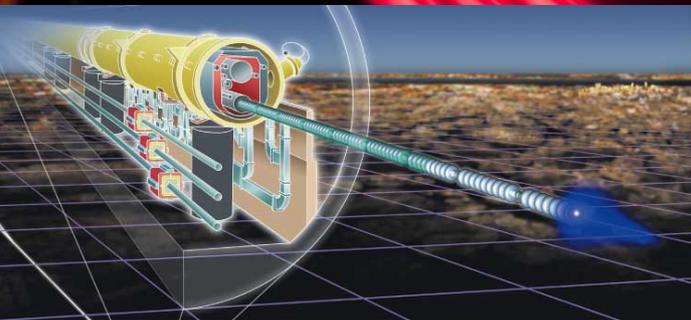
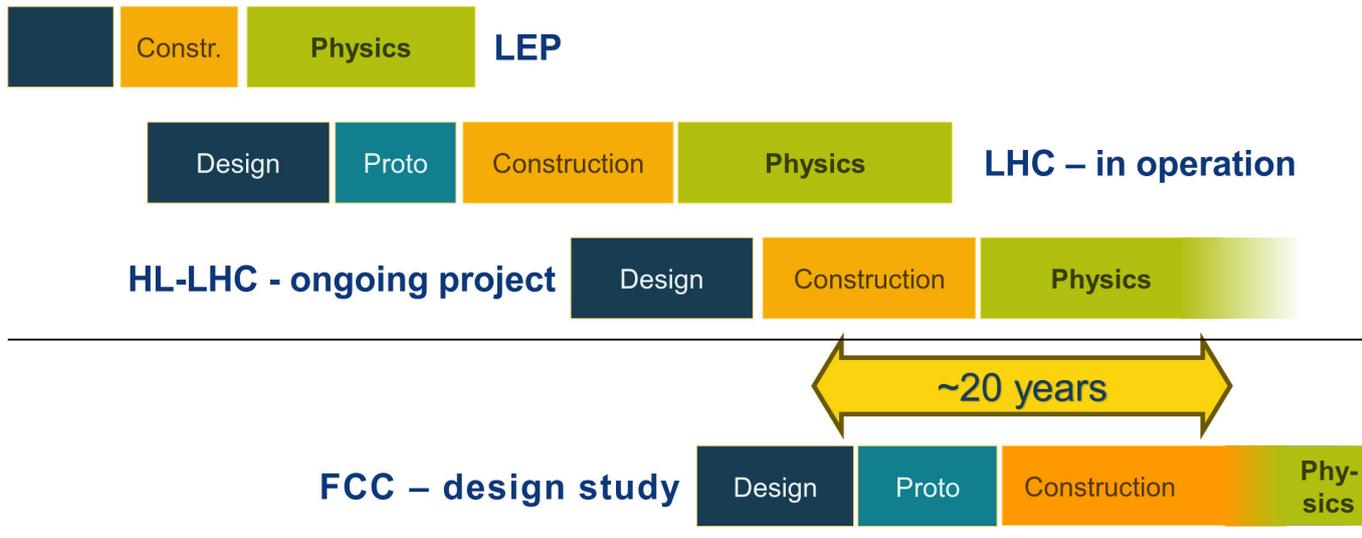
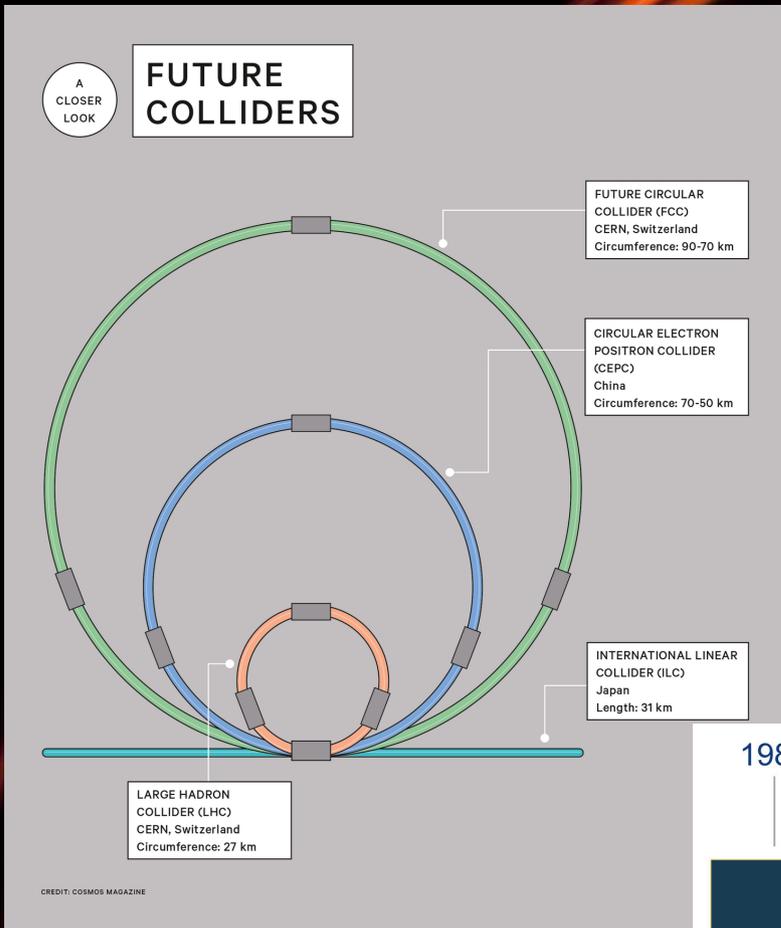
# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

## **LHC Saisons 2 & 3 (Runs 2&3) :**

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

# Et après ?



# Liens

#LHCIMC



@physicsIMC



@InternationalParticlePhysicsMasterclasses

ATLAS@home



[atlasathome.cern.ch](http://atlasathome.cern.ch)

ATLAS grand public



[atlas.cern](http://atlas.cern)

ATLAS en direct

[atlas-live.cern.ch](http://atlas-live.cern.ch)

ATLAS sur



[twitter.com/ATLASexperiment](https://twitter.com/ATLASexperiment)

ATLAS sur



[www.facebook.com/ATLASexperiment](https://www.facebook.com/ATLASexperiment)

ATLAS sur



[www.instagram.com/atlasexperiment](https://www.instagram.com/atlasexperiment)

ATLAS sur



[www.youtube.com/theATLASExperiment](https://www.youtube.com/theATLASExperiment)

Site français du



[www.lhc-france.fr](http://www.lhc-france.fr)

Le CPPM



[www.cppm.in2p3.fr](http://www.cppm.in2p3.fr)



[twitter.com/cppmluminy](https://twitter.com/cppmluminy)

Le CERN



[home.cern](http://home.cern)



[twitter.com/cern](https://twitter.com/cern)

Le CERN sur



[www.facebook.com/cern](https://www.facebook.com/cern)

«Nouvelle» affiche du SM

[www.particuleselementaires.fr](http://www.particuleselementaires.fr)