



Bibliothèque
de l'Alcazar
7 mars 2013
17h30

La quête du boson de Higgs

L'accélérateur de particules LHC et l'expérience ATLAS

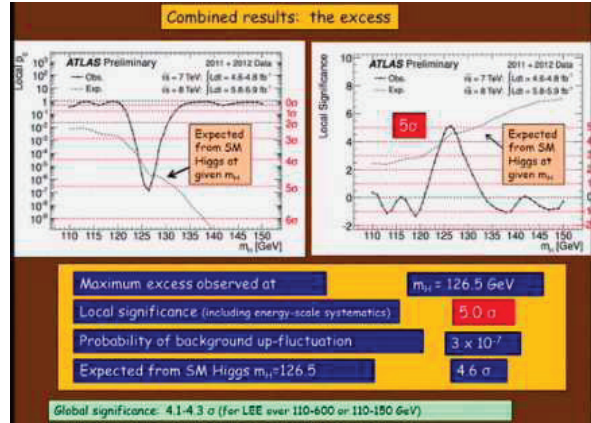
pour percer les secrets de l'Univers

Laurent VACAVANT

Centre de Physique des Particules de Marseille



Retour sur le 4 juillet 2012

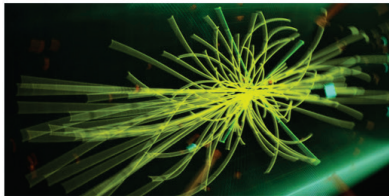


Le Monde.fr

INTERNATIONAL POLITIQUE SOCIÉTÉ ÉCONOMIE CULTURE IDÉES SPORT SCIENCES TECHNOLOGIE

EN CÍUDADES EUROPEAS desde 15€
EN CÍUDADES ESPAÑOLAS desde 17€ (por noche por persona)

Le boson de Higgs découvert avec 99,9999 % de certitude



Voici la confirmation tant attendue : une nouvelle particule a été découverte au Centre européen de recherche nucléaire (CERN), près de Genève.



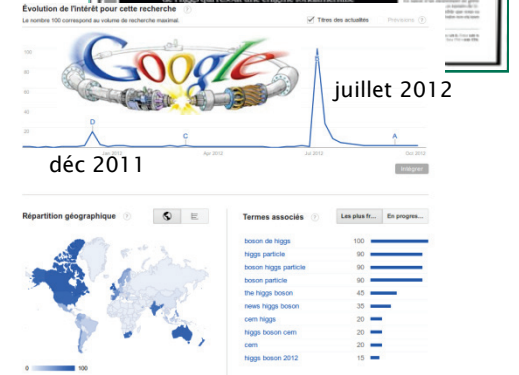
The New York Times

DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢



New Particle Could Be Physics' Holy Grail

MARKETS
FTSE 100
DAX
Nikkei 225



Le boson de Higgs: quezako ?

© Lison Bernet



BD ici: <http://www.lhc-france.fr>



boson: un type de particule élémentaire, clé de voûte de la théorie en physique des particules

Peter Higgs: un de ses inventeurs (il y a 48 ans...)

La quête du boson de Higgs

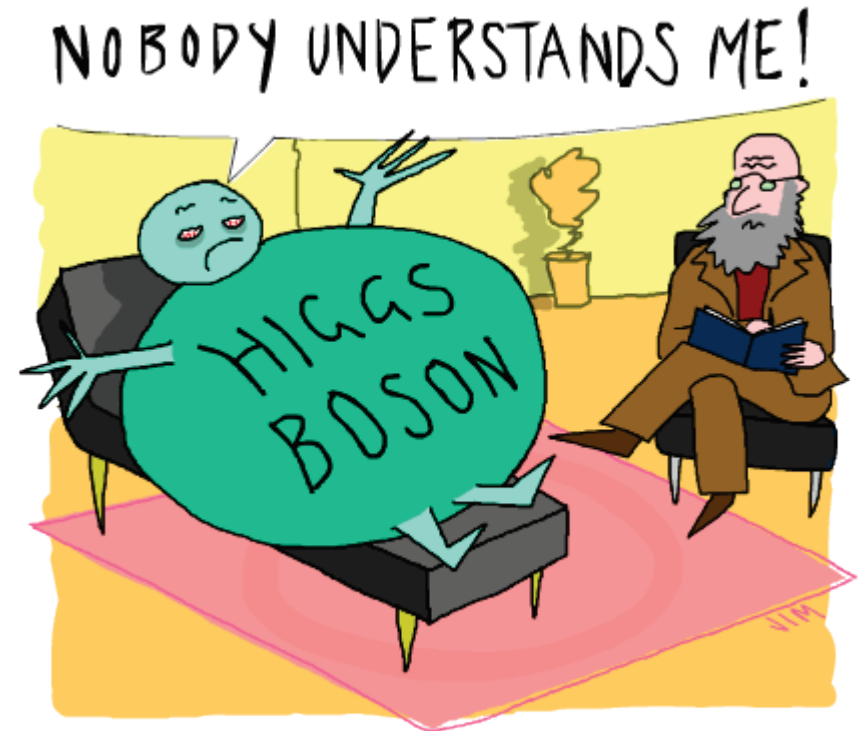
Cette présentation:

L'invention d'une particule:

- L'infiniment petit
- Les particules élémentaires
- Les forces
- La masse
- Le mécanisme de Higgs

La découverte d'une particule:

- Accélérateurs et le LHC
- Le détecteur ATLAS
- Recherche du boson de Higgs



<< Personne ne me comprend ! >>

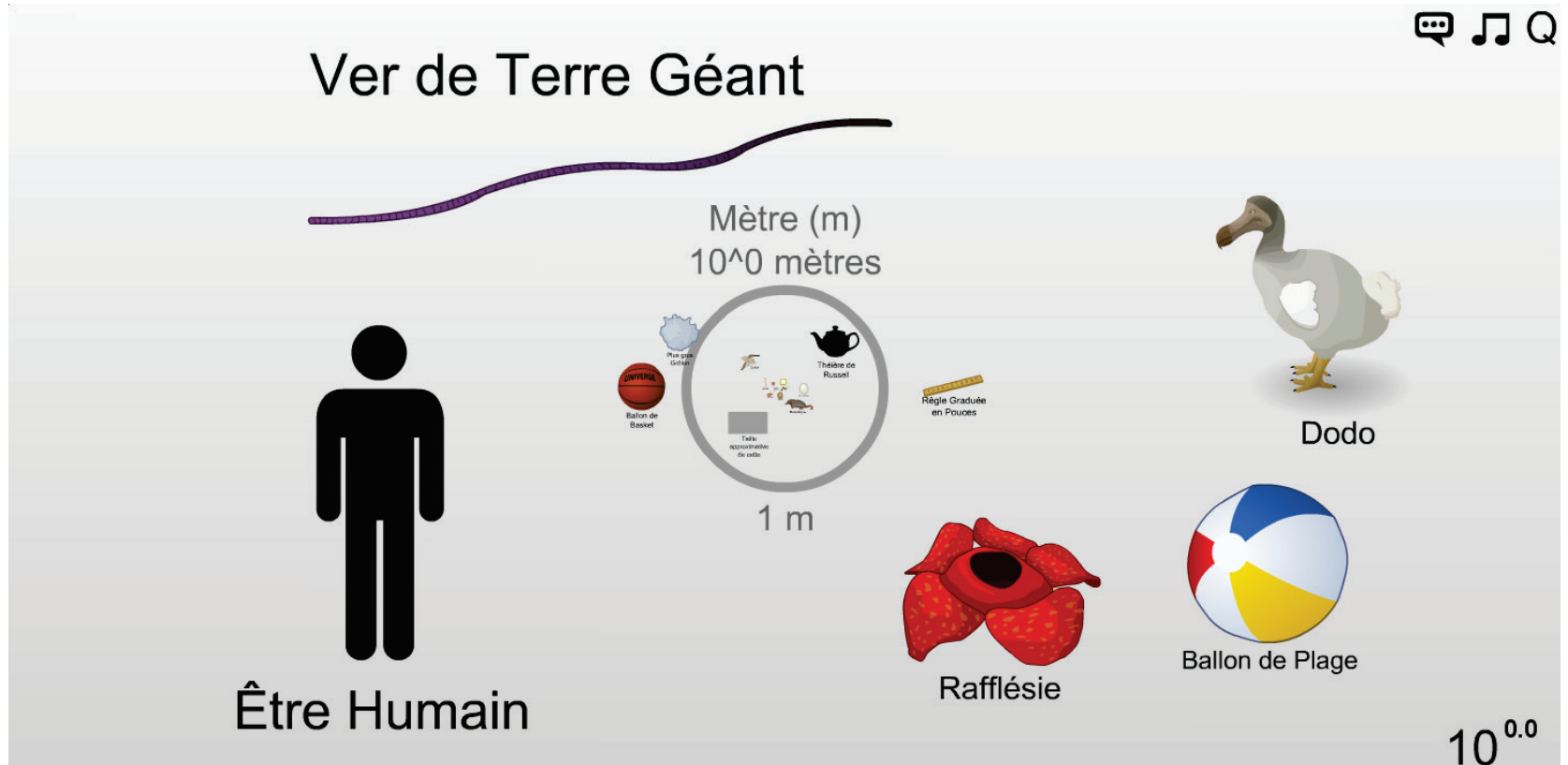
➔ notion assez difficile à vulgariser

La physique des particules élémentaires

- **Physique des particules**: étude des constituants ultimes de la matière. Nom moderne d'un effort entrepris depuis des siècles et visant à comprendre les lois de la nature
→ recherche fondamentale
- **Objectif**: décrire les propriétés du tout à partir de ses parties
 - Les particules de matière (les « briques » formant toute la matière)
 - Les interactions de ces briques: lois de la physique (forces)
- **Démarche**: réduire le nombre d'éléments, recherche des similitudes/symétries, unification de phénomènes apparemment différents
- Le tout dans un cadre mathématique extrêmement rigoureux et prédictif

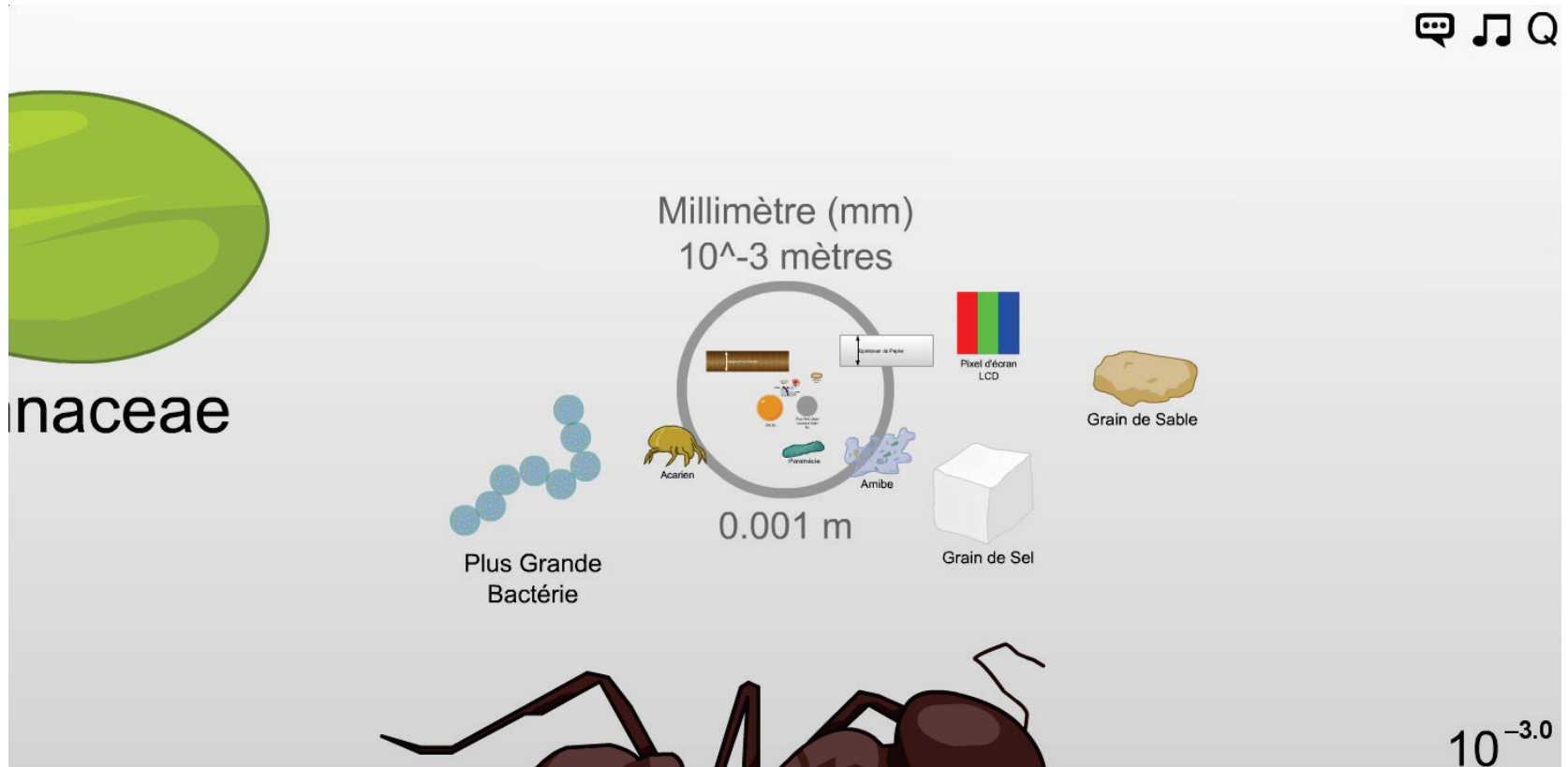
Voyage vers l'infiniment petit

1 m



Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m} = 0.001 \text{ m}$$



© 2012 Cary and Michael Huang (<http://htwins.net>)

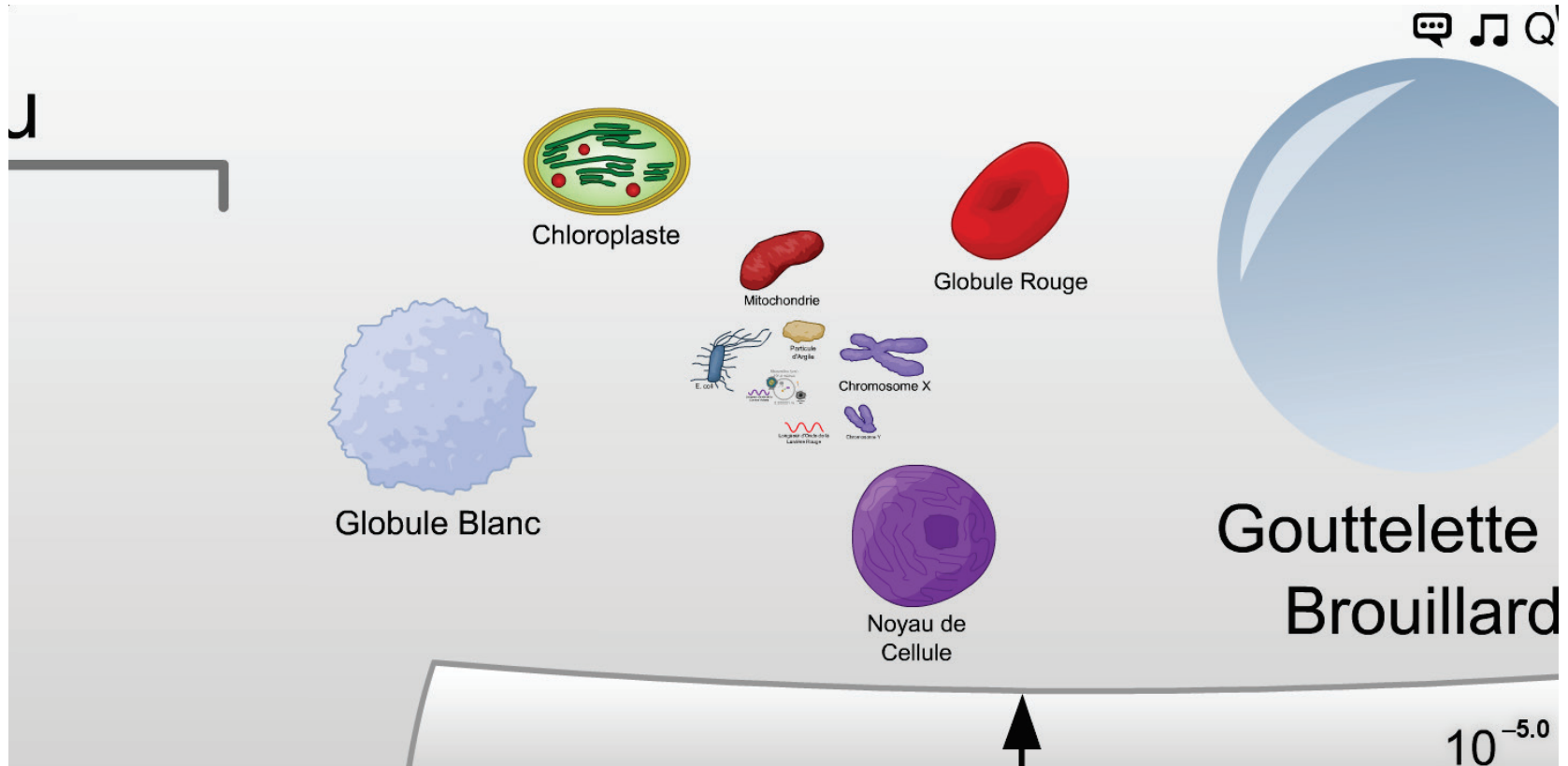
Voyage vers l'infiniment petit

$$1/10 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m} = 0.0001 \text{ m}$$



Voyage vers l'infiniment petit

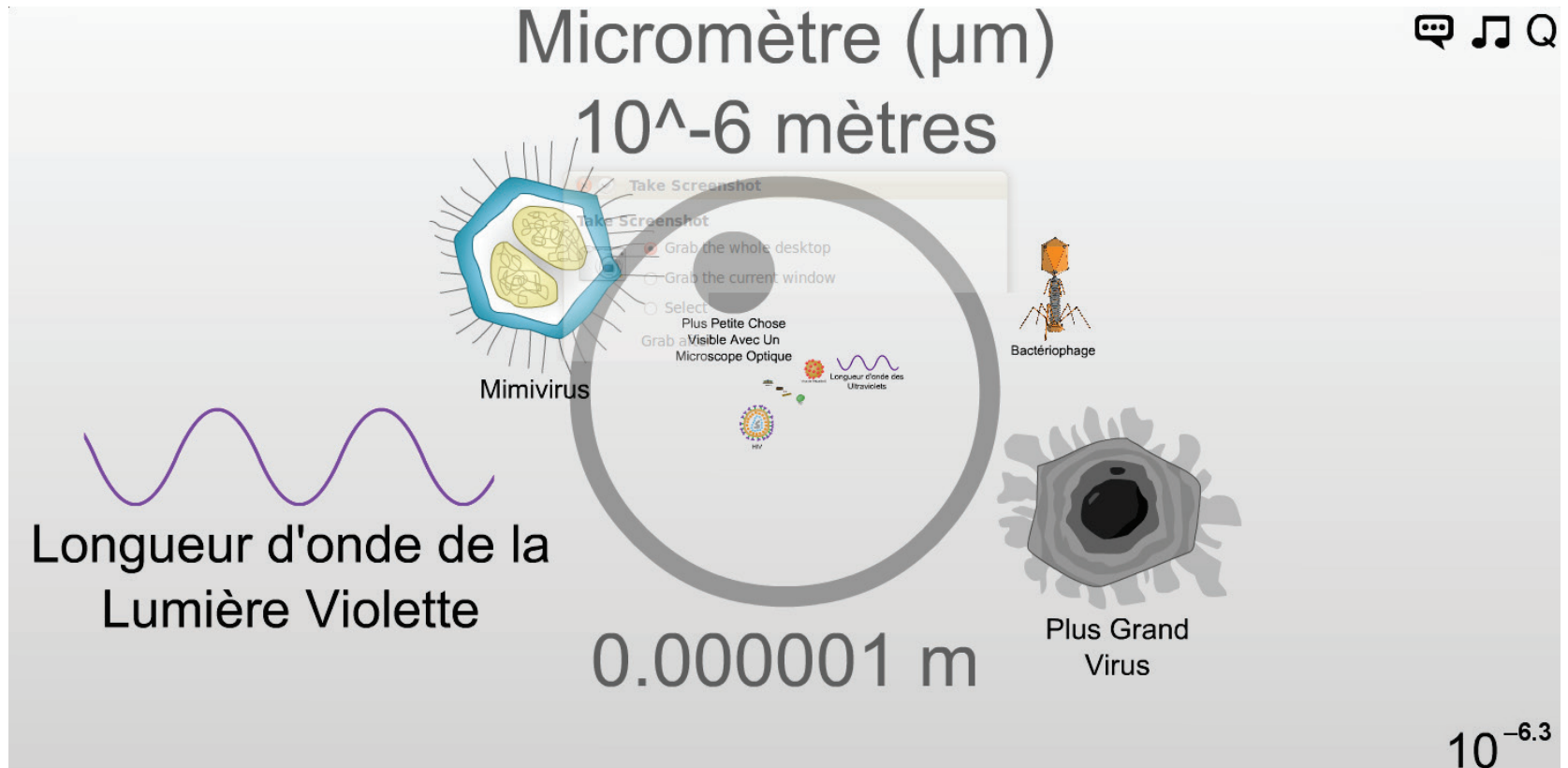
$$1/100 \text{ mm} = 10^{-5} \text{ m} = 0.00001 \text{ m}$$



© 2012 Cary and Michael Huang (<http://htwins.net>)

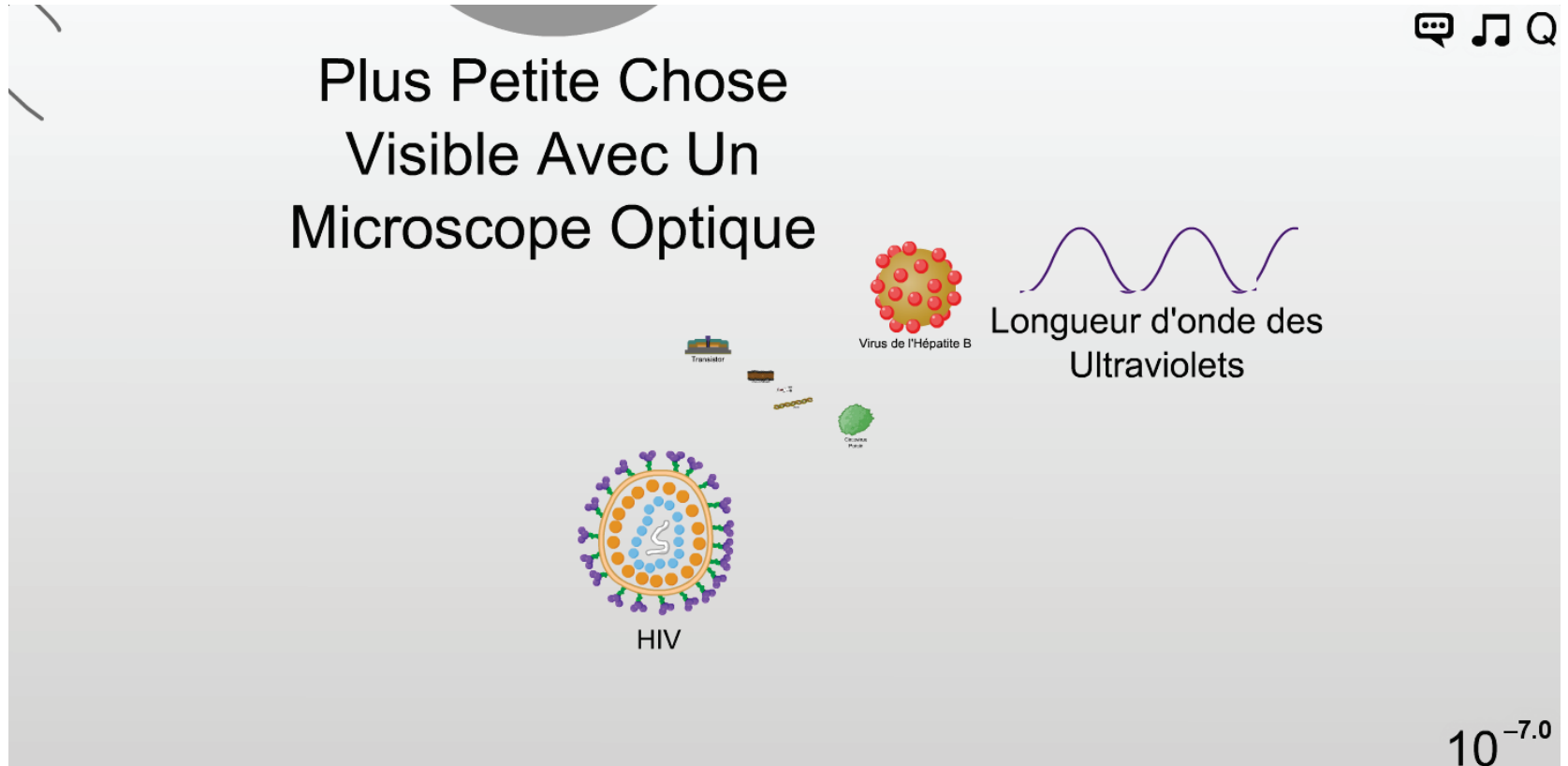
Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 0.000001 \text{ m}$$



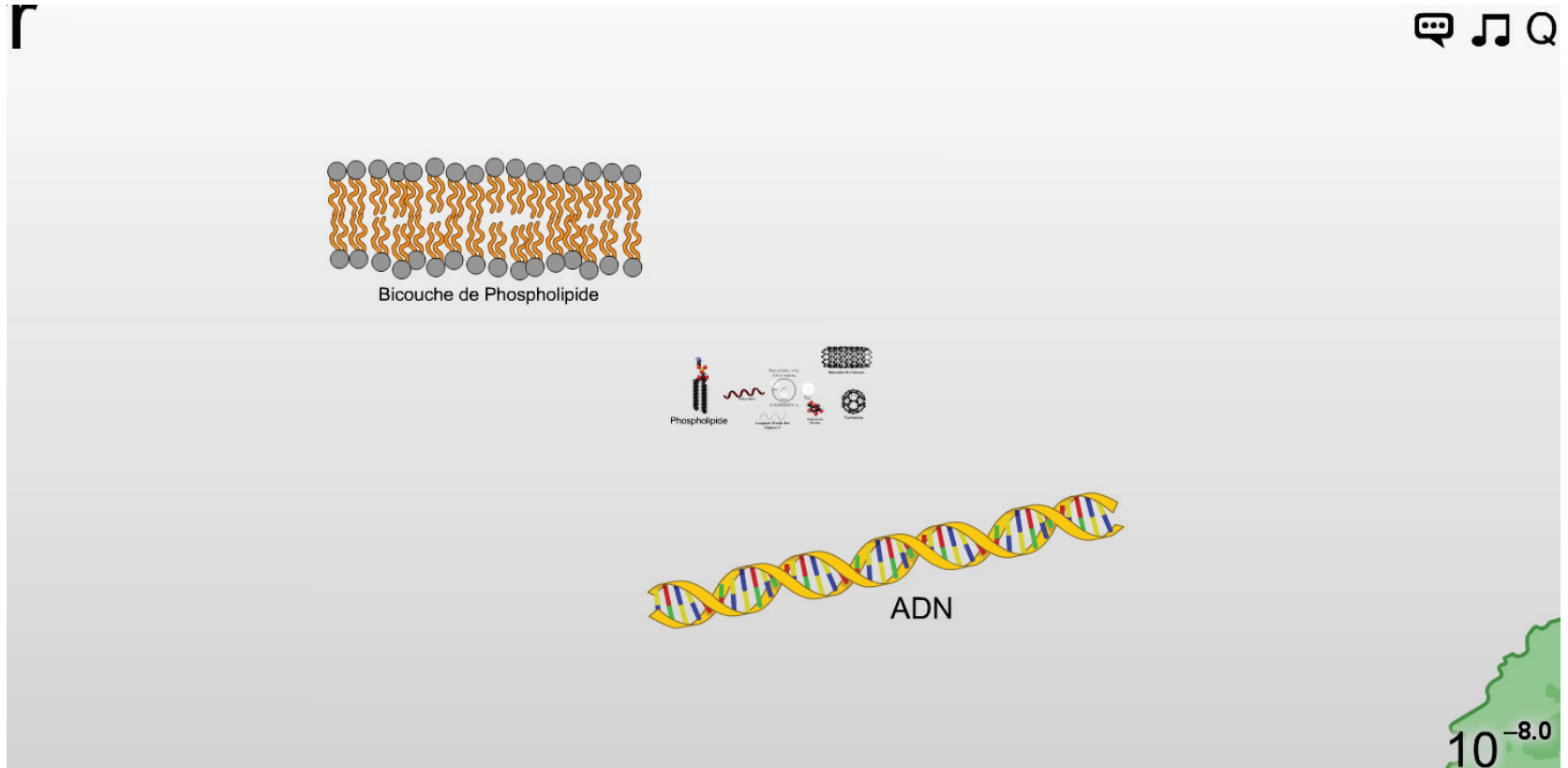
Voyage vers l'infiniment petit

$$1/10 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-7} \text{ m} = 0.0000001 \text{ m}$$



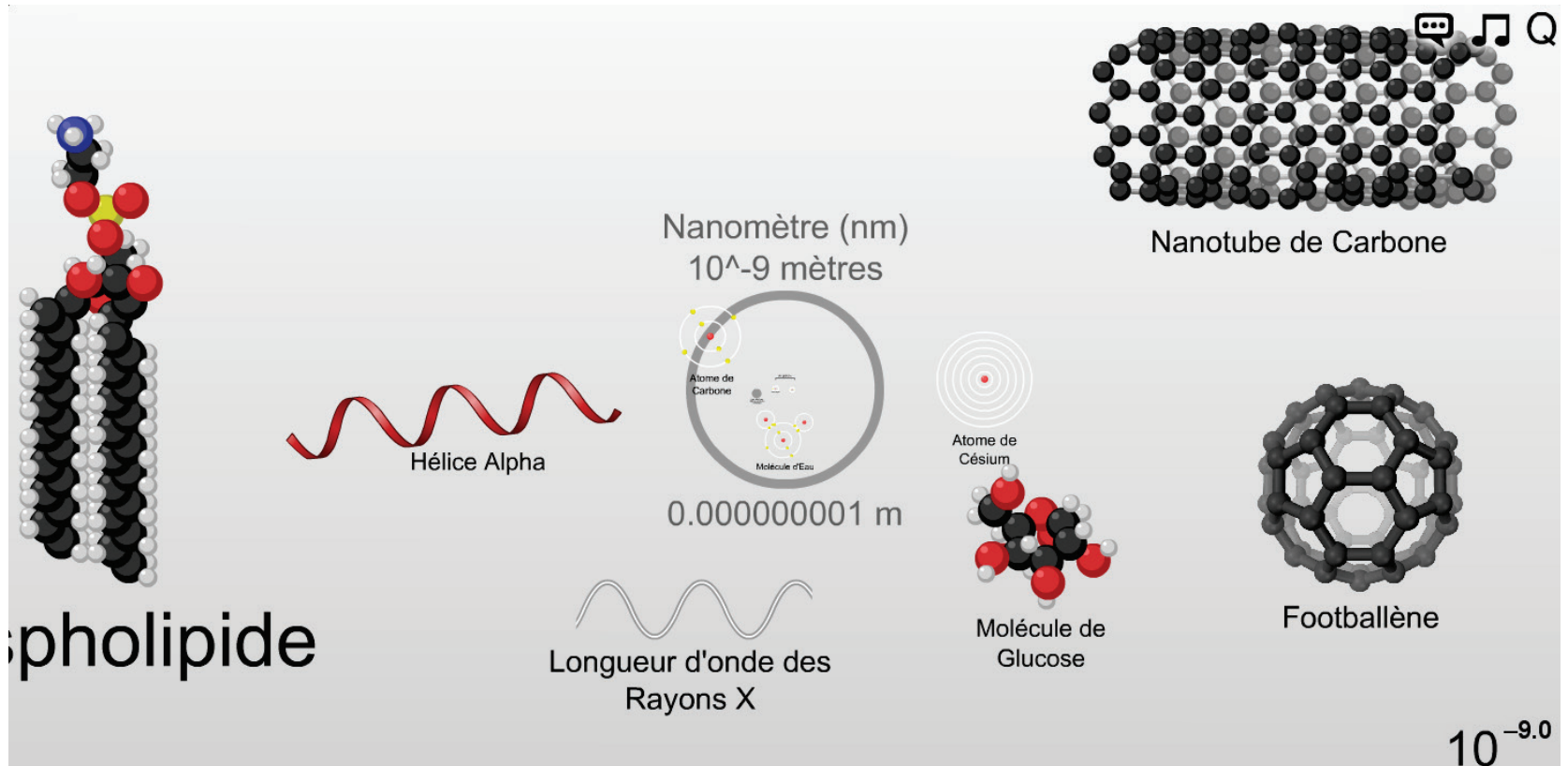
Voyage vers l'infiniment petit

$$1/100 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-8} \text{ m} = 0.00000001 \text{ m}$$



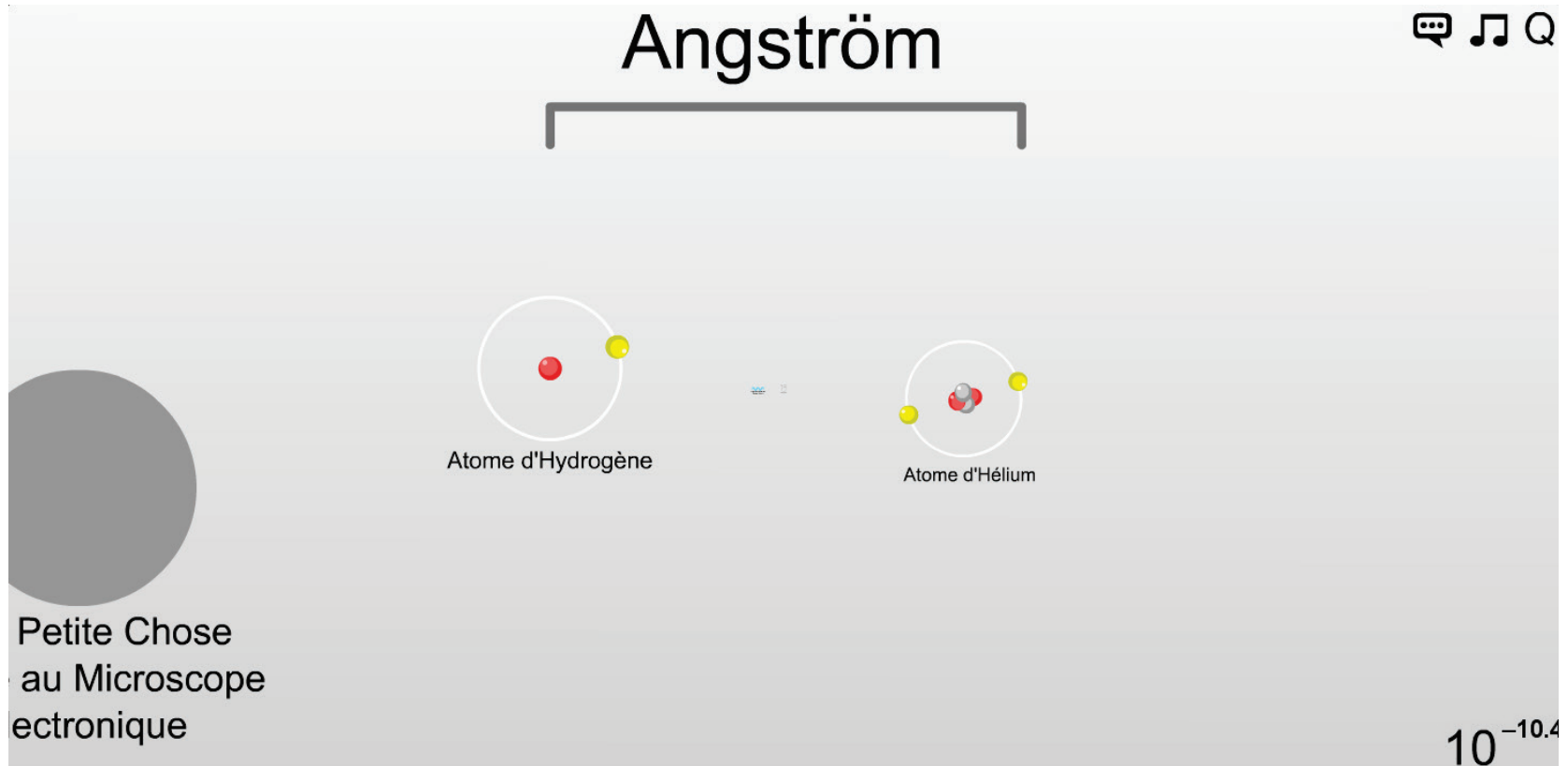
Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0.000000001 \text{ m}$$



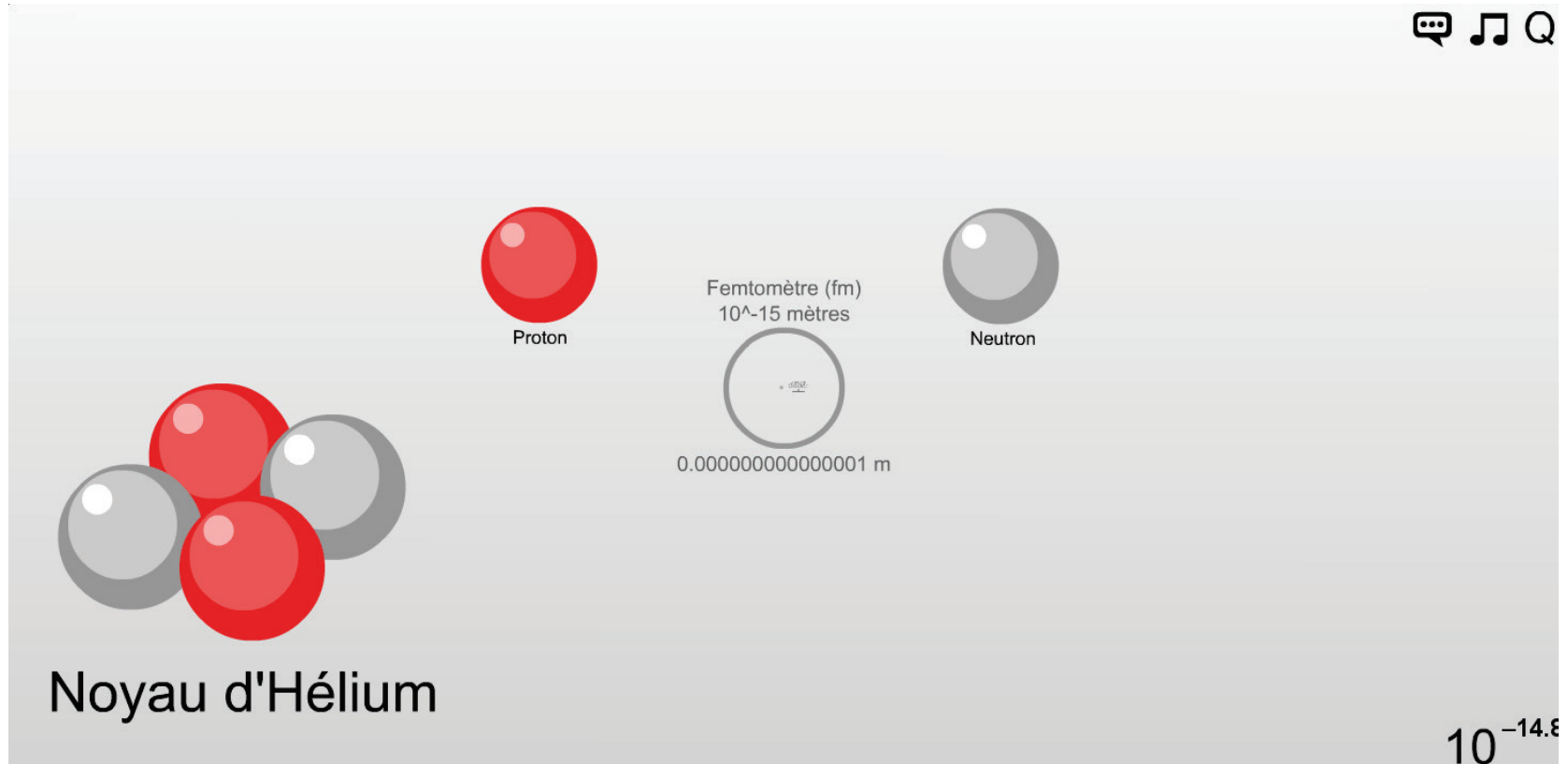
Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 0.0000000001 \text{ m}$$



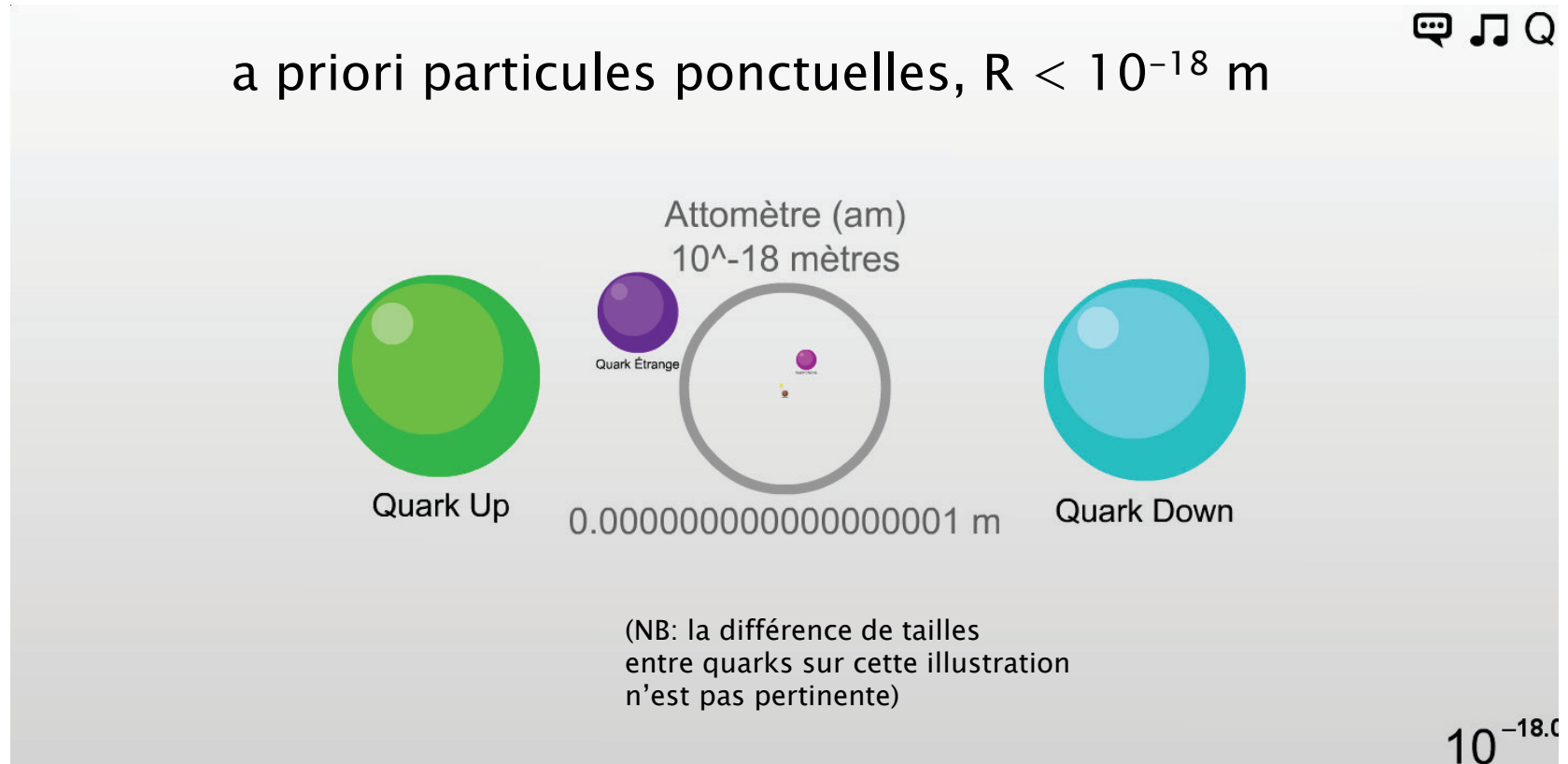
Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m} = 0.000000000000001 \text{ m}$$



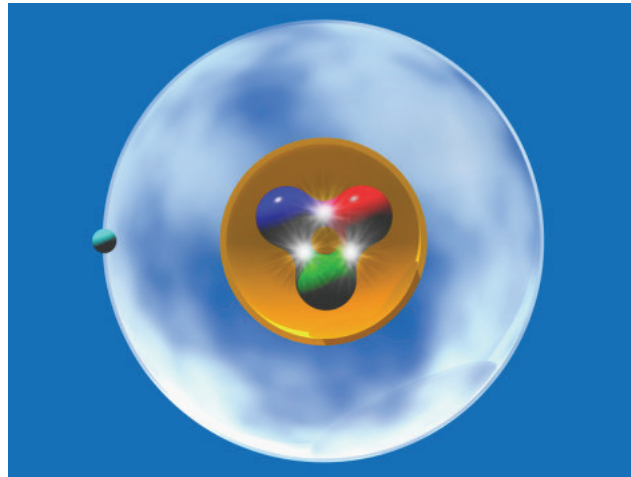
Voyage vers l'infiniment petit

$$1 \text{ am} = 10^{-18} \text{ m} = 0.00000000000000000001 \text{ m}$$



Atome d'hydrogène & le vide

Le plus simple des atomes: un proton, un électron



Si le proton avait un diamètre de 10cm, un quark mesurerait moins de 0.1 mm et un atome environ 10km !!
Un atome contient essentiellement du vide.

La matière ordinaire: 3 briques

Quarks:

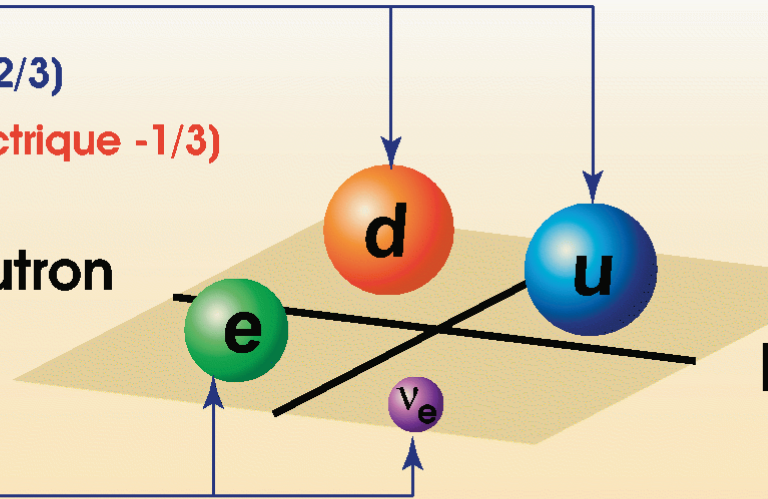
Up (charge électrique 2/3)

et **Down** (charge électrique -1/3)

Ils composent
le proton et le neutron

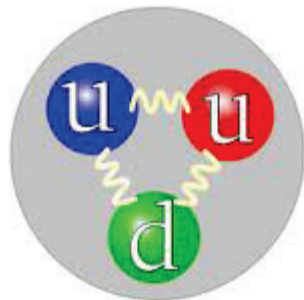
Leptons :

l'**électron** et son
neutrino associé



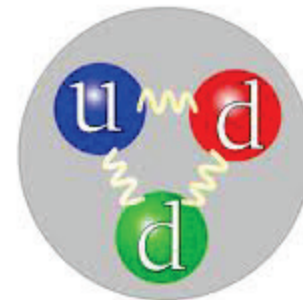
Matière ordinaire,
dont nous sommes constitués

proton



$$q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$

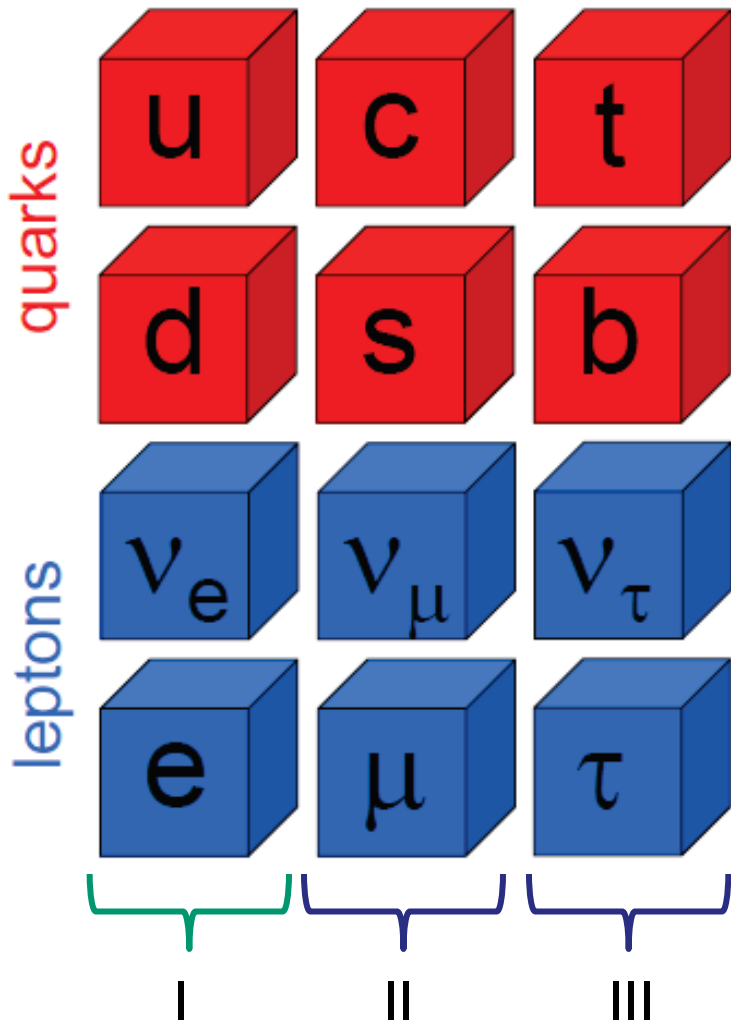
neutron



$$q_n = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$$

Le Modèle Standard: particules de matière

Trois familles ou générations:



- **matière ordinaire**: u, d, e, ν_e
 - **deux répliques** plus massives mais instables:
 - $m(\tau) \simeq 200 \times m(\mu) \simeq 3500 \times m(e)$
 - $m(t) \simeq 100 \times m(c) \simeq 90000 \times m(u)$
- NB: ces particules ont disparu une fraction de seconde après le Big-Bang, elles sont recréées dans des accélérateurs naturels (rayons cosmiques) ou artificiels.
- certains fermions prédits par raison de symétrie(s), découverts ensuite: c, b, t, ν_τ . Inversement, les découvertes expérimentales ont aussi structuré le modèle.
 - dernier quark (top) découvert en 1994
 - dernier lepton (ν_τ) observé directement en 2001

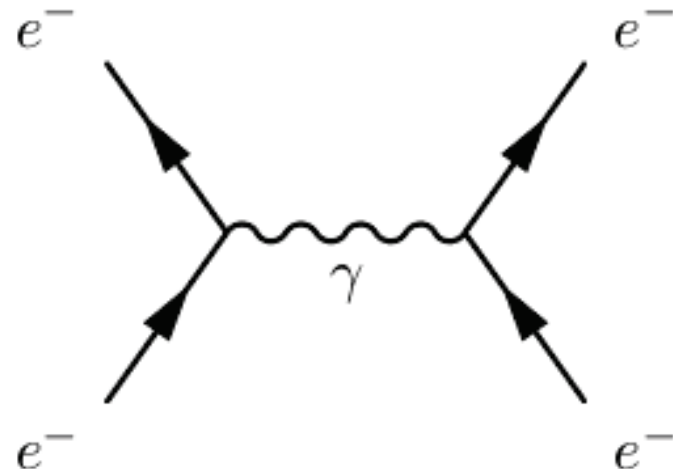
+ leurs anti-particules (anti-matière)

Forces: interactions entre particules

Nos particules de matière, les fermions, s'organisent en structures régies par des forces:

- planètes gravitant autour d'une étoile
- électrons tournant autour des noyaux atomiques
- protons et neutrons reliés dans le noyau
- etc

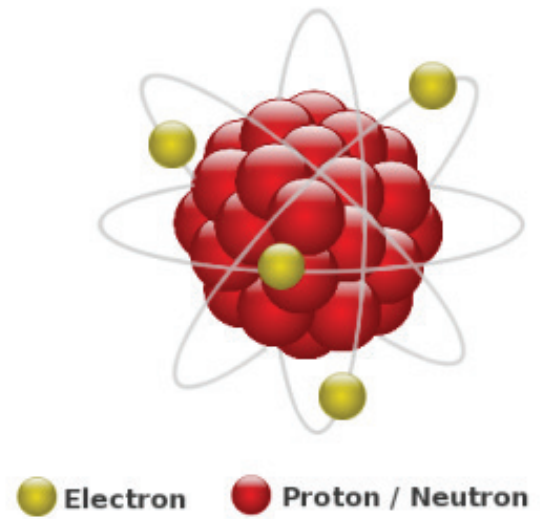
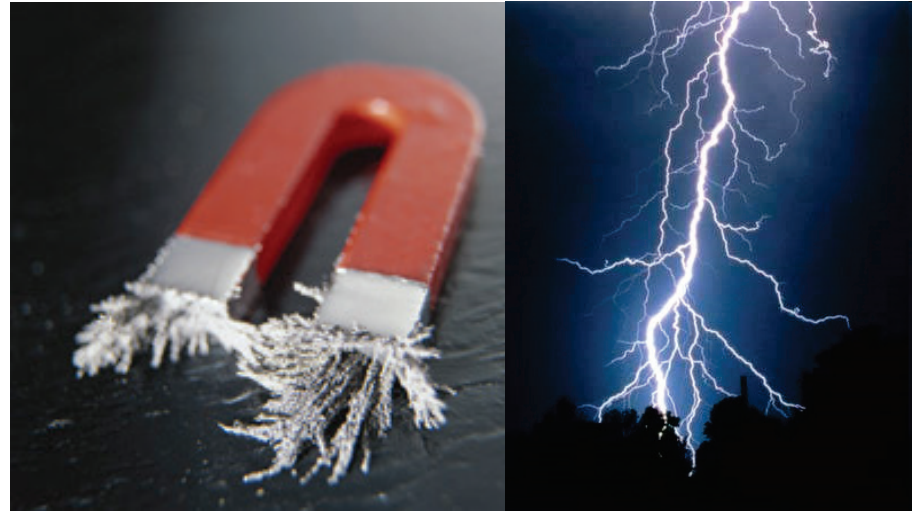
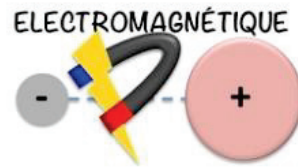
Ces forces sont véhiculées par d'autres particules ! Elles sont d'un type un peu différent, appelé bosons.



Les forces et leurs médiateurs

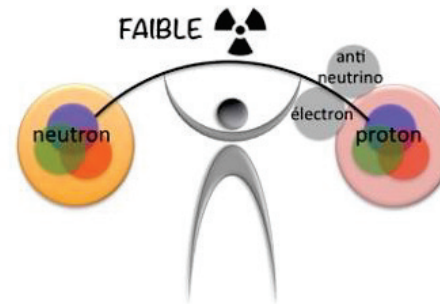
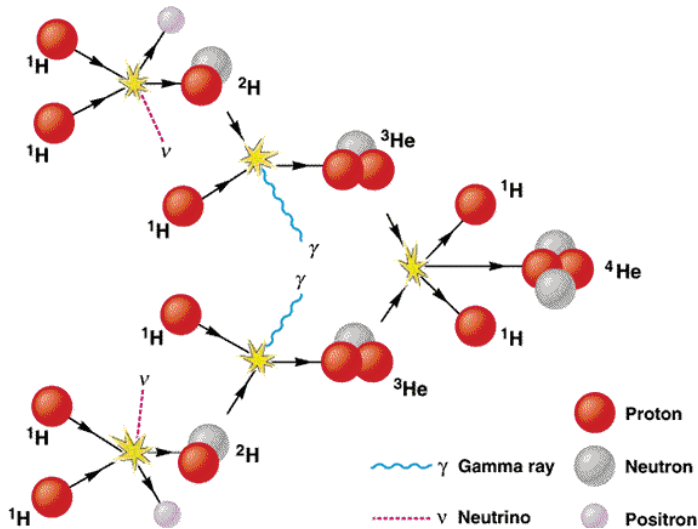
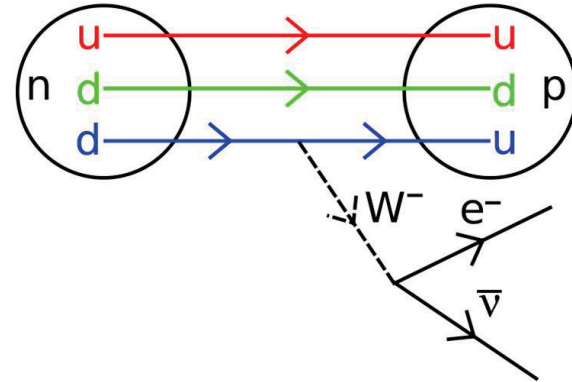
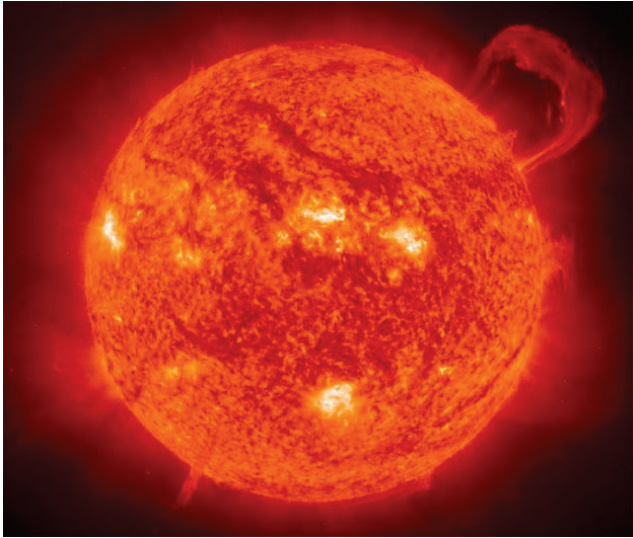
Lumière, électricité, magnétisme
Chimie, biologie

le photon γ
masse nulle
portée infinie
intensité $\equiv 1$



La force électromagnétique

Les forces et leurs médiateurs



bosons $W^\pm, Z^0$
 $\sim 100\times$ masse proton
portée: 10^{-18} m
intensité 10^2

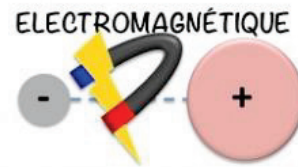
Radioactivité β , réactions nucléaires
dans les étoiles

La force nucléaire faible

Les forces et leurs médiateurs

Lumière, électricité, magnétisme
Chimie, biologie

le photon γ
masse nulle
portée infinie
intensité $\equiv 1$



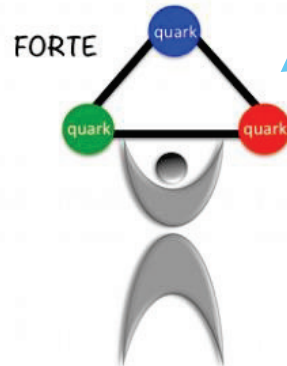
Pesanteur, mouvement des astres,
marées, ...

graviton ?
portée infinie
intensité 10^{-30}



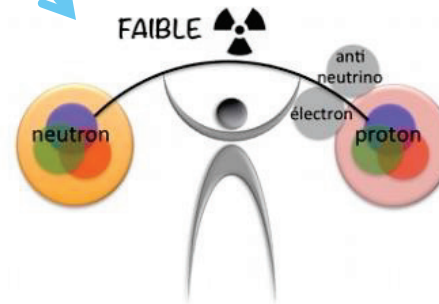
unifiées

8 gluons
masse nulle
portée: 10^{-15} m
intensité 10^6



Cohésion des noyaux atomiques,
stabilité du proton, radioactivité α

*NB: énergie gluons, quarks
→ 95% de la masse du proton !!*

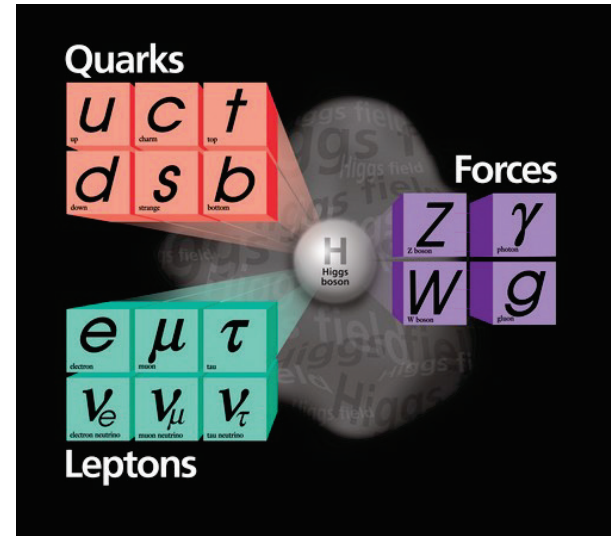


bosons $W^\pm, Z^0$
 ~ 100 x masse proton
portée: 10^{-18} m
intensité 10^2

Radioactivité β , réactions nucléaires
dans les étoiles

Résumé: le Modèle Standard en 2011

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



Fermions

Bosons

Higgs ?

La théorie mathématique sans le mécanisme de Higgs: pas de masse aux particules !

Or on sait que les bosons W/Z (et les fermions) sont massifs !!

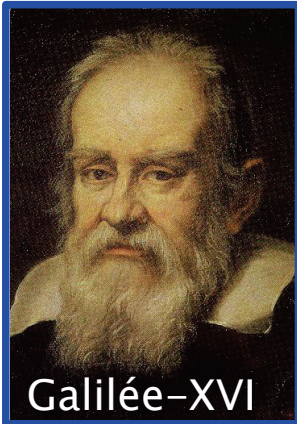
Le photon et les bosons W/Z

Photon: masse nulle, portée infinie

Bosons W/Z: masse finie (100x proton), portée finie



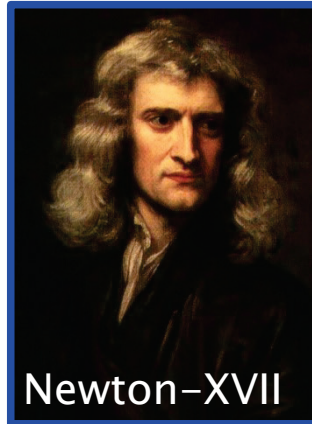
La masse



Galilée-XVI

$$P = mg$$

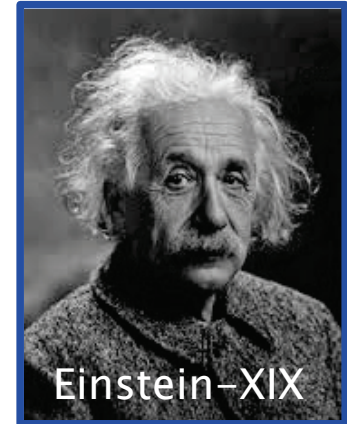
Masse gravitationnelle



Newton-XVII

$$\Sigma F = ma$$

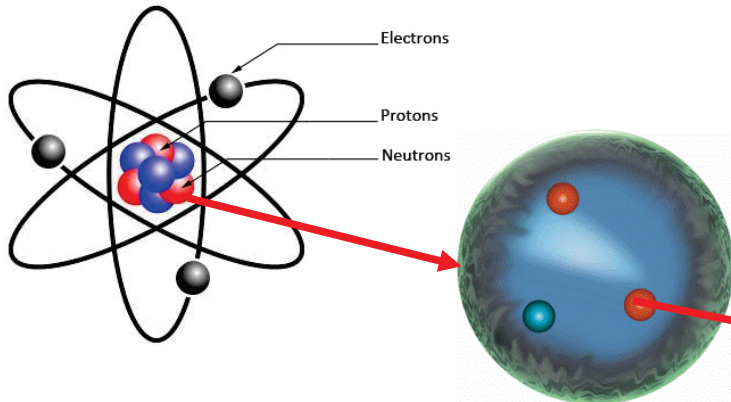
Masse inertielle



Einstein-XIX

$$E = mc^2$$

Equivalence m/E



Masse de la matière (p,n) :

- 1 % masse des constituants (quarks)
- 99 % interaction entre constituants

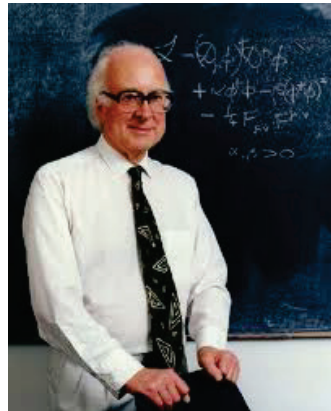
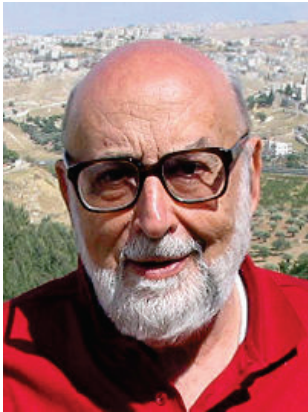
LEPTONS		
Electron Neutrino Mass ~0	Muon Neutrino ~0	Tau Neutrino ~0
Electron .511	Muon 106.7	Tau 1 777
QUARKS		
Up Mass: 5	Charm 1 500	Top ~180 000
Down 8	Strange 160	Bottom 4 250

$m(\text{top}) \approx 170$ protons
 $\approx$ masse (atome d'or)

masse des particules élémentaires ! 26

Le mécanisme de Higgs: 1964

ou comment donner une masse aux bosons W et Z (puis aux autres particules élémentaires)



BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

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

(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

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

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

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

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

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

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

(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon 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

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

mais aussi travaux de: G. Guralnik, C. Hagen, T. Kibble

Conséquences: existence d'un champ de Higgs, et d'un boson scalaire

Le mécanisme de Higgs: analogie

R. Feynman: "I really can't explain [magnetic force] in terms of something you're more familiar with"

Le défi lancé par Sir W. Waldegrave en 1993:
"Expliquez-moi en une page ce qu'est le
boson de Higgs et pourquoi il faut le trouver"

- un des gagnants: D. Miller (UCL)
- P. Higgs: "The analogy I object least to"

Le mécanisme de Higgs: analogie

R. Feynman: "I really can't explain [magnetic force] in terms of something you're more familiar with"

Le défi lancé par Sir W. Waldegrave en 1993:
"Expliquez-moi en une page ce qu'est le
boson de Higgs et pourquoi il faut le trouver"

- un des gagnants: D. Miller (UCL)
- P. Higgs: "The analogy I object least to"



politiciens / le champ de Higgs

Le mécanisme de Higgs: analogie

R. Feynman: "I really can't explain [magnetic force] in terms of something you're more familiar with"

Le défi lancé par Sir W. Waldegrave en 1993:
"Expliquez-moi en une page ce qu'est le boson de Higgs et pourquoi il faut le trouver"

- un des gagnants: D. Miller (UCL)
- P. Higgs: "The analogy I object least to"



politiciens / le champ de Higgs



une célébrité/particule a du mal
à se frayer un chemin

Le mécanisme de Higgs: analogie

R. Feynman: "I really can't explain [magnetic force] in terms of something you're more familiar with"

Le défi lancé par Sir W. Waldegrave en 1993:
"Expliquez-moi en une page ce qu'est le boson de Higgs et pourquoi il faut le trouver"

- un des gagnants: D. Miller (UCL)
- P. Higgs: "The analogy I object least to"



politiciens / le champ de Higgs



une célébrité/particule a du mal
à se frayer un chemin

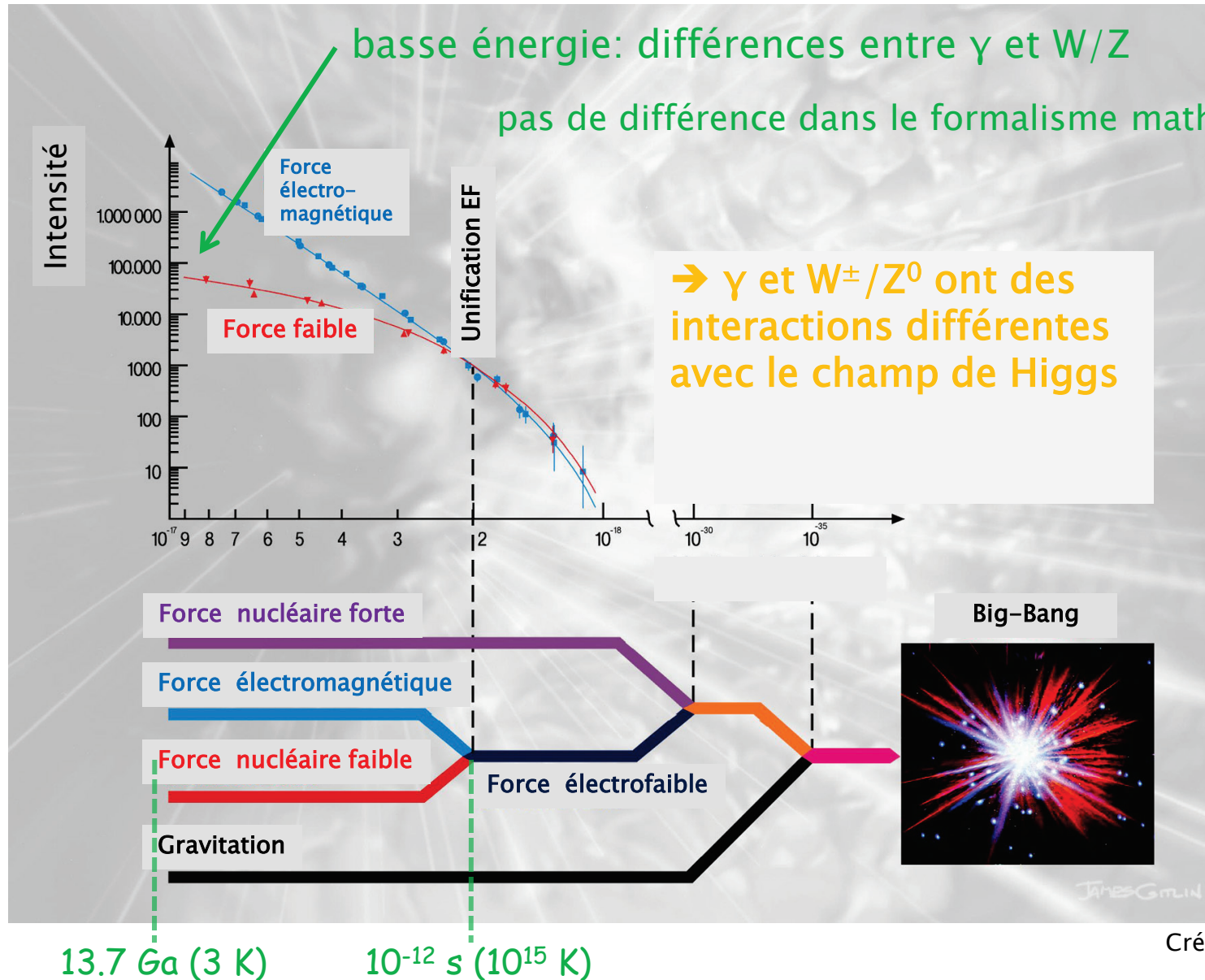


une rumeur est lancée / excitation
du champ de Higgs



→ perturbation temporaire /
particule de Higgs

Unification électrofaible:

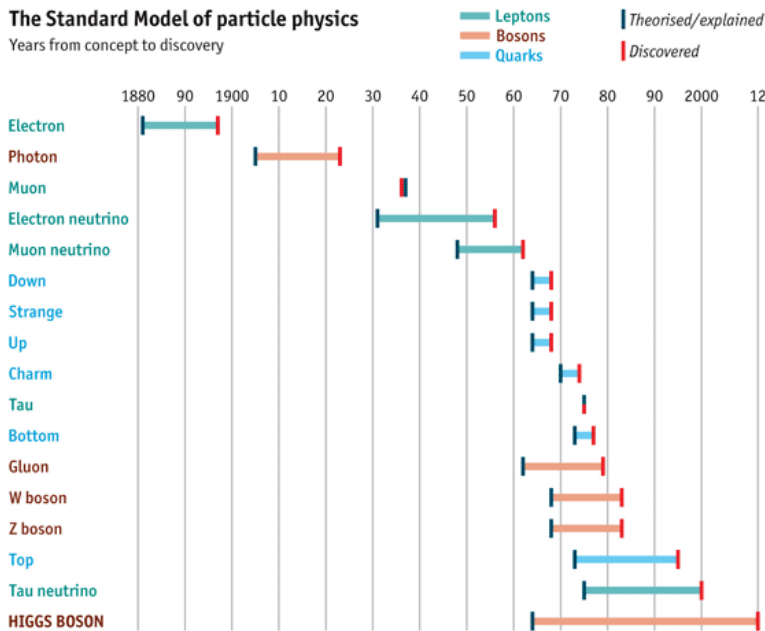


L'outil pour la recherche du boson de Higgs: l'accélérateur LHC

Une longue quête ...

The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery



Source: The Economist

Quelques jalons:

- 1964: articles de R. Brout, F. Englert, P. Higgs
- 1967: théorie électrofaible (Glashow, Salam, Weinberg)
- 1973: courants neutres (CERN)
- 1983: observation des $W^\pm$ et Z^0 (CERN)
- 1983: mise en service du Tevatron
- 1983: réflexions sur l'intérêt d'un "LHC" (C. Rubbia)
- 1983: réflexions pour un "SSC" (USA)
- 1989: mise en service du LEP (CERN)
- 1993: abandon du projet SSC
- 1994: lancement officiel du projet LHC
- 2000: arrêt du LEP, pas de signe de H^0
- 2011: arrêt du Tevatron, évidence $H \rightarrow b\bar{b}$?
- 2012: découverte d'un boson (de Higgs?) au LHC

Les grandes phases du projet LHC:

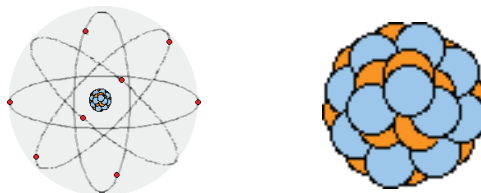
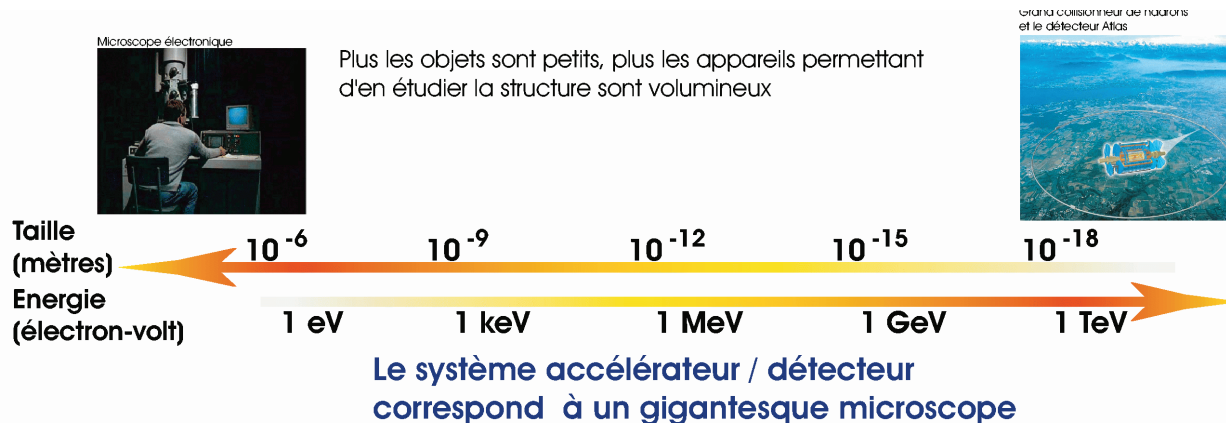
- 1984–1998: conception de l'accélérateur et des détecteurs
- 1992: création de la collaboration ATLAS (le CPPM en fait déjà partie)
- années 90: turbulences financières...
- 1998–2008: construction du LHC et des détecteurs
- 2008: mise en service, panne majeure
- 2009: redémarrage, phase à 7 TeV jusqu'à fin 2012
- ~2014: redémarrage à ~14 TeV, puis phase à haute-luminosité → 2030 ?

Pourquoi des accélérateurs de particules ?

On a besoin de sonder la matière avec des énergies toujours plus élevées pour:

1. étudier des objets plus petits

- ➔ Mécanique quantique: une particule d'énergie E est associée à une longueur d'onde $\lambda = h/k$
- ➔ Plus λ est petite, plus on peut voir des détails fins

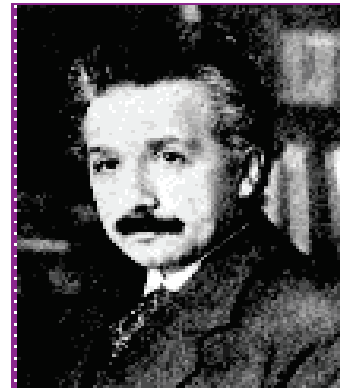


Les collisions de haute énergie

2. créer des particules de plus en plus lourdes:

→ la relativité restreinte exprime l'équivalence entre masse et énergie

$$E = mc^2$$



Dans un accélérateur:

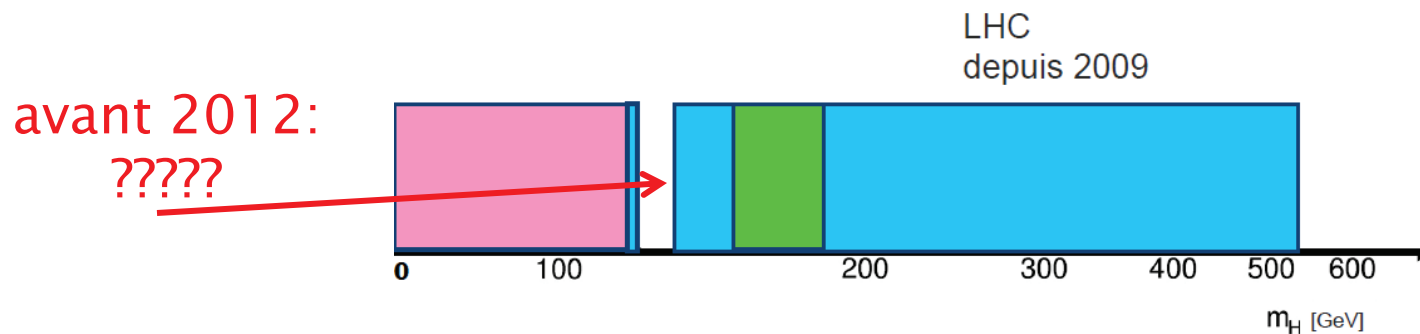
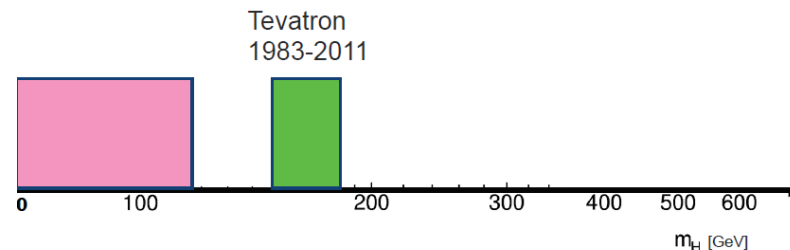
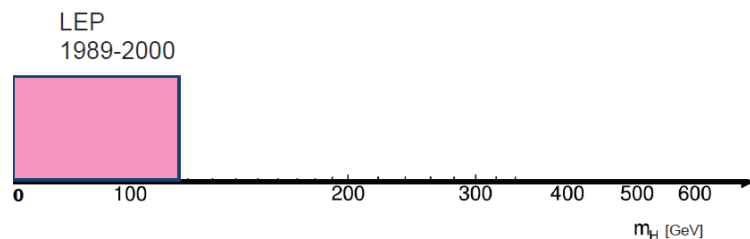
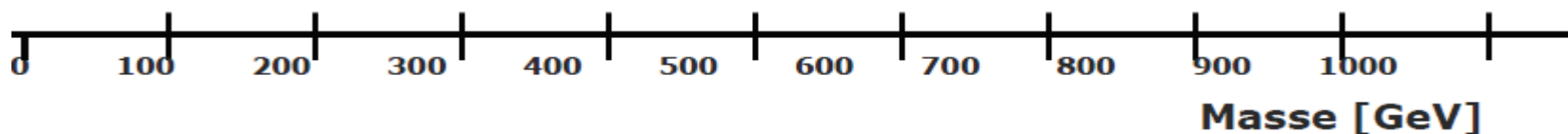
- toute l'énergie cinétique E de la collision est transformée en masse
- $E = E(\text{faisceau protons}_1) + E(\text{faisceau protons}_2)$

Collision classique ou quantique



La chasse au Higgs avant le LHC

?



Le Grand Collisionneur de Hadrons LHC



Laboratoire européen de physique des particules (CERN)

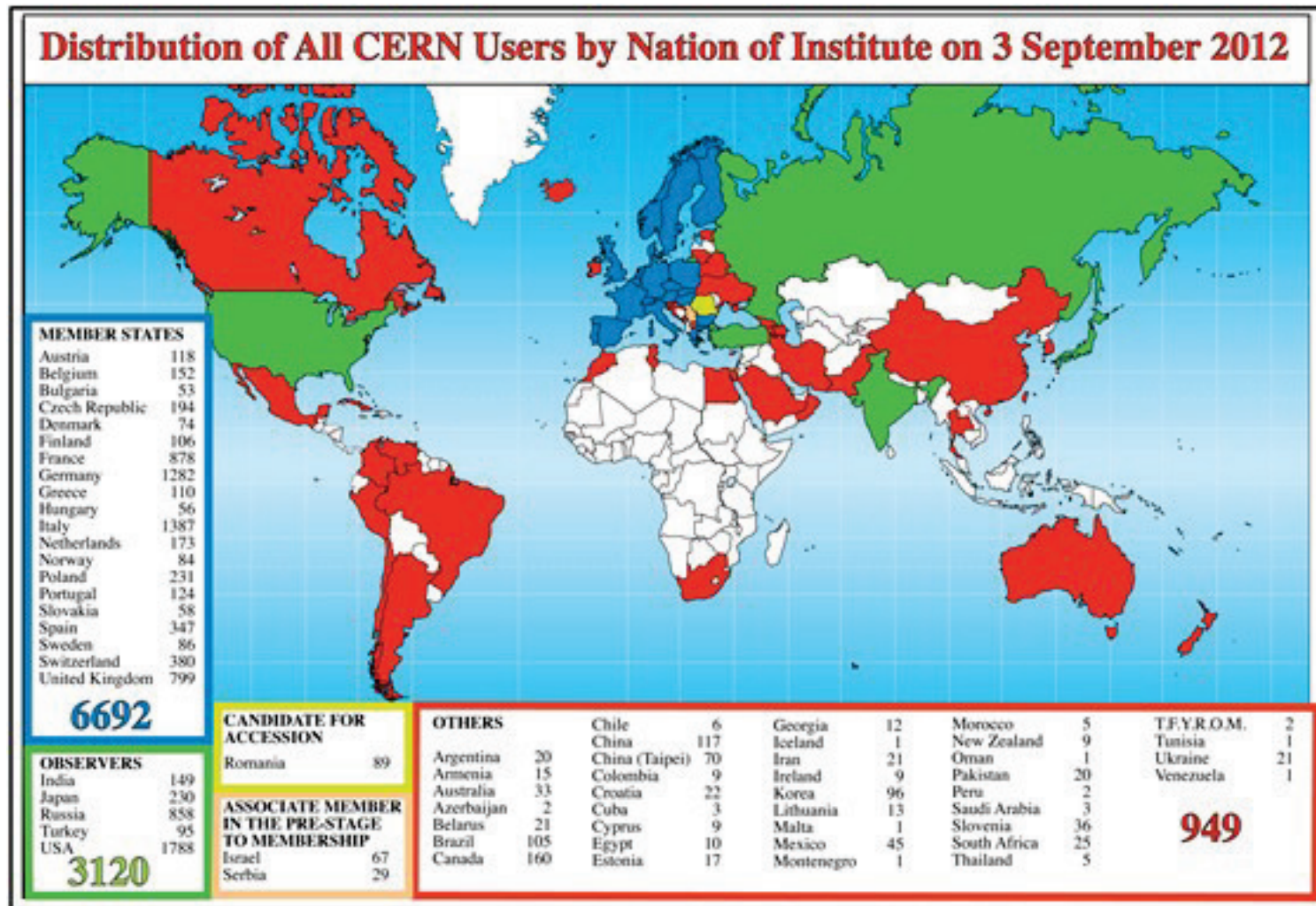


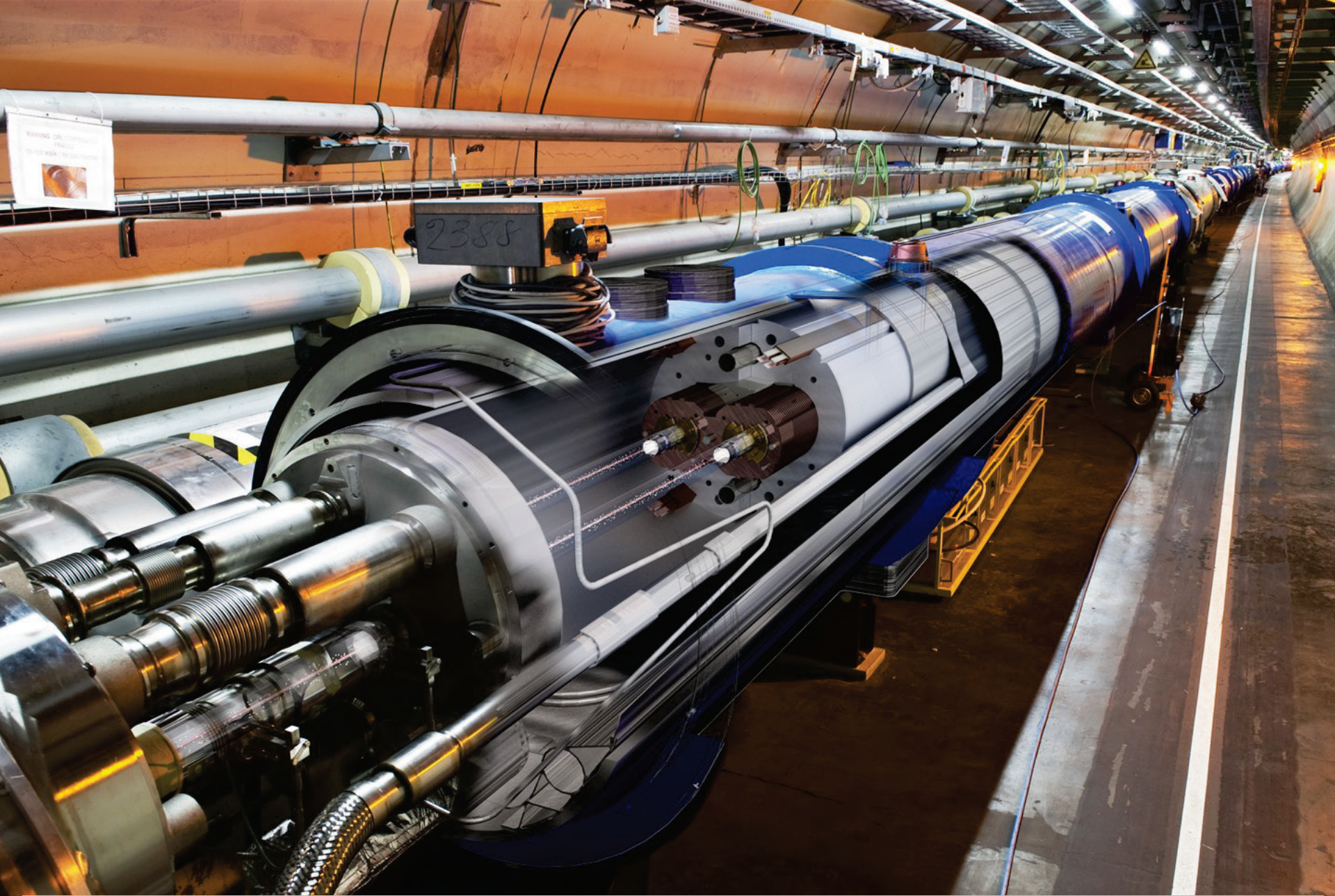
Le plus grand
laboratoire
de physique des
particules du monde:
20 états-membres,
plusieurs états
associés



Organisation internationale
Basée à Genève (Suisse), site en Suisse & France
Créé en 1953

Un laboratoire global





Le Grand Collisionneur de Hadrons: LHC

Le LHC en quelques faits

- La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite
- Un proton dans le LHC parcourt 11 000 fois par seconde les 27km
- 9600 aimants dont 1232 dipolaires supraconducteurs de 8.3T pour courber la trajectoire des protons
- Le plus grand réfrigérateur du monde: 27 km à une température inférieure à celle de l'espace intersidéral. 100 t d'hélium superfluide à $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Le vide presque parfait: pression 10x plus faible que sur la Lune
- Au niveau de la collision, des températures un milliard de fois plus élevées qu'au coeur du Soleil
- Puissance consommée par le LHC: $\sim 120\text{ MW}$

Energie des protons

En 2012, l'énergie des protons dans chaque faisceau était de 3.5 TeV (~7 TeV en 2014), ce qui conduit à des collisions avec 7 TeV (14 TeV) d'énergie disponible.

eV: énergie qu'acquiert un électron accéléré par une d.d.p. de 1 V
 $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joule}$

Energie d'un proton dans le faisceau: 3.5 TeV

- c'est l'énergie cinétique d'un moustique en vol !
- mais répartie sur un seul proton ...

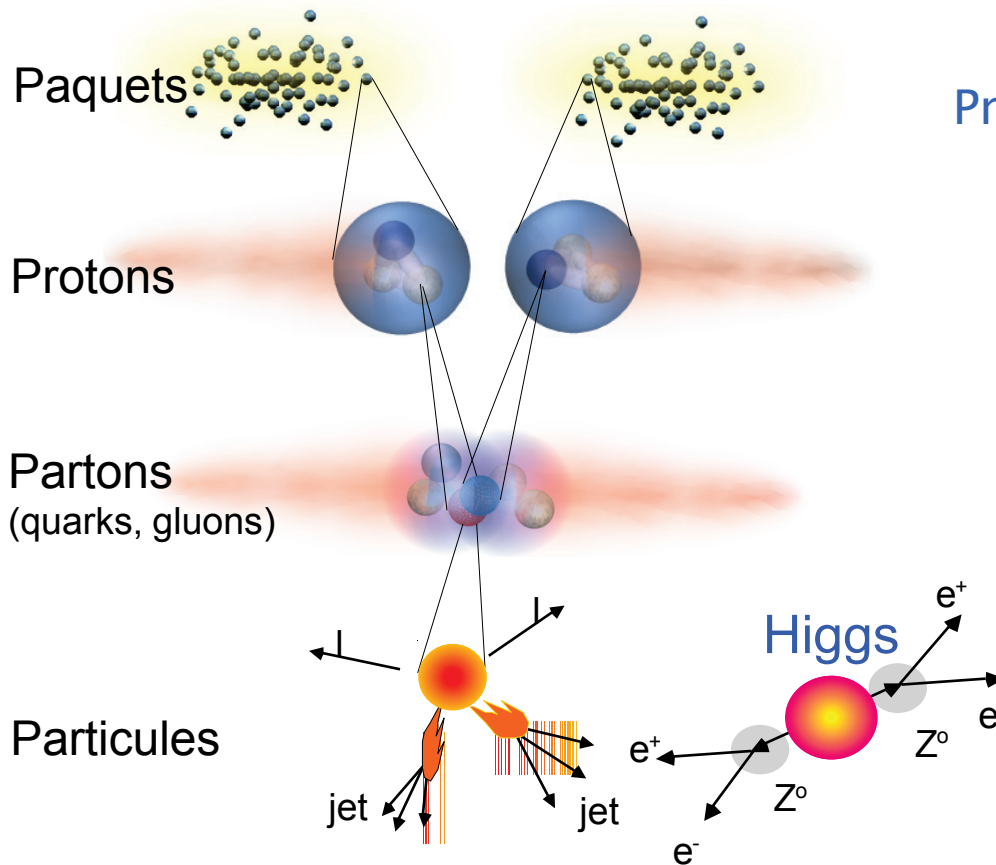
Energie totale d'un faisceau: $3.5 \text{ TeV} \times N_p = 350 \text{ MJ}$

- c'est l'énergie d'un TGV lancé à 150 km/h
- suffirait à faire fondre 500kg de cuivre

Collisions au LHC en 2012

Production du boson de Higgs:
phénomène très rare !!

Taux de production $H \rightarrow \gamma\gamma$:
1 / 2,500,000,000,000



Proton – Proton 1308 + 1308 paquets

Protons par paquet: $\sim 10^{11}$

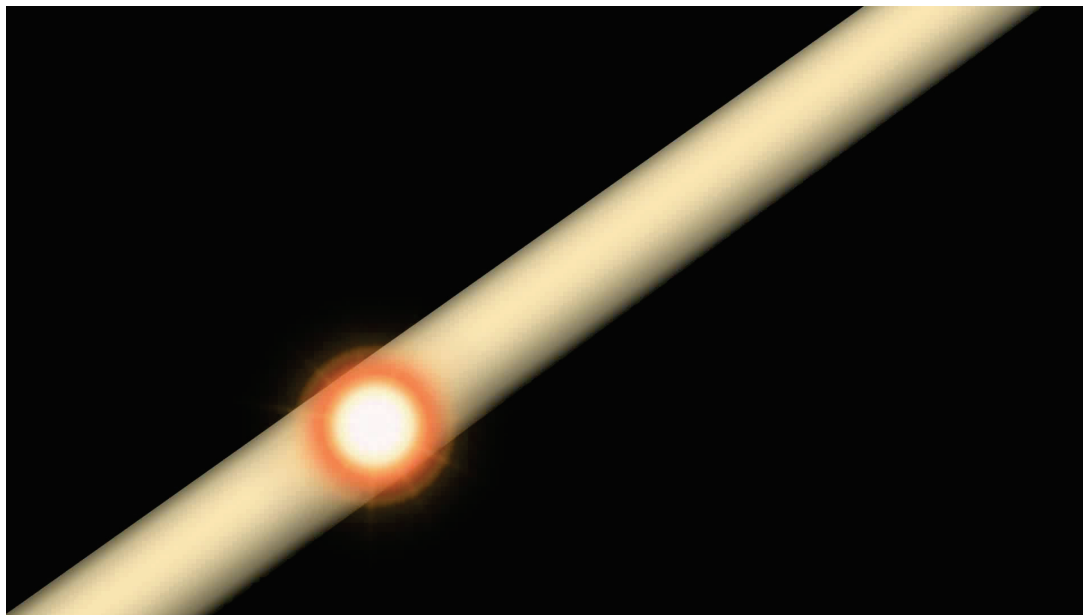
Energie des faisceaux: 4 + 4 TeV

Croisements de paquets: environ
15 millions de fois par seconde !

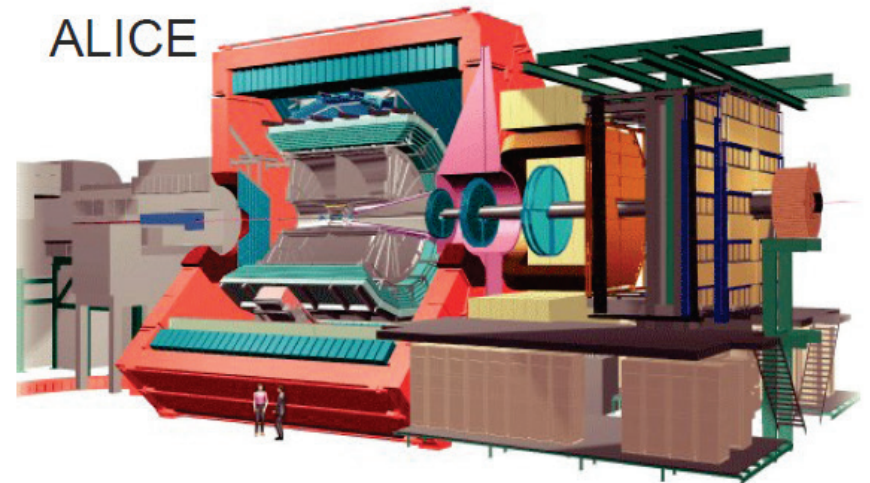
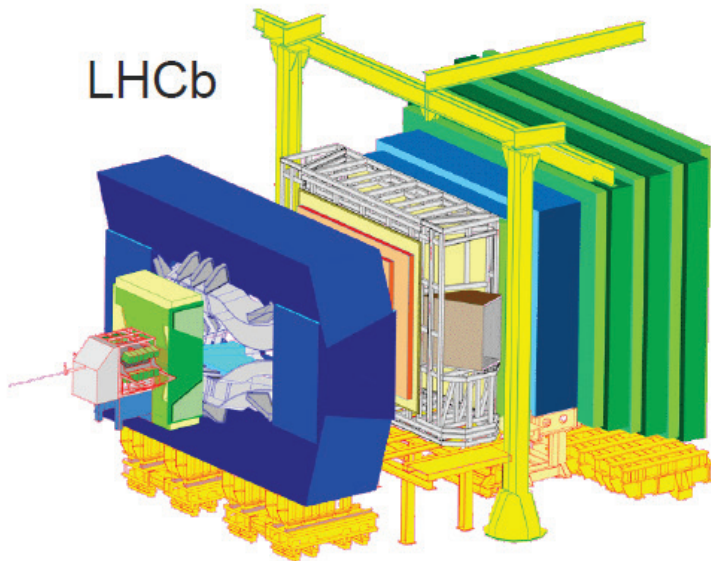
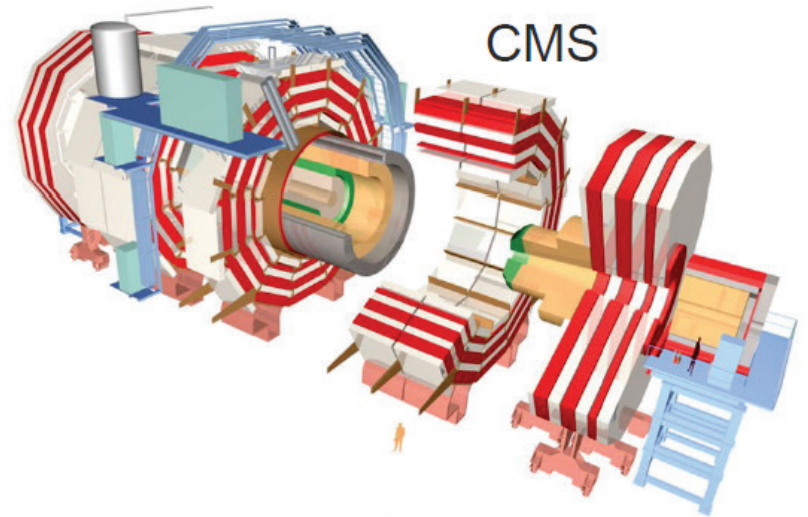
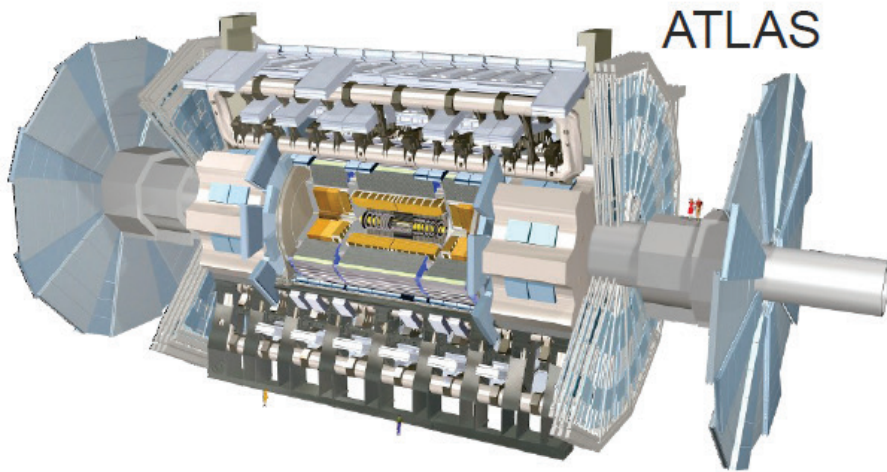
Collisions de protons: environ
600 millions par seconde !!

Comment observe-t-on de nouvelles particules ?

- Les particules produites dans les accélérateurs vivent en général très peu de temps: elles se désintègrent presque immédiatement en particules de matière ordinaire ($\sim$ stables).
- Ainsi, on ne verra donc pas directement le boson de Higgs !!
- Par contre en mesurant très précisément ses produits de désintégration on peut vérifier qu'ils viennent de la désintégration d'un boson de Higgs. Mais beaucoup d'autres phénomènes peuvent jouer les imposteurs !



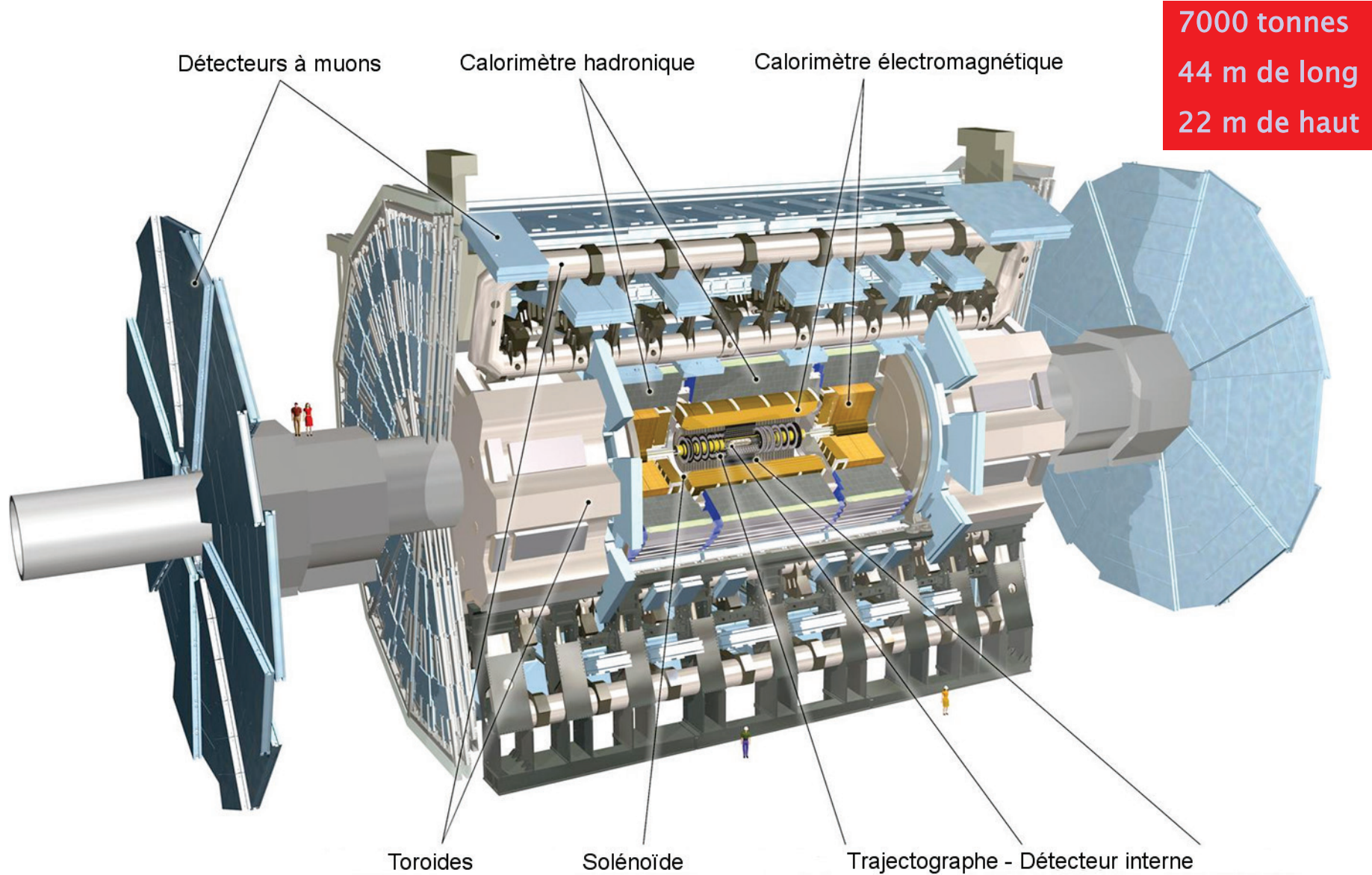
Des "caméras" géantes



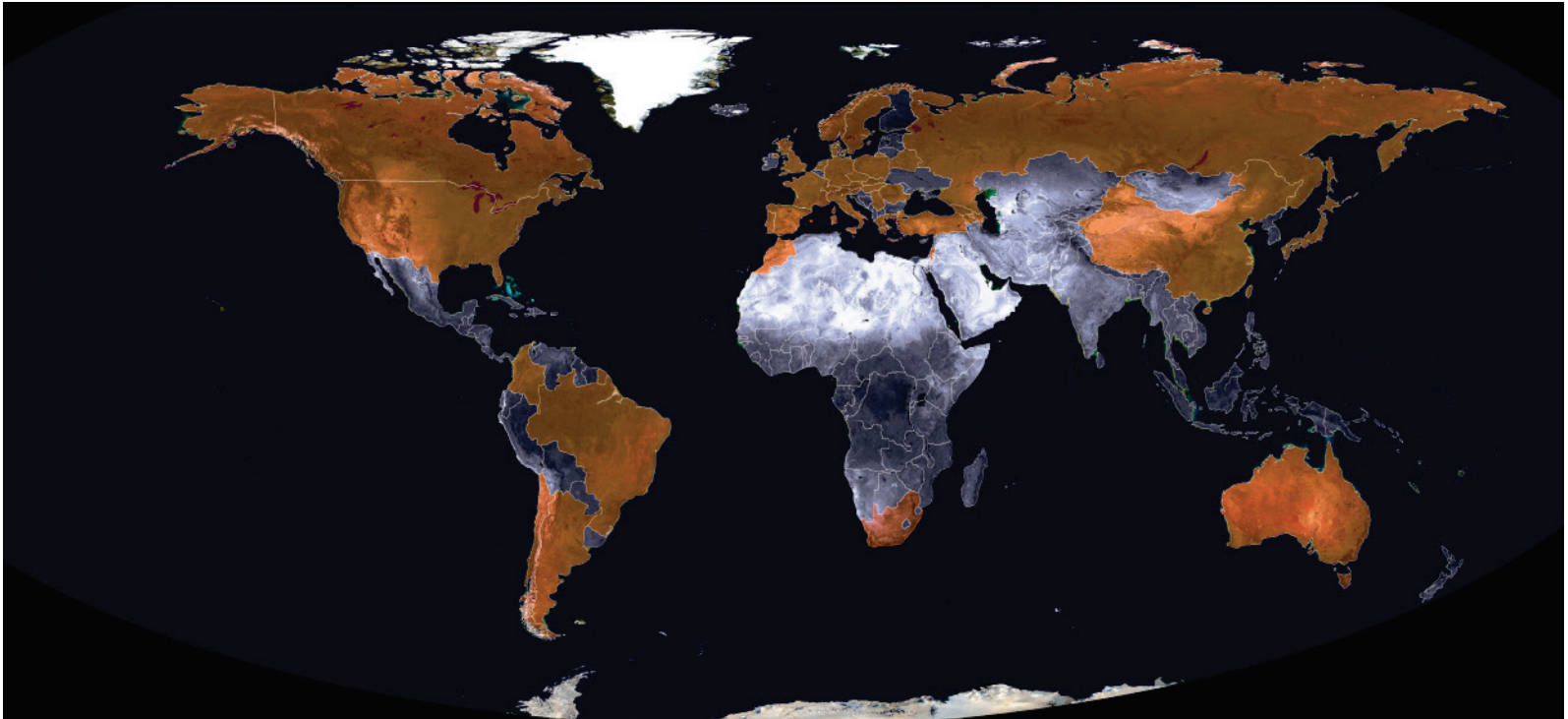
Au coeur d'ATLAS



ATLAS, un détecteur géant



ATLAS, une collaboration mondiale

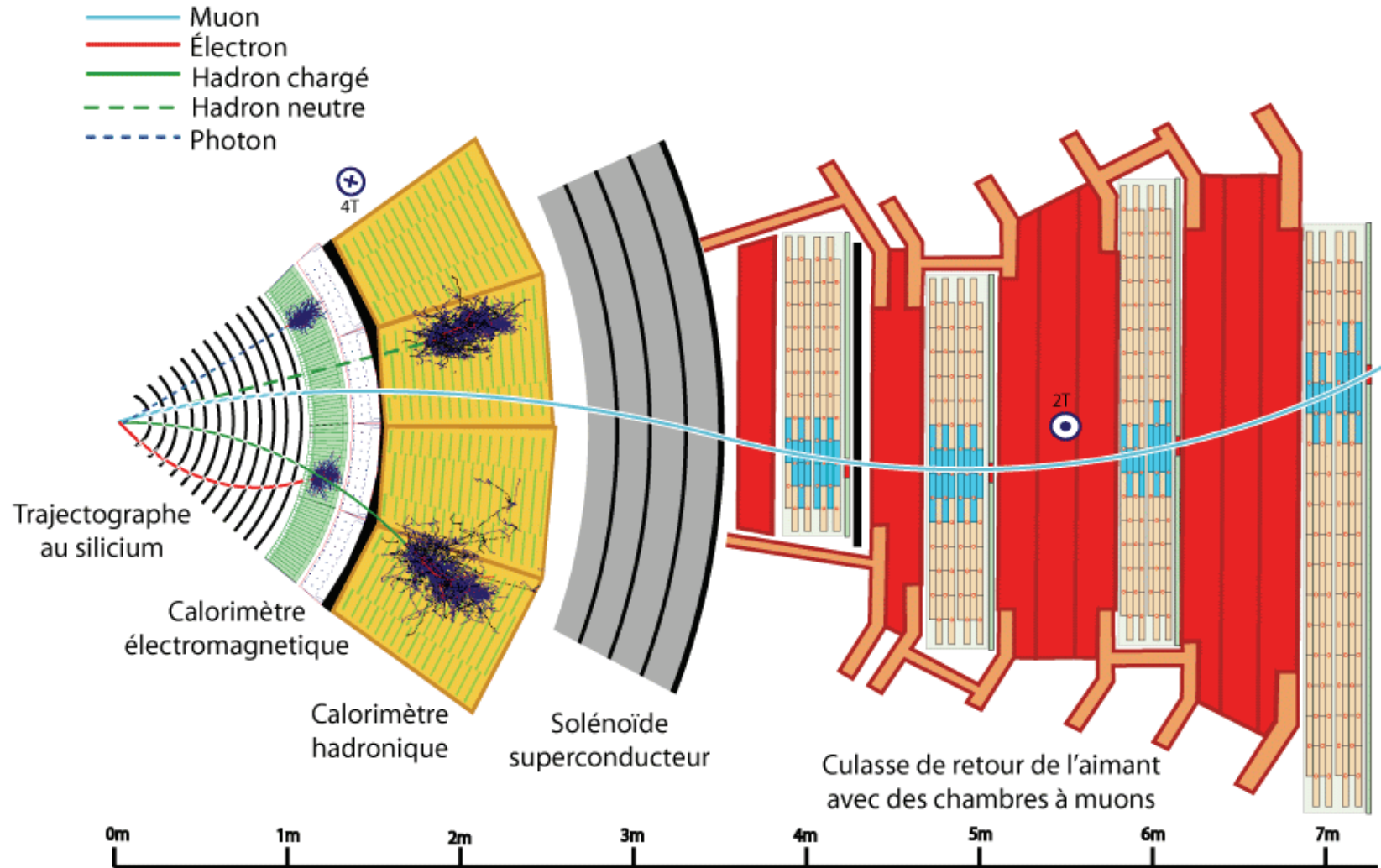


38 pays: Europe, Amérique du Nord, Russie, Chine, Japon, ...
174 universités et laboratoires
Environ 3000 physiciens (dont 1000 étudiants) !

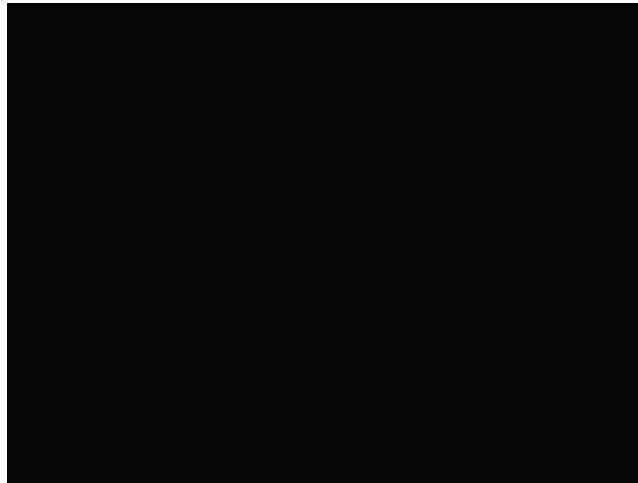
Contribution française: 6 laboratoires CNRS/IN2P3/Universités,
et 1 laboratoire CEA

➔ environ 400 personnes (physiciens, ingénieurs, étudiants)

Les éléments d'un détecteur



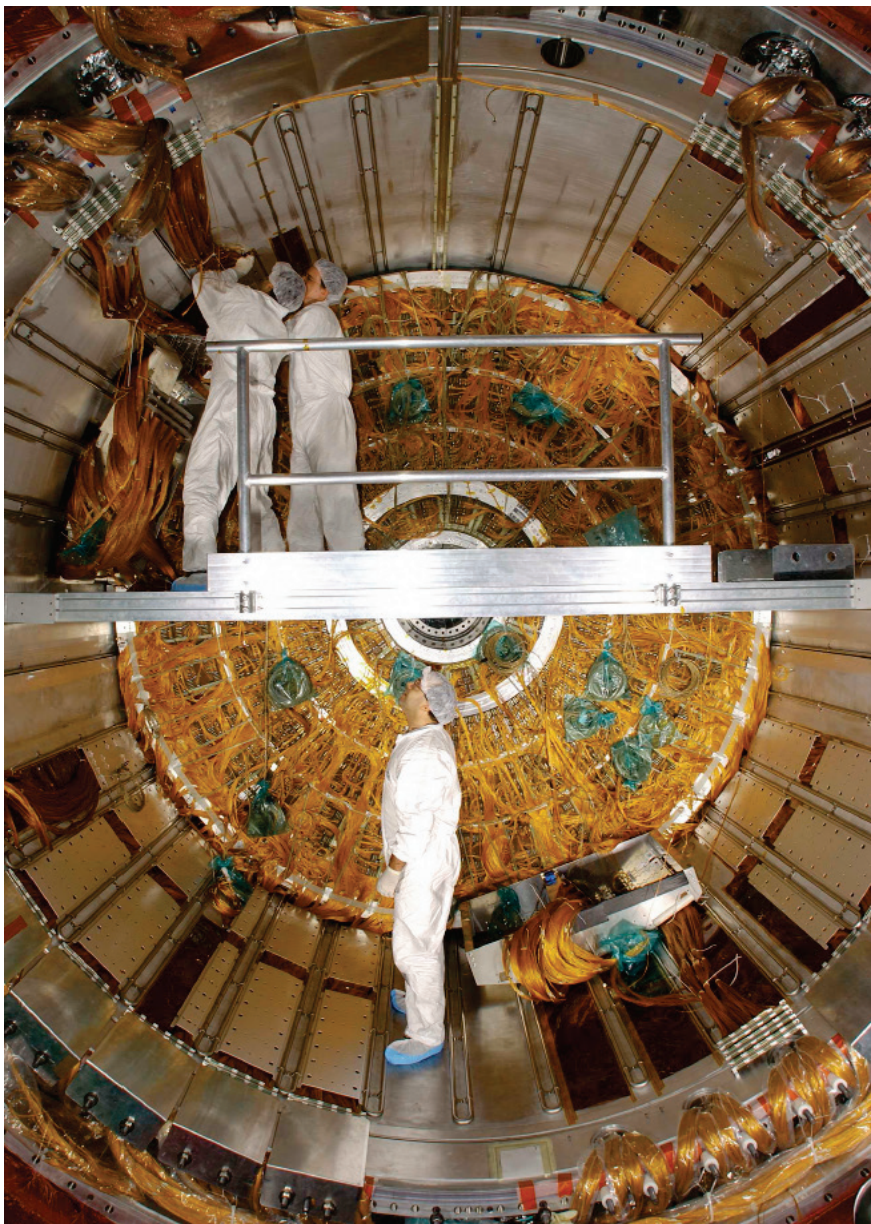
Identifier et mesurer les particules



Cryostat et détecteur à muons

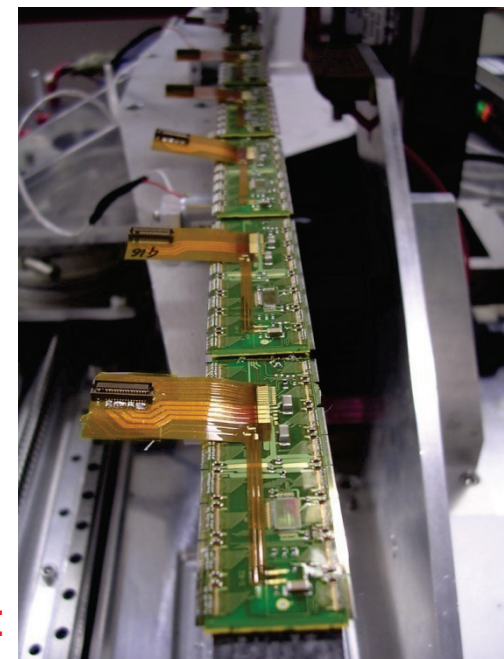


ATLAS: contributions du CPPM à la conception & construction

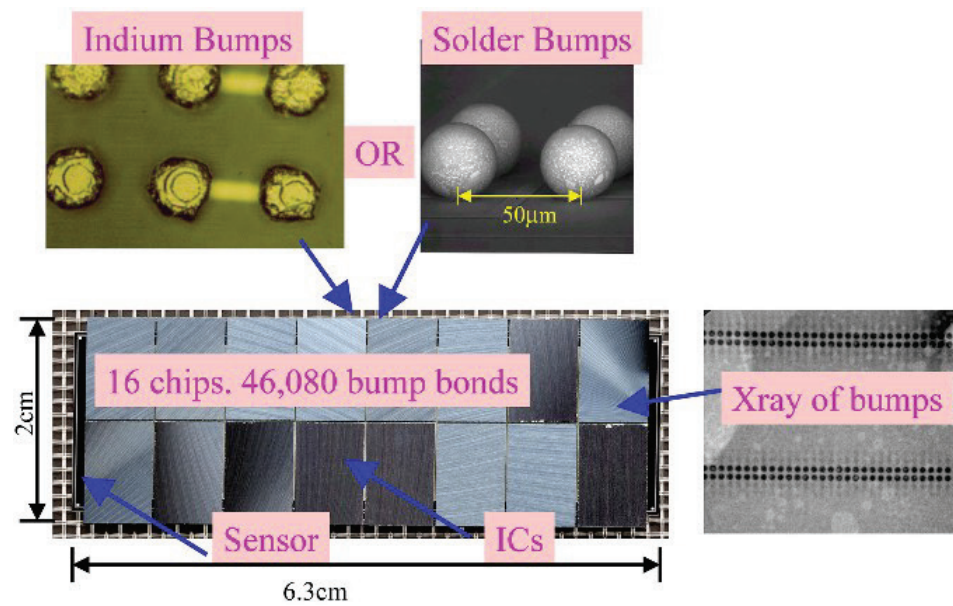


Calorimètre à argon liquide

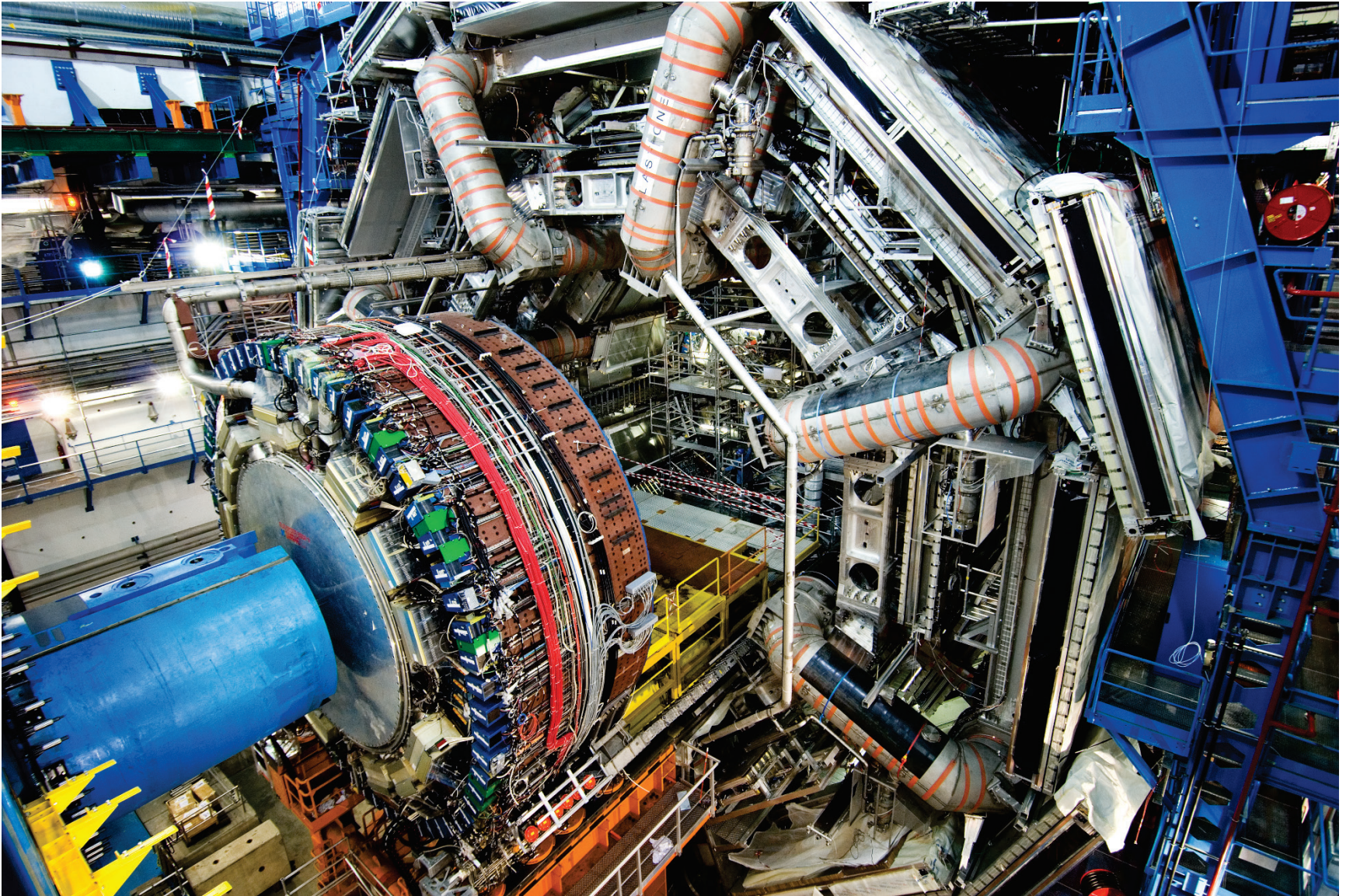
Système de déclenchement
(non-illustré)



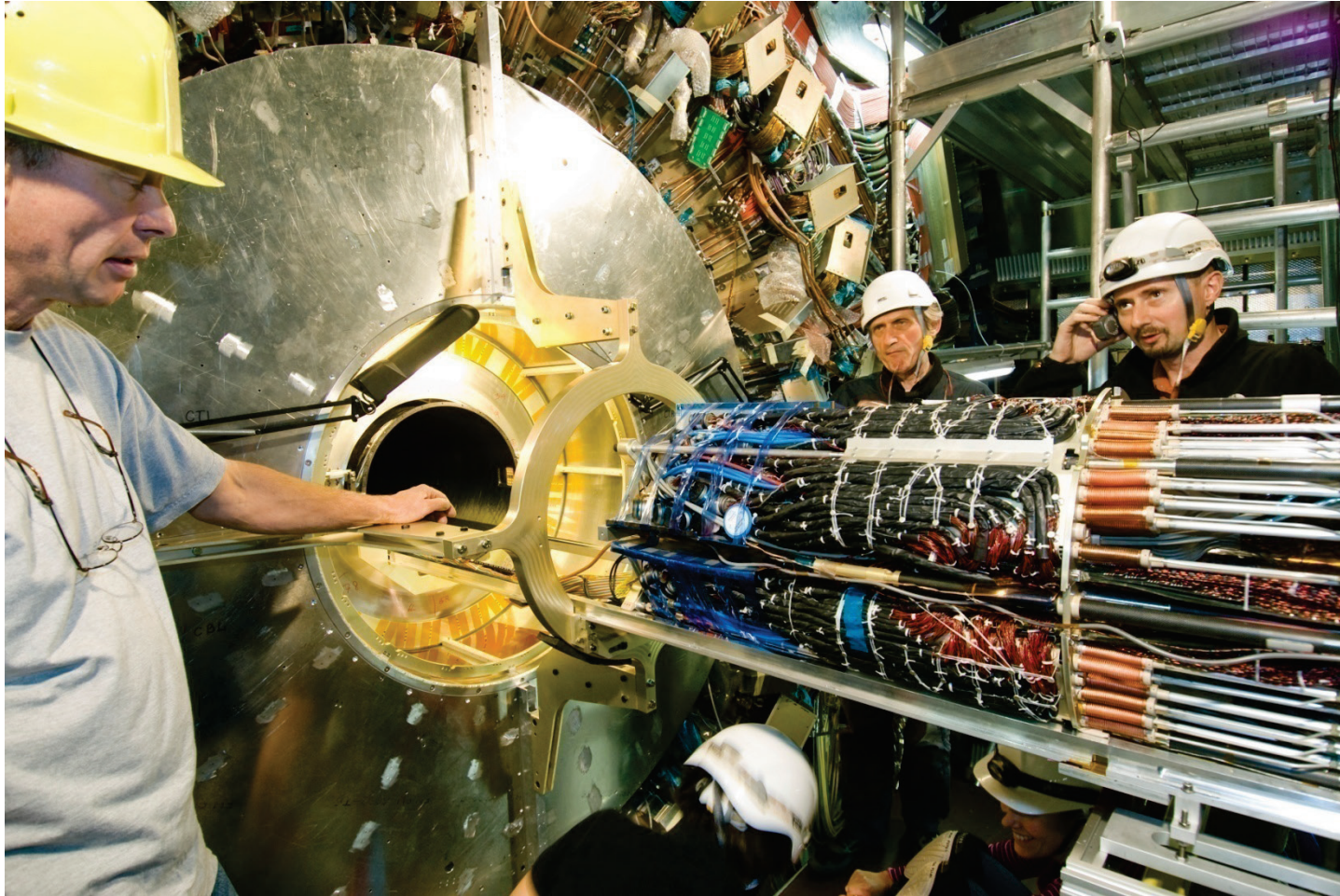
Détecteurs à pixels:



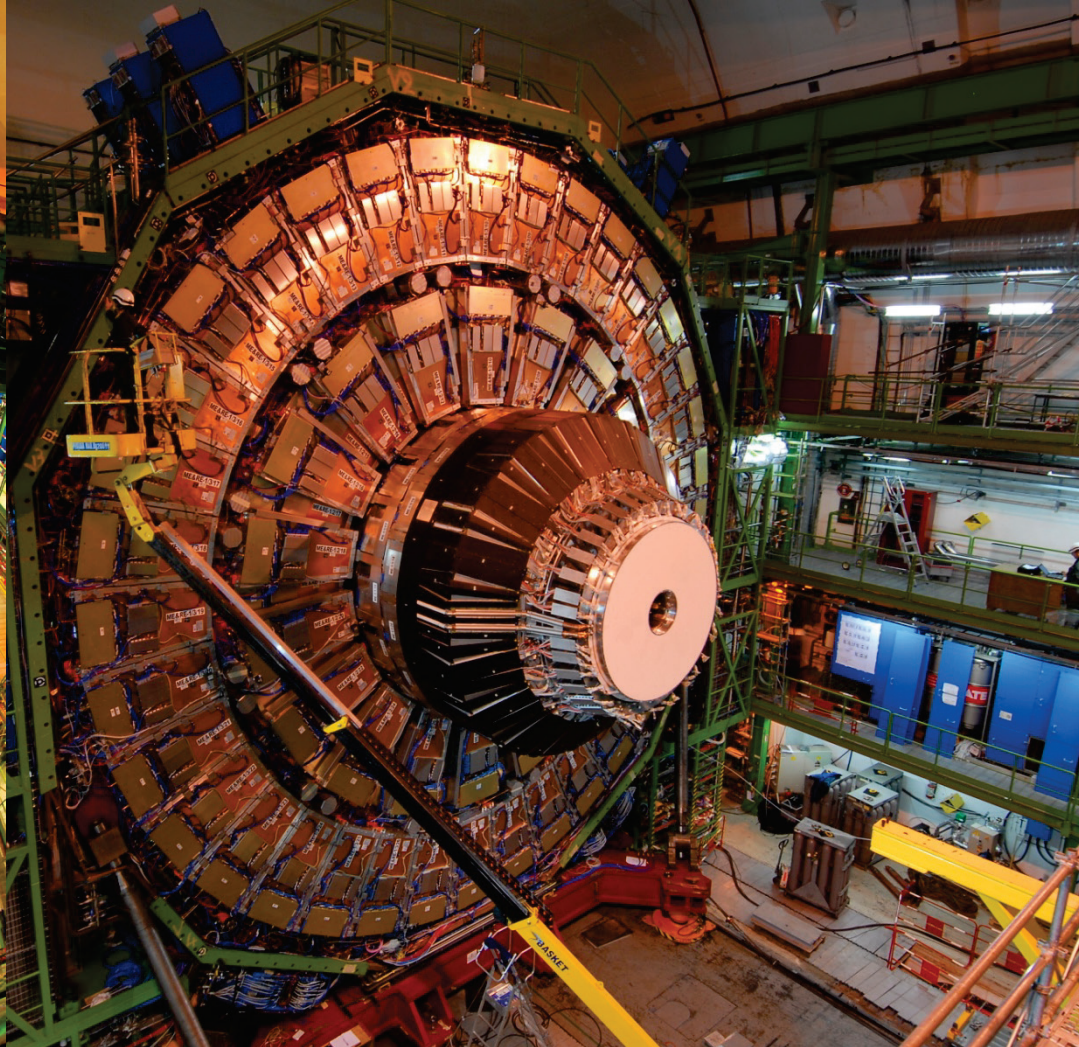
Extrémité ouverte d'ATLAS



Insertion des pixels



De l'autre côté de l'anneau...: CMS



20 novembre 2009: derniers préparatifs pour le redémarrage du LHC...

Salle de contrôle du LHC



Salle de contrôle d'ATLAS:
Fabiola Gianotti, porte-
parole de l'expérience
ATLAS

20 novembre 2009: un premier faisceau de protons arrive dans ATLAS



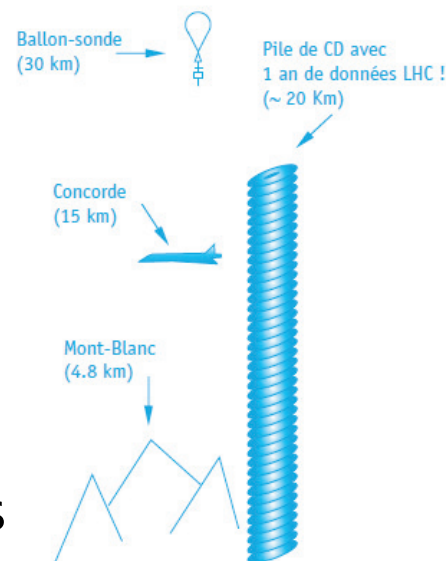
Le défi des données d'ATLAS

- Une avalanche de données:

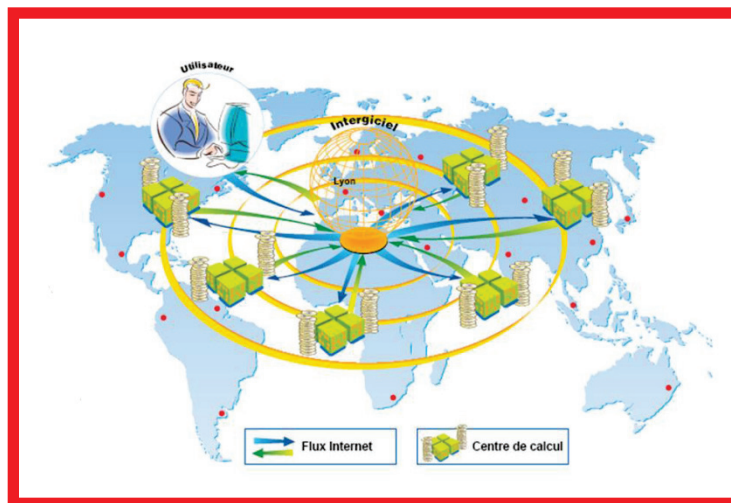
- 7 DVD par minute
- 20 Po par an !

- La solution: la grille de calcul

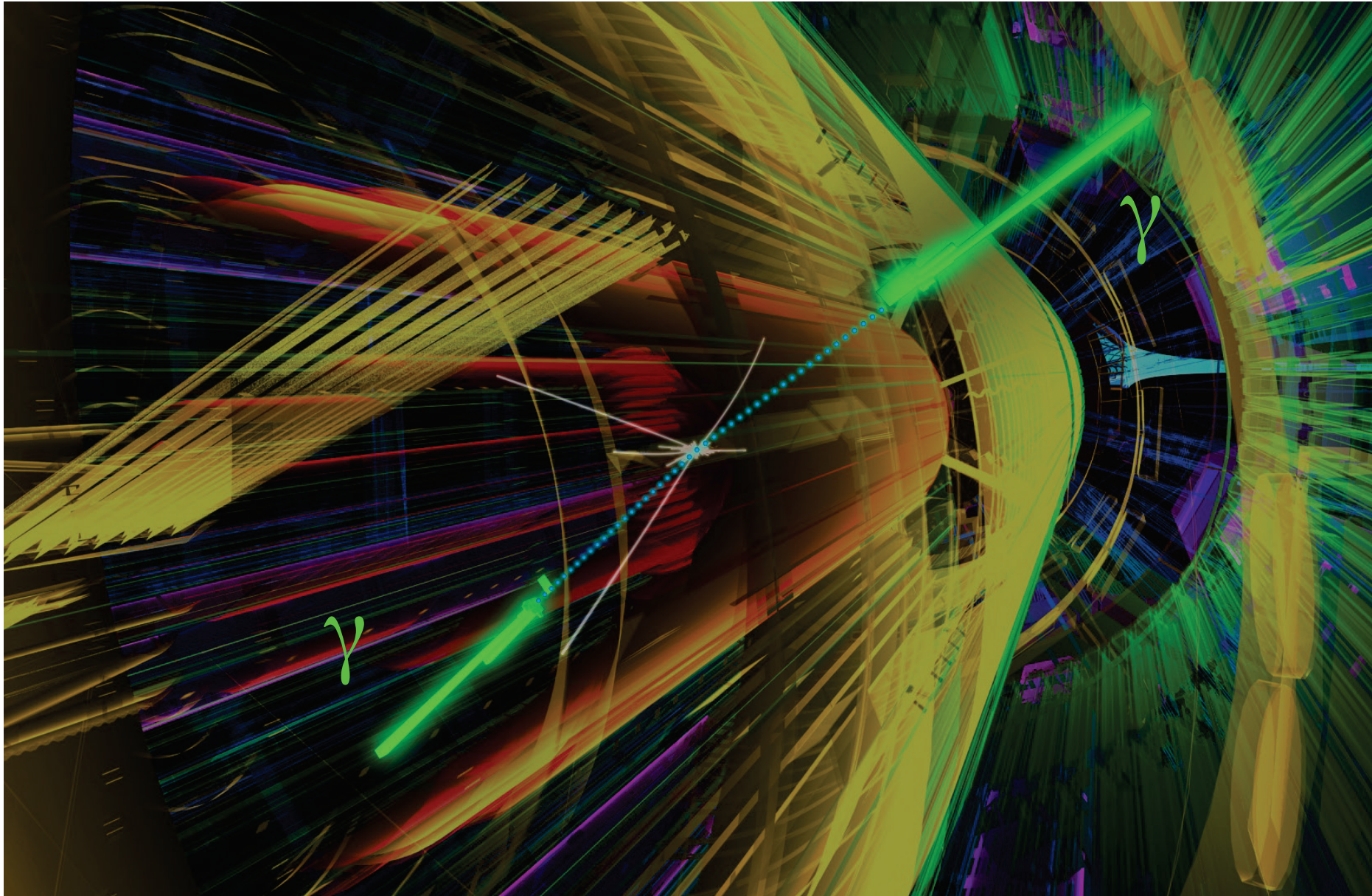
- mettre en réseau des millions d'ordinateurs dans le monde qui se partagent le travail d'analyse des données



- Après l'invention du World-Wide-Web, le CERN a développé la grille
 - permet aux physiciens d'analyser les données pour trouver des candidats H par exemple....



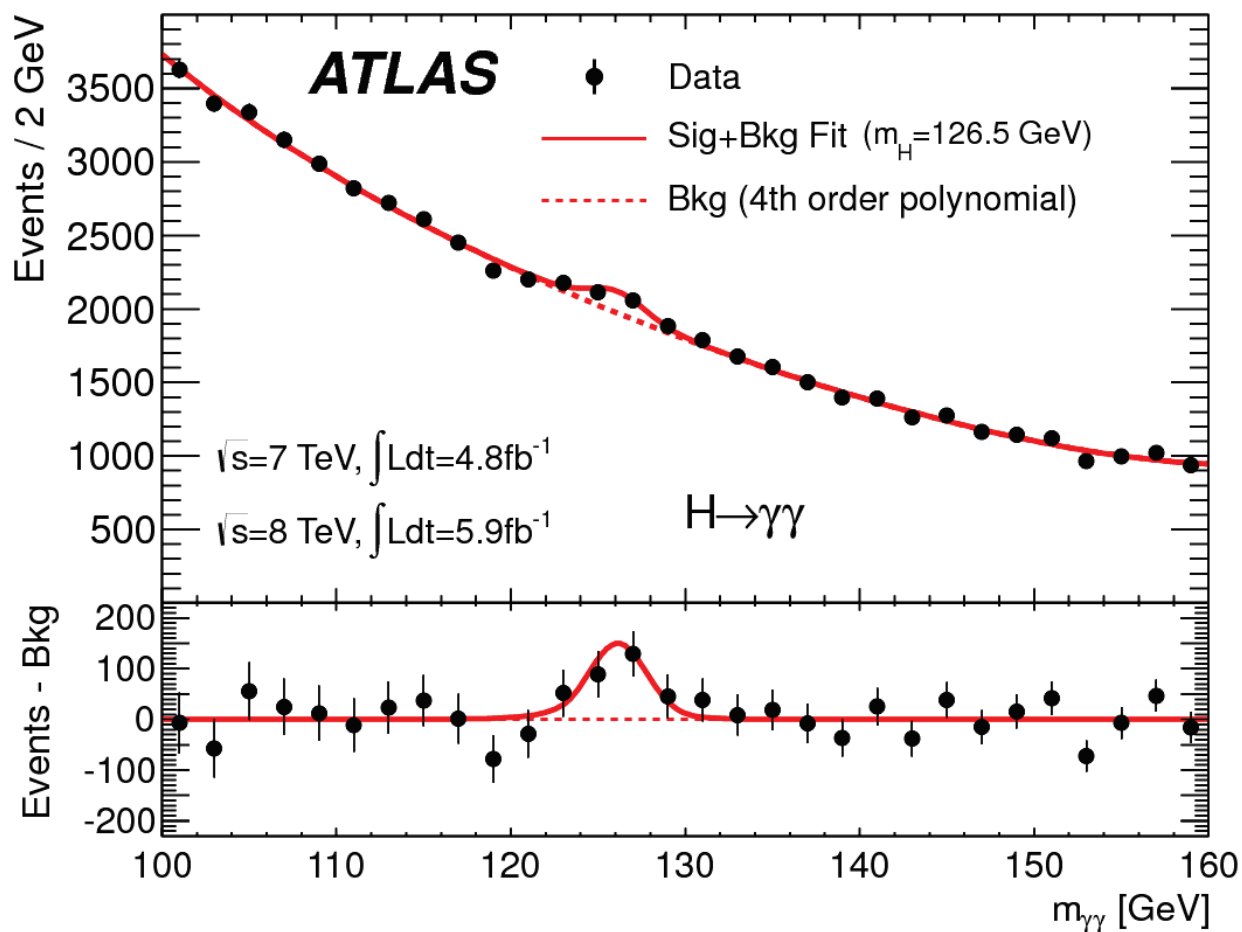
Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



Excès dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

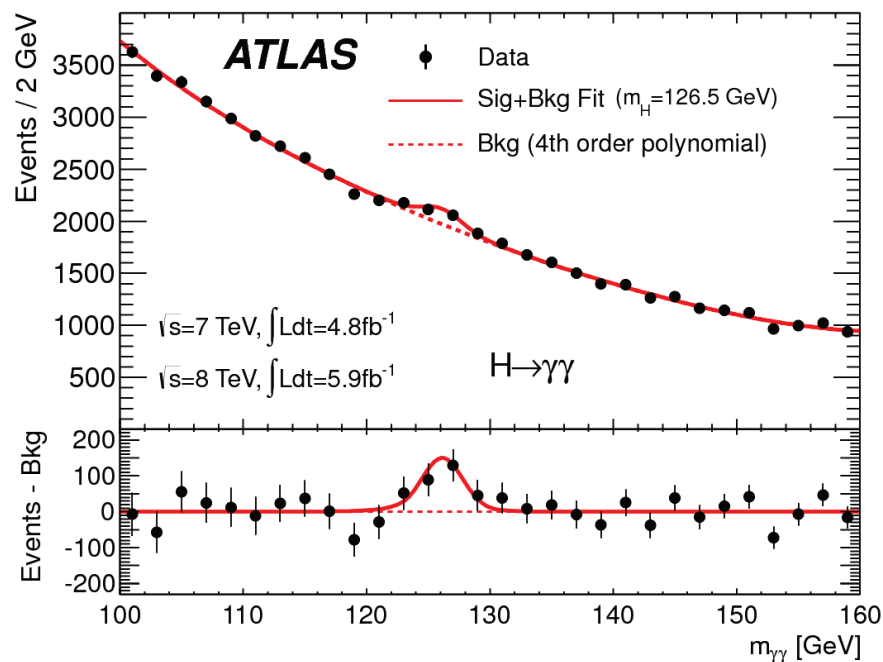
$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos\theta)}$$

juillet 2012

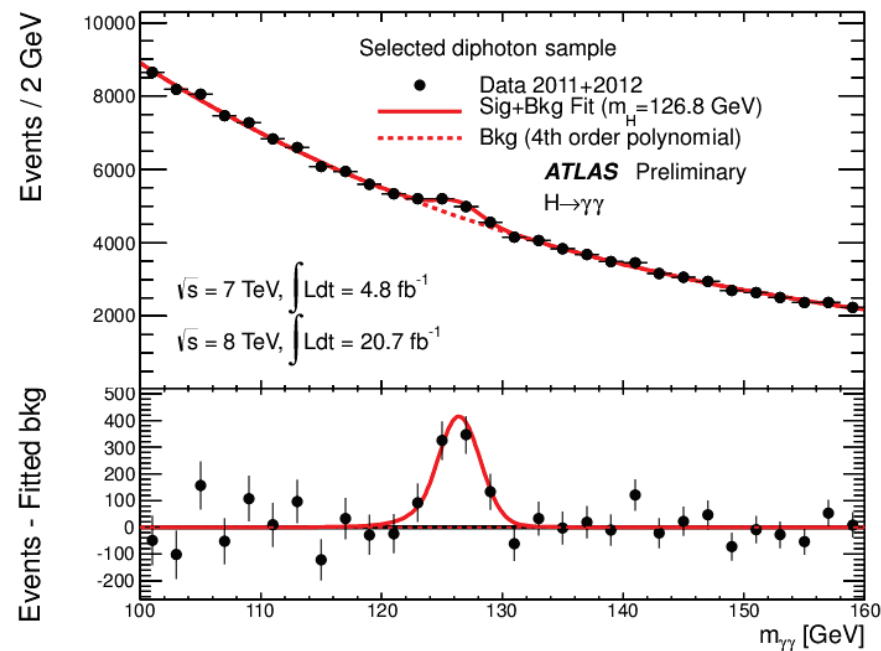


Excès dans le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

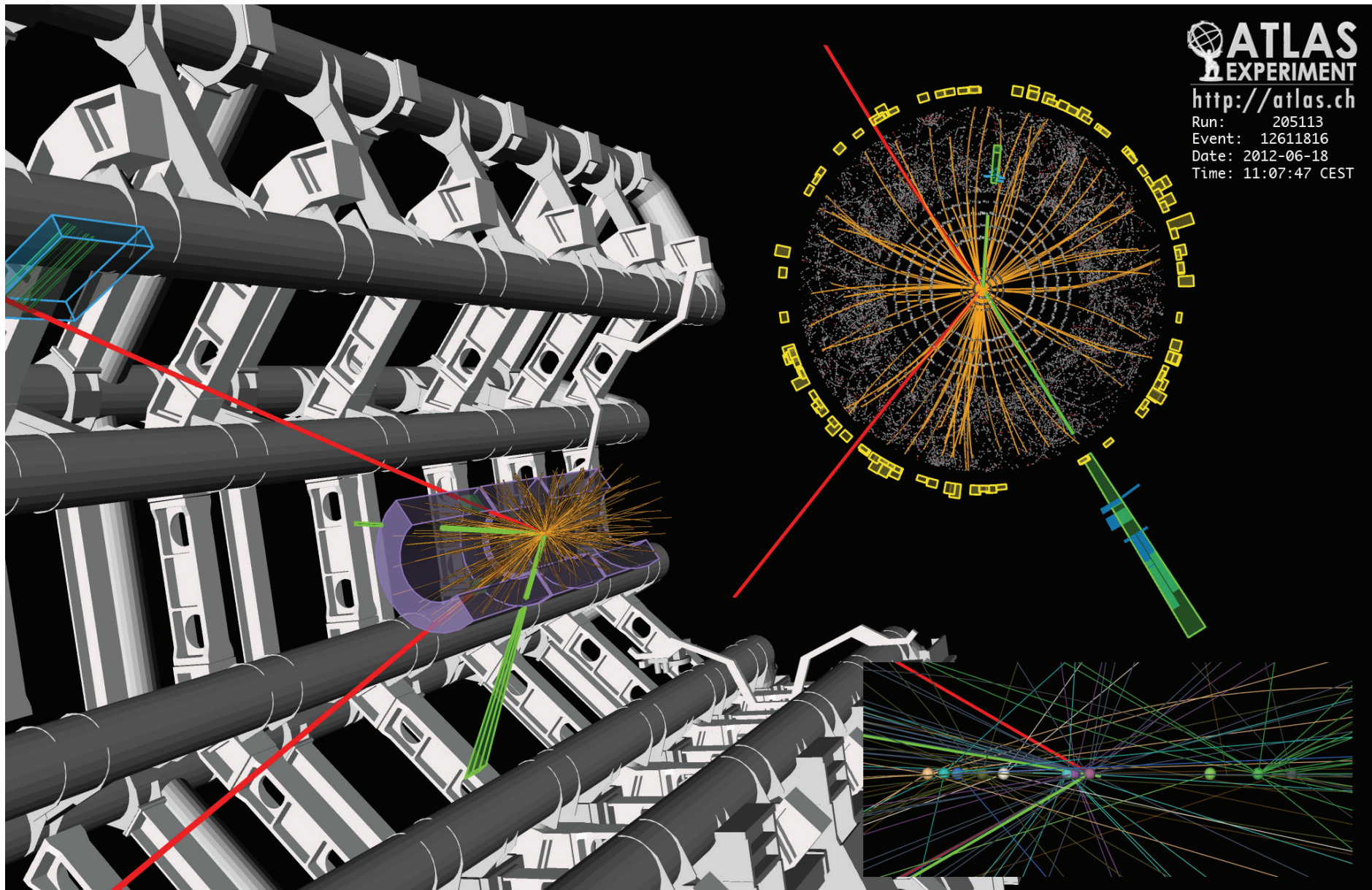
4 juillet 2012



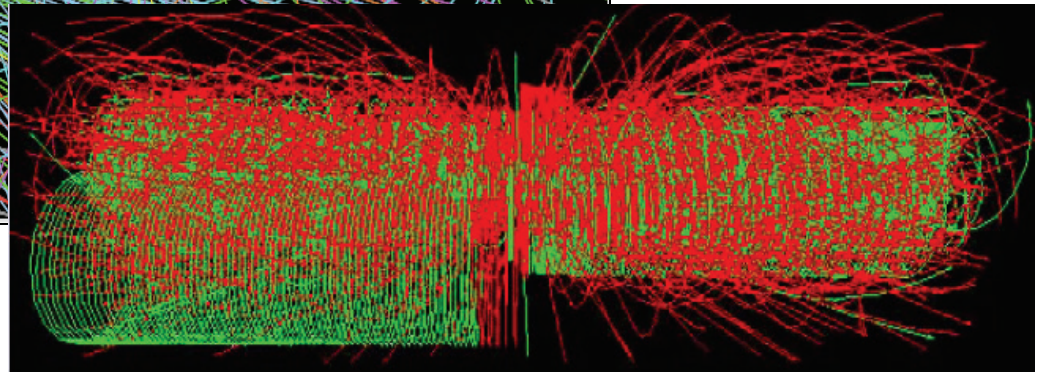
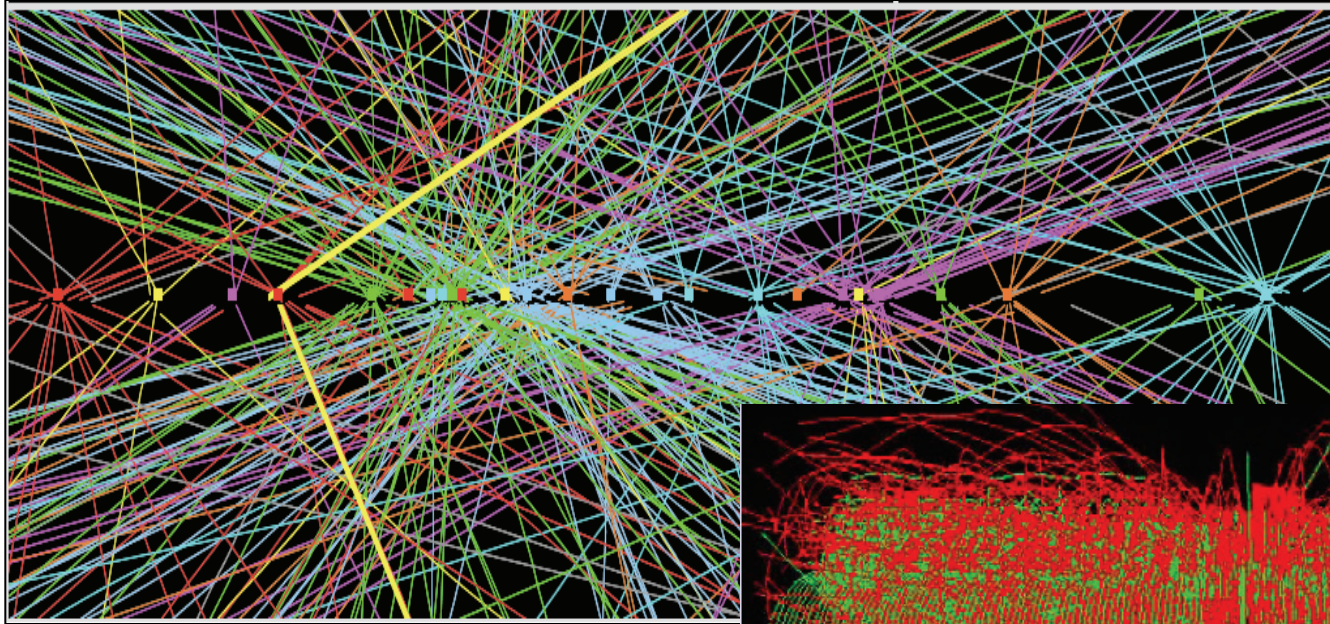
6 mars 2013



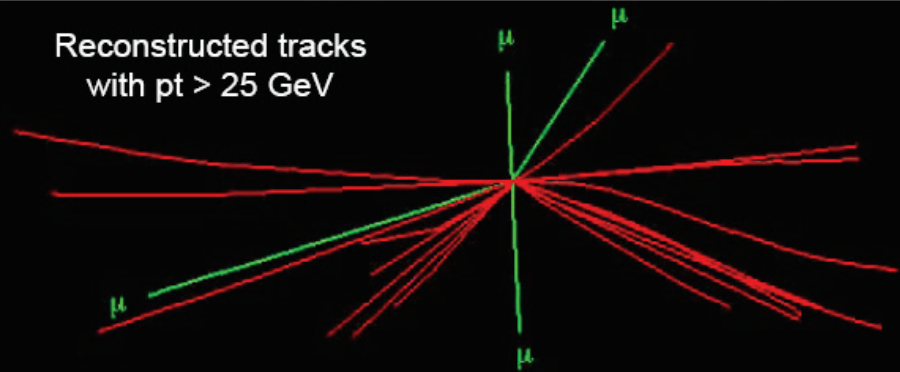
Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



En fait c'est un peu moins net...

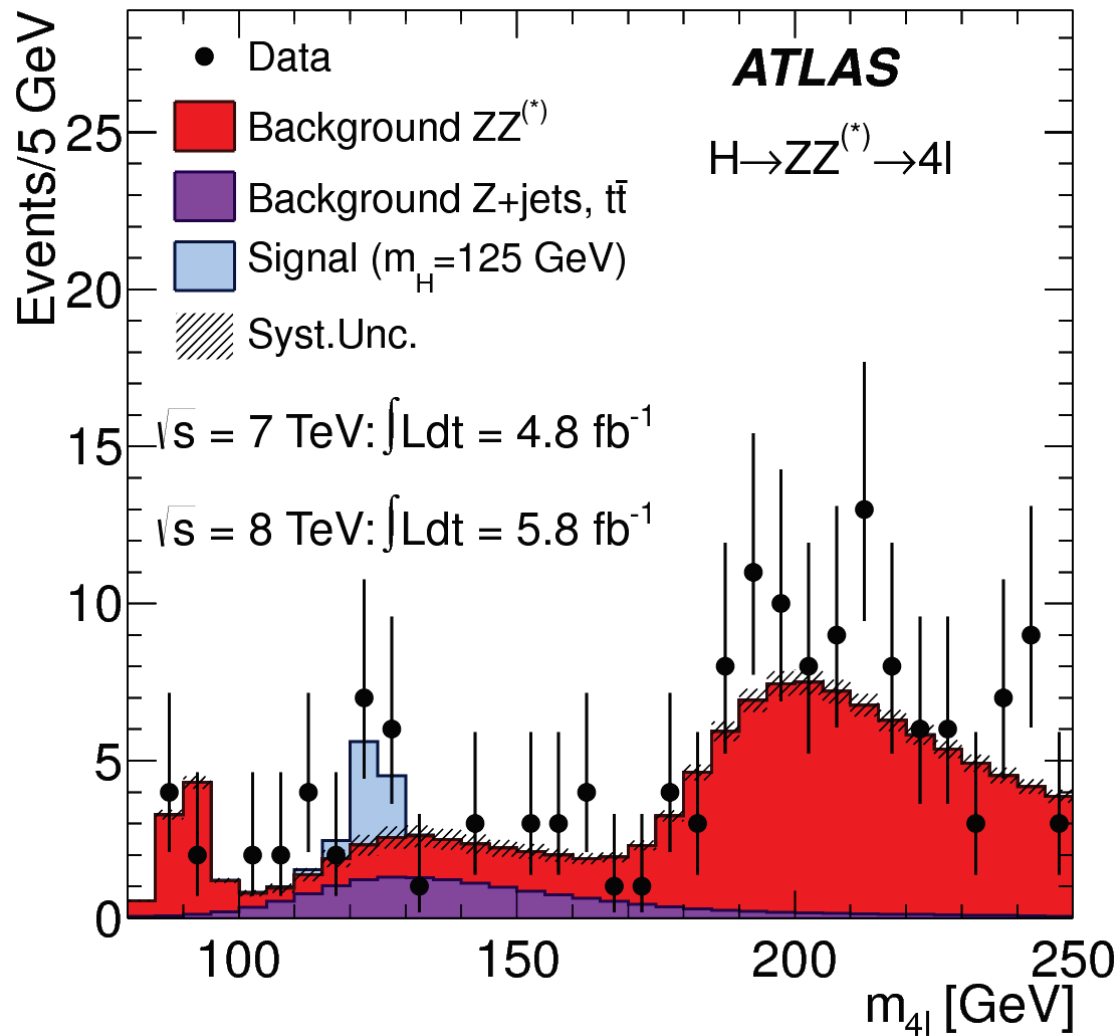


Reconstructed tracks
with $p_t > 25$ GeV



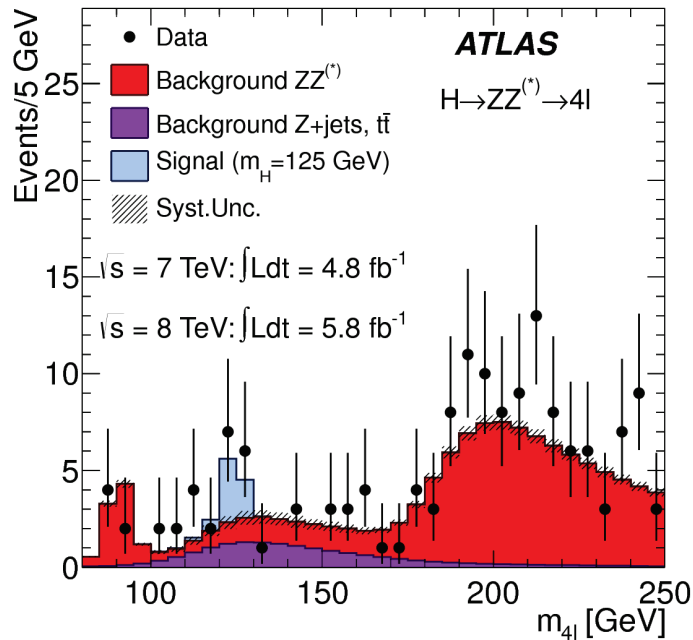
Excès dans le canal $ZZ^* \rightarrow 4l$

juillet 2012

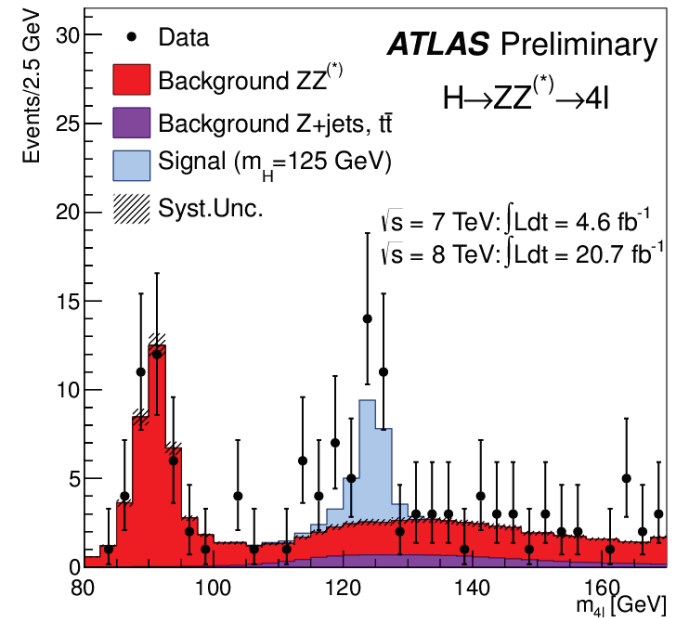


Excès dans le canal $ZZ^* \rightarrow 4l$

4 juillet 2012



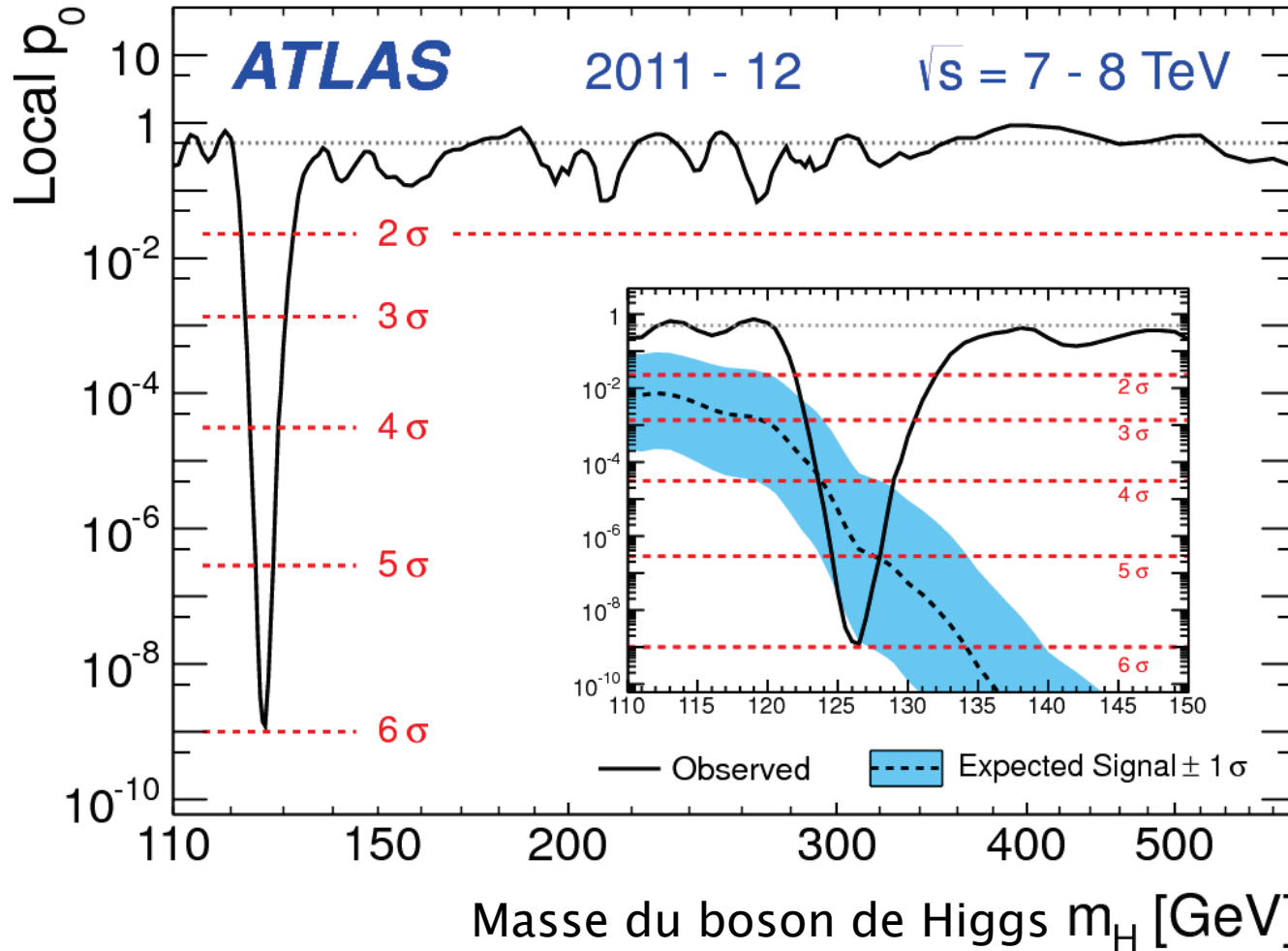
6 mars 2013



Pertinence statistique

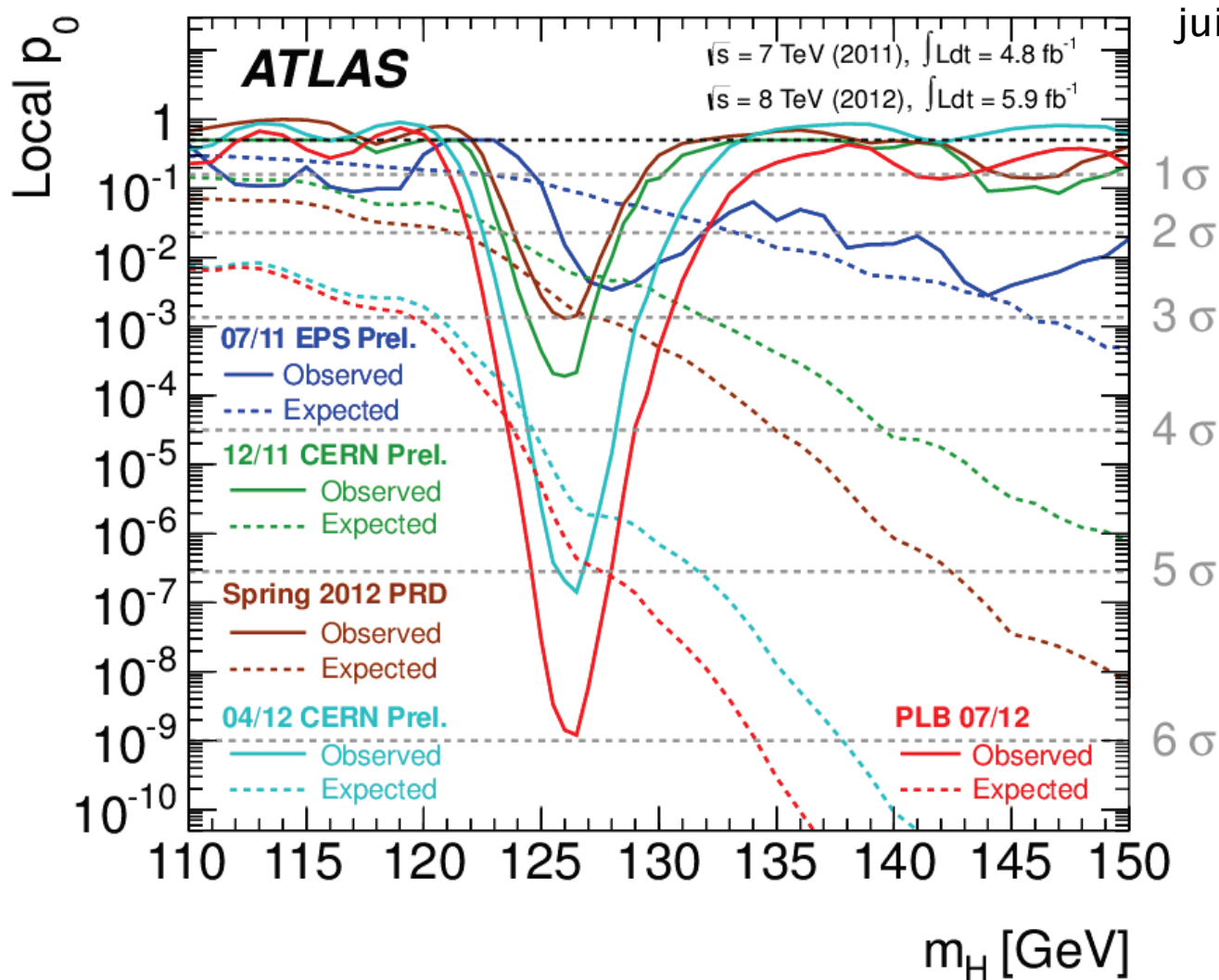
juillet 2012

Probabilité de fluctuation du bruit de fond



mars 2013: 7σ pour $H \rightarrow \gamma\gamma$ seul, 6σ pour $H \rightarrow 4l$ seul

Evolution de p_0 dans le temps



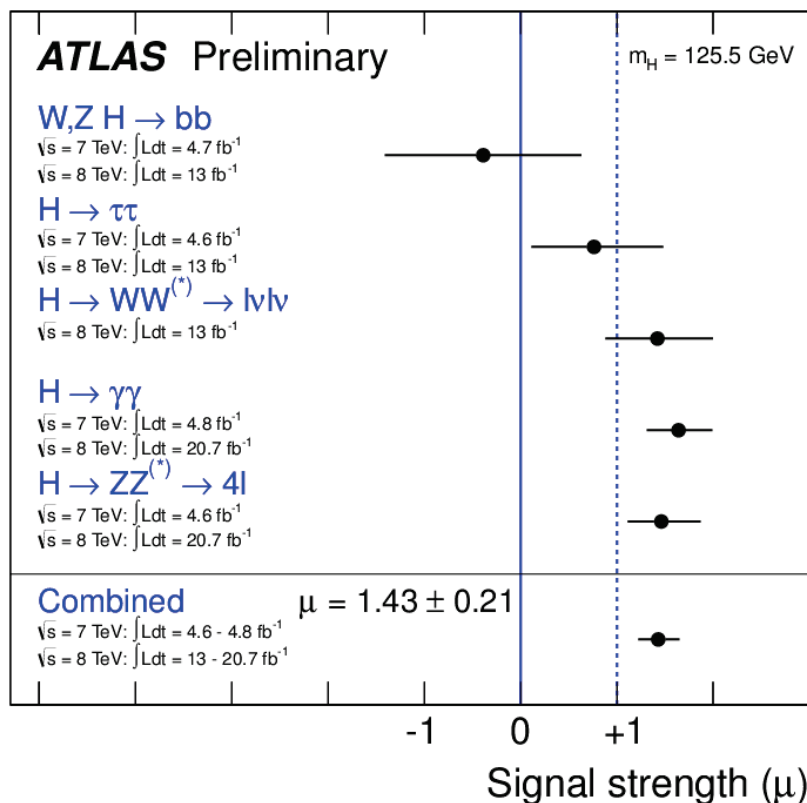
juillet 2012

Résultats similaires observés par CMS !!!

Est-ce bien le boson de Higgs du MS ?

Le boson se désintègre de différentes façons, dans le cadre du MS on peut calculer la probabilité d'occurrence de chacun des modes

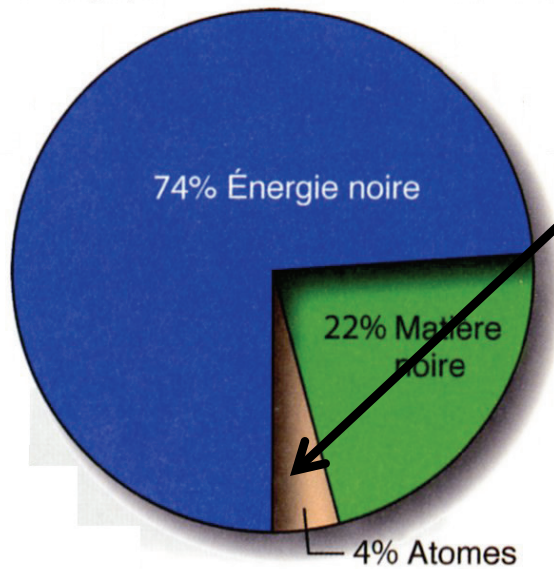
→ il faut vérifier que notre boson est compatible avec le calcul



- Quelles sont ses autres propriétés ?
- Y a-t-il d'autres bosons de Higgs ?
- Ce boson est-il vraiment une particule élémentaire ?
- Sa masse est-elle compatible avec un état stable du champ de Higgs ?

→ études en cours avec les données, mais plus de données nécessaires encore pour la plupart des questions !

De la place pour l'inconnu ?



Ce dont je viens de vous parler !!!

Pourra t-on observer au LHC des particules de matière noire comme celles prédites par la supersymétrie ?

Asymétrie matière/antimatière ?

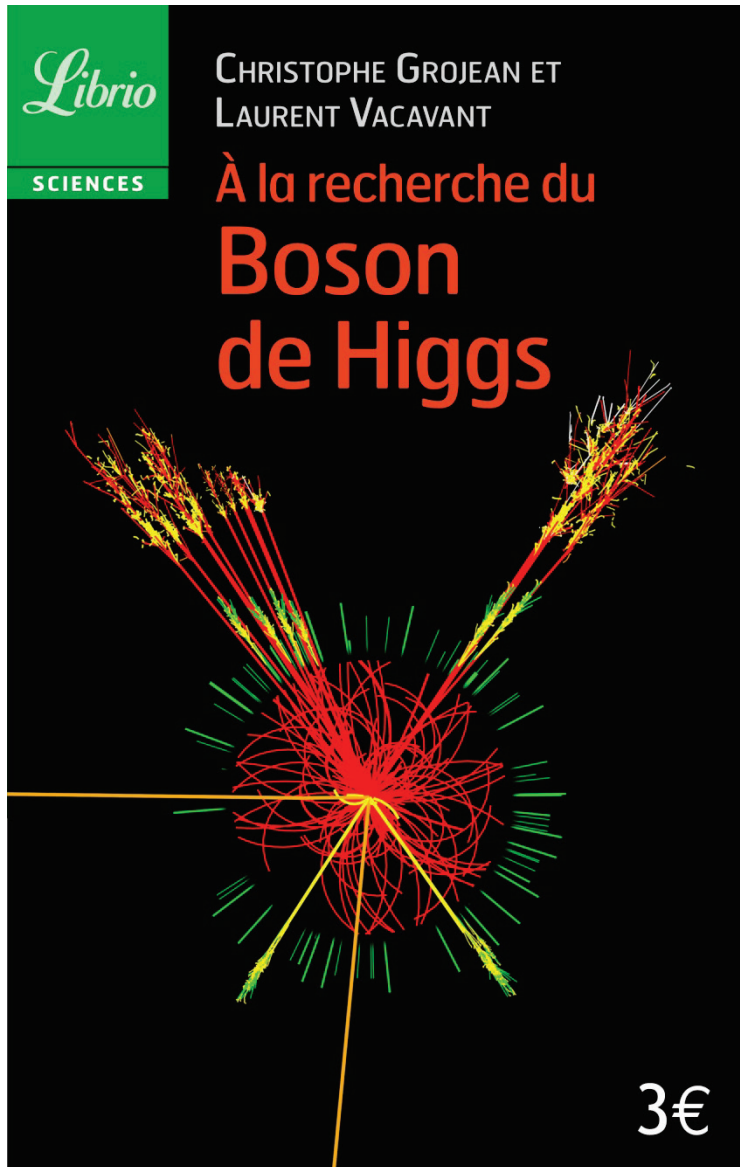
Unification ?

Surprises ?!

Le LHC est arrêté depuis le 14 février 2013 pour ~2 ans de travaux. Il redémarrera à une énergie de ~14 TeV, a priori jusqu'en 2030... Patience....!

En attendant nous analysons nos 10 Po de données (300 M de DVD)
Déjà des réflexions bien avancées pour une future machine... ☺

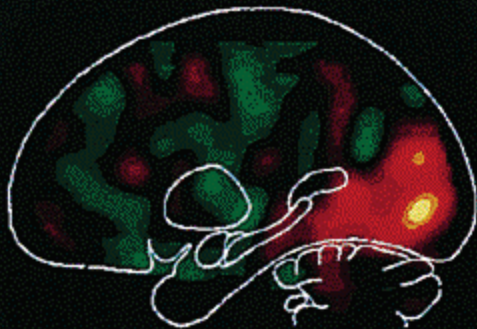
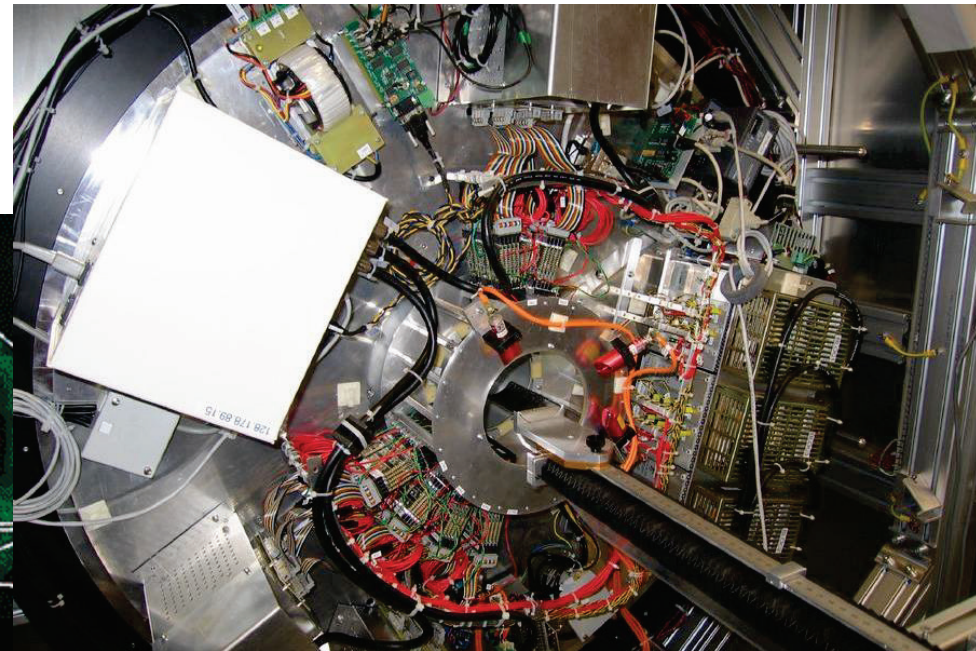
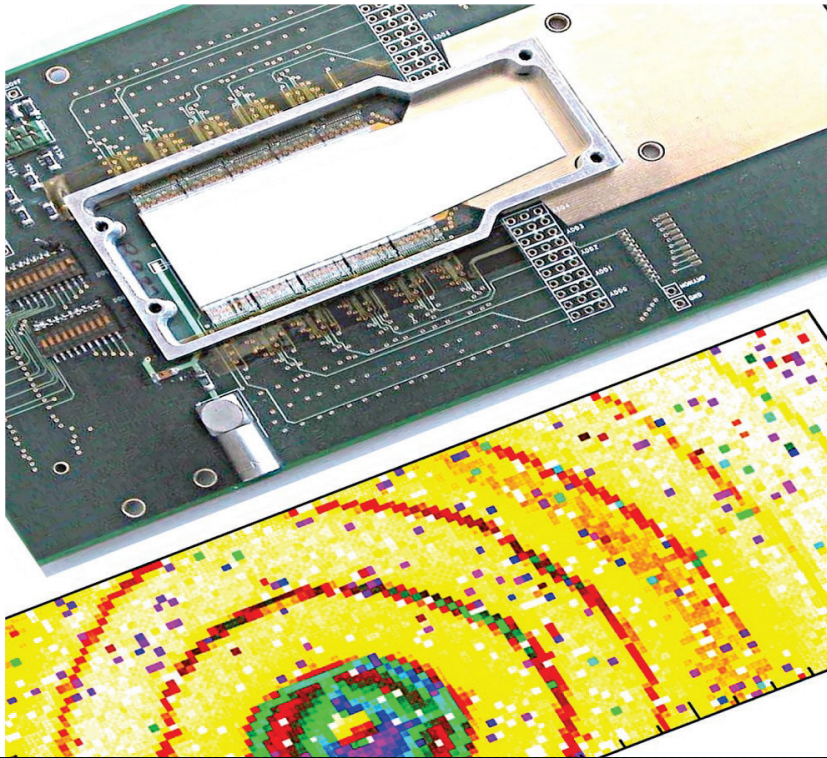
Plus d'information...



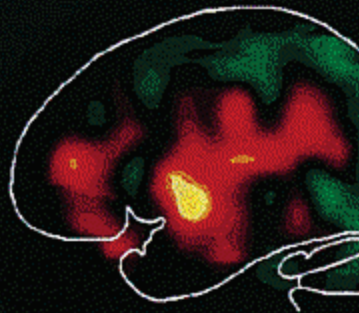
Le 10 avril en librairie !

FIN

Pixels et imagerie médicale au CPPM



**SEEING
WORDS**



**HEARING
WORDS**

Coût du LHC

- Coût du LHC: ~3 milliards d'euros, financés sur le budget CERN (i.e. répartis sur ≥ 20 pays et sur 15 ans)
- Budget du CERN: 800 M€ / an
- Fraction payée par la France: 15%
- Retour sur investissement en France: $\sim \times 3$

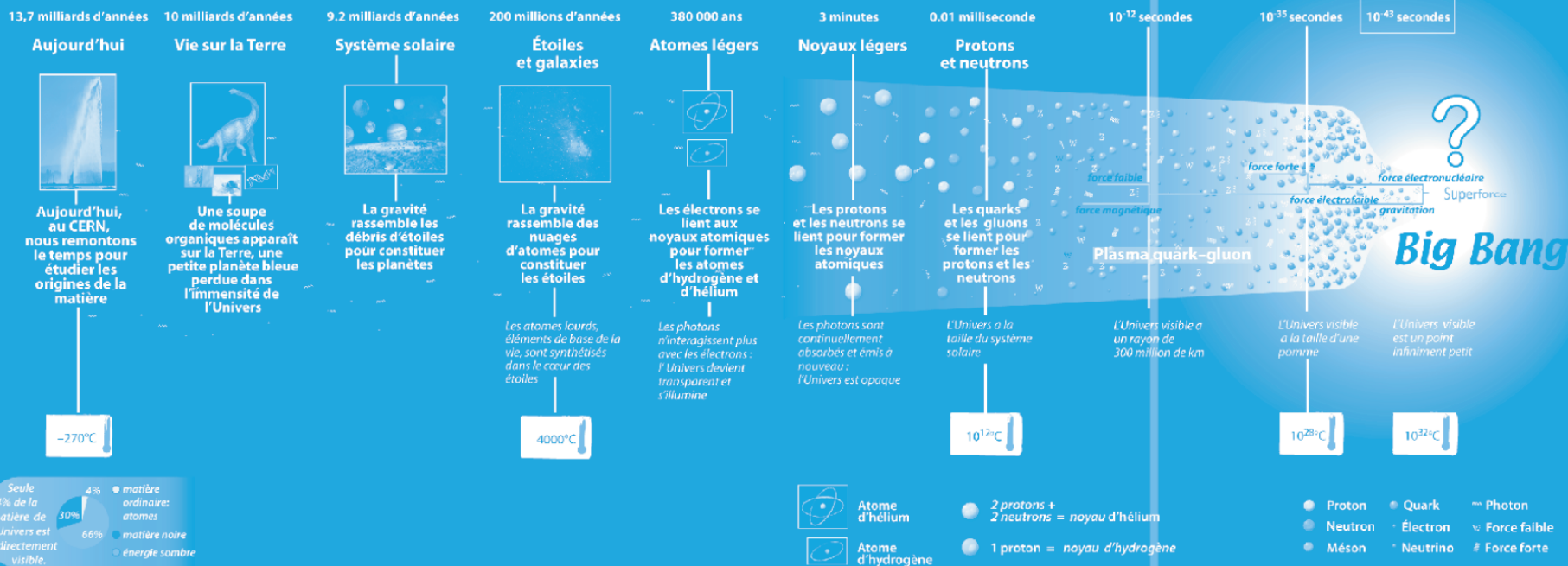
Une machine à remonter le temps ?!

LHC



Crédit: CERN

Évolution de l'Univers



temps

Collision classique ou quantique

Taille quantique d'un objet de masse m :

$$\lambda = \frac{h}{mc}$$

h = constante de Planck = $6.6 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2.\text{kg/s}$
 c = vitesse de la lumière dans le vide $\approx 3000000 \text{ km/s}$

$$\rightarrow \lambda \text{ (m)} \approx \frac{2.2 \cdot 10^{-42}}{m \text{ (kg)}}$$

Collision de fraises:



$m \sim 20 \text{ g} \rightarrow \lambda \sim 10^{-40} \text{ m}$

λ très petit devant R ($\sim 1 \text{ cm}$) $\rightarrow$ classique

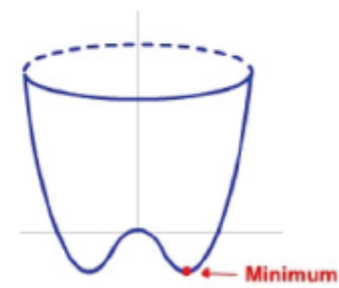
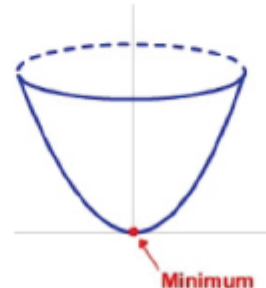
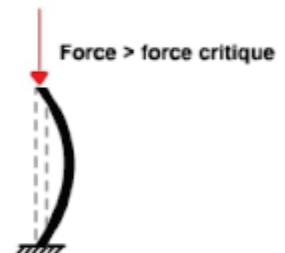
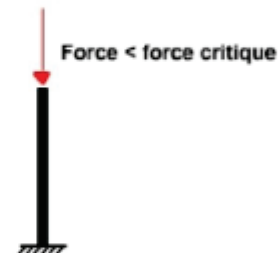
Collision de protons:

$m \sim 1.6 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow \lambda \sim 10^{-15} \text{ m}$

$\lambda \sim R \rightarrow$ quantique

Brisure spontanée de symétrie

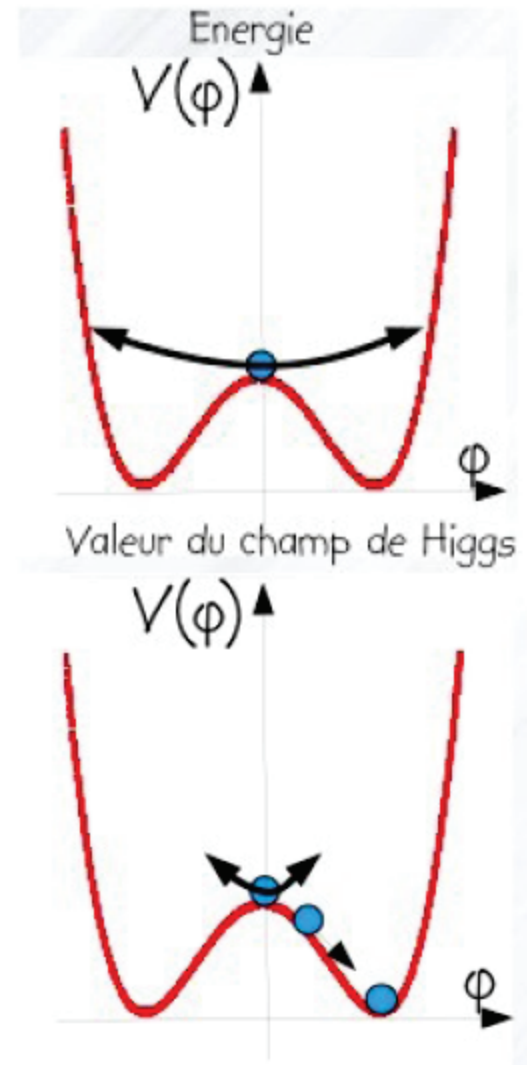
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
 - du crayon qui tourne sur lui-même
 - d'une barre en compression
- Les solutions ne respectent pas forcément les mêmes symétries :
 - chute du crayon
 - flambage de la barre dans une direction donnée



© 3xplus.com

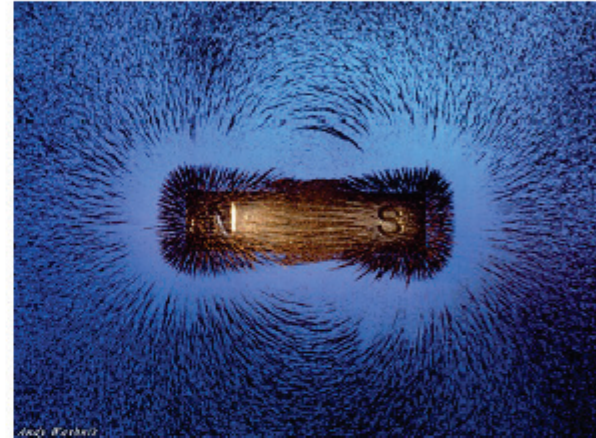
Brisure de la symétrie électrofaible

- 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**



Notion de champ

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



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

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

Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

