

# Le boson de Higgs: vraiment ? pourquoi ? comment? et maintenant ?

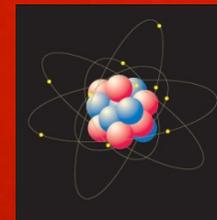
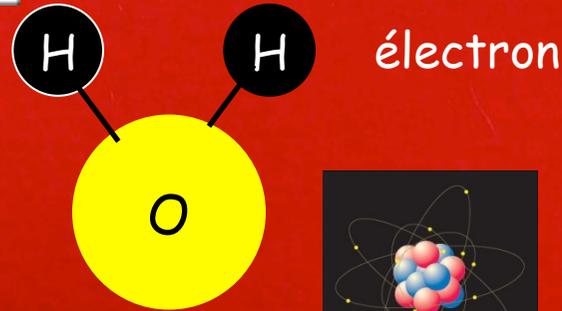
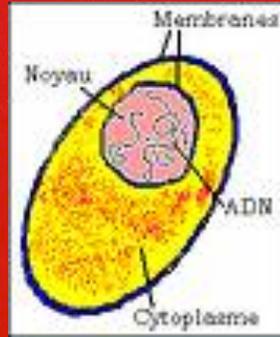
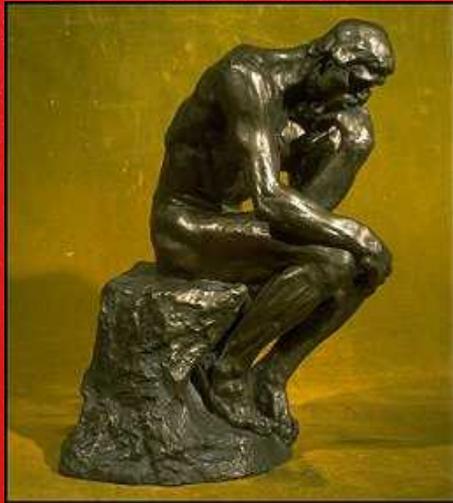
**David Rousseau**  
**LAL-Orsay**

Remerciements à : Nicolas Arnault, Sandro de Cecco, Johann Collot, Laurent Duflot, Daniel Fournier, Marumi Kado, Nikola Makovec, Françoise Maréchal, Pierre Matricon, Frédéric Rousseau, Estelle Scifo, François Vazeille, Dirk Zerwas

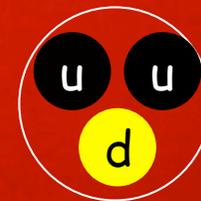


# Le boson de Higgs en quelques transparents

# Voyage vers l'infiniment petit



proton



Quark up



↑  
Homme  
~1 m



↑  
Cellule  
~10<sup>-6</sup>m



↑  
Molécule  
~10<sup>-9</sup>m



↑  
Atome  
~10<sup>-10</sup>m



↑  
Noyau

↑  
Nucléons



↑  
Quarks



↑  
~10<sup>-15</sup>m

# La Matière: les FERMIONS

## Quarks

$q = +\frac{2}{3}$



$q = -\frac{1}{3}$

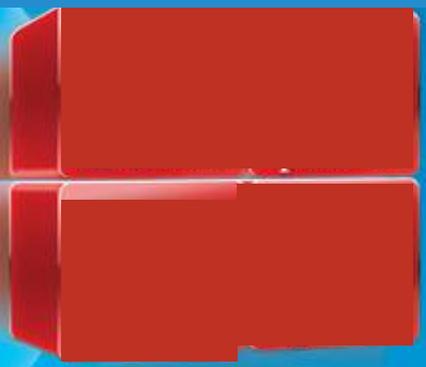


## Leptons

$q = -1$



$q = 0$



# La Matière: les FERMIONS

## Quarks

$q = +\frac{2}{3}$

<b>u</b> up	<b>c</b> charm	
<b>d</b> down	<b>s</b> strange	

$q = -\frac{1}{3}$

## Leptons

$q = -1$

<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	
<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	

$q = 0$

# La Matière: les FERMIONS

## Quarks

$q = +\frac{2}{3}$

<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

$q = -\frac{1}{3}$

## Leptons

$q = -1$

<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau
<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino

$q = 0$

# La Matière: les FERMIONS et les ANTIMATIÈRES

## Quarks

$q = +\frac{2}{3}$

u up	c charm	t top
---------	------------	----------

$q = -\frac{1}{3}$

d down	s strange	b bottom
-----------	--------------	-------------

## Quarks

$q = -\frac{2}{3}$

$\bar{t}$ top	$\bar{c}$ charm	$\bar{u}$ up
------------------	--------------------	-----------------

$q = +\frac{1}{3}$

$\bar{d}$ down	$\bar{s}$ strange	$\bar{b}$ bottom
-------------------	----------------------	---------------------

Antimatière

## Leptons

$q = -1$

e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
---------------	---------------	---------------

$q = 0$

$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino
------------------------------	----------------------------	----------------------------

## Leptons

$q = +1$

$\bar{\tau}$ tau	$\bar{\mu}$ muon	$\bar{e}$ electron
---------------------	---------------------	-----------------------

$q = 0$

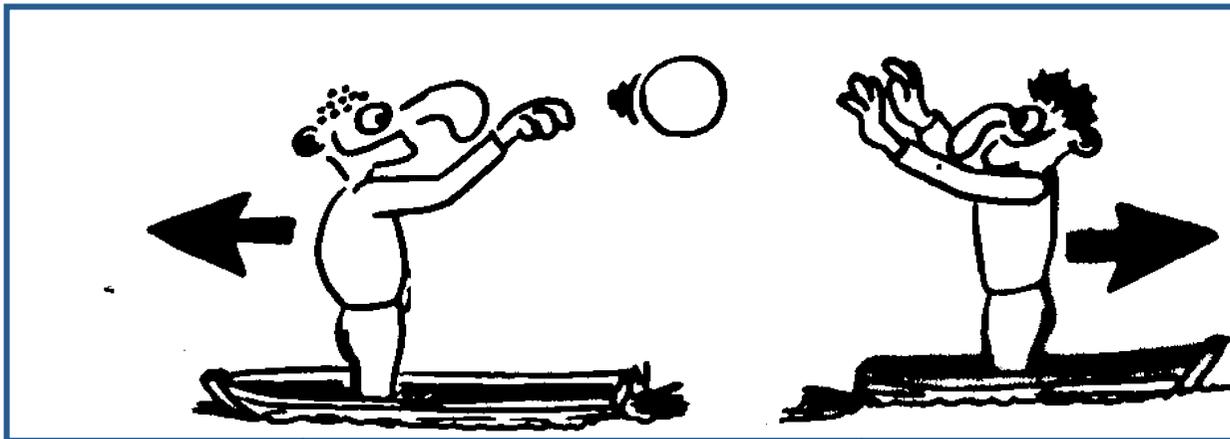
$\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron neutrino
----------------------------------	----------------------------------	------------------------------------

# Interactions

Les fermions (d'Enrico Fermi) de spin demi-entier ne peuvent pas s'accumuler dans le même état  $\Rightarrow$  ils « résistent » à la compression, comme toute matière.

Les bosons (de Satyendranath Bose) de spin entier peuvent s'accumuler dans le même état (exemple les photons d'un rayon laser).

Une interaction est expliquée par un **échange de bosons**

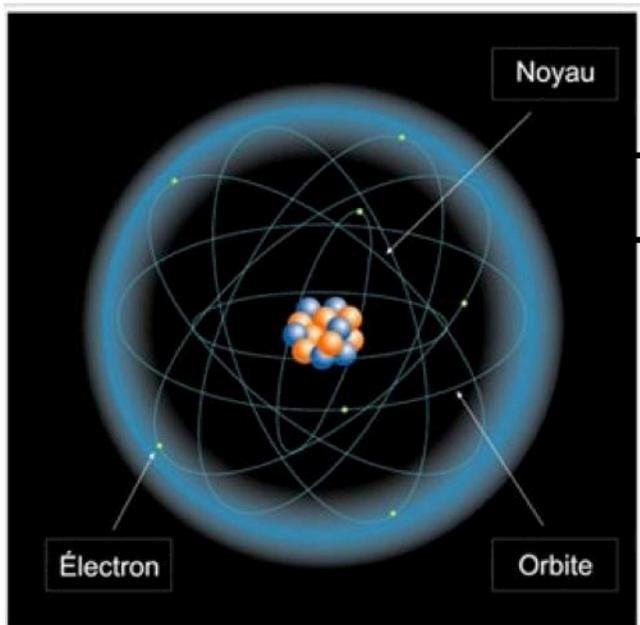
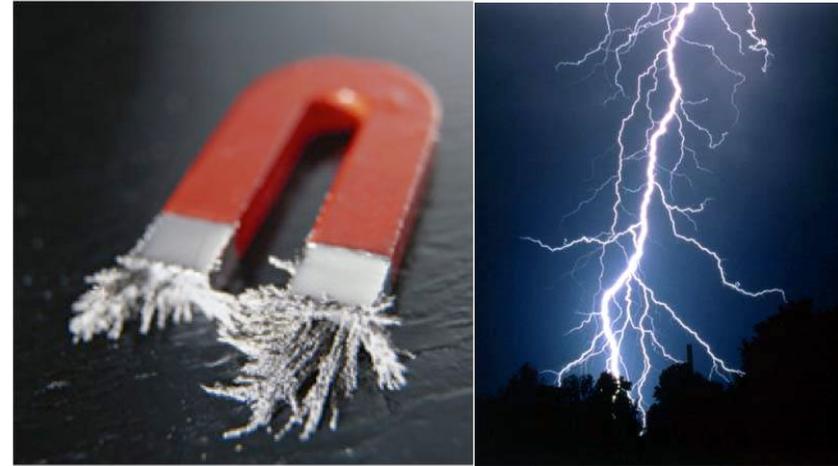


- Chaque interaction se différencie par:
  - **son type de messenger** : Photon, gluon, ...
  - **sa portée** : Plus le messenger est massif plus l'interaction est de courte portée

# L'interaction électromagnétique

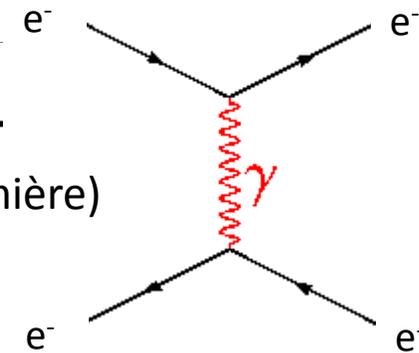
Responsable des phénomènes  
**électriques et magnétiques** :  
aimantation, lumière,  
cohésion des atomes,...

Répulsion entre objets de  
charges électriques identiques  
(attraction si charges opposées)



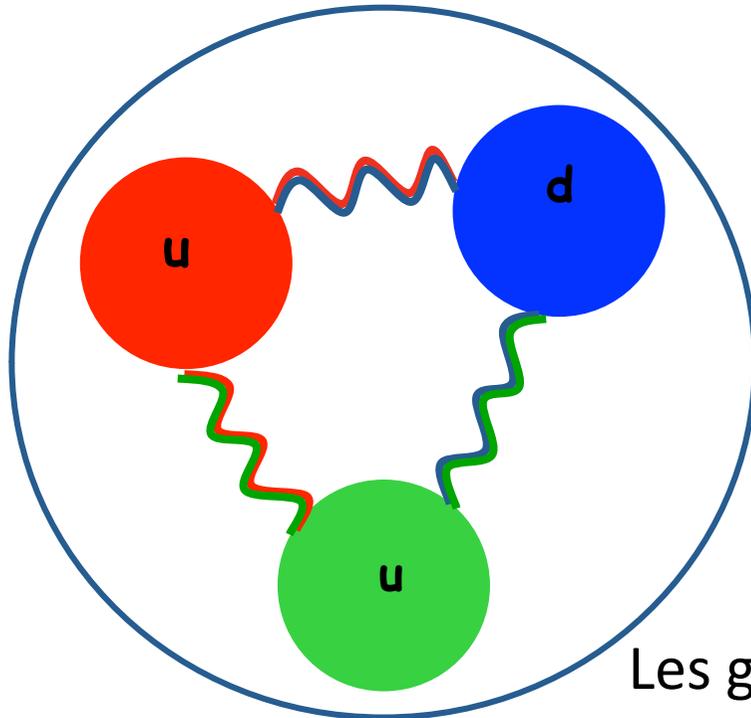
Médiateur : **photon (ou gamma)**

$m=0$  (vitesse= $c$ =vitesse de la lumière)  
portée infinie



# L'interaction forte

Proton



En plus de la charge électrique, les quarks portent une charge de “couleur”:

Bleu vert rouge

Ainsi le proton est “incolore”

Les gluons « **collent** » les quarks entre eux : ils sont confinés à l'intérieur des hadrons (proton, neutron,...)

⇒ Stabilité des noyaux

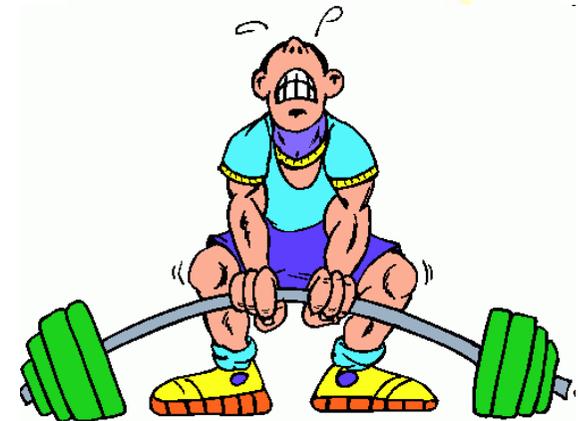
Contre-exemple: la masse du gluon est nulle, mais la portée de l'interaction est très faible car les gluons se « collent » eux-même.

Médiateurs: **gluons**

# L'interaction faible

Médiateurs :  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$

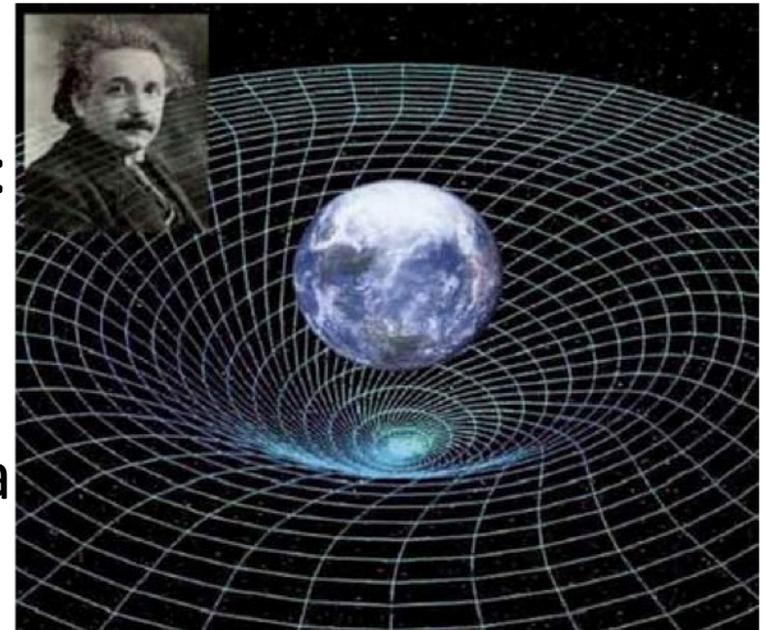
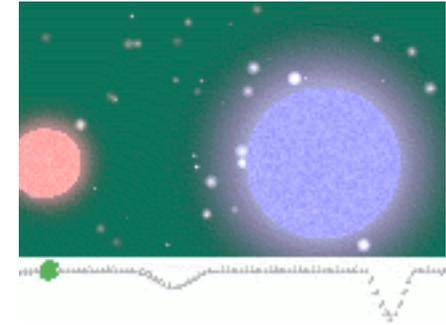
- Interaction faible
  - Radioactivité  $\beta$
  - Participe aux réactions nucléaires au coeur du Soleil
- 100,000 fois plus faible que l'interaction forte,
  - Influence limitée au noyau atomique.
  - Expliquée par la grande masse des bosons vecteurs de l'interaction faible.



# La gravitation

Médiateur hypothétique : **graviton**

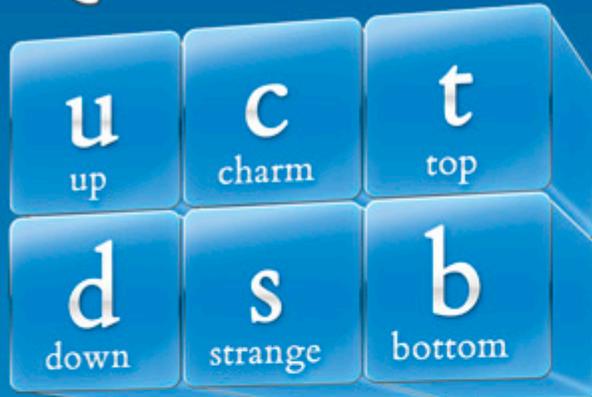
- Gravitation newtonienne (1685)
  - Force complètement négligeable à l'échelle du noyau
  - Mais portée infinie
  - Pas de masse négative
  - $\Rightarrow$  dominante à grande échelle
- Einstein : relativité générale (1916):
  - La gravitation est issue d'une déformation de l'espace temps
  - $\Rightarrow$  la gravitation est très difficile à marier avec les autres forces



# La Matière: les FERMIONS

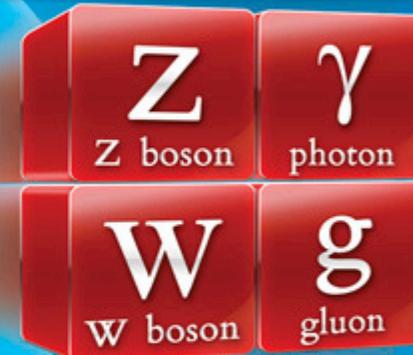
Modèle Standard  
des particules

## Quarks

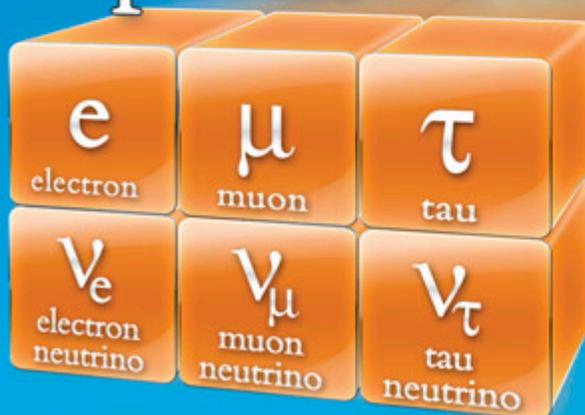


## Les Forces: les BOSONS

?  
H  
Higgs boson

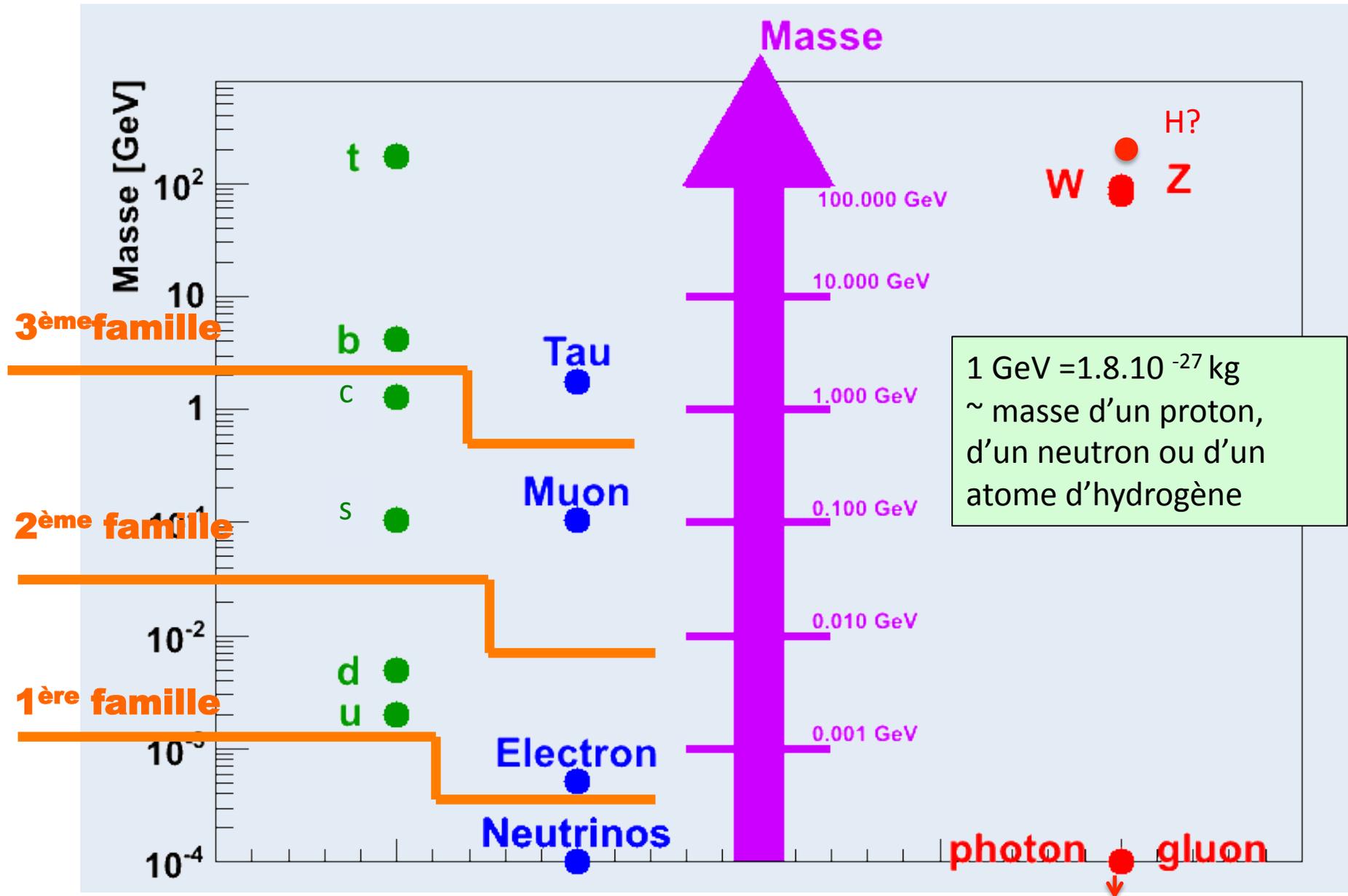


## Leptons



+Antiparticules

# Echelle des masses



# Le Modèle Standard

- Il décrit dans un même cadre les **particules élémentaires** et leurs **interactions** :
  - Électromagnétique (le photon)
  - Faible (W et Z)
  - Forte (gluons)
  - Mais pas la gravitation ☹
- Il a été élaboré dans les années **1960-70**
- Il est basé sur:
  - **Relativité restreinte**
    - $E = mc^2$
  - **Mécanique quantique**
    - Description du monde microscopique
  - **Symétrie**
    - invariance de jauge
- Il a été testée aux **accélérateurs de particules**, en particulier au CERN.
  - L'accord entre le Modèle Standard et les mesures est excellent
- Il y a beaucoup de théories alternatives, (super-symétrie, quatrième famille, dimensions supplémentaires...), mais qui doivent être compatibles avec les mêmes résultats expérimentaux

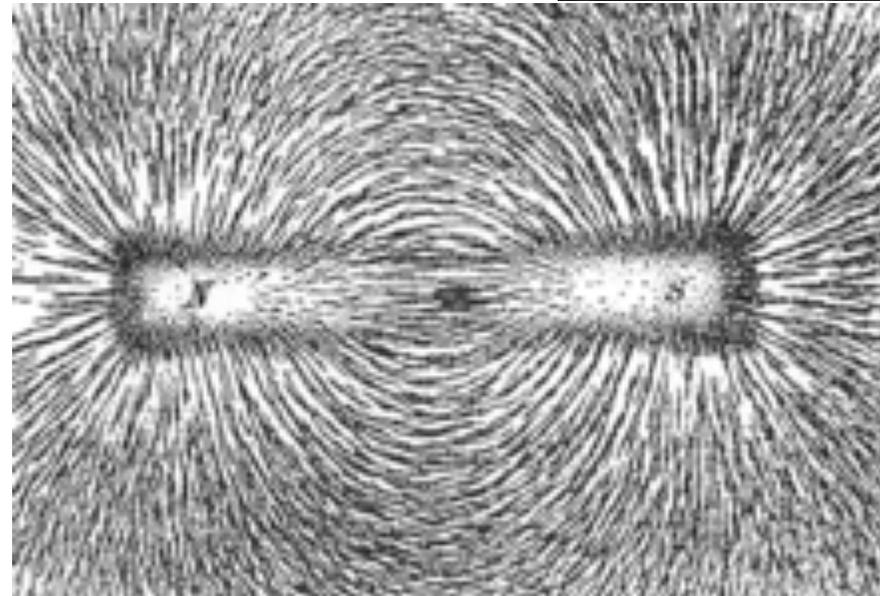


# Notion de champ

- Ensemble de valeurs prises par un paramètre physique en différents points de l'espace:  $\phi(x, y, z)$ .

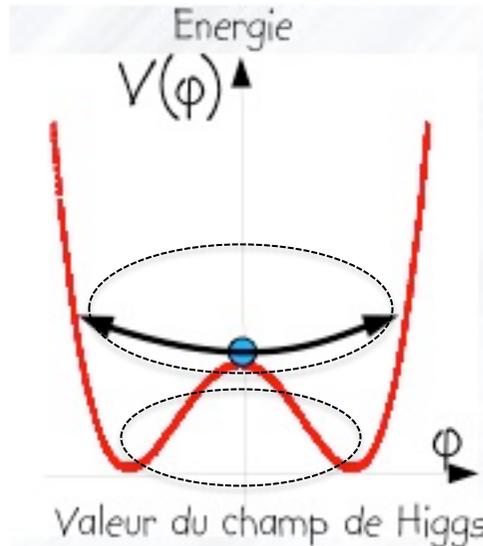


- Champ orienté: **vecteur**  
champ magnétique.



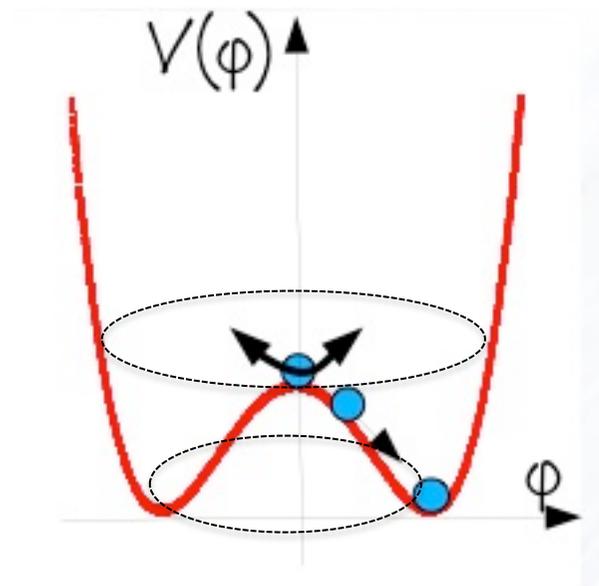
- Champ non orienté: **scalaire**  
relevé des températures dans l'atmosphère, potentiel électrique,  
*champ de Higgs.*

# Mécanisme de Brout, Englert et Higgs



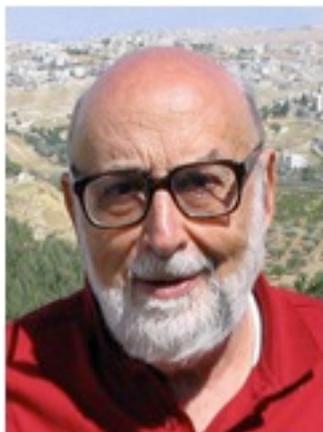
- Réduction de la température
- $\Rightarrow$  brisure spontanée de symétrie
- $\Rightarrow$  le champ acquiert une valeur moyenne non nulle
- $\Rightarrow$  les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle
- Bonus ! (envisagé par Higgs). Une excitation de ce champ est une nouvelle particule le boson de Higgs

- Champ BEH scalaire initialement (juste après le Big Bang) de valeur moyenne nulle
- Le champ interagit avec les particules, mais elles gardent une masse nulle

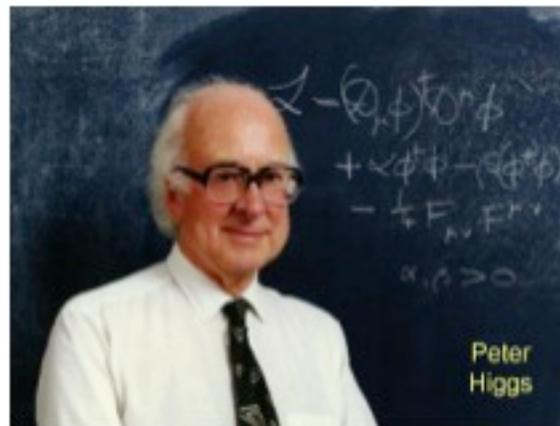




Robert Brout 1928-2011



François Englert 1932-



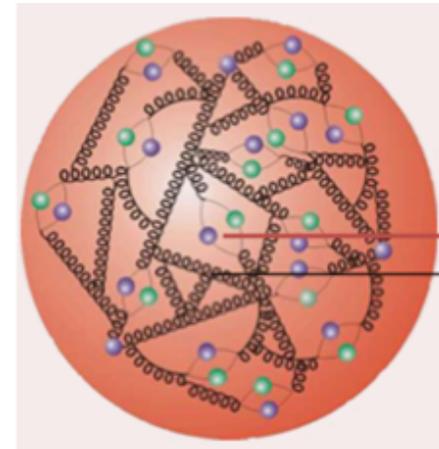
Peter Higgs 1929-

Également : G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble,



# La masse de notre matière

- La masse de notre matière ne doit (presque) rien au boson de Higgs
- Proton et neutrons (masse  $\sim 1\text{GeV}$ ) sont composés de trois quarks (masse qq MeV)
- L'essentiel de la masse des protons et neutrons vient de l'énergie des gluons liant les quarks entre eux (et  $E=mc^2$ )



# La Matière: les FERMIONS

## Quarks



Particules élémentaires connues en 1964

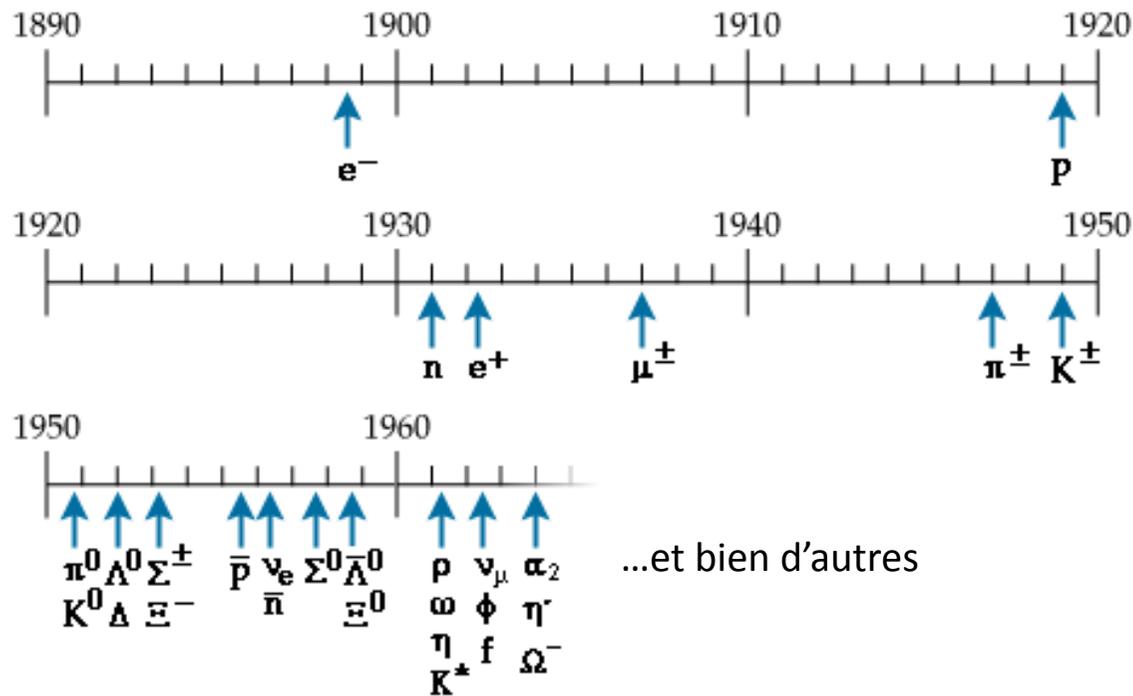
## Les Forces: les BOSONS



## Leptons

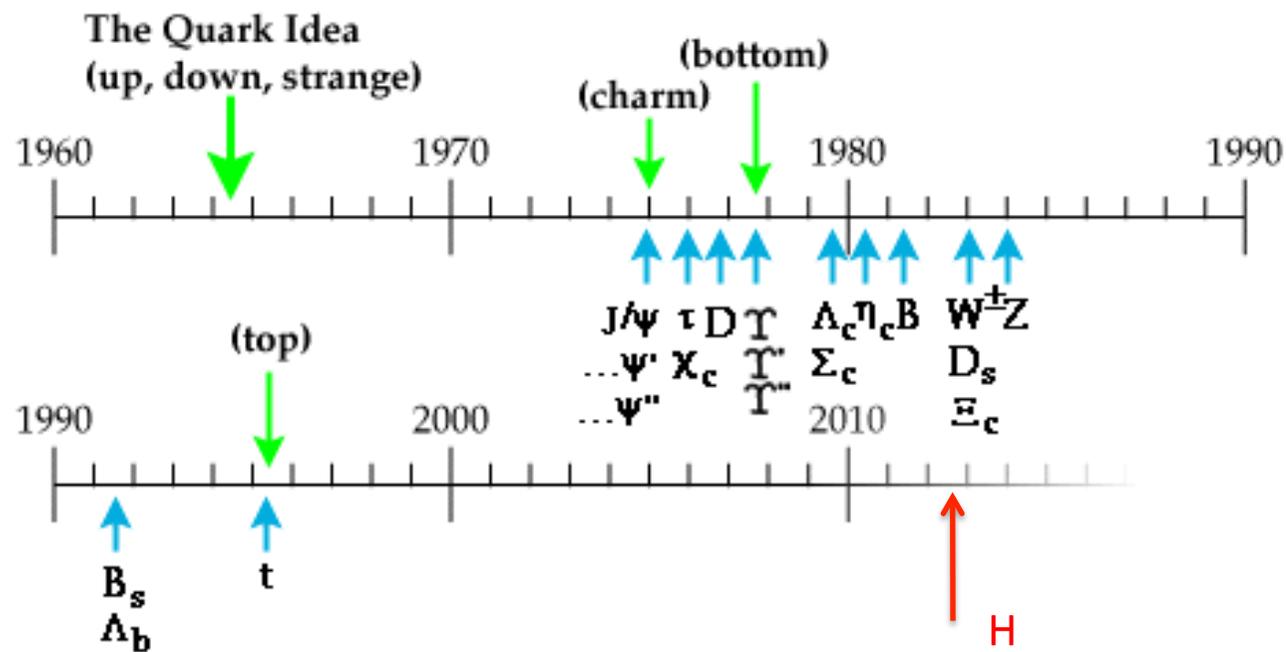


Le mécanisme de Higgs est la clé de voûte du modèle standard, mais il a été conçu avant lui.



Une maturation d'un siècle...

...et bien d'autres





# La Théorie Quantique

Prix Nobel

Les fondements...

- 1873 **MAXWELL** : électromagnétisme
- 1895 **ROENTGEN** : découverte des rayons X
- 1898 **THOMSON** : découverte de l'électron
- 1900 **PLANCK** : quantification de la radiation
- 1905 **EINSTEIN** : photons quantas de lumière et relativité
- 1911 **RUTHERFORD** : existence de noyaux
- 1913 **BOHR** : modèle planétaire de l'atome
- 1919 **RUTHERFORD** : évidence d'un proton isolé
- 1923 **COMPTON** : théorie des photons comme particules
- 1924 **DE BROGLIE** : comportement ondulatoire de l'électron
- 1926 **SHRÖDINGER** : équation d'onde quantique
- 1928 **DIRAC** : mécanique Q et relativité pour décrire l'électron
- 1930 **PAULI** : suggestion du neutrino dans les désintégrations  $\beta$
- 1932 **ANDERSON** : découverte du positron
- 1937 **HESS** : observation du  $\mu$  dans les rayons cosmiques
- 1947 **BERKELEY** : synchro-cyclotron produit les premiers p
- 1949 **BUTLER** et **ROCHESTER** : découverte du méson  $K^+$

# Le Modèle Standard

Prix Nobel

Aboutissement...

- 1952 **GLASER** : chambre à bulles à Brookhaven
- 1954 **YANG** et **MILLS** : théories de jauge des interactions
- 1956 **REINES, COWAN** : premier neutrino
- 1957 **SCHWINGER, BLUDMAN, GLASHOW** : bosons  $W^{+/-}$
- 1962 **LEDERMAN, STEINBERGER, SCHWARTZ** : séparent le  $\nu_e$  du  $\nu_\mu$
- 1964 **GELL-MANN, ZWEIG** : 3 quarks expliquent les hadrons
- 1964 **BROUT, ENGLERT et HIGGS** : Mécanisme de BEH
- 1967 **CRONIN, FITCH** : violation de CP dans la désintégration du  $K^0$
- 1968 **GLASHOW, WEINBERG et SALAM** : théorie électrofaible(MS)
- 1970 **FRIEDMANN, KENDALL, TAYLOR** : sous structure du proton
- 1970 **T'HOOFT et VELTMAN** : Renormalisation du MS
- 1973 **GLASHOW, ILIOPOULOS, MAIANI** : 4ème quark (c)
- 1973 **GROSS, POLITZER, WILCEK** : th. de jauge de l'interaction forte
- 1974 **KOBAYASHI, MASKAWA** : mélange quarks et violation de CP
- 1976 **RICHTER, TING** : découverte du  $J/\psi$
- 1977 **PERL** : découverte du t au SLAC
- 1979 **LEDERMAN** : découverte du Y au SLAC
- 1983 **SÖDING, WIJK, WOLF, WU** : existence des gluons à DESY
- 1983 **RUBBIA, VAN DER MEER** : bosons W et Z au CERN

# Triomphe?

## Grandes Collaborations

1989

LEP et SLC : 3 générations de neutrinos légers

1995

CDF et D0 : découverte du quark top

1998

SuperK (TOSHIBA) observation d'oscillations de neutrinos

2000

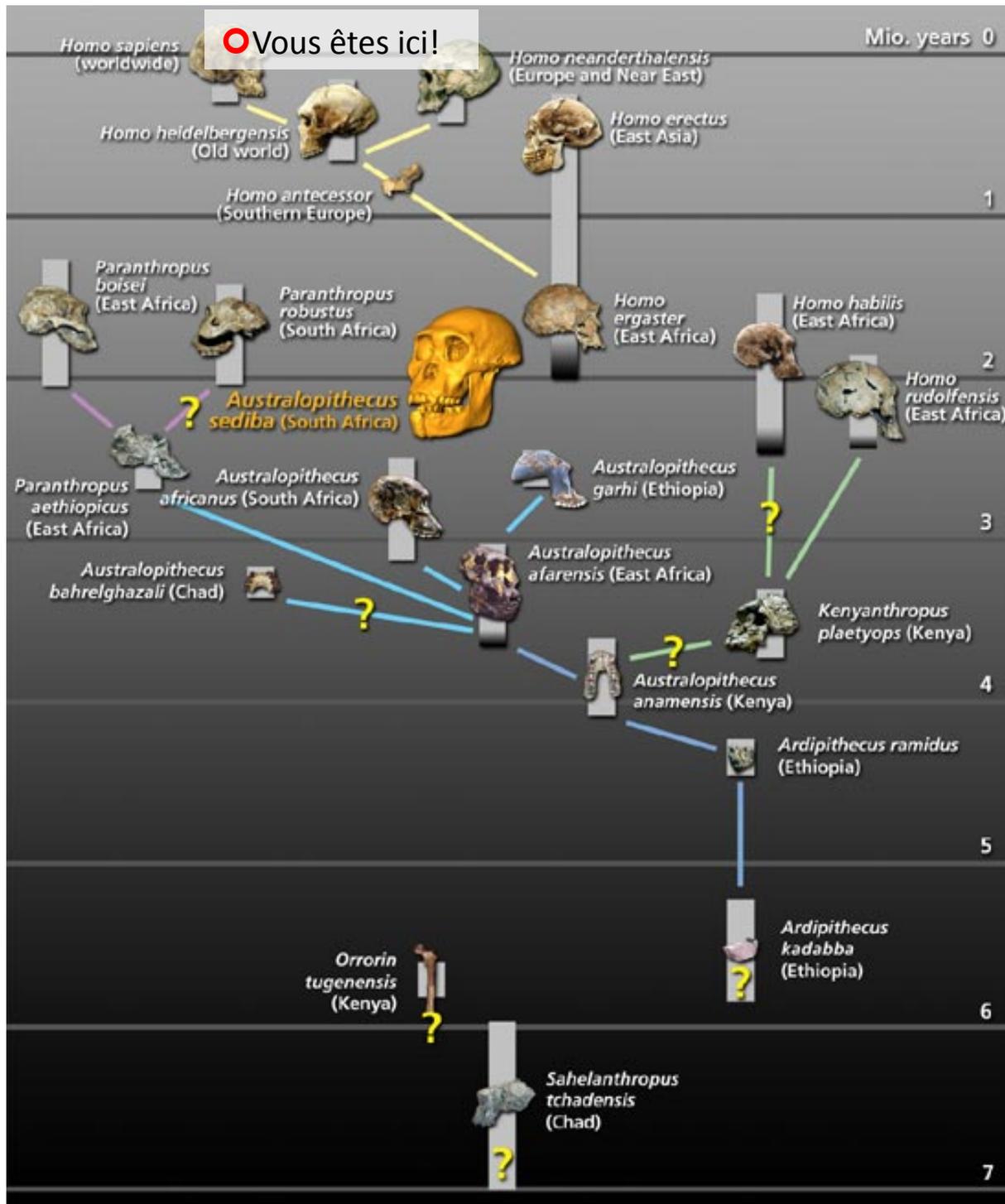
DONUT : confirmation directe de l'existence du  $\nu_\tau$

2000

SNO : confirmation du déficit de neutrinos solaires

2001

Belle et BaBar : violation de CP dans la désintégration du  $B_0$



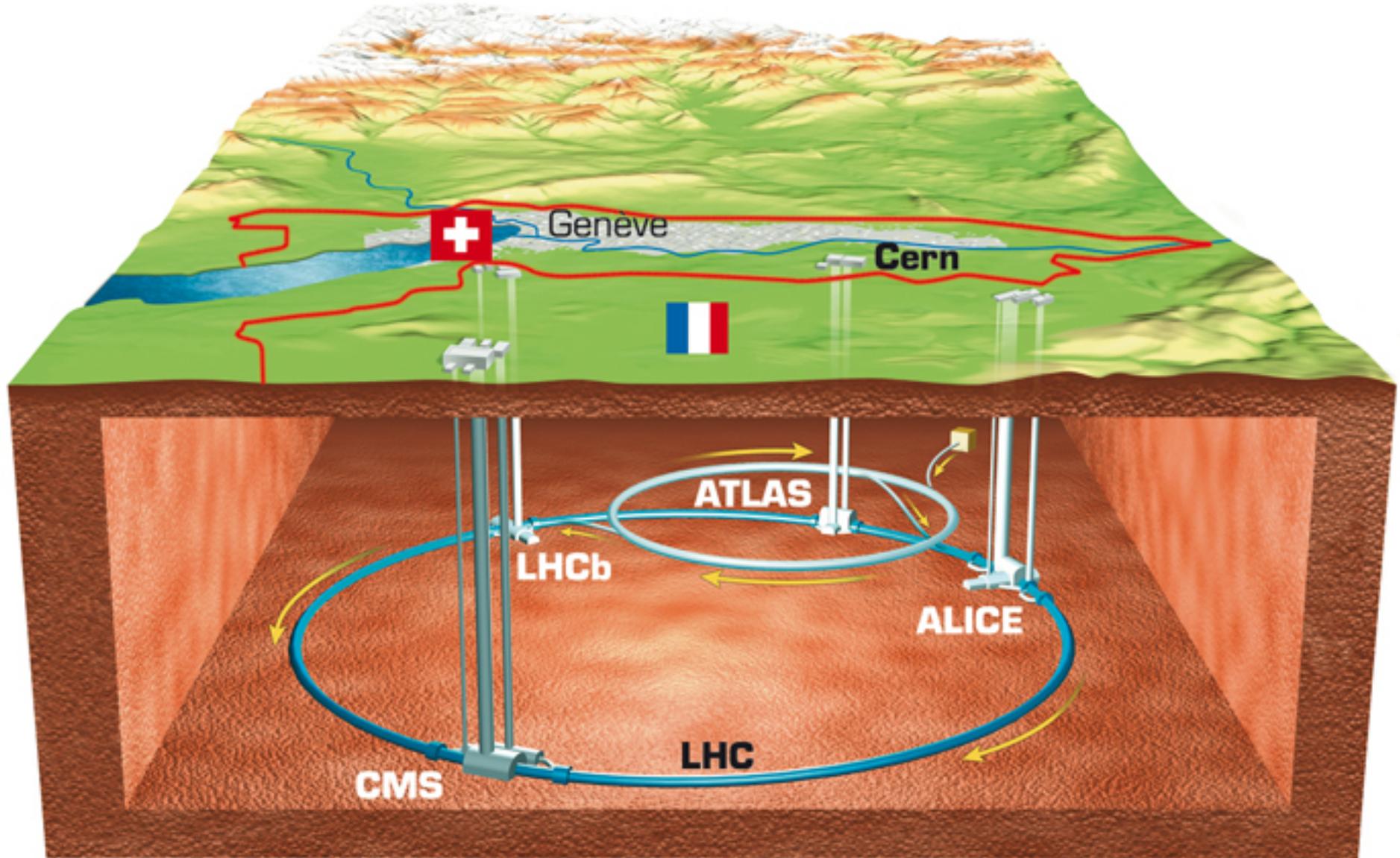
Mais n'oublions pas les théories invalidées par l'expérience...

et les résultats expérimentaux non confirmés....

# Le CERN et ATLAS



## Le LHC



# Le LHC: un quart de siècle de travaux

<b>1984</b>	Etude préliminaire
<b>1994</b>	Approbation par le conseil du cern
<b>1996-1998</b>	Approbation des 4 grandes expériences
<b>2000</b>	arrêt de l'accélérateur précédent (le LEP) et démarrage de la construction du LHC
<b>Fin 2007- début 2008</b>	fin de la construction après plusieurs retards
<b>septembre 2008</b>	démarrage officiel du LHC et accident cryogénique
<b>23 octobre 2009 :</b>	Redémarrage
<b>30 mars 2010</b>	premières collisions à 7 TeV et Début de l'exploitation scientifique du LHC



# Le LHC en chiffre

- **Energie des collisions:**

- Nominal: 14 TeV (prévu pour 2015)
  - 1TeV  $22.4 \cdot 10^{-7}$  Joules
- Actuelle: 7 TeV

- **La plus grande machine du monde**

- Circonférence : 26659m
- 9300 aimants supraconducteurs



- **Le circuit le plus rapide de la planète**

- Proton: 99.9999993% de la vitesse de la lumière
- 20 millions collisions par seconde, entre paquets de protons, une vingtaine de collisions de proton simultanées

- **L'espace le plus vide du système solaire (10-13 atm)**

- Pression 10 fois plus faible que sur la lune

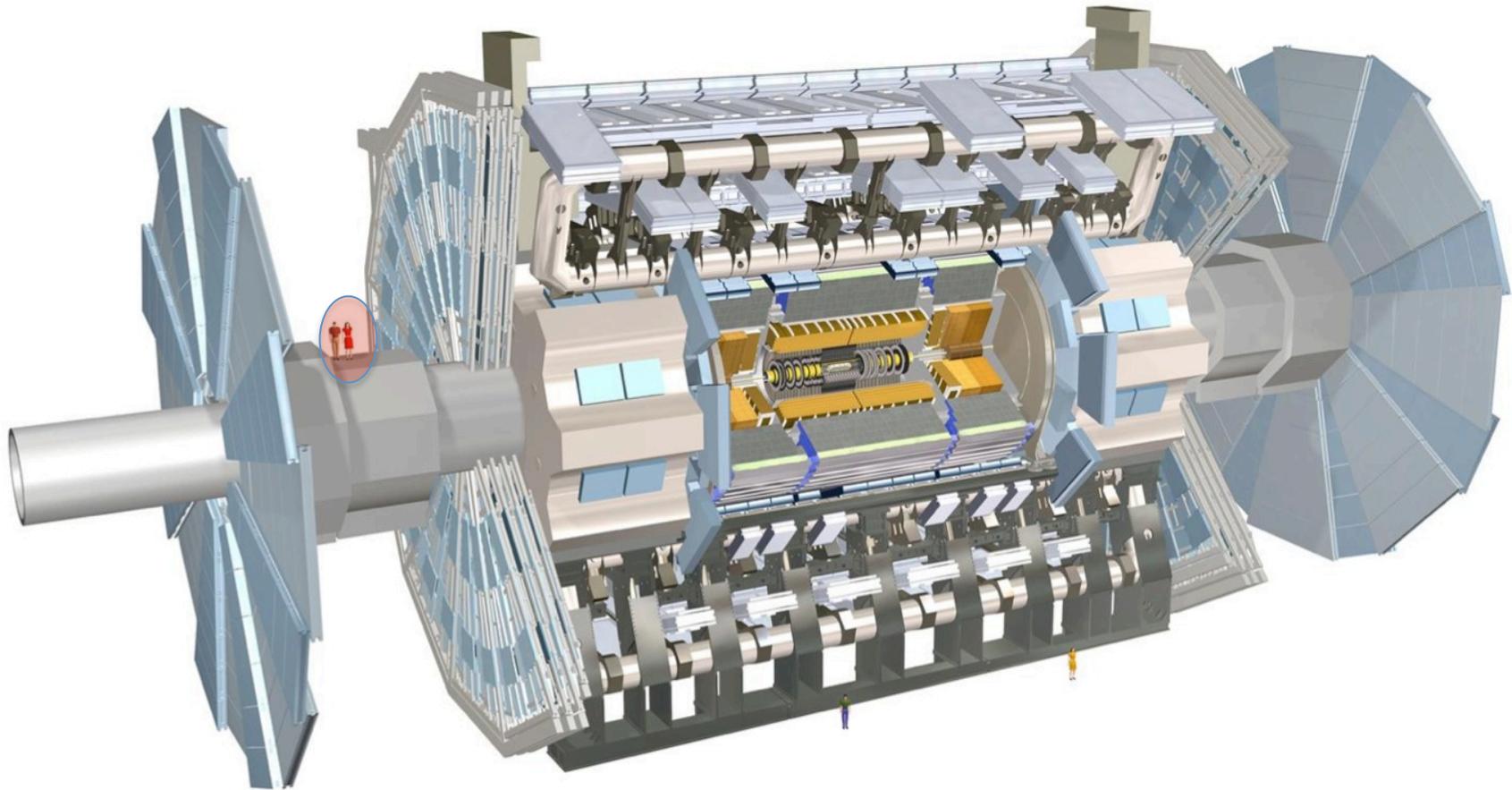
- **Le plus grand réfrigérateur**

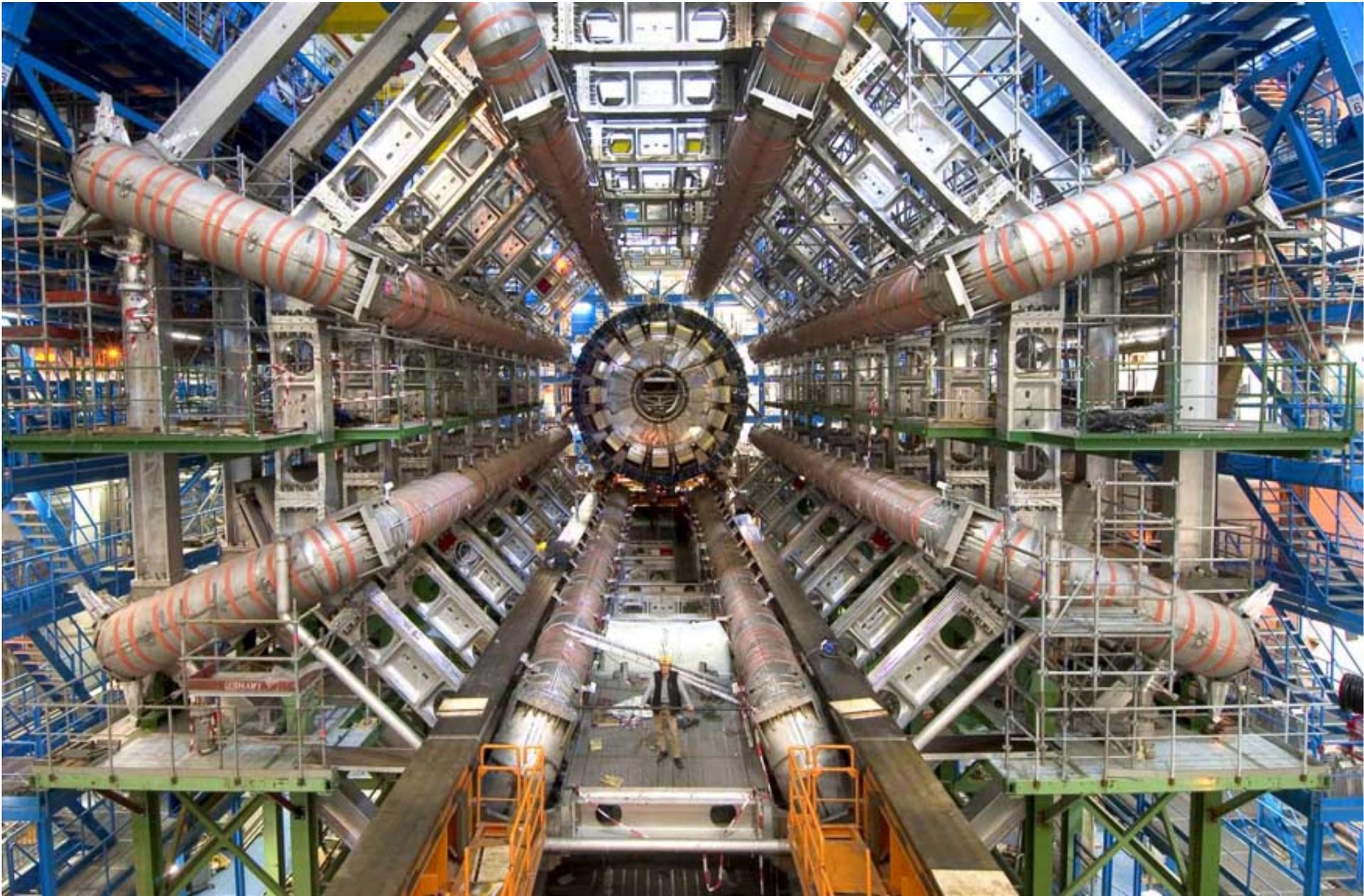
- les aimants doivent être refroidis à  $-271^{\circ}\text{C}$ , une température plus froide que celle de l'espace intersidéral

# Le détecteur Atlas

Diamètre: 25m  
Longueur: 46m  
Poids: 7000 tonnes

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

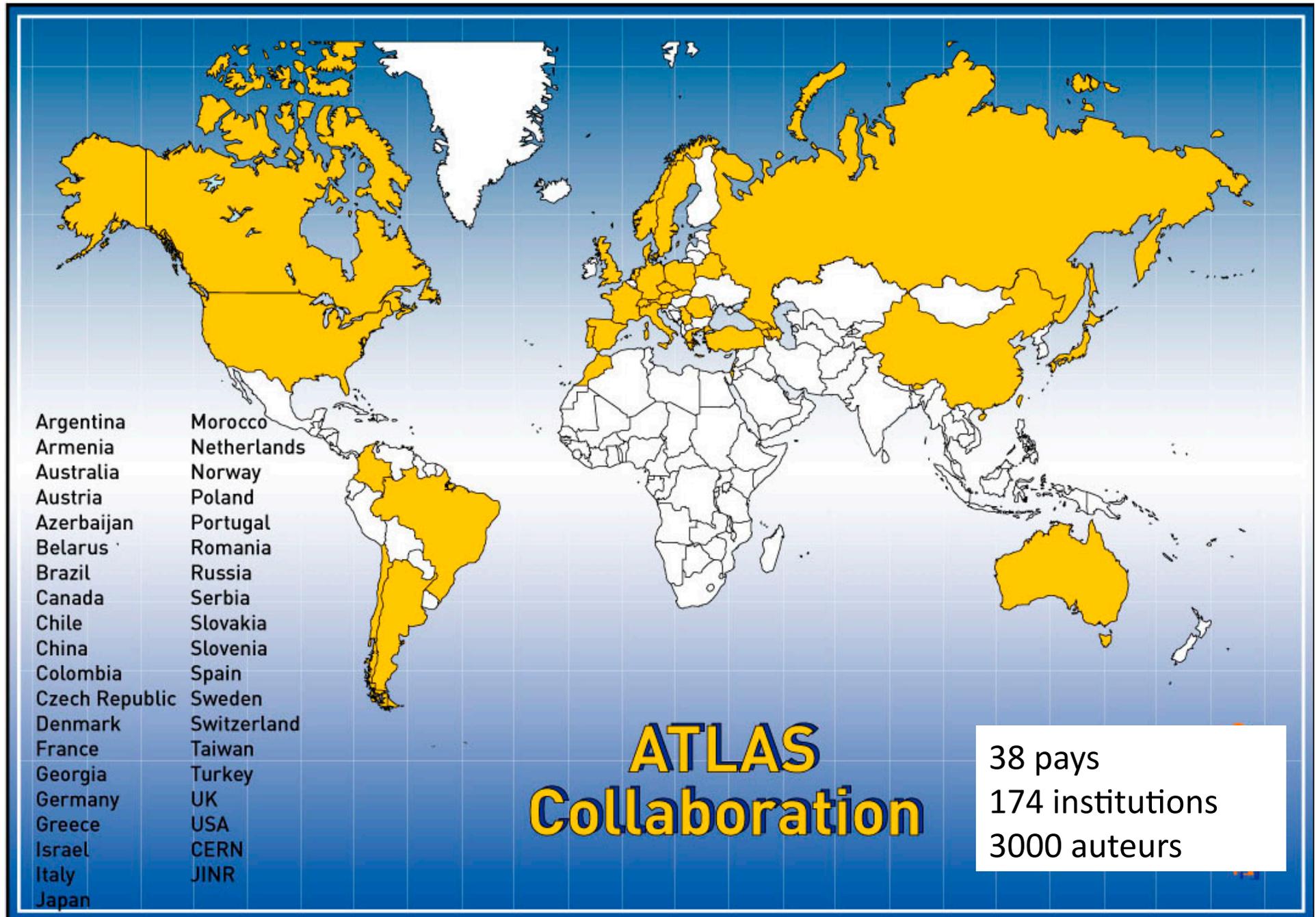


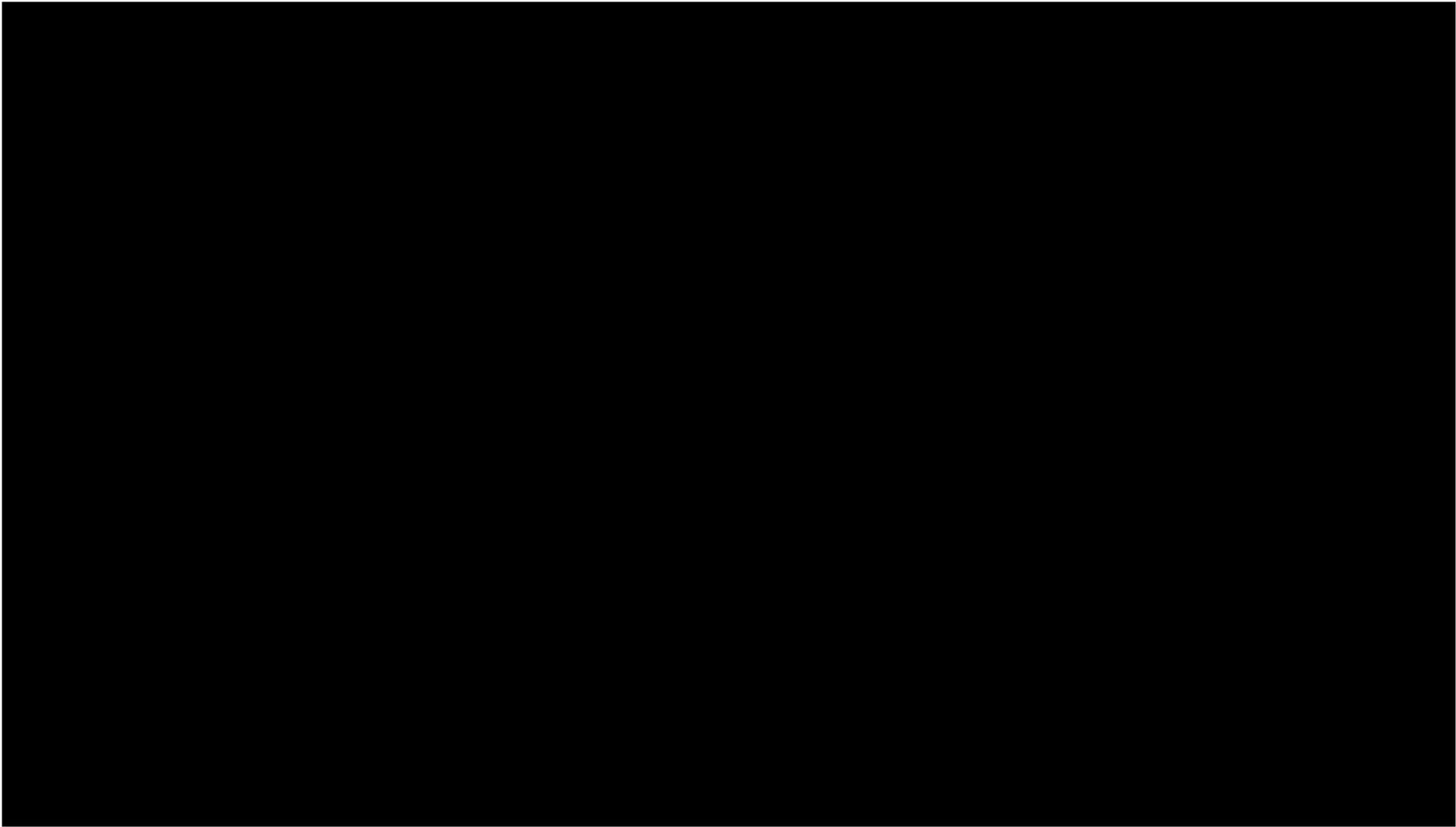


# La collaboration Atlas



# La collaboration Atlas





VOIR les particules ?

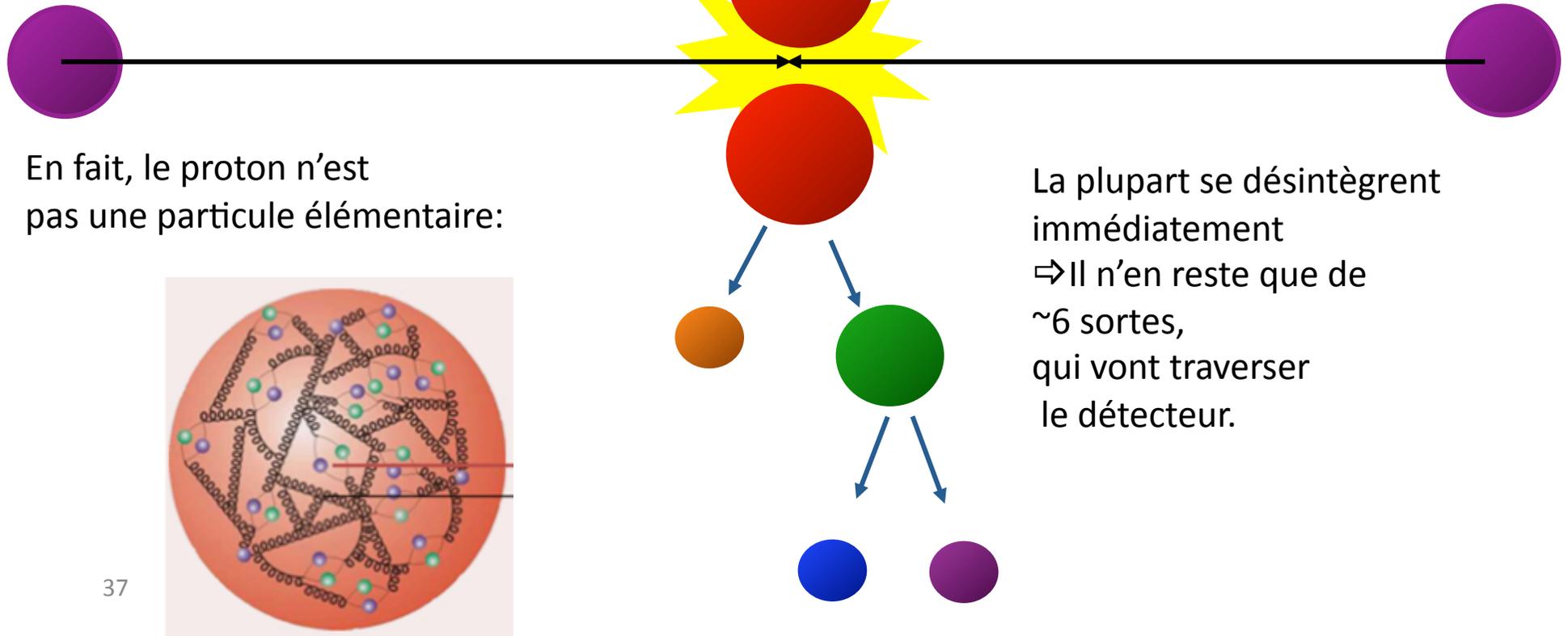


# Collision de protons

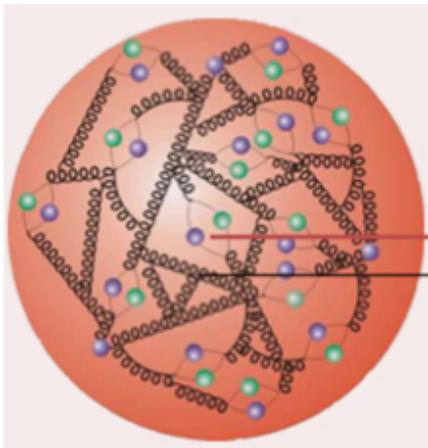
Einstein jeune:  $E=mc^2$   
c: vitesse de la lumière

Conversion de l'énergie cinétique en masse.

Création de nouvelles particules, d'une centaine de sortes



En fait, le proton n'est pas une particule élémentaire:



La plupart se désintègrent immédiatement  
⇒ Il n'en reste que de ~6 sortes, qui vont traverser le détecteur.

Découverte du positron (Anderson 1932), l'anti-électron  
postulé par Dirac (mais Anderson l'ignorait)



Nobel 1936

Photo dans une chambre à brouillard,  
soumise au rayonnement cosmique

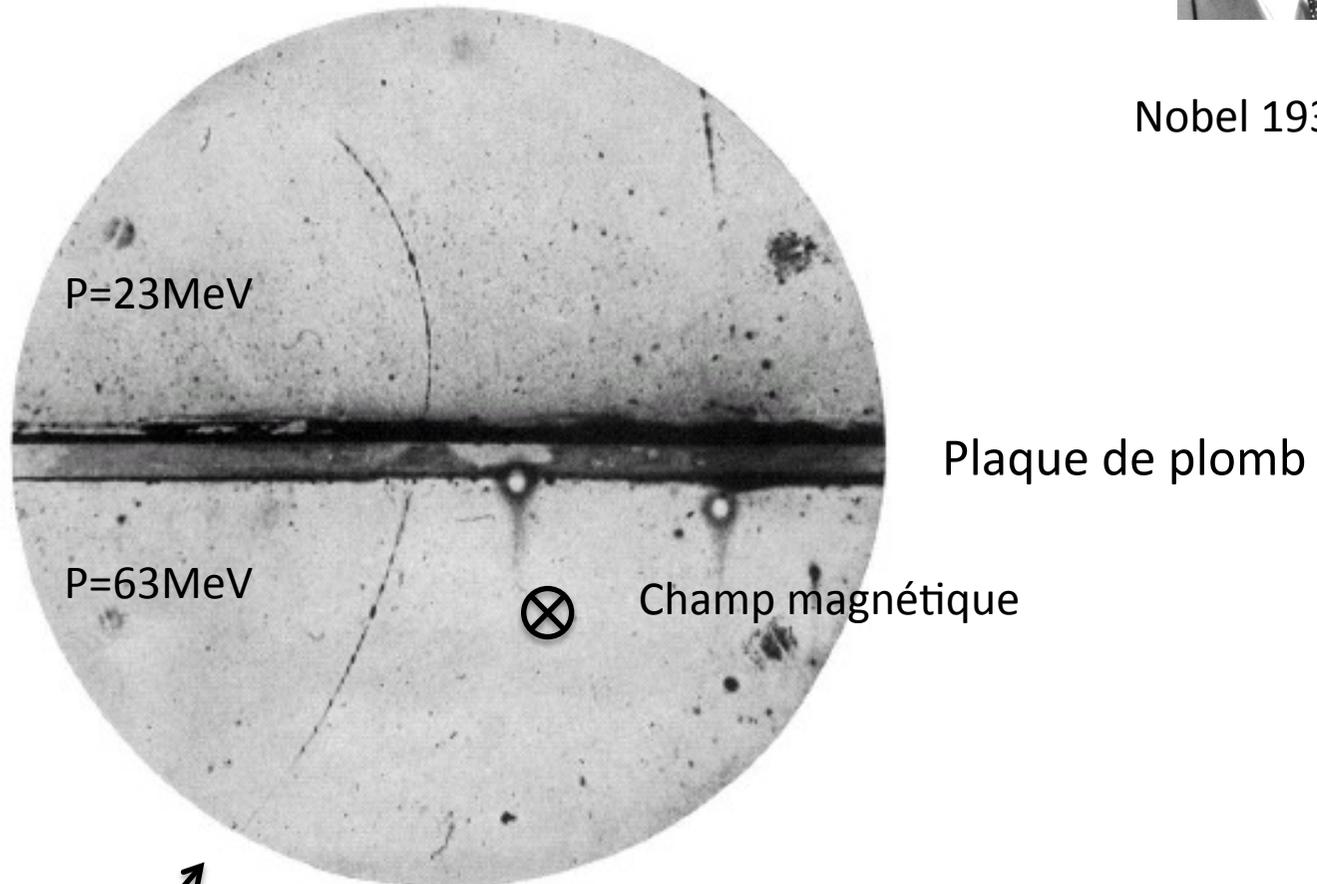
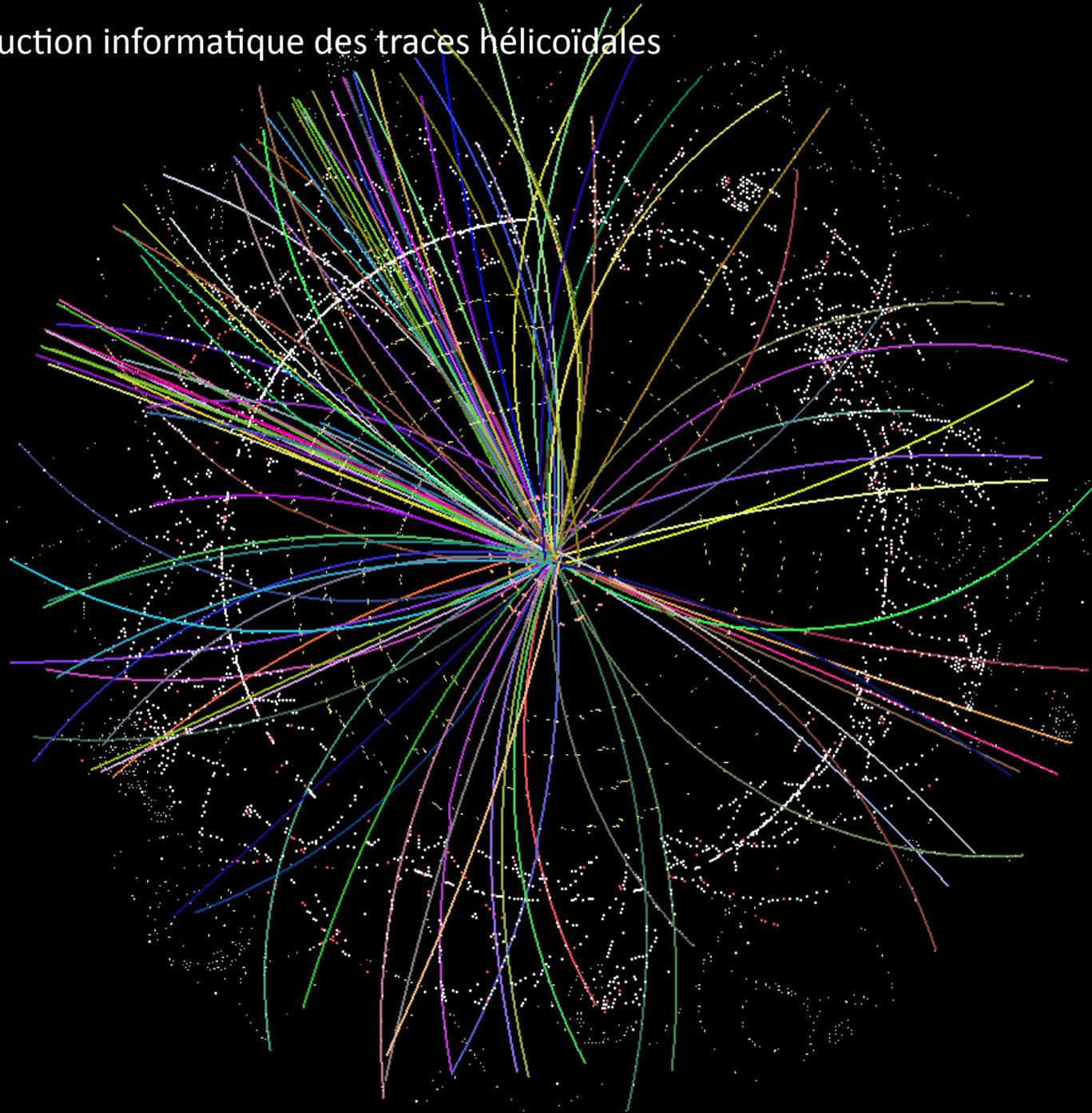


FIG. 1. A 63 million volt positron ( $H\rho=2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H\rho=7.5 \times 10^4$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

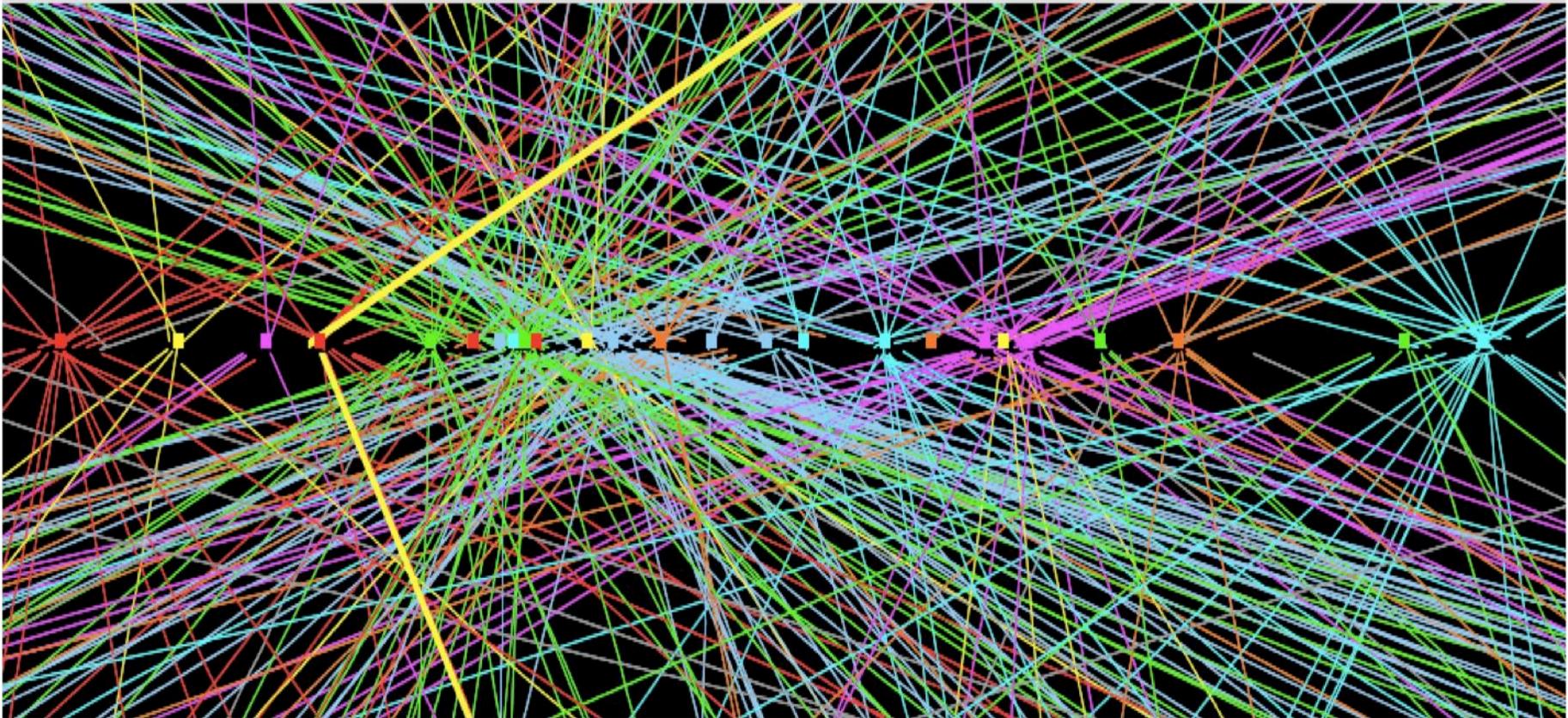
Détection du passage des particules



# Reconstruction informatique des traces hélicoïdales



## Un événement



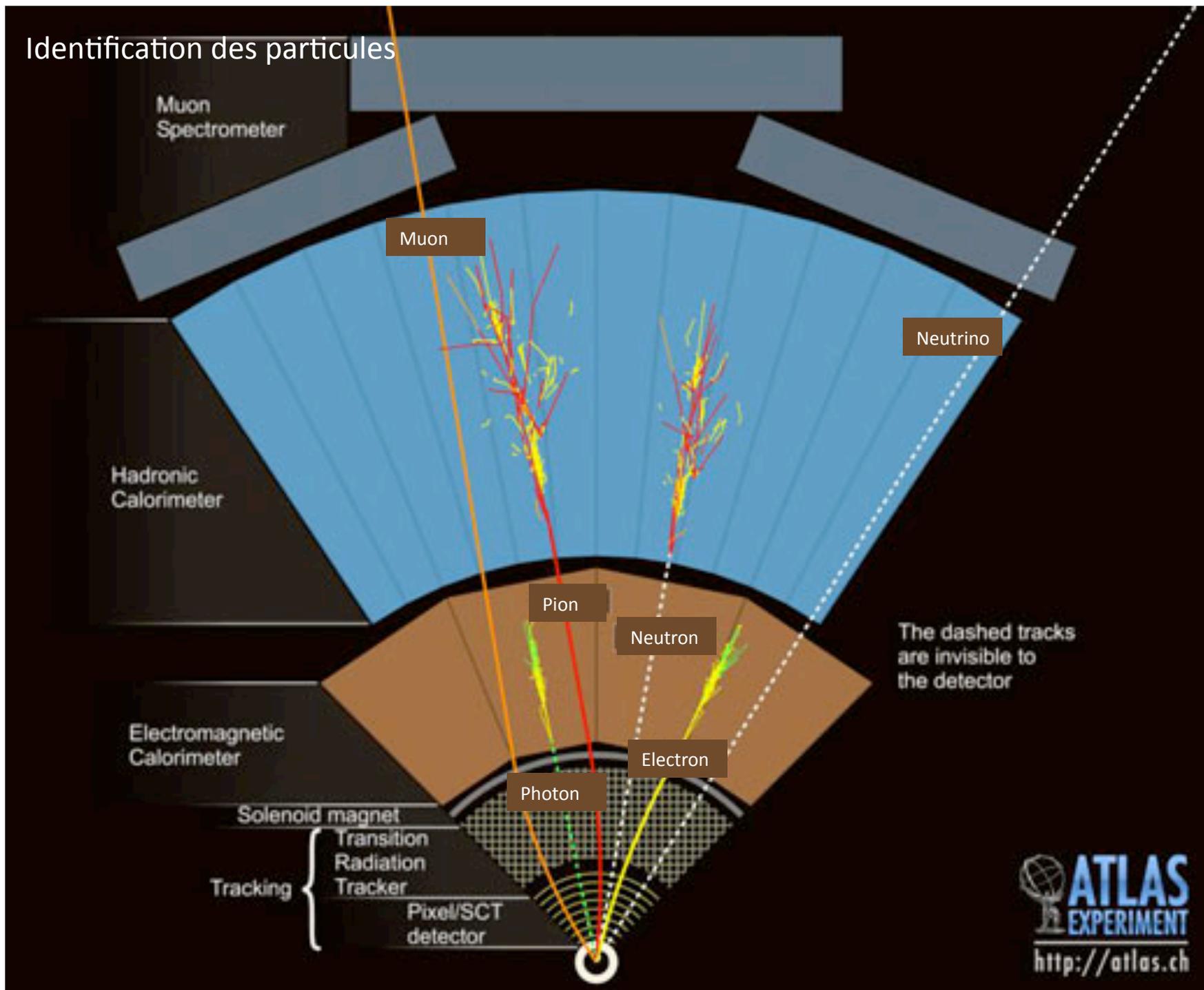
La précision obtenue permet entre autre de distinguer les traces venant de la collision intéressante de la 20aine de collision parasites au court de la collision des mêmes paquets de protons

La chasse au boson de Higgs était  
ouverte depuis longtemps

## Un événement

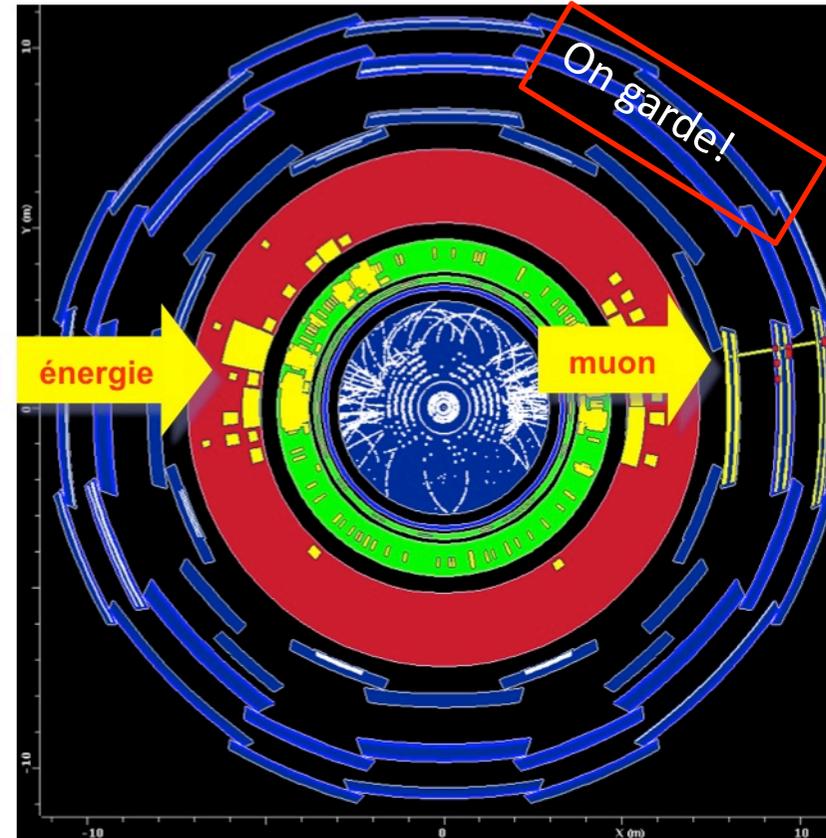
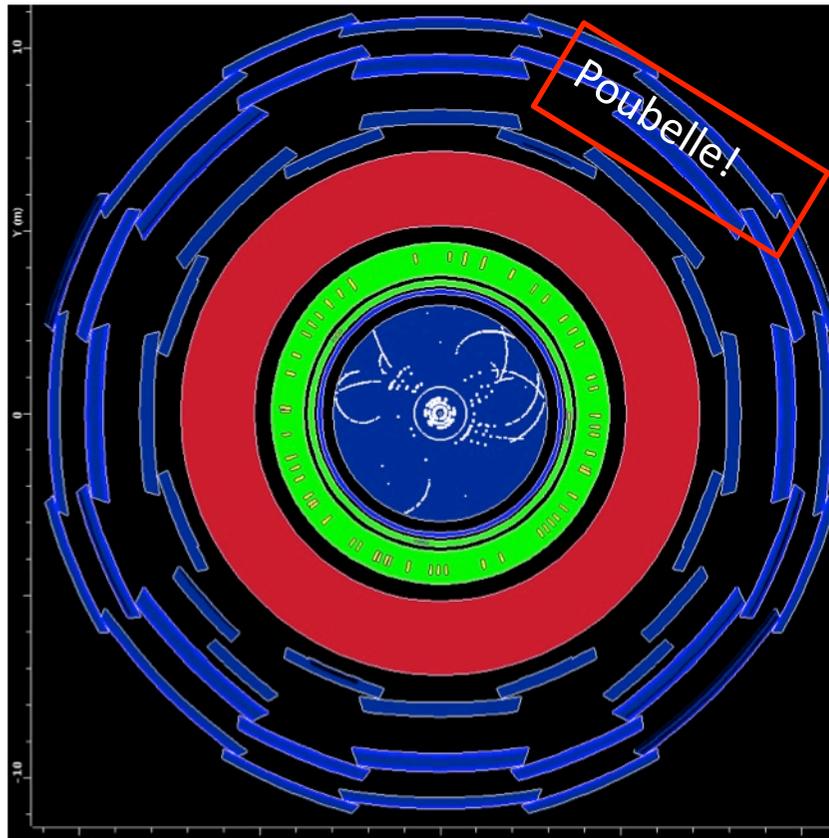


# Identification des particules



# Sélection des événements en temps réel

- 20 millions de collision de paquets par seconde
- 400 événements sélectionnés (1/50.000) au vol
- ⇒ échantillonnage en cascade, décision en  $1\mu\text{s}$ - $1\text{s}$  sur des *signatures*

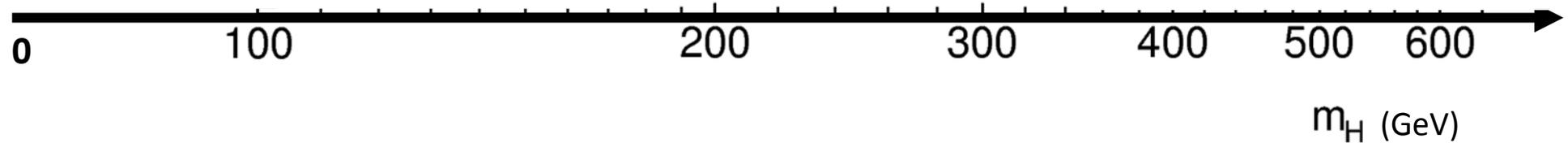


# Le traitement des données en chiffres

- ~1 PetaOctet de données accumulé chaque année (1 million de GigaOctets ~1 milliard de chansons mp3)
- Données processées quasi – en ligne par ~6000 ordinateurs au CERN
- Du collisionneur au laptop: ...puis réduites et distribuées dans le monde entier dans les laboratoires, et finalement quelques GigaOctets sur les laptops des physiciens
- Parallèlement, 150.000 ordinateurs dans le monde moulinent en permanence pour produire ~1 milliard d'événement simulés par an
- 4 millions de ligne de code écrites par 1000 personnes depuis >10 ans, ~250 étant encore actives

# Etat initial

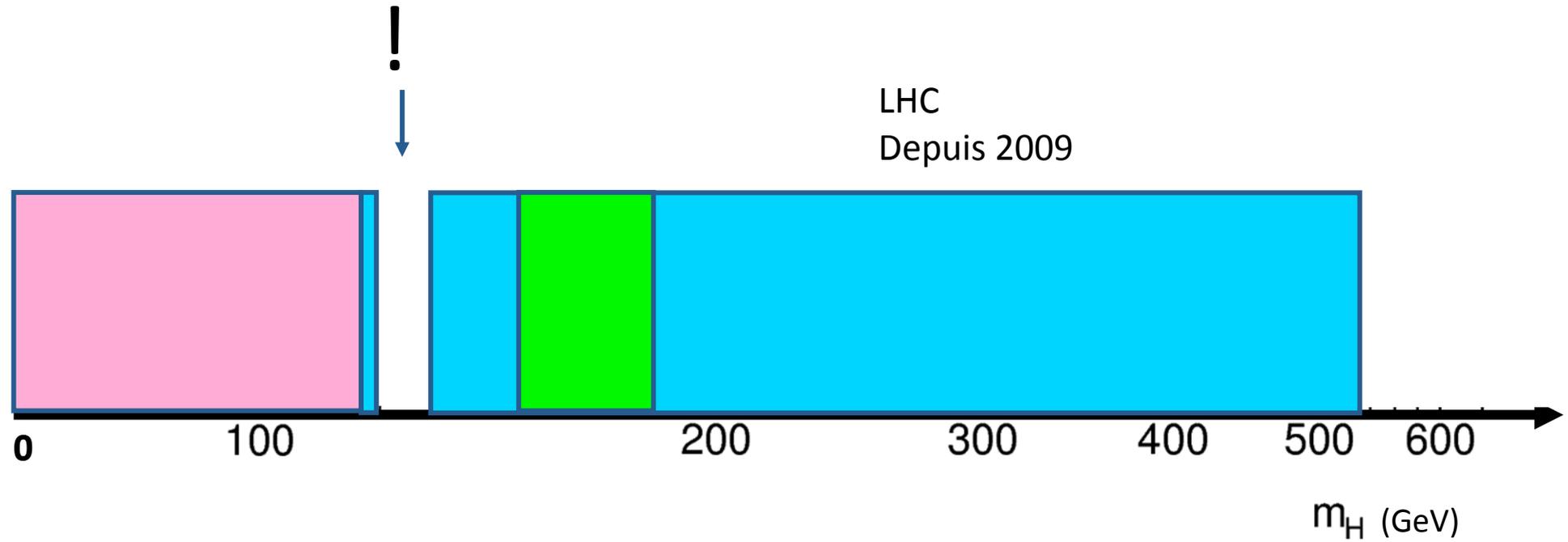
?



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie  $\Rightarrow m_H < 1000$  GeV

<sup>47</sup>  
1GeV  $\sim$  masse d'un proton/atome d'hydrogène

# La chasse au boson de Higgs

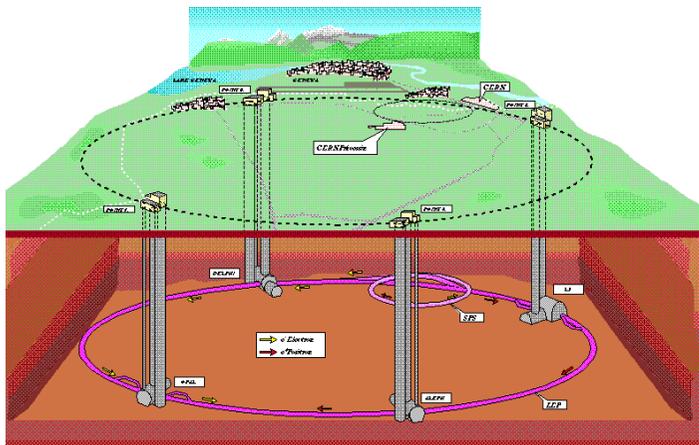
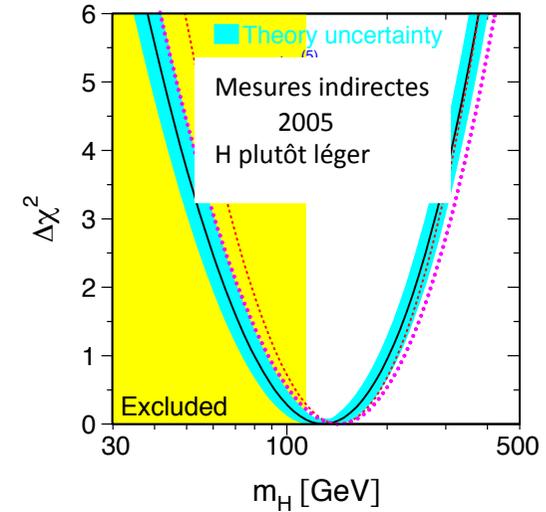
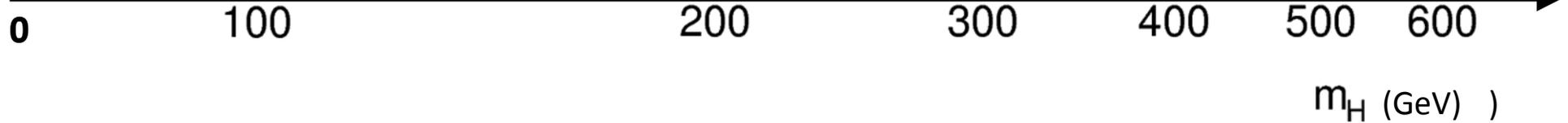


Le LHC au cern



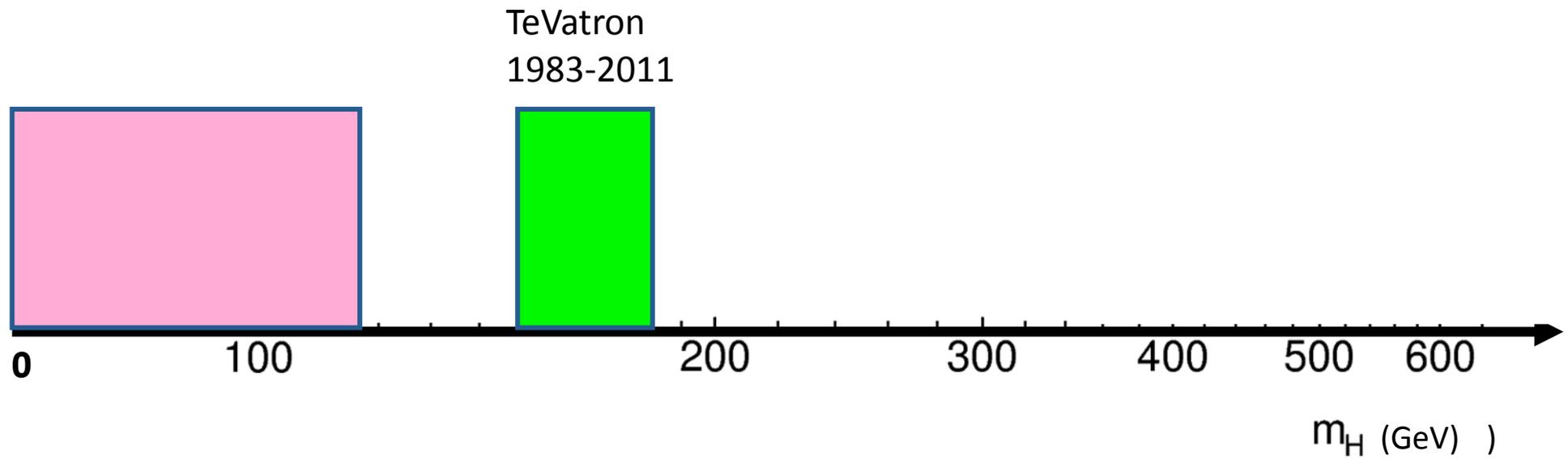
# La chasse au boson de Higgs

LEP  
1989-2000



Le LEP au cern  
(pres de Genève)

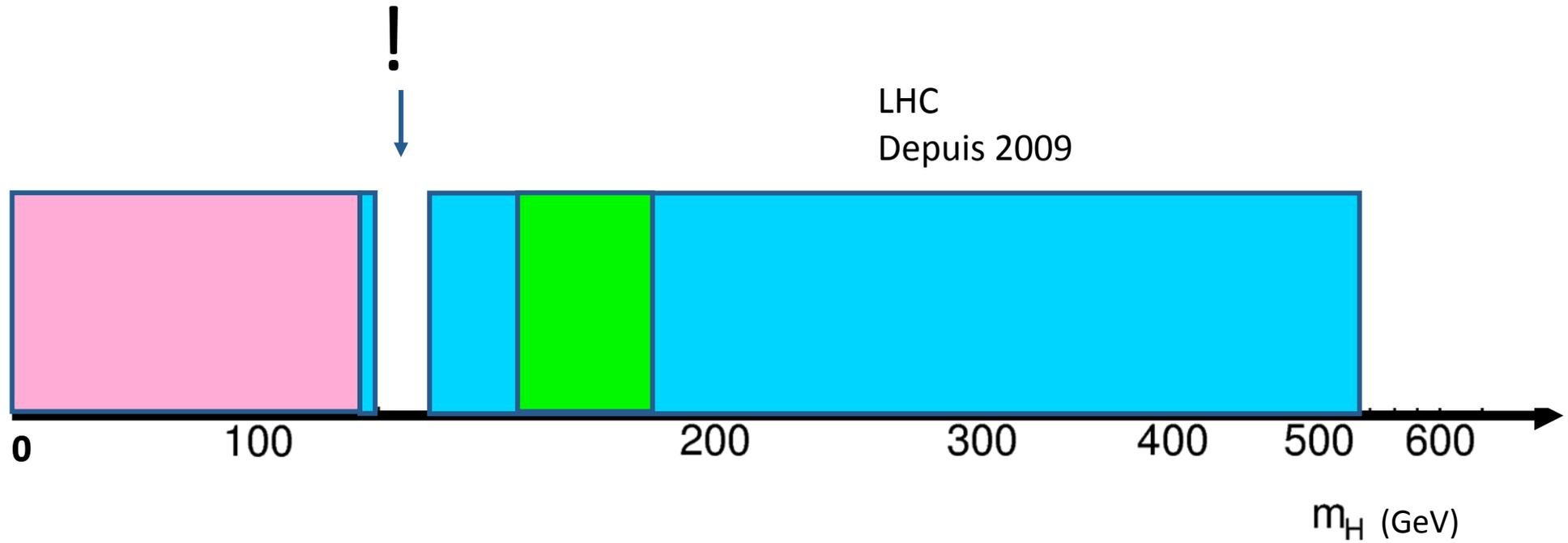
# La chasse au boson de Higgs



Le TeVatron à Fermilab  
(pres de Chicago)



# La chasse au boson de Higgs



Le LHC au cern



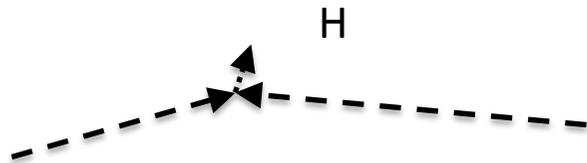
VOIR le boson de Higgs

$$E=mc^2$$



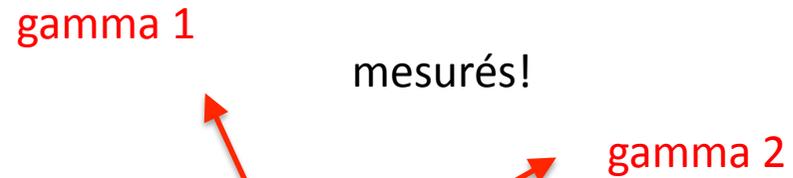
En fait, la formule complète est  $E^2=p^2c^2+m^2c^4$   
 $p$  est l'impulsion,  $mv$  en mécanique classique  
En choisissant bien les unités, on se débarrasse de  $c$ :

$$E^2=p^2+m^2$$



H, juste avant sa désintégration

$$m_H^2=E_H^2-p_H^2$$



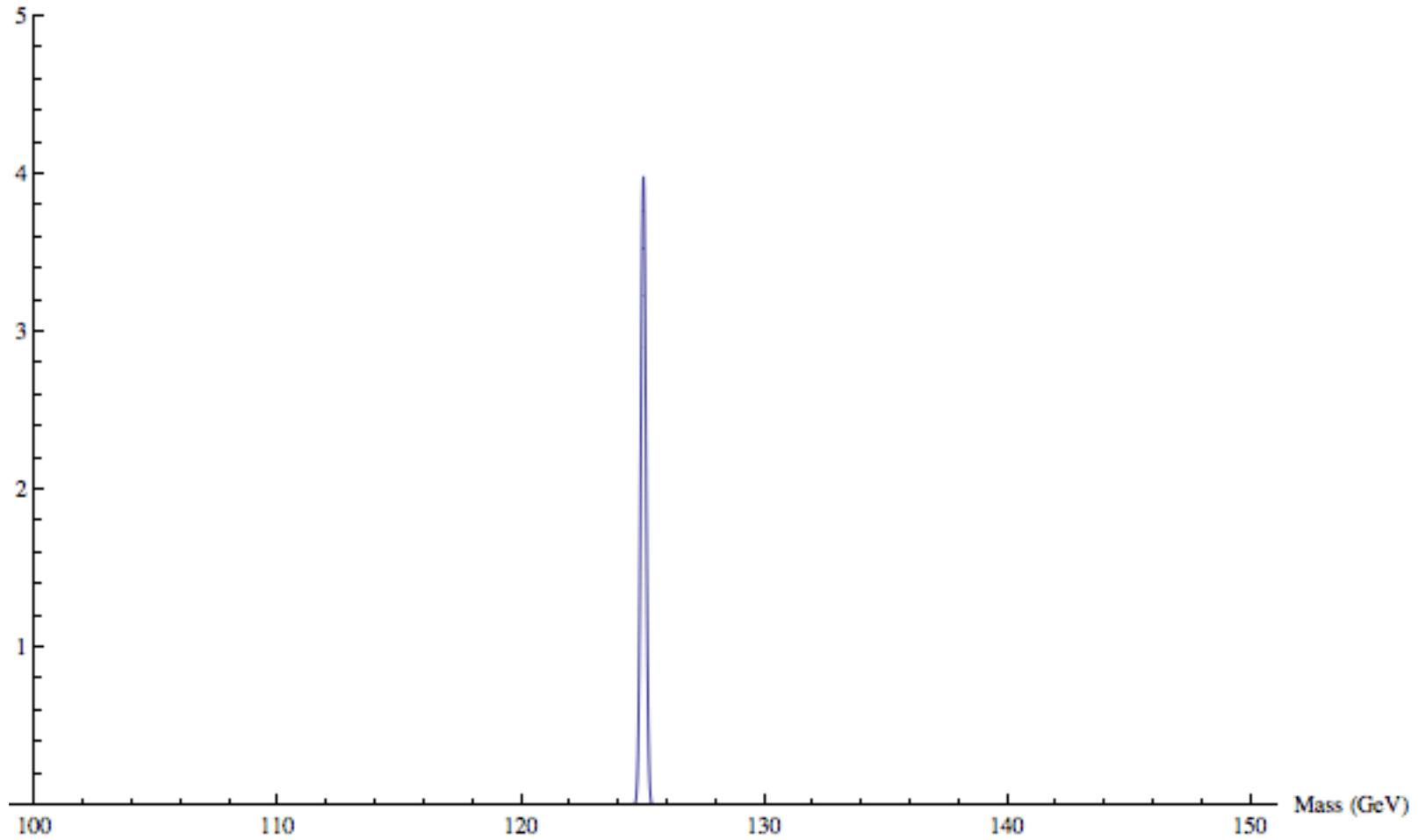
Juste après sa désintégration  
Conservation énergie et  
impulsion



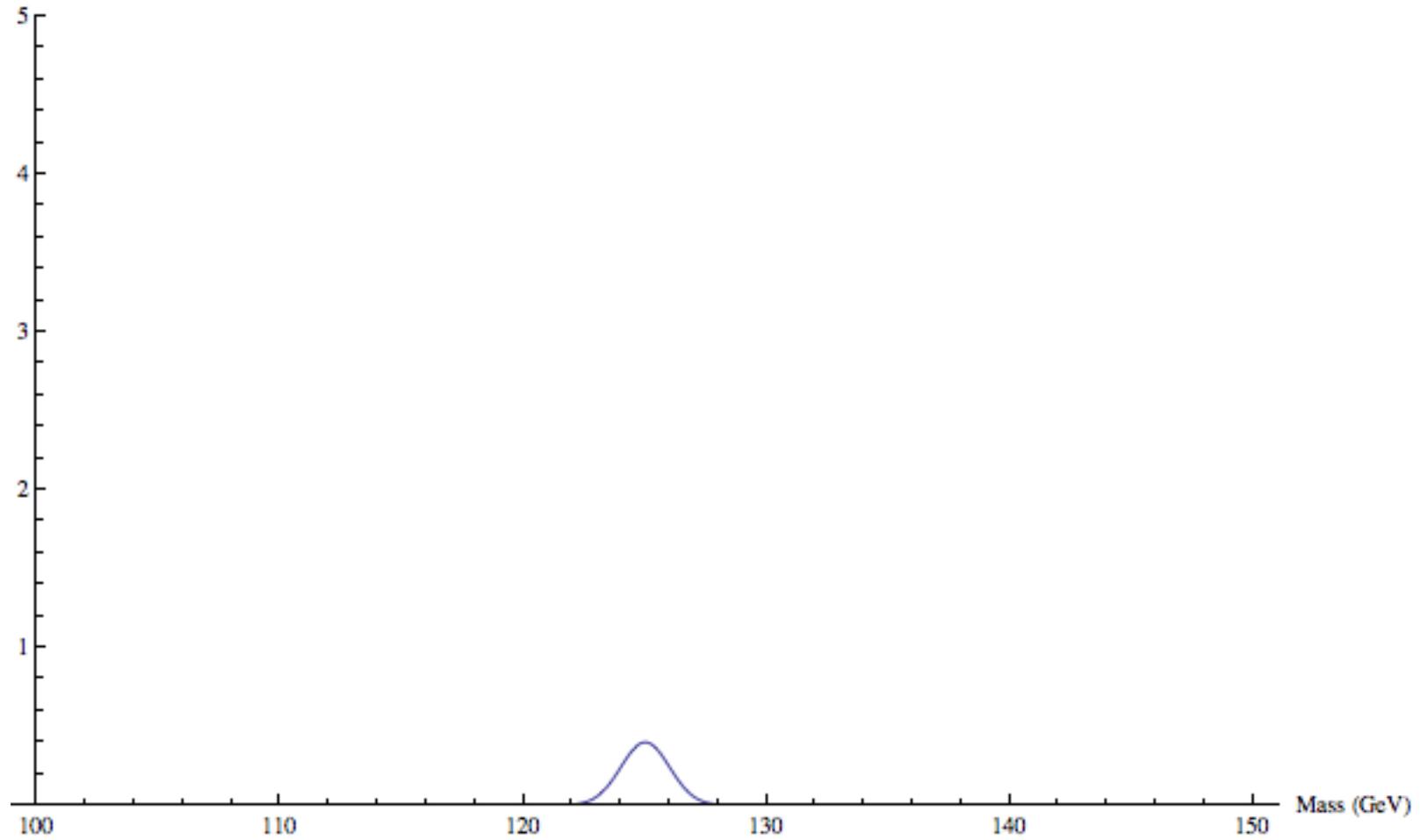
$$E_H=E_{g1}+E_{g2}$$
$$\vec{p}_H=\vec{p}_{g1}+\vec{p}_{g2}$$

⇒ on en déduit  
 $m_H!$

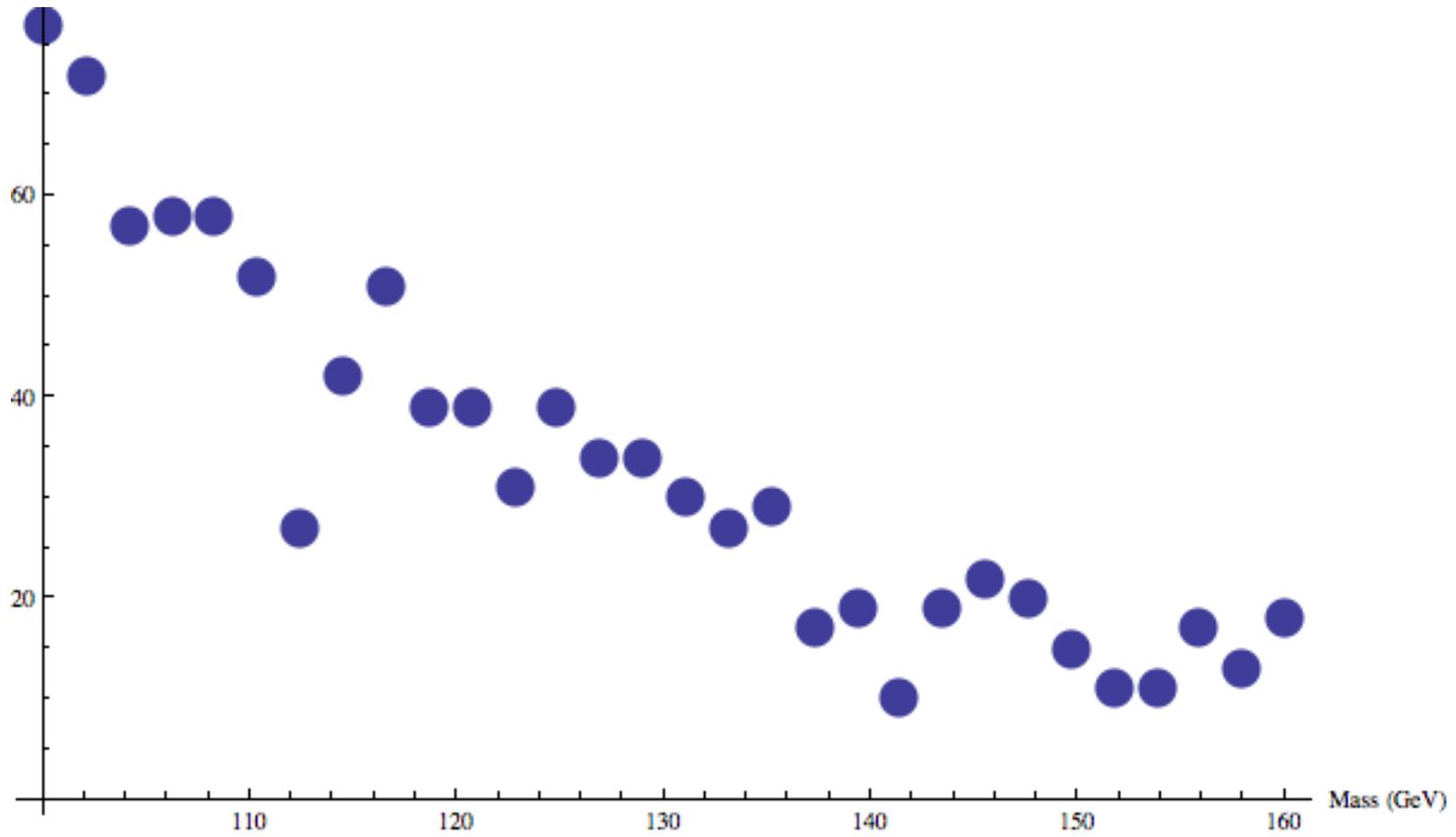
# Effet de la précision du détecteur



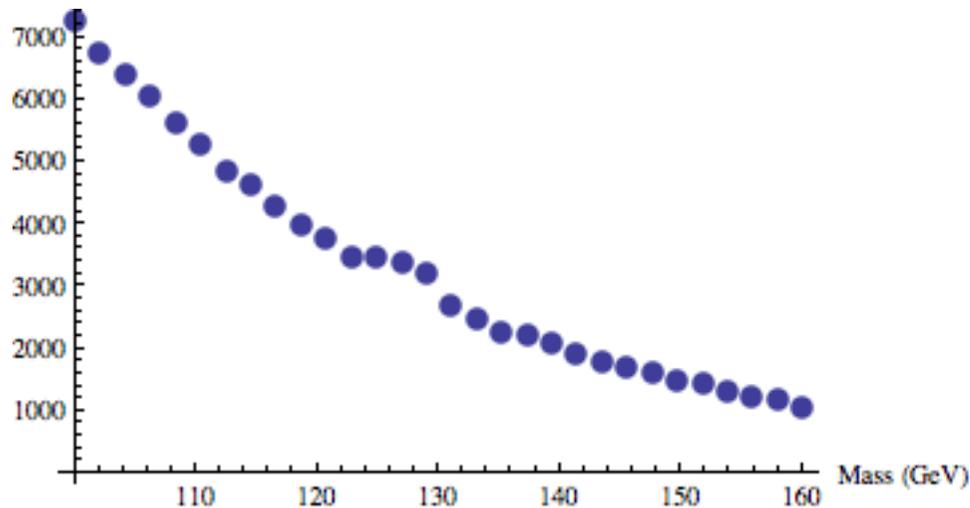
# Effet du bruit de fond



# Effet de la statistique



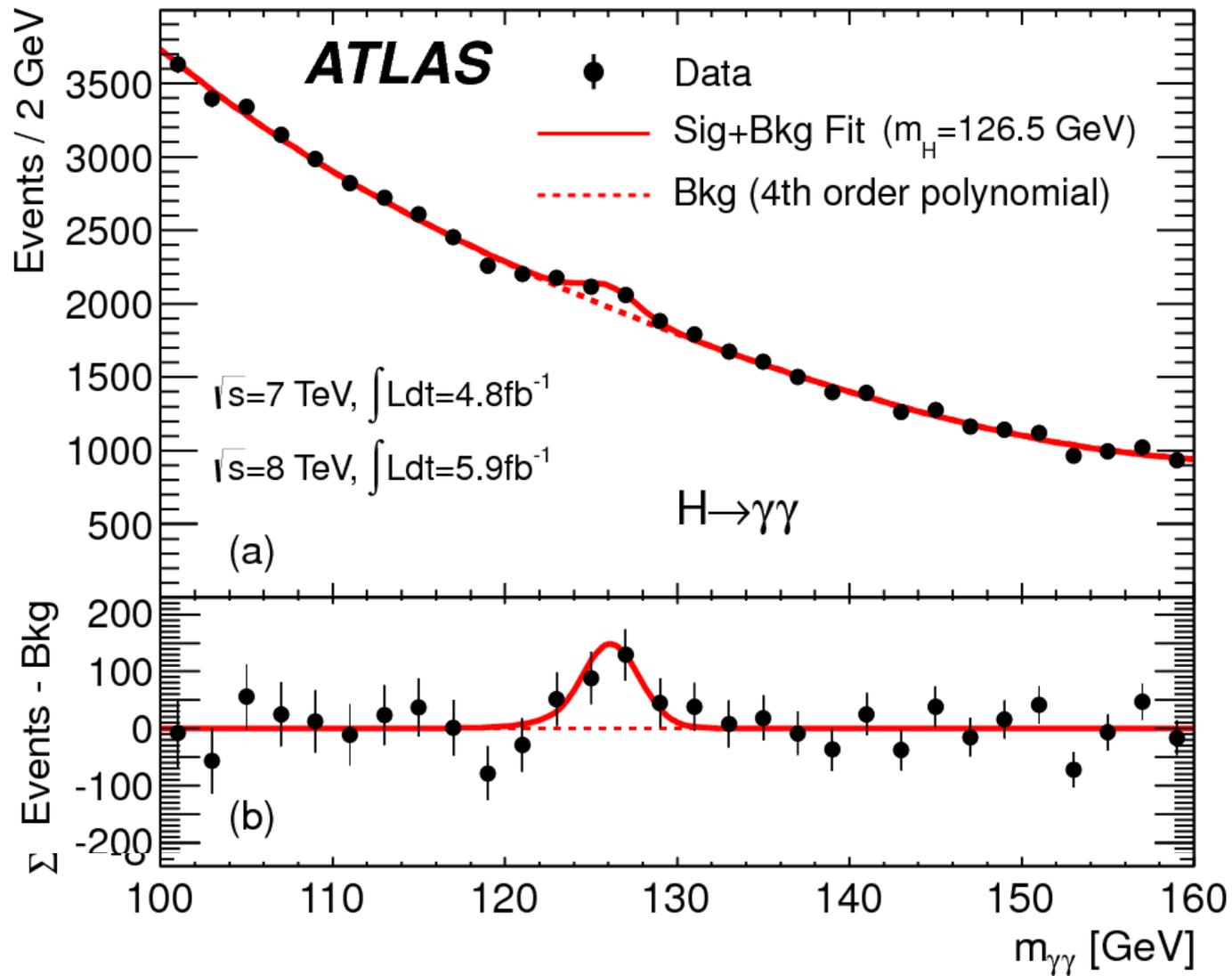
# Jobs du physicien



- Augmenter la taille du pic
- Réduire sa largeur
- Réduire le fond
- Evaluer les incertitudes

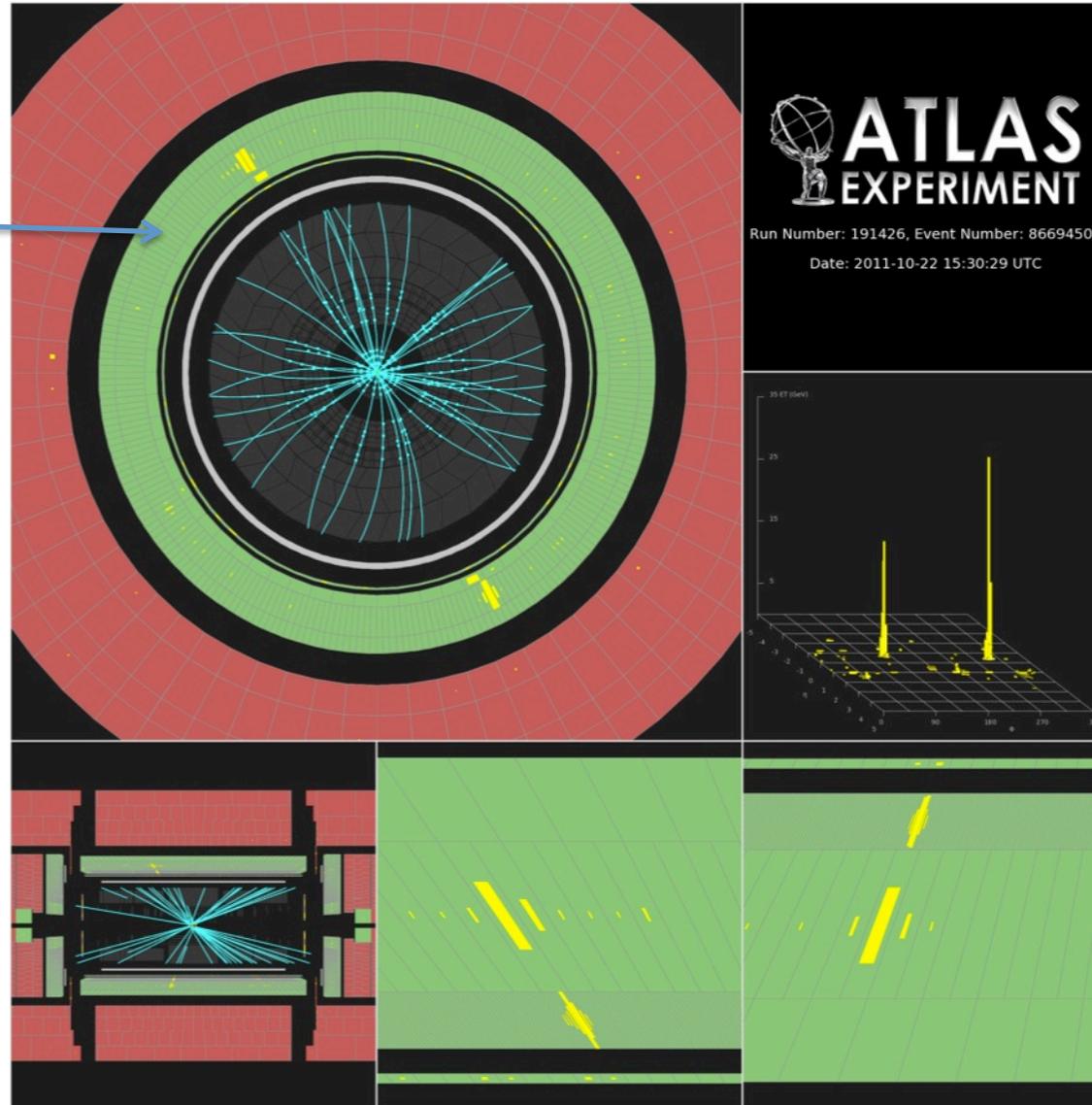
Job du LHC : augmenter la statistique,  
accompli au-delà des espérances

# Et maintenant « en vrai »

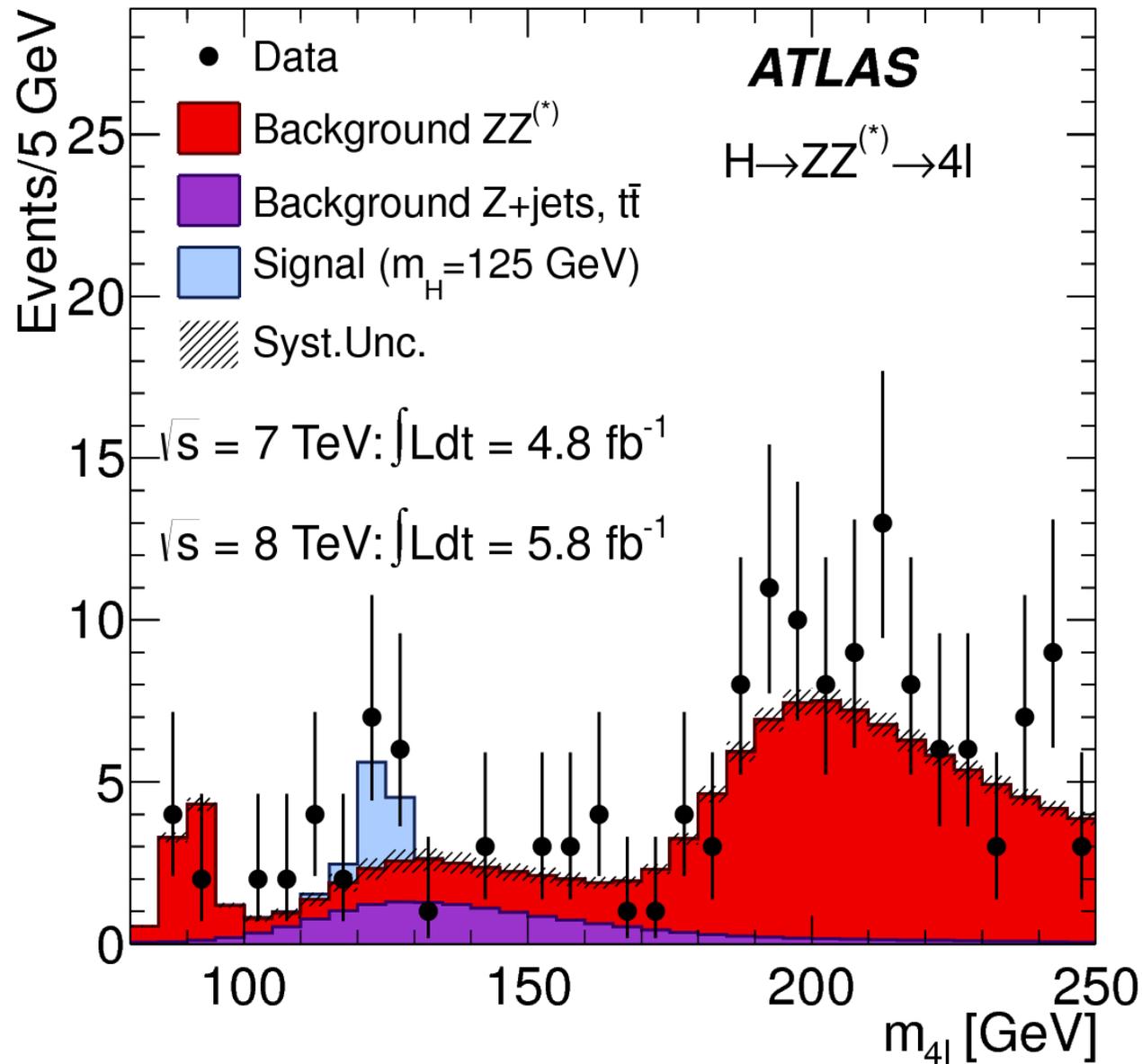


# Candidat $H \rightarrow \text{gamma gamma}$

Calo LArg



# Autre canal: $H \rightarrow Z(\rightarrow l^+l^-)Z(\rightarrow l^+l^-)$





# ATLAS EXPERIMENT

## Candidat

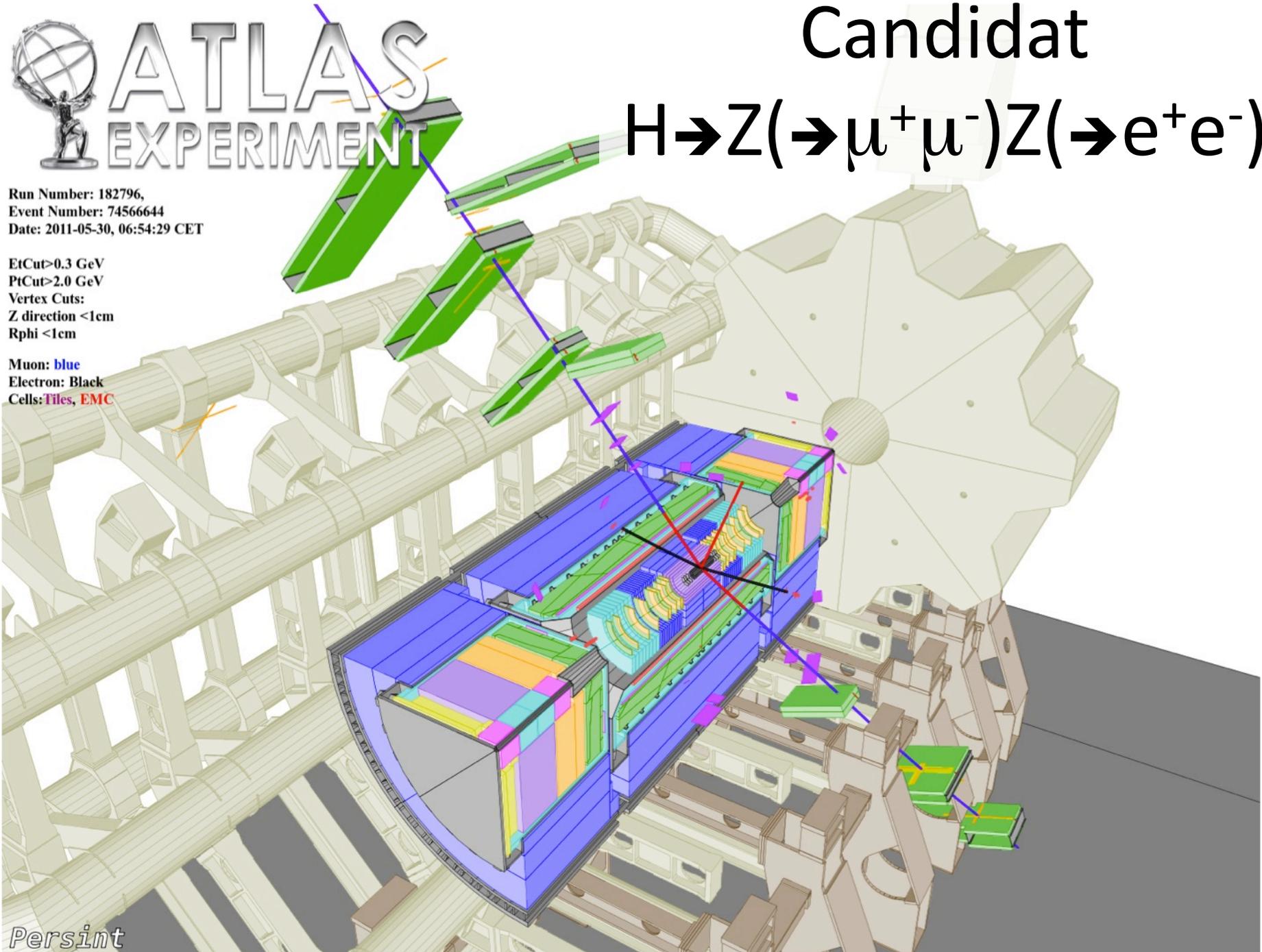
### $H \rightarrow Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) Z(\rightarrow e^+ e^-)$

Run Number: 182796,  
Event Number: 74566644  
Date: 2011-05-30, 06:54:29 CET

EtCut > 0.3 GeV  
PtCut > 2.0 GeV  
Vertex Cuts:  
Z direction < 1cm  
Rphi < 1cm

Muon: blue  
Electron: Black  
Cells: Tiles, EMC

Persint



Pourquoi sommes-nous certains d'avoir  
découvert une nouvelle particule ?

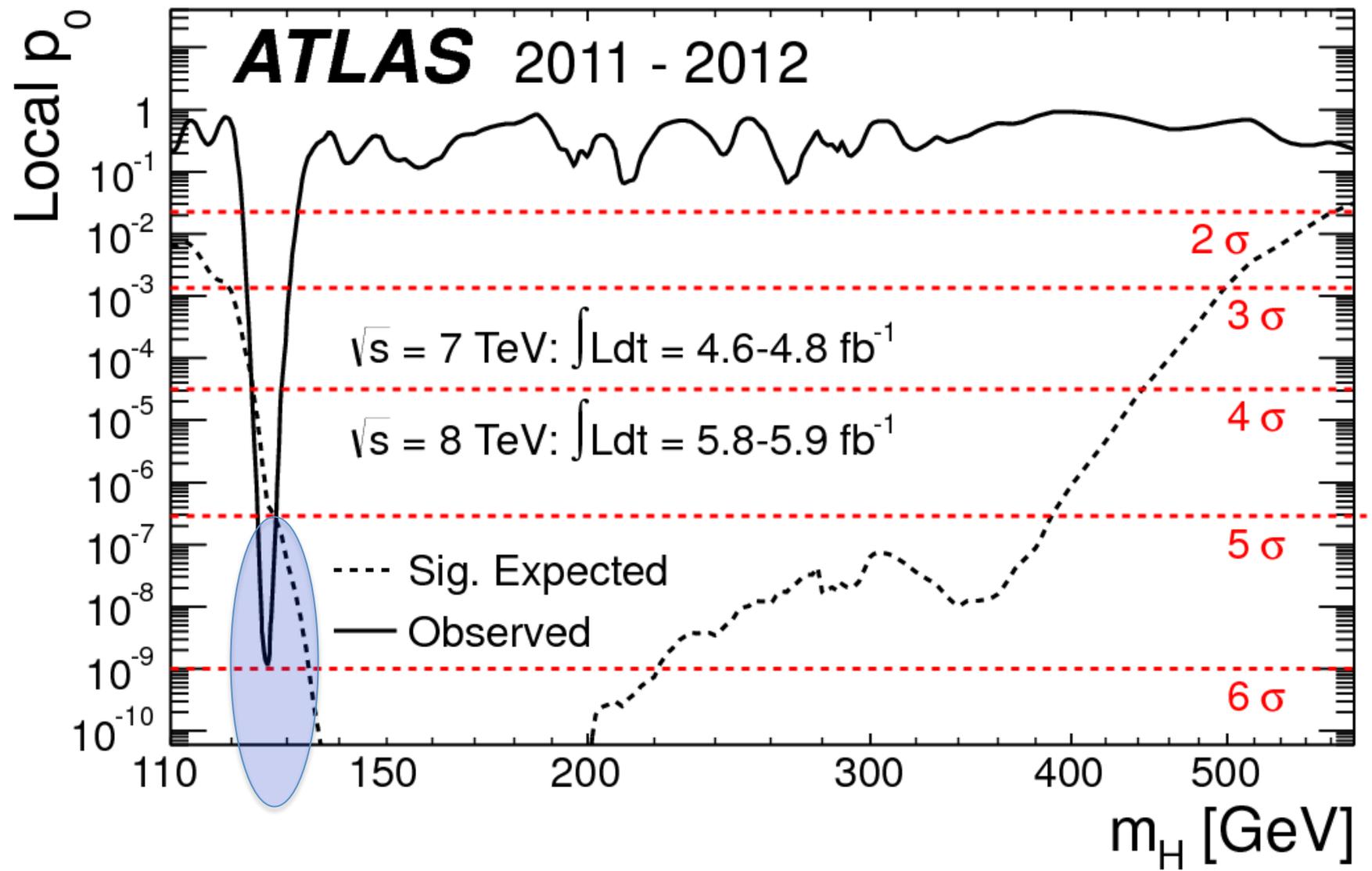
Certitude au sens physique, non mathématique!

On évalue : « la probabilité pour voir ce que l'on voit si il n'y avait que du bruit de fond » (en combinant toutes les informations dont on dispose, et en tenant compte de toutes les incertitudes)

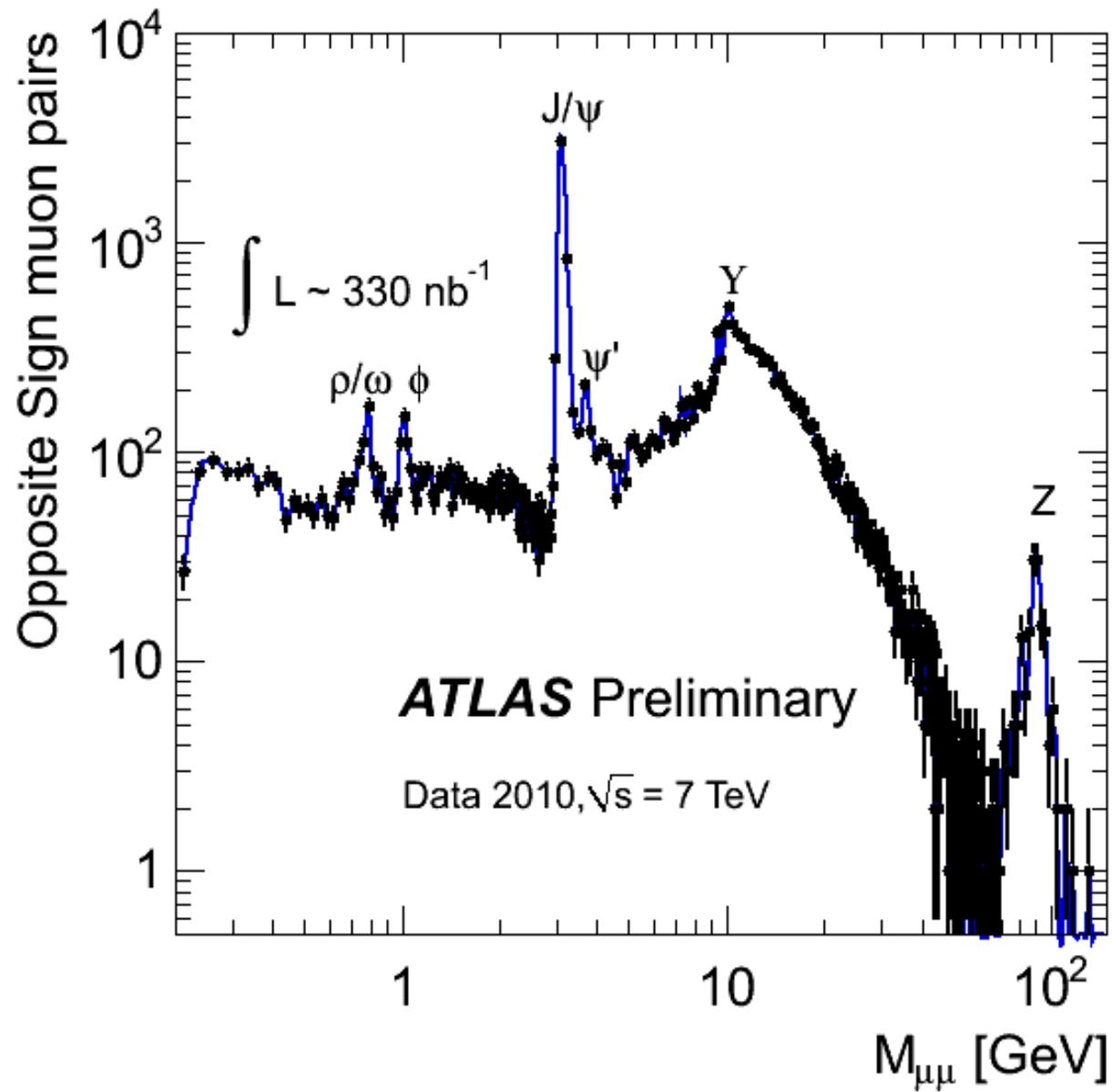
Si cette probabilité est meilleure que 5 écart standard, on peut, « légalement » parler de découverte .

5 écart standard : probabilité  $2.8 \cdot 10^{-7}$  , une chance sur 3 millions, ou bien  $\sim$  la probabilité de tirer les quatres as d'un jeu de 52 cartes, dans l'ordre



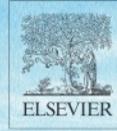


# Ré-observation de particules connues

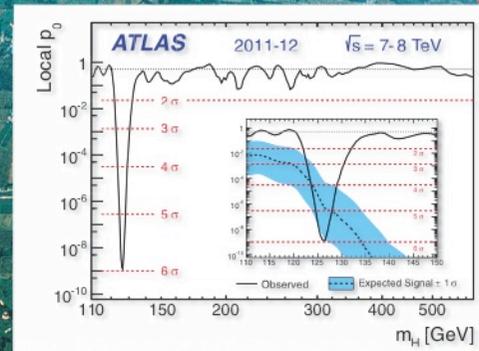
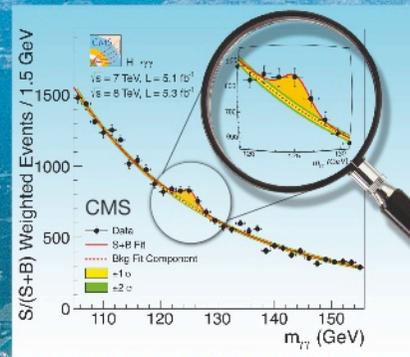


De plus:

- Nous avons également observé des particules connues du modèle standard avec leurs propriétés connues
- Excès d'événements dans trois canaux indépendants, mettant en jeu des éléments différents du détecteur, à la même masse.
- Excès d'événements dans tous les sous-échantillons: année de prise de donnée, électron vs muon, catégorie
- ATLAS et CMS, de technologies complètement différentes, conçues et exploitées par des équipes différentes, ont trouvé sans se concerter le même excès d'événements à la même masse



# First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

## The Positive Electron

CARL D. ANDERSON, *California Institute of Technology, Pasadena, California*

(Received February 28, 1933)

Out of a group of 1300 photographs of cosmic-ray tracks in a vertical Wilson chamber 15 tracks were of positive particles which could not have a mass as great as that of the proton. From an examination of the energy-loss and ionization produced it is concluded that the charge is less than twice, and is probably exactly equal to, that of the proton. If these particles carry unit positive charge the curvatures and ionizations produced require the mass to be less than twenty times the electron mass. These particles will be called positrons. Because they occur in groups associated with other tracks it is concluded that they must be secondary particles ejected from atomic nuclei.

*Editor*

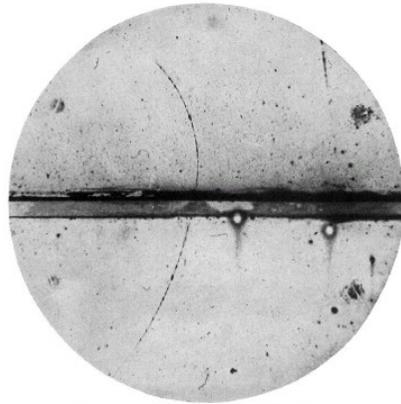


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_0=2.1 \times 10^9$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_0=7.5 \times 10^8$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



(~3000  
signataires en  
annexe)

## Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC <sup>☆</sup>

ATLAS Collaboration <sup>\*</sup>

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 31 July 2012  
Received in revised form 8 August 2012  
Accepted 11 August 2012  
Available online 14 August 2012  
Editor: W.-D. Schlatter

### ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately  $4.8 \text{ fb}^{-1}$  collected at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  in 2011 and  $5.8 \text{ fb}^{-1}$  at  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  in 2012. Individual searches in the channels  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$  in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for  $H \rightarrow ZZ^{(*)}$ ,  $WW^{(*)}$ ,  $b\bar{b}$  and  $\tau^+\tau^-$  in the 7 TeV data and results from improved analyses of the  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$  and  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of  $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys) GeV}$  is presented. This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of  $1.7 \times 10^{-9}$ , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



(~3000  
signataires en  
annexe)

## Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC <sup>☆</sup>

CMS Collaboration <sup>\*</sup>

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 31 July 2012  
Received in revised form 9 August 2012  
Accepted 11 August 2012  
Available online 18 August 2012  
Editor: W.-D. Schlatter

#### Keywords:

CMS  
Physics  
Higgs

### ABSTRACT

Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to  $5.1 \text{ fb}^{-1}$  at 7 TeV and  $5.3 \text{ fb}^{-1}$  at 8 TeV. The search is performed in five decay modes:  $\gamma\gamma$ ,  $ZZ$ ,  $W^+W^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ , and  $b\bar{b}$ . An excess of events is observed above the expected background, with a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV, signalling the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution,  $\gamma\gamma$  and  $ZZ$ ; a fit to these signals gives a mass of  $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.5 \text{ (syst.) GeV}$ . The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

# Séminaire du 4 juillet au CERN



rapt crowd watches as physicists Fabiola Gianotti (standing, left), Rolf Dieter-Heuer (right) and Joe Incandela (far right) unveil evidence for the Higgs boson.

# de 1964...à aujourd'hui



## 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  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

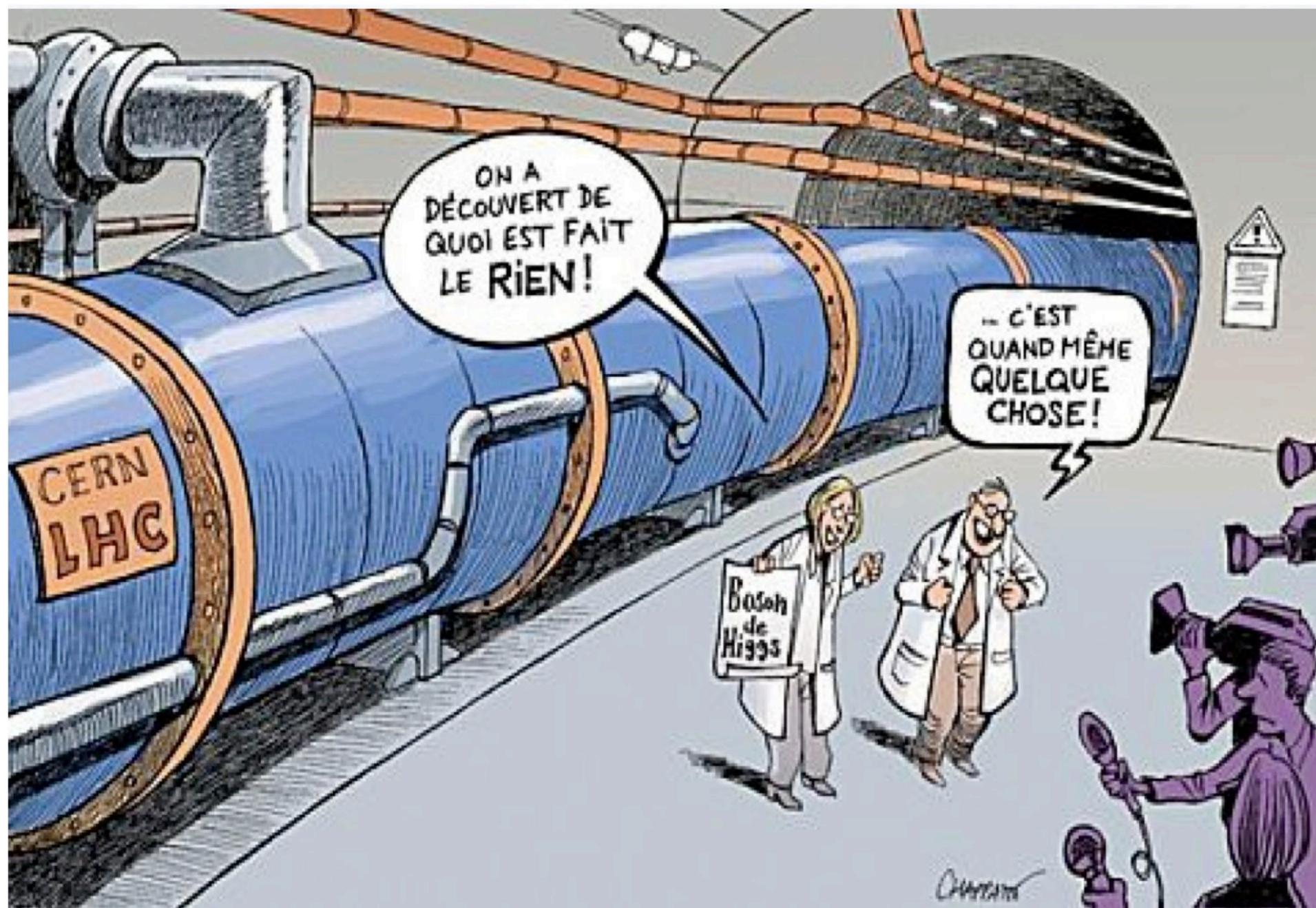
$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

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

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

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

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



ON A DÉCOUVERT DE QUOI EST FAIT LE RIEN!

CERN  
LHC

Boson  
de  
Higgs

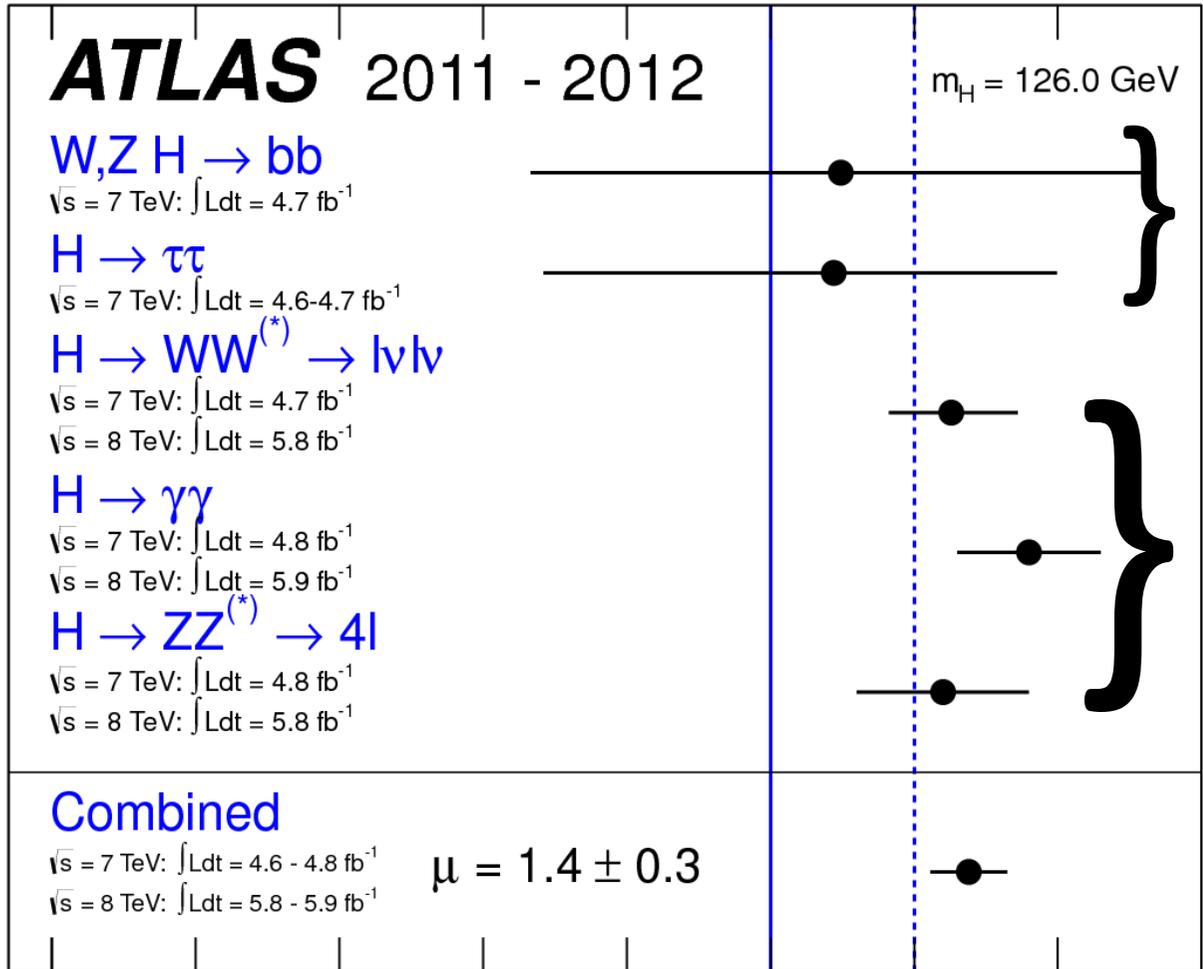
... C'EST QUAND MÊME QUELQUE CHOSE!

CHAMPAGNE

Est-ce que c'est bien le boson de  
Higgs?

Pas vu!

Vu!



Pas vu!

Vu!

(Le groupe ATLAS-LAL est impliqué dans ces trois canaux)

Signal strength ( $\mu$ ) (rapporté à la prédiction du modèle standard) <sub>74</sub>

Il est probable que la particule observée soit le boson de Higgs:

- L'excès d'événements est pile là où on l'attend, dans les canaux où on le cherchait, avec le niveau de signal attendu (mais à 50% près)
- Si le boson de Higgs du modèle standard existe, il est soit entre 120 et 130 GeV, soit au delà de 600 GeV (mais très défavorisé par les mesures indirectes)
- Depuis le démarrage du LHC :
  - petit excès 1.5 sigma à l'été 2011 pour ATLAS et CMS
  - annonce d'un excès à >3 sigma par les deux expériences en Décembre 2011
  - excès de 2.5-3 sigmas annoncé par les américains de Tevatron
  - excès à >5 sigmas annoncé en juillet 2012,

*tout se passe comme si il y avait un boson de Higgs à 126 GeV*

# Et maintenant...

- Mesure précise des différents modes de désintégration (vu/pas vu - > mesure précise)
  - Ils sont prédits précisément par le modèle standard
  - pour l'instant, très bon accord mais mesures imprécises
- Mesure du spin : 0 (modèle standard) scalaire, ou 2
- L'observation d'un boson de Higgs standard à 126 GeV permet un « élagage » des théories
- Recherche d'autres bosons de Higgs (hors modèle standard)
- A la fin de l'année, les expériences auront accumulé presque 3 fois les données publiées cet été
- Puis le LHC, sera arrêté pendant deux ans, et redémarrera en 2015-2018 à une énergie presque doublée (13Tev), et très haute luminosité après 2020
  - => à terme 10-100 fois les données actuelles
  - => recherche de nouvelle physique

Qu'est-ce que VOIR une particule ?

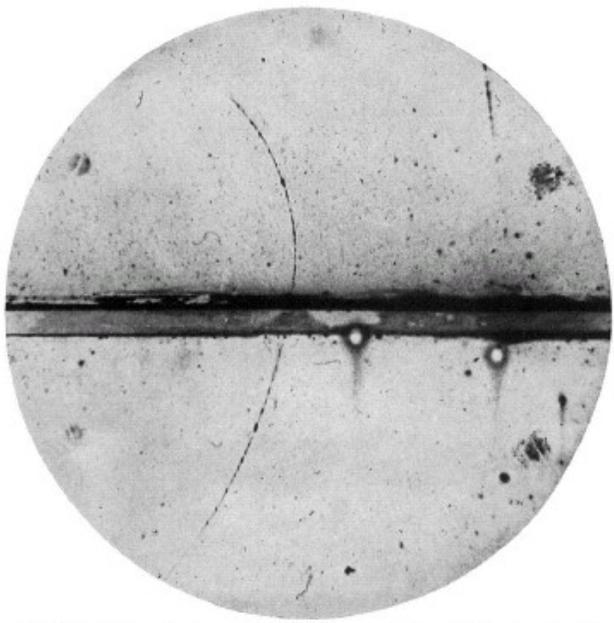
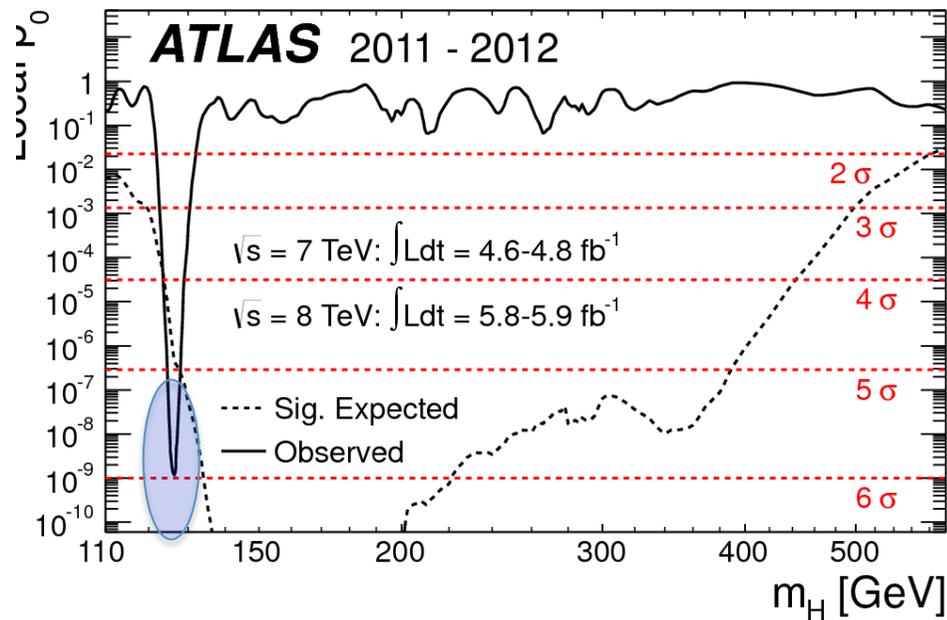
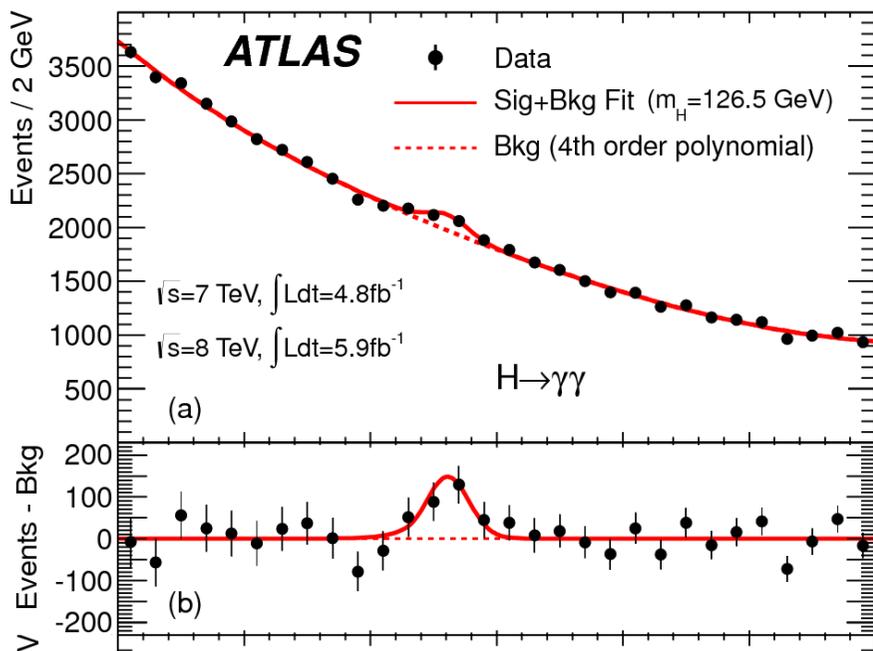
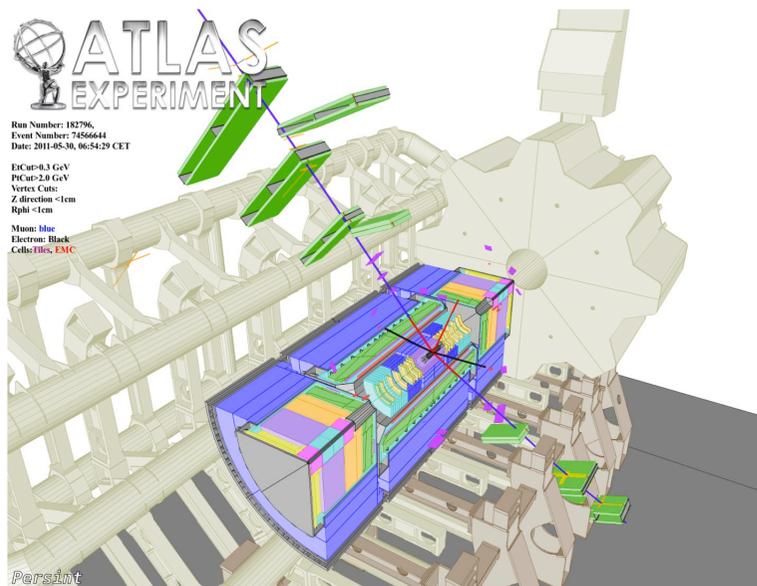
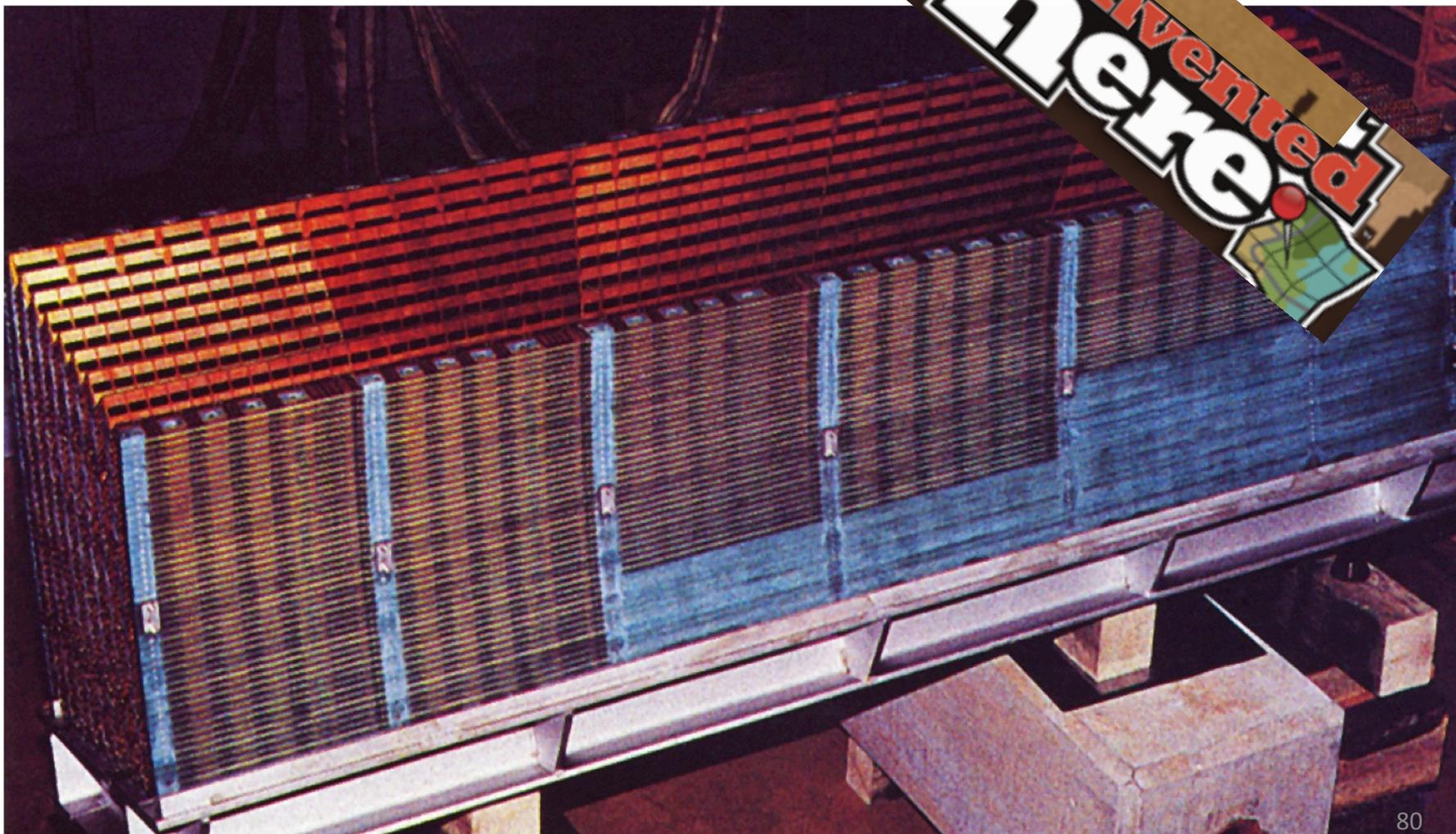


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_p = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_p = 7.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



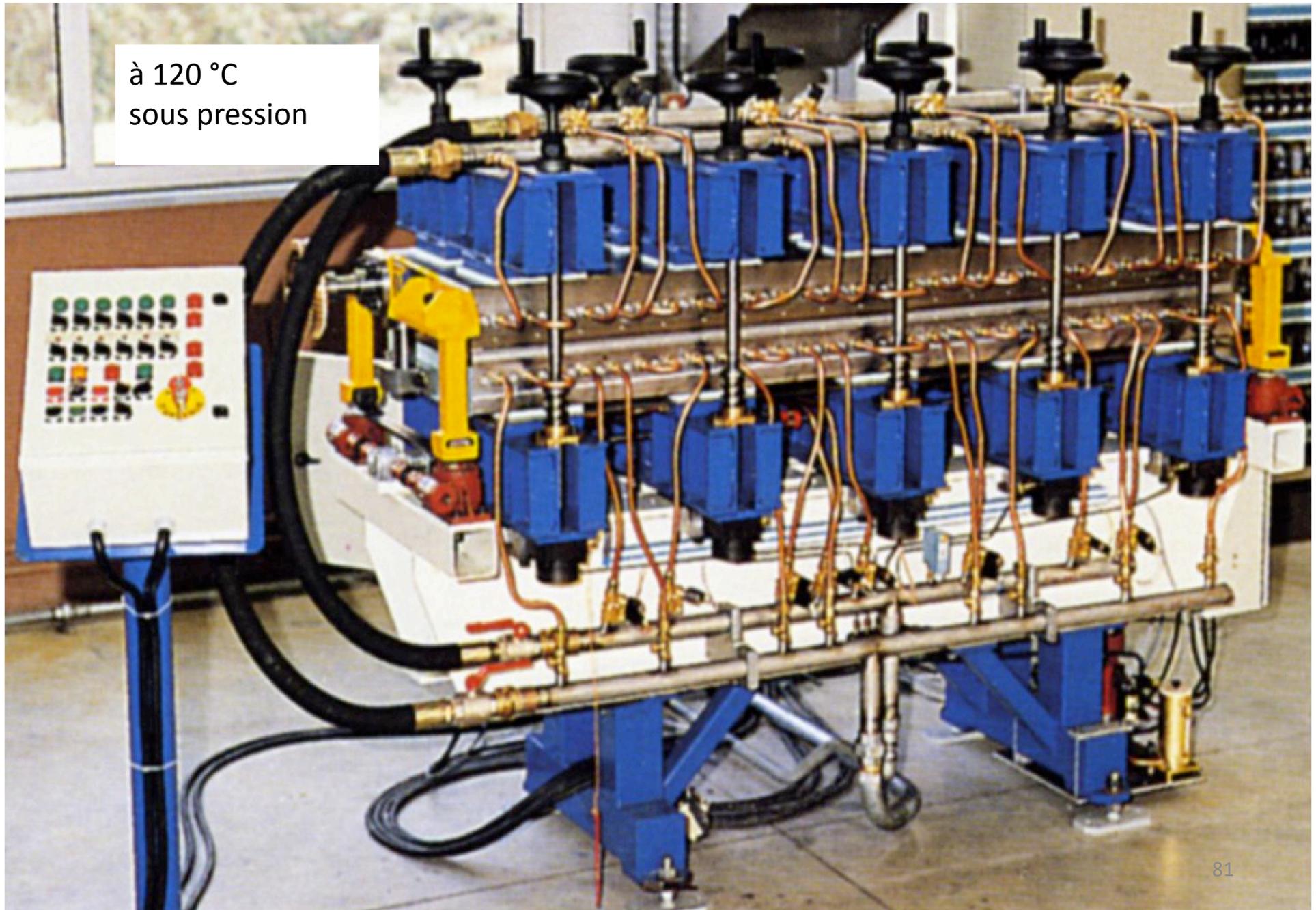
Qu'avons nous fait au LAL ?

Prototype 1992 d'un module Tonneau du calorimètre argon liquide



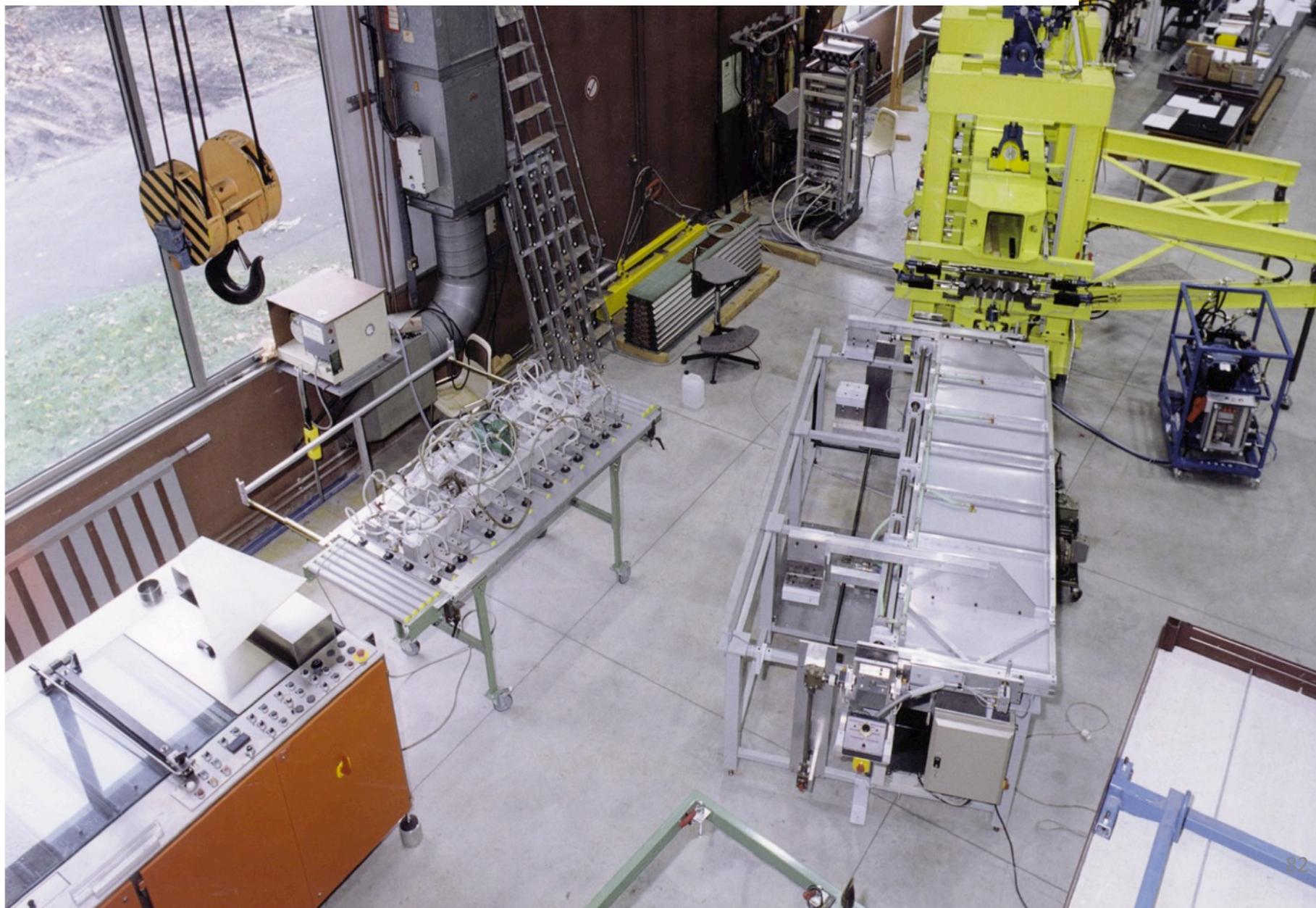
## Étude et fabrication d'outillages : la colleuse des absorbeurs

à 120 °C  
sous pression



# La construction du calorimètre à Argon liquide

Le hall IN2P3 et la chaîne de production des absorbeurs



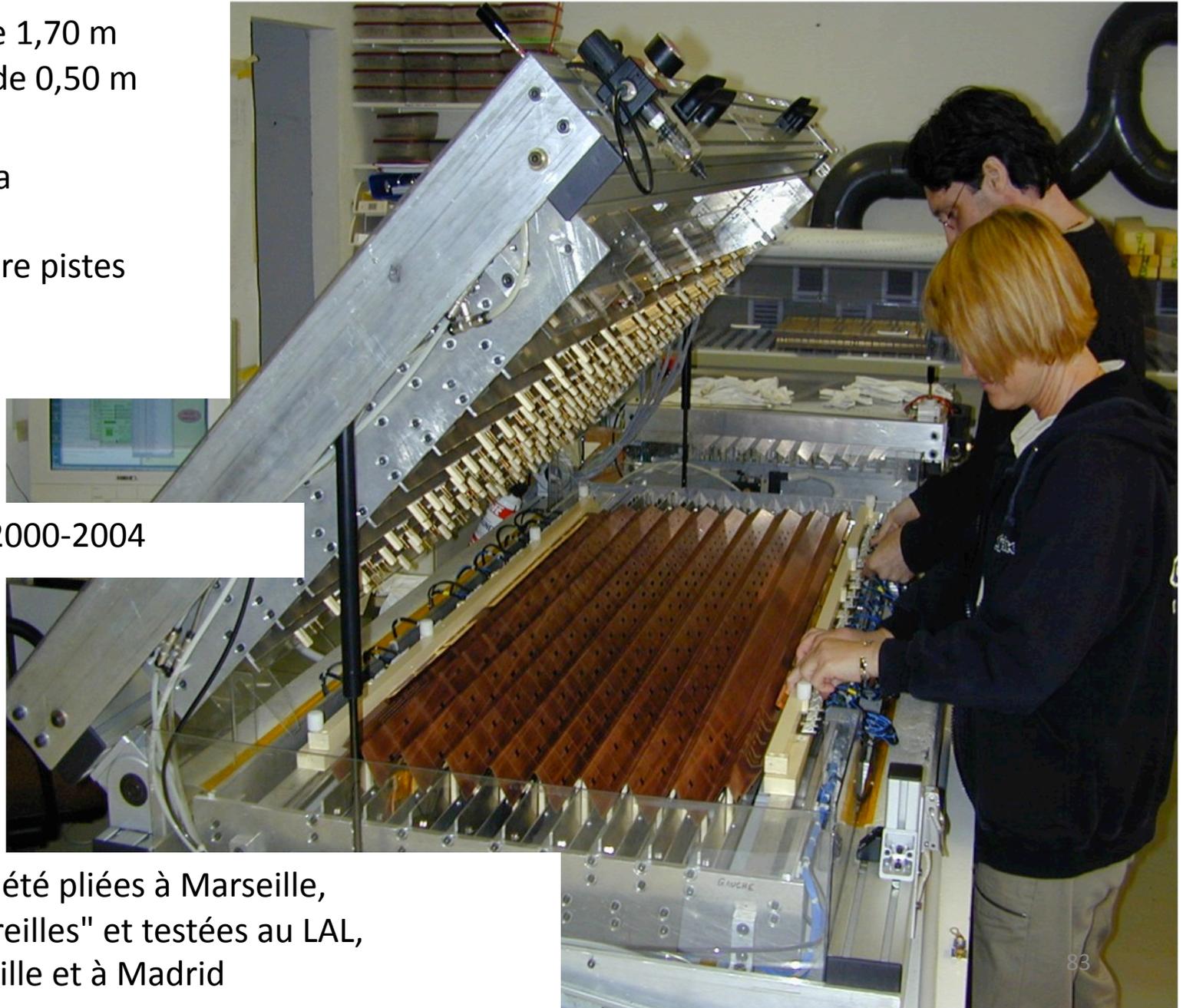
## Travail sur les électrodes des Bouchons

1536 électrodes de 1,70 m  
et 512 électrodes de 0,50 m

Chaque électrode a  
2100 résistances  
1000 capacités entre pistes

4 ans de travail : 2000-2004

Les électrodes ont été pliées à Marseille,  
équipées de 22 "oreilles" et testées au LAL,  
expédiées à Marseille et à Madrid



Test des Front-End Board

MAC based SBIT3  
With TMacLib

LV U and I

LV Power Supply

VME:

- TTCvx, TTCvi, PDG,PDC, Fanout
- CALIB
- SPACmaster
- miniROD readout

## Responsabilité de fabrication des harnais de câbles

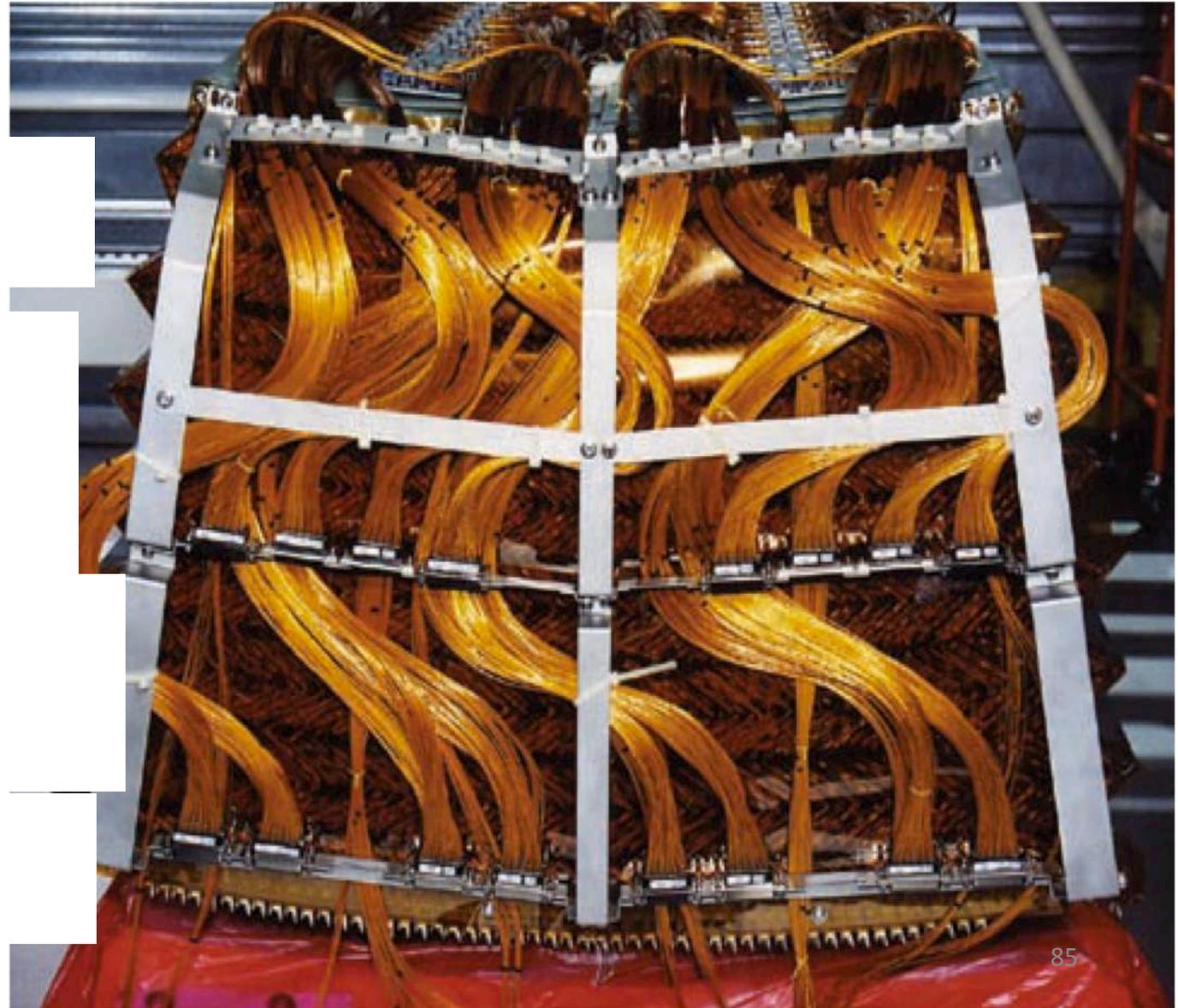
Raccorder les signaux du calorimètre

Câblage de n modules  
du Tonneau

Responsabilité  
de fabrication  
des câbles  
de tout le calorimètre

6600 harnais  
200 000 câbles coaxiaux  
(800 km)

Câbles et connecteurs  
résistant aux radiations



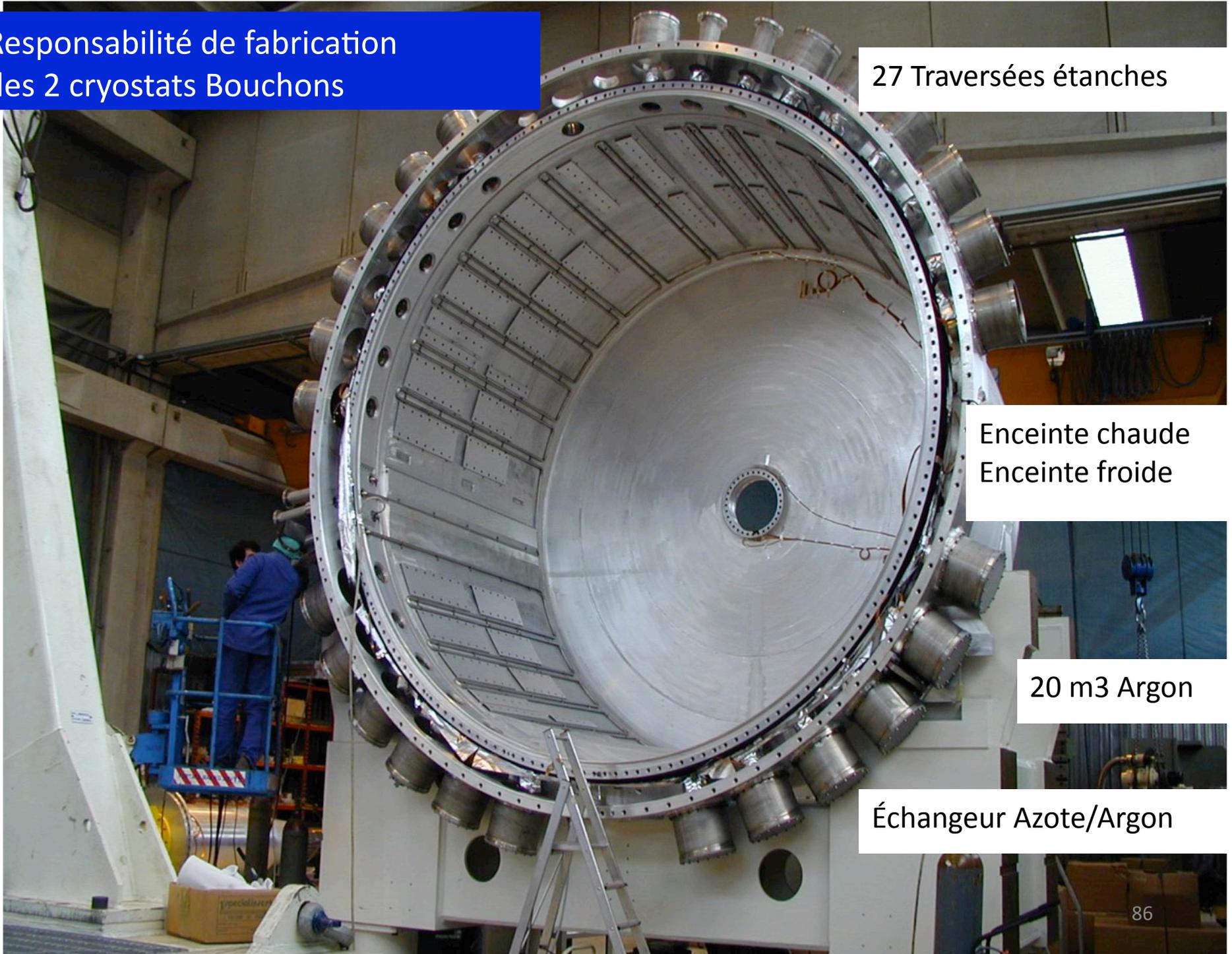
Responsabilité de fabrication  
des 2 cryostats Bouchons

27 Traversées étanches

Enceinte chaude  
Enceinte froide

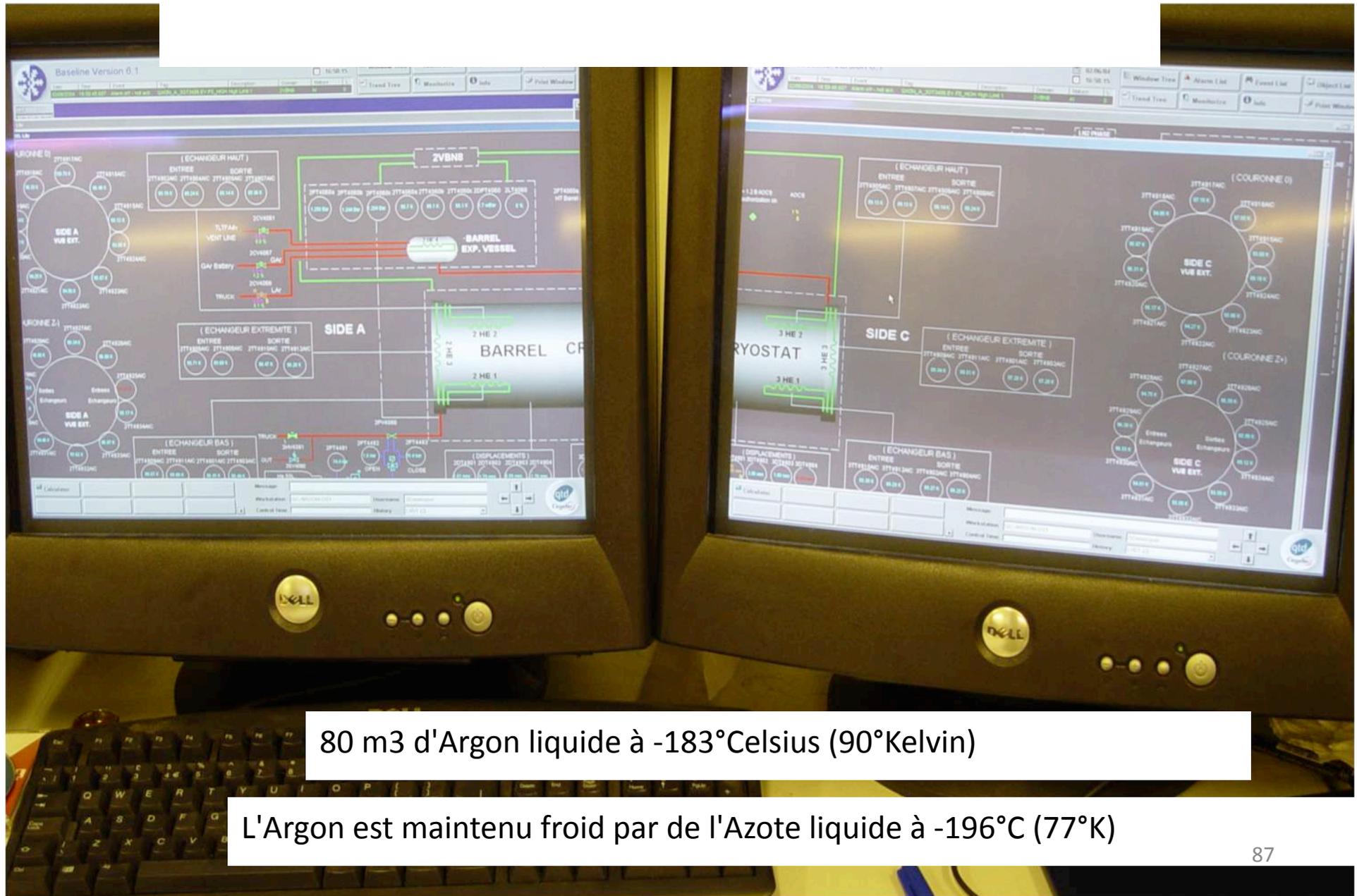
20 m<sup>3</sup> Argon

Échangeur Azote/Argon



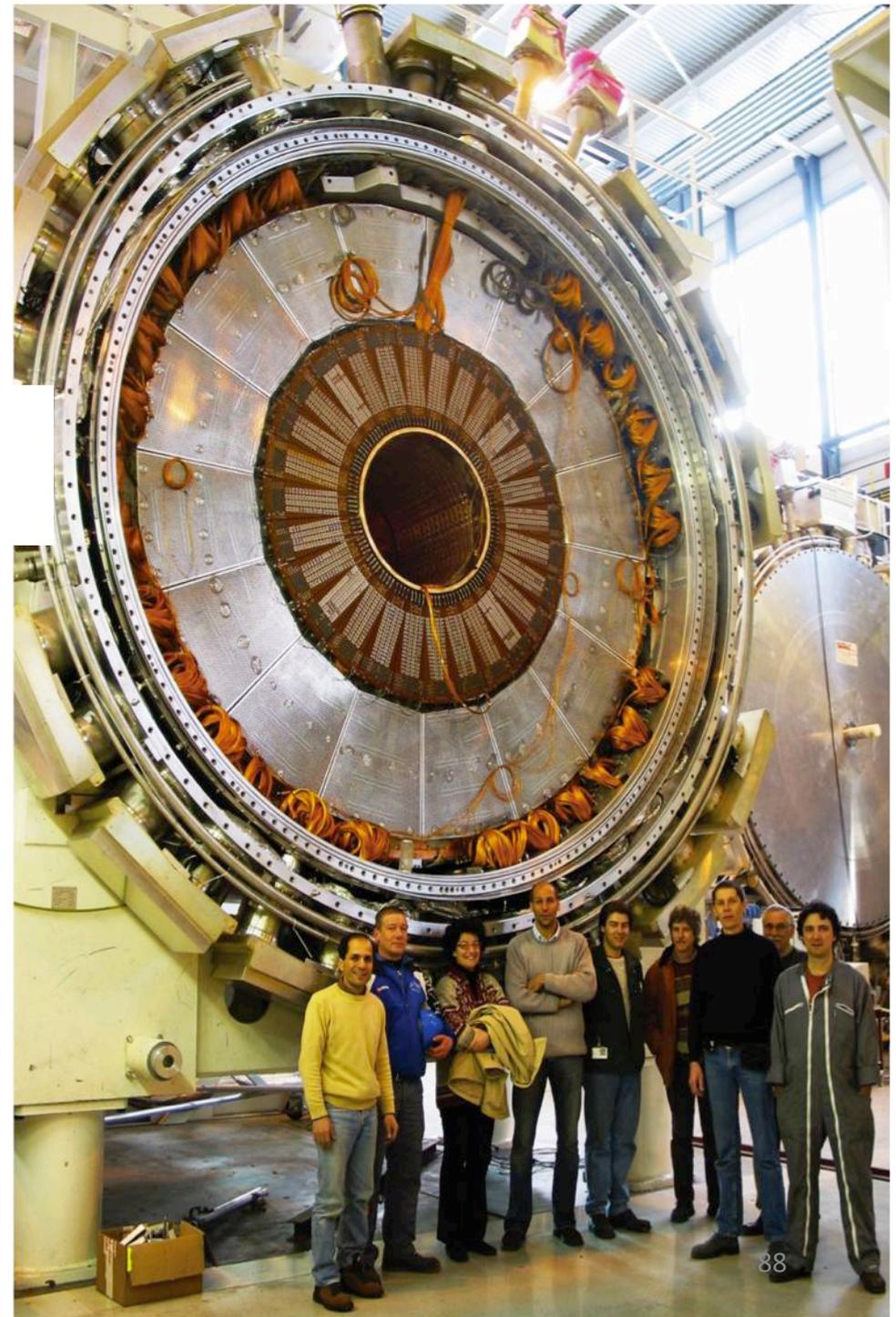
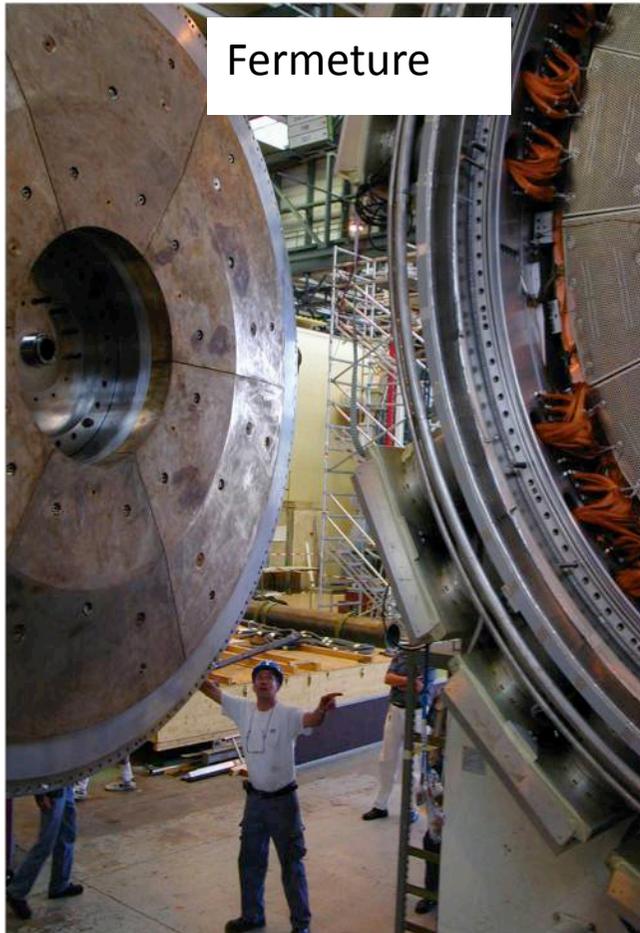
# Informatique de "Contrôle Commande" de la cryogénie

Assurer le refroidissement et le réchauffage des calorimètres



L'intégration  
presque achevée  
d'un cryostat Bouchon  
au bâtiment 180 du CERN

20 m<sup>3</sup> Argon  
280 tonnes



# Cryostat pour les tests en faisceaux



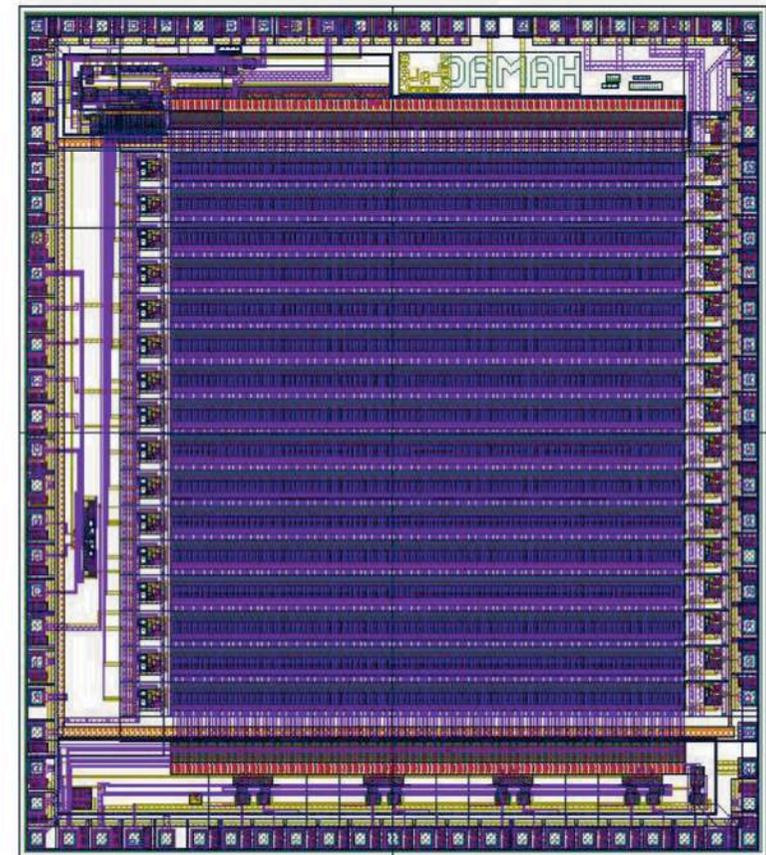
A permis la calibration précise de la technologie avant installation des modules de calorimètre dans ATLAS



## Les mémoires analogiques HAMAC-SCA

Mémorisation analogique à 40 MHz à l'entrée  
144 mémoires en série pipe-line  
Sortie analogique à 5 MHz  
13 bits de précision  
12 voies utiles et 4 voies de référence  
(85 000 HAMAC-SCA)

HAMAC-SCA



Et de nombreux autres développements en électronique...

# Tutoriel software au LAL en 2004



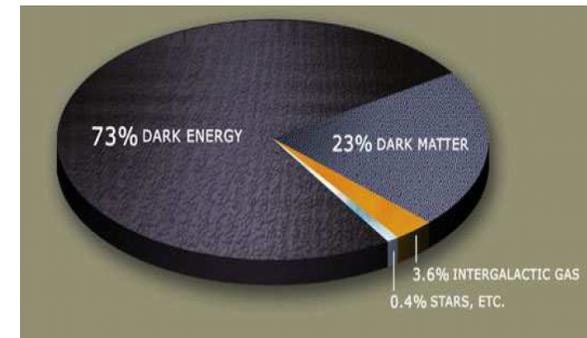
...pour illustrer nos nombreuses contributions au software de l'expérience



Le boson de Higgs n'explique pas  
tout, loin de là!

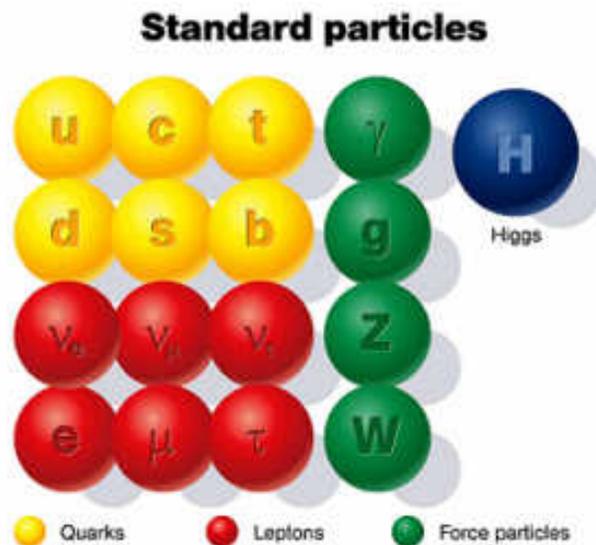
# Questions ouvertes

- (~200 articles publiés par Atlas, seulement ~20 sur le boson de Higgs)
- Pourquoi l'antimatière est-elle si rare ? (alors qu'on en produit autant que la matière dans les collisions au LHC)
- Quelle est la composition de l'univers?
  - On ne comprend que 4% du contenu énergétique de l'univers
- Comment introduire la gravité dans le Modèle Standard?
- Pourquoi 3 familles de fermions?
- Pourquoi de telles différences de masse entre neutrino, électron, et bosons lourds)
- Les forces de la nature ont-elles une origine commune? (« grande unification »)



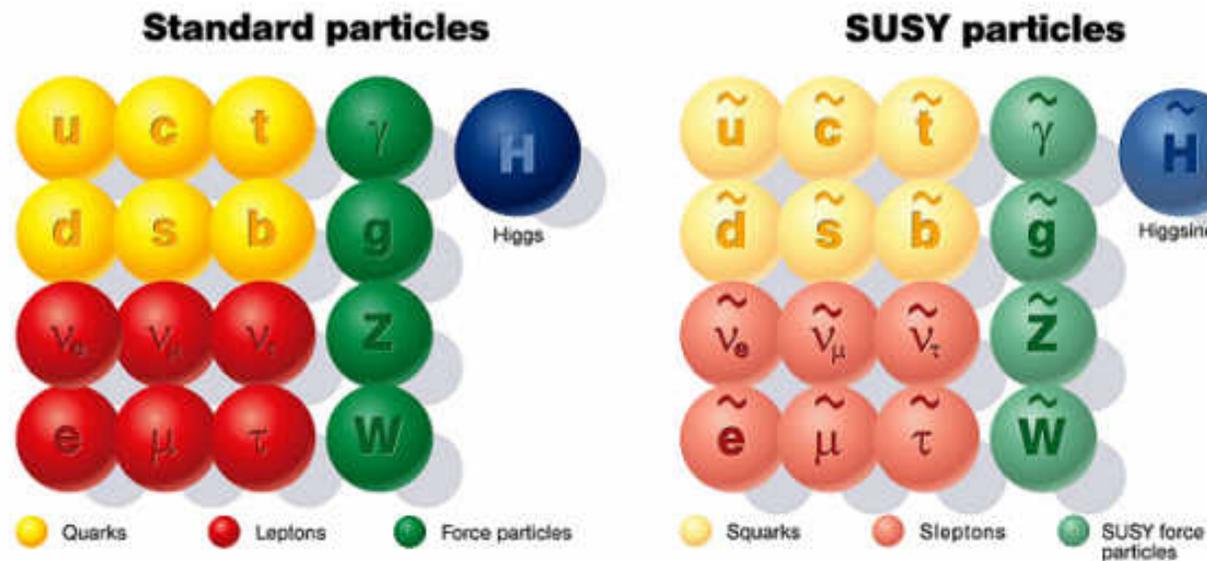
# La supersymétrie

- Problème pour définir correctement la masse du Higgs
  - Solution : supersymétrie
- Symétrie entre particules de matière (fermions) et particules véhiculant les interactions (bosons)
  - Fermion  $\leftrightarrow$  Boson



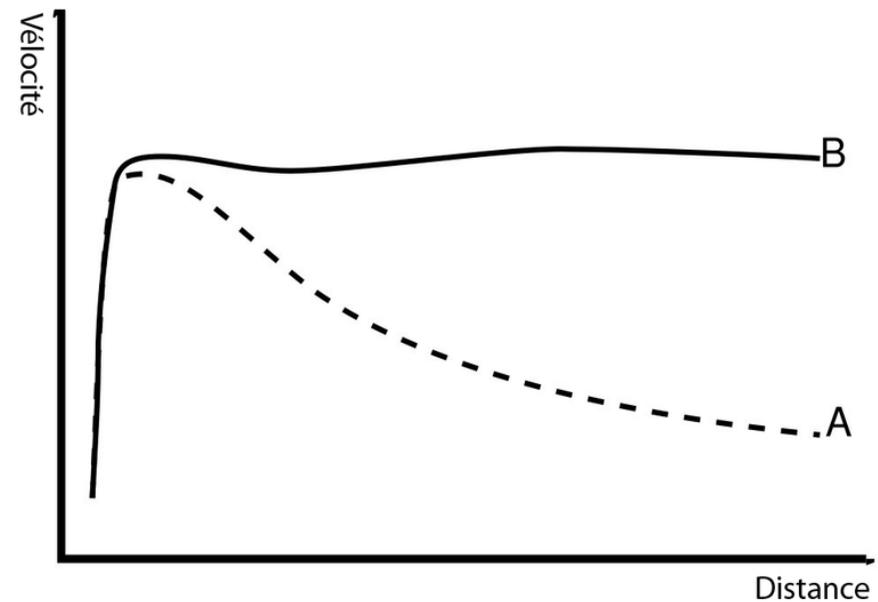
# La supersymétrie

- Problème pour définir correctement la masse du Higgs
  - Solution : supersymétrie
- Symétrie entre particules de matière (fermions) et particules véhiculant les interactions (bosons)
  - Fermion  $\leftrightarrow$  Boson



# Matière noire

- Les étoiles situées à la périphérie des galaxies spirales semblent tourner trop vite:
  - ⇒ Il y a de la masse sous une forme non lumineuse, c'est la **Matière Noire**
  - ⇒ ~90% de la densité totale de l'Univers observable
  - ⇒ aucune explication à ce jour



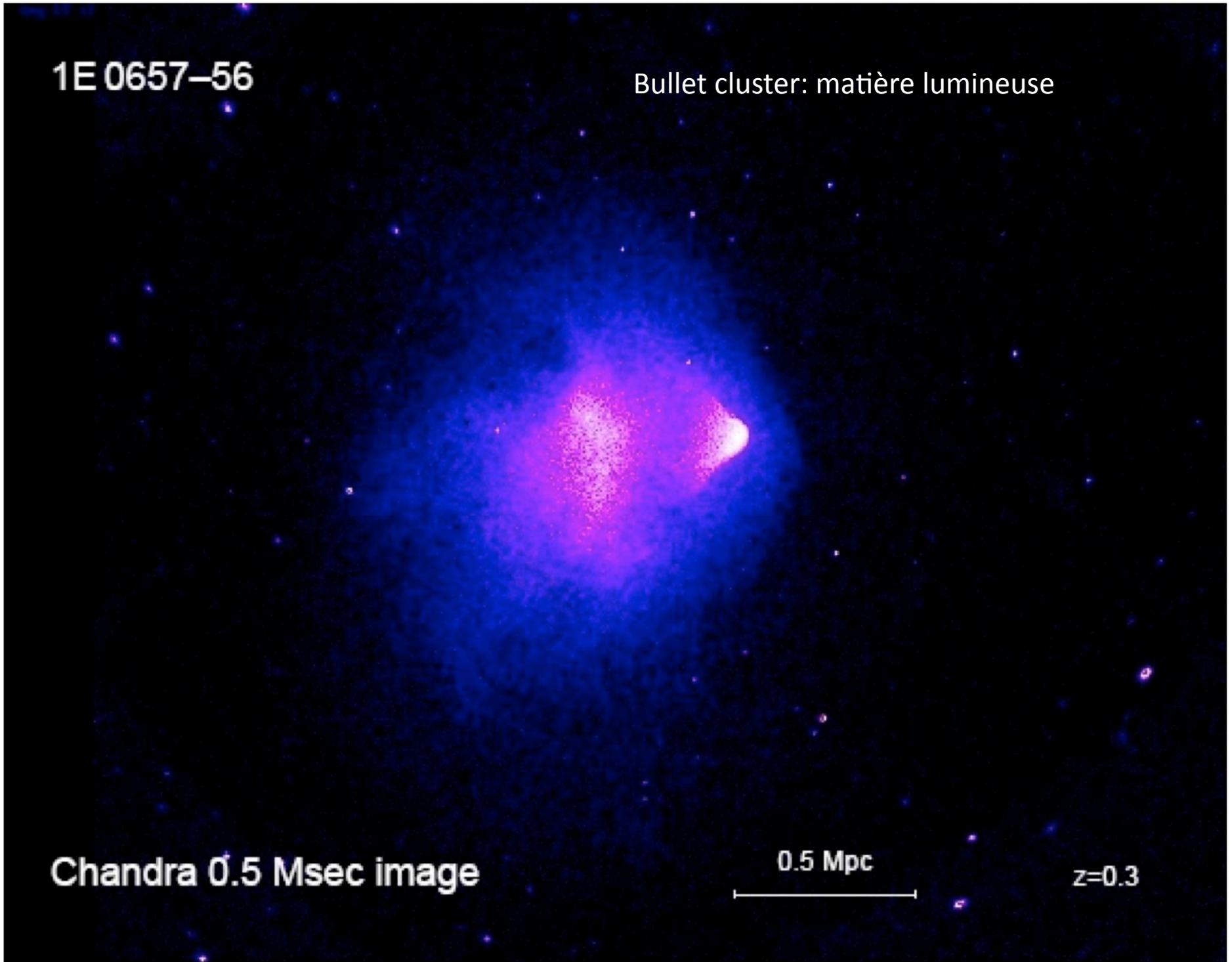
1E 0657-56

Bullet cluster: matière lumineuse

Chandra 0.5 Msec image

0.5 Mpc

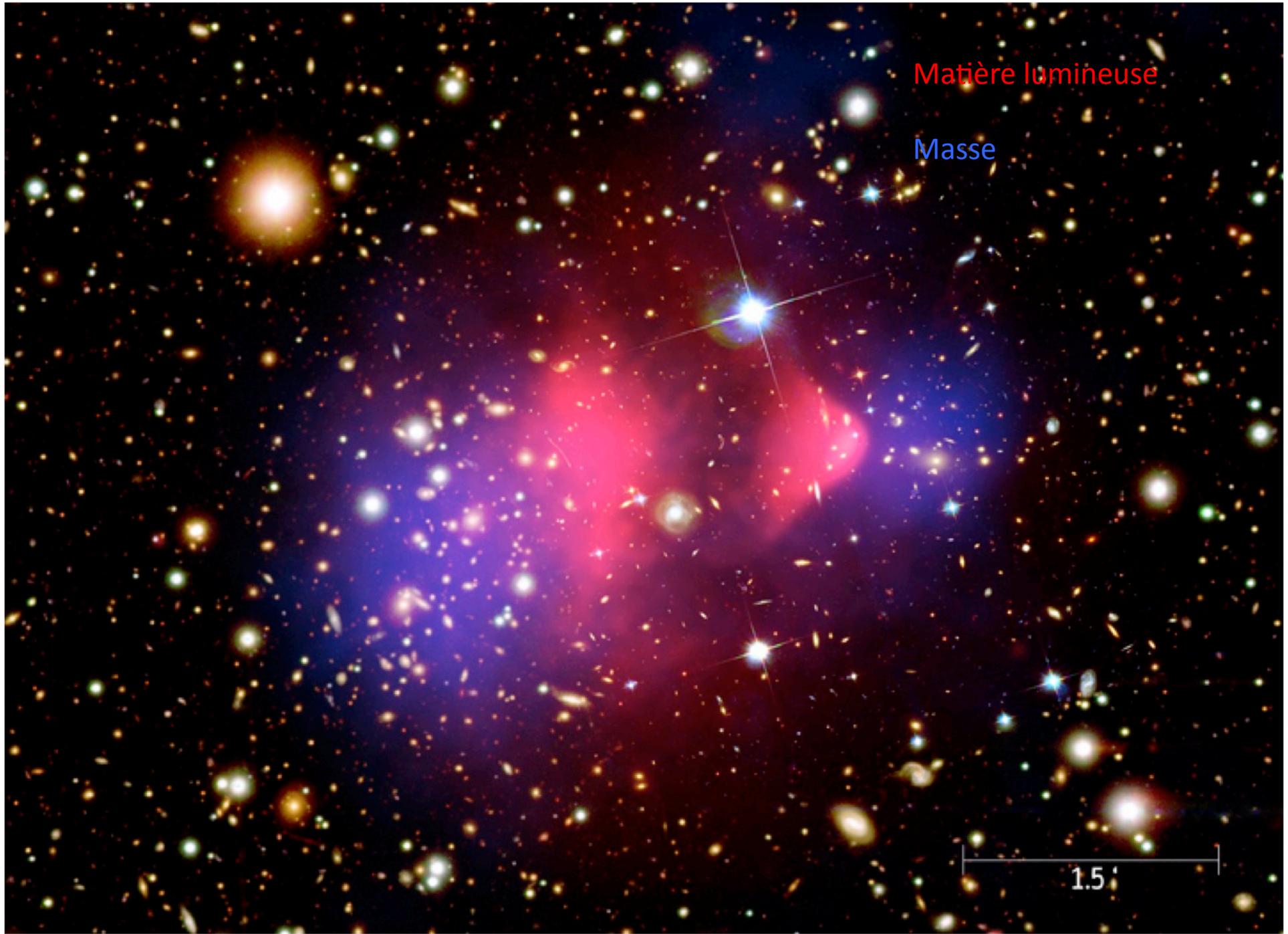
$z=0.3$



Matière lumineuse

Masse

1.5'

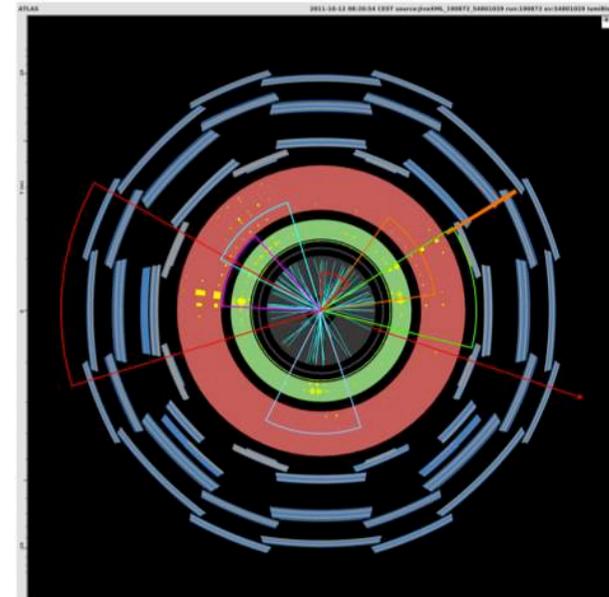
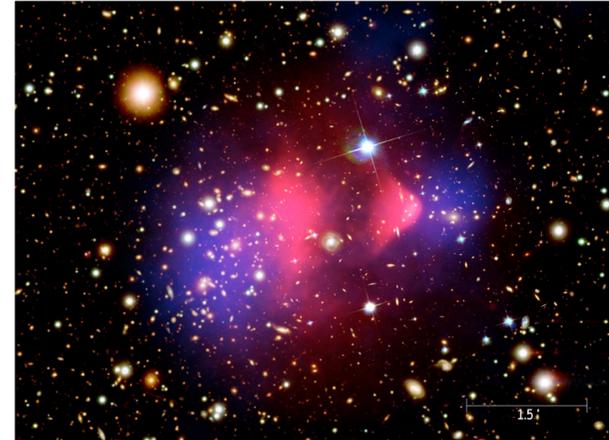


# La supersymétrie: matière noire

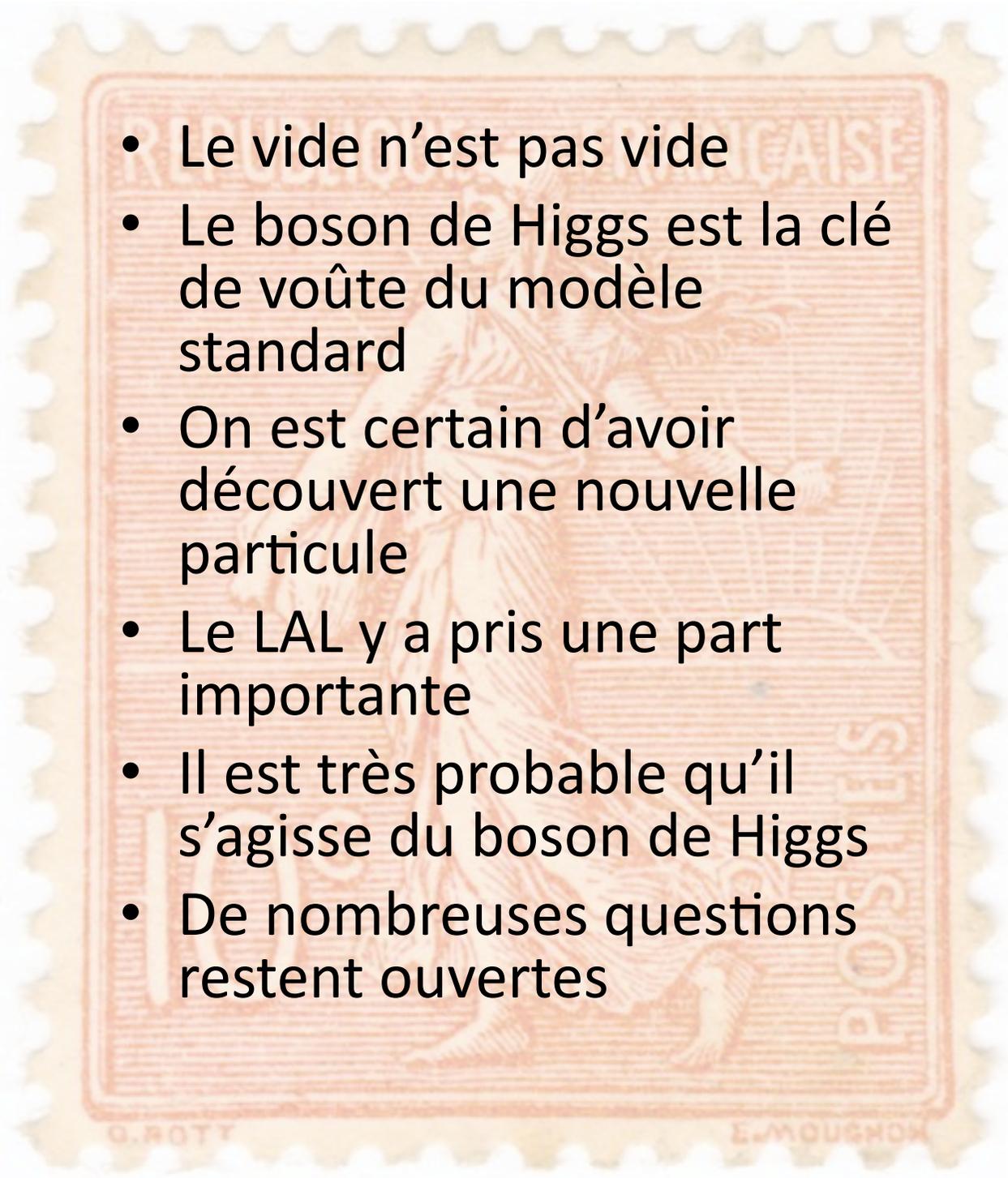
- La supersymétrie fournit un candidat de la matière noire:  
⇒ le neutralino

...qui pourrait être découvert au LHC!

... physique des deux infinis.....

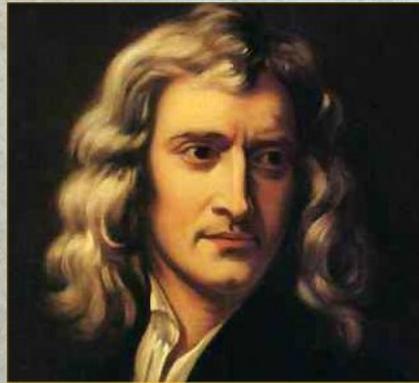


# Conclusions

- 
- Le vide n'est pas vide
  - Le boson de Higgs est la clé de voûte du modèle standard
  - On est certain d'avoir découvert une nouvelle particule
  - Le LAL y a pris une part importante
  - Il est très probable qu'il s'agisse du boson de Higgs
  - De nombreuses questions restent ouvertes

Eléments de la philosophie de Newton,  
Voltaire, 1738

lectricité de Magnétisme. Il viendra un tems peut-être, où l'on aura un amas assez grand d'expériences pour reconnaître quelque autres principes cachés. Tout nous avertit que la matiere a beaucoup plus de propriétés que nous n'en connaissons. Nous ne sommes encore qu'au bord d'un Océan immense; que de choses restent à découvrir! mais aussi que de choses sont à jamais hors de la Sphere de nos connaissances.



**F I N.**

