

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

David Rousseau
LAL-Orsay, CNRS/IN2P3

rousseau@lal.in2p3.fr

Remerciements à : Nicolas Arnaud, Sandro de Cecco, Laurent Chevalier, Johann Collot, Laurent Duflot, Daniel Fournier, Gautier Hamel de Monchenault, Marumi Kado, Fabienne Ledroit, Jessica Lévêque, Nikola Makovec, Françoise Maréchal, Pierre Matricon, Frédéric Rousseau, Estelle Scifo, François Vazeille, Dirk Zerwas

the guardian

News | Sports | Comment | Culture | Business | Money | London 2012 | Life & style | Travel | Environment | Video | Apps | Offers | Jobs

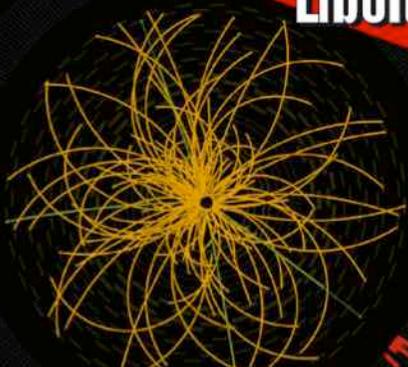
Breaking news: Diamond set to come out fighting as he faces MPs

Chief executive of the City watchdog has been accused of misbehaving and mismanaging the scandal

Hayley Prosser: I'm escaped by chicken and other baffling Britain

Man Utd to face

Libération



Physique des particules
La masse est dite

Le Cern a réussi à mettre en évidence le boson de Higgs qui résout une énigme fondamentale et ouvre une nouvelle étape scientifique. PAGES 3-5



Les derniers feux des pharaons

Au musée Jacquemart-André, à Paris, une exposition passionnante s'attarde sur le périple tardif de l'art égyptien, souvent oublié. PAGES 14-15

Suicides chez France Télécom: l'ancien patron mis en examen

Dider Lombard, qui dirigeait l'opérateur téléphonique lors de la vague de suicides ayant touché l'entreprise en 2005 et 2007, est visé par une enquête de la justice pour harcèlement moral. PAGE 14

A nos lecteurs

En raison d'un mouvement de grève dans les aéroports, ce numéro n'est distribué à nos abonnés que sous la forme d'un journal. Toutes nos excuses à nos lecteurs.

Spécial Festival d'Avignon

Le 60^e fête du théâtre dimanche le 7 juillet

Le Monde

Science: la matière dévoilée

Le boson de Higgs, particule mystérieuse pour expliquer l'univers, vient d'être découvert

Un physicien du CERN de proposer pour expliquer le mystère de la matière



EL PAÍS

Hallada "la más sólida evidencia de la existencia del bosón de Higgs"

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia



OST POPULAR U.S. Edition

The New York Times

Wednesday, July 4, 2012 Last Update: 4:00 AM ET

DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢

Search



h uses results he ns to eir y are

OPINION » EDITORIAL

Too Quiet, A Health Care The Obama ca forcefully coun Republican m the reform law

MARKETS »

Britain	Ge
FTSE 100	6,4
5,673.04	
-14.69	
0.000	

LE FIGARO

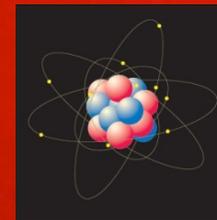
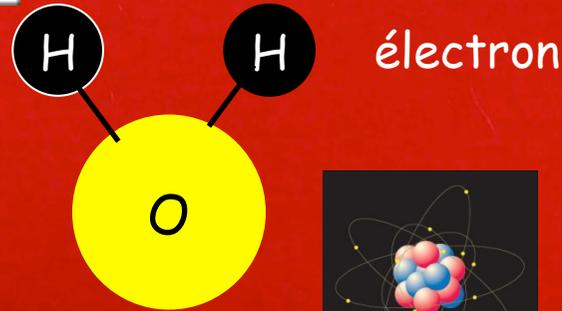
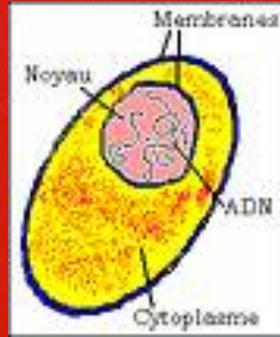
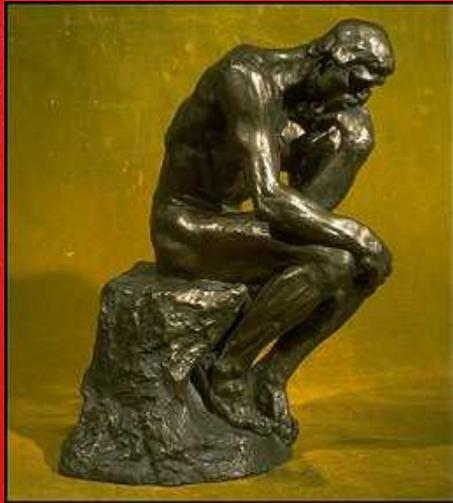
Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les chercheurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ont découvert le nouveau: Graal de la physique

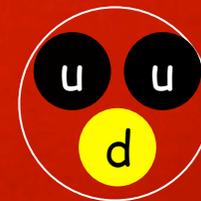


Le boson de Higgs en quelques transparents

Voyage vers l'infiniment petit



proton



Quark up



↑
Homme
~1 m



↑
Cellule
~10⁻⁶m



↑
Molécule
~10⁻⁹m



↑
Atome
~10⁻¹⁰m



↑
Noyau

↑
Nucléons



↑
Quarks

~10⁻¹⁵m

La Matière: les FERMIONS

Quarks

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



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

Leptons

$q = -1$



$q = 0$

La Matière: les FERMIONS

Quarks

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

u up	c charm	
d down	s strange	

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

Leptons

$q = -1$

e electron	μ muon	
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	

$q = 0$

La Matière: les FERMIONS

Quarks

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

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

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

Leptons

$q = -1$

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

$q = 0$

La Matière: les FERMIONS et les ANTIMATIÈRES

Quarks

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

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

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

Quarks

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

\bar{t} top	\bar{c} charm	\bar{u} up
\bar{d} down	\bar{s} strange	\bar{b} bottom

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

Antimatière

Leptons

$q = -1$

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

$q = 0$

Leptons

$q = +1$

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

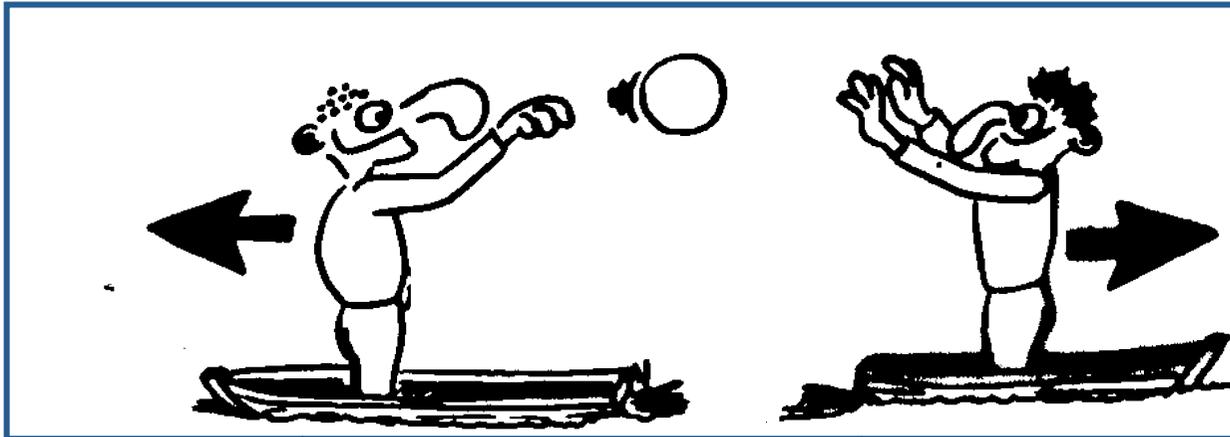
$q = 0$

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.

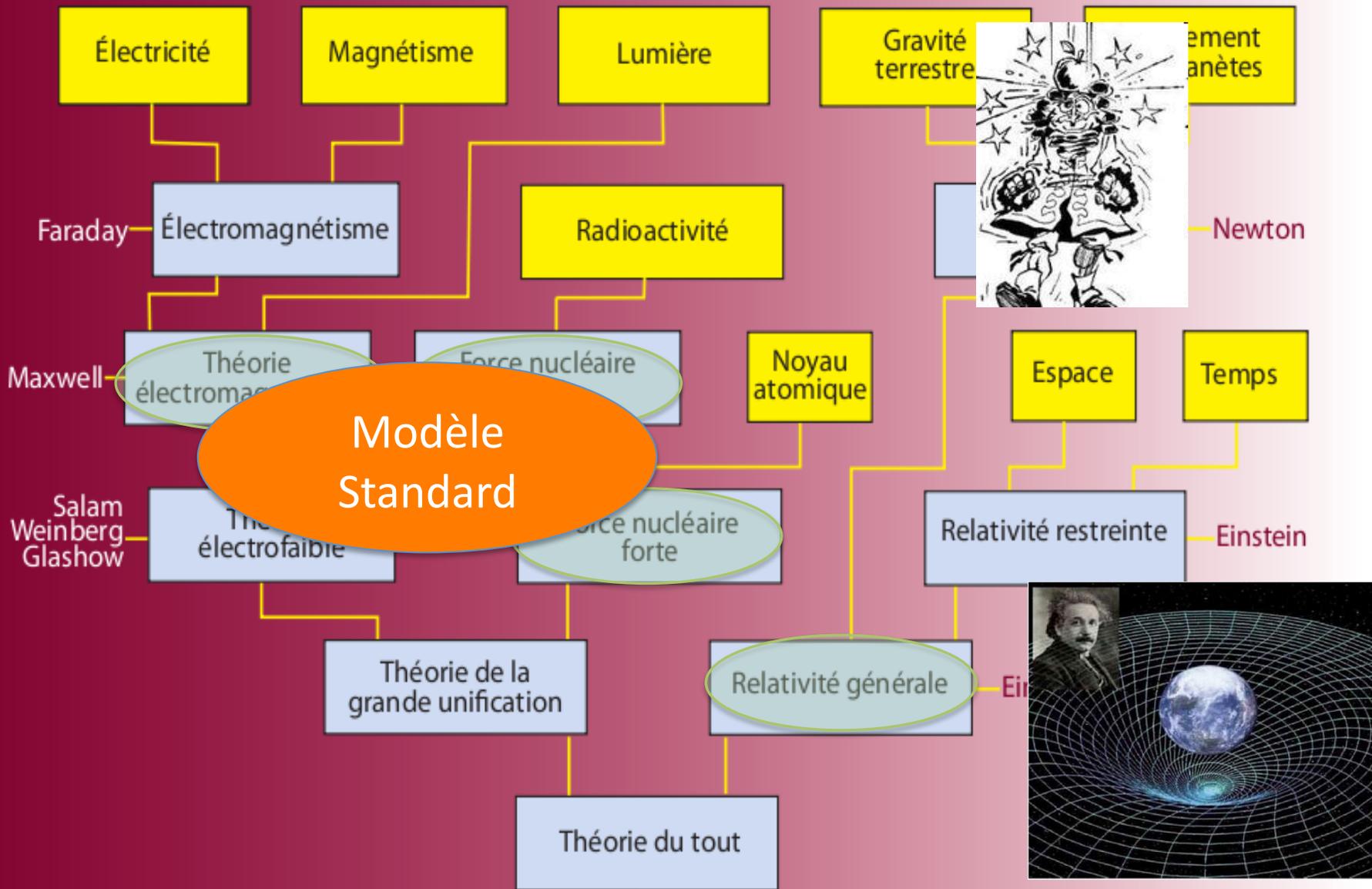
Les bosons (de Satyendranath Bose) de spin entier peuvent s'accumuler dans le même état (exemple les photons d'un rayon laser).

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

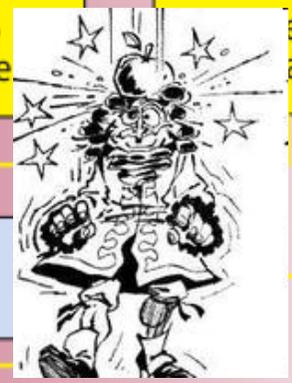


- Chaque interaction se différencie par **son type de messenger** : Photon (aussi appelé gamma), gluon, $W^+/W^-/Z$

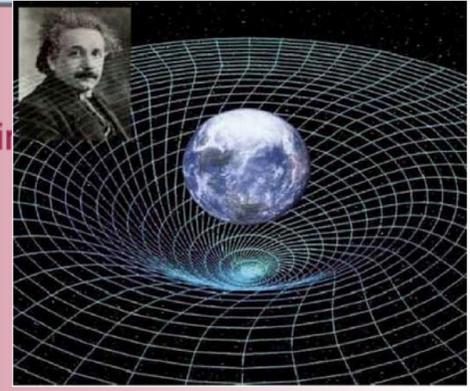
L'UNIFICATION DES FORCES DE LA NATURE



Temps



Newton

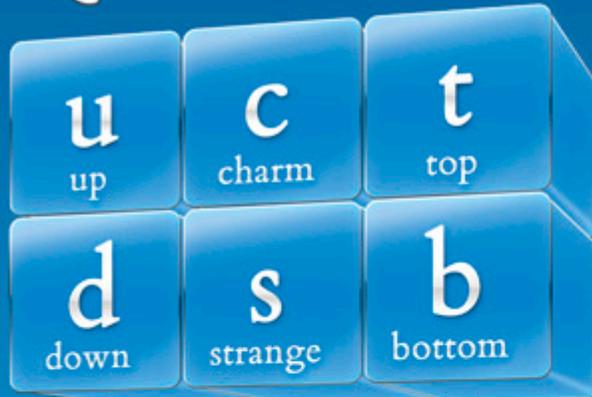


Einstein

La Matière: les FERMIONS

Modèle Standard
des particules

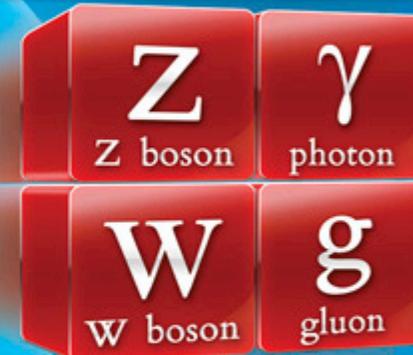
Quarks



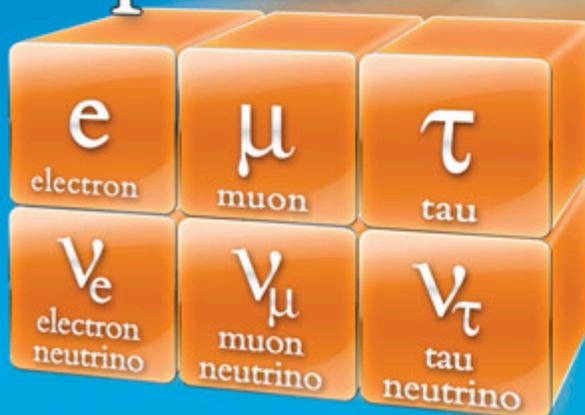
Les Forces: les BOSONS

La masse!

H
Higgs boson



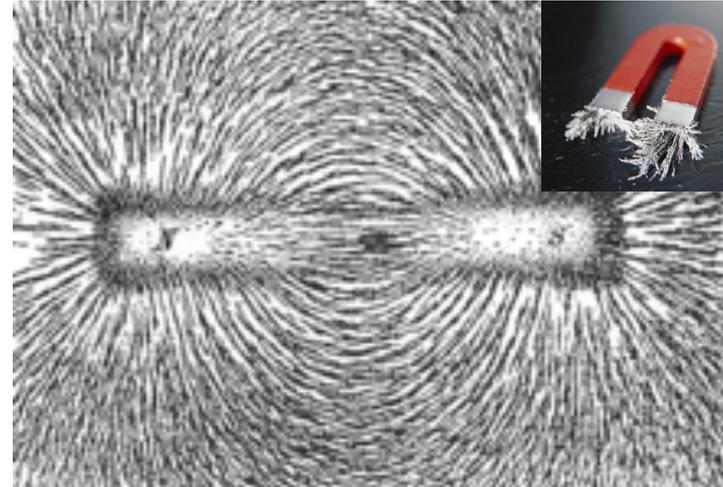
Leptons



+Antiparticules

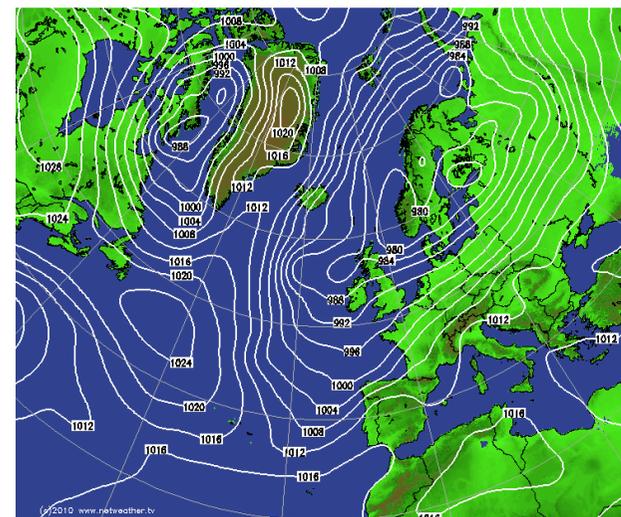
Notion de champ

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



- Champ orienté: **vecteur**
exemple: champ magnétique,
vitesse des vents dans l'atmosphère

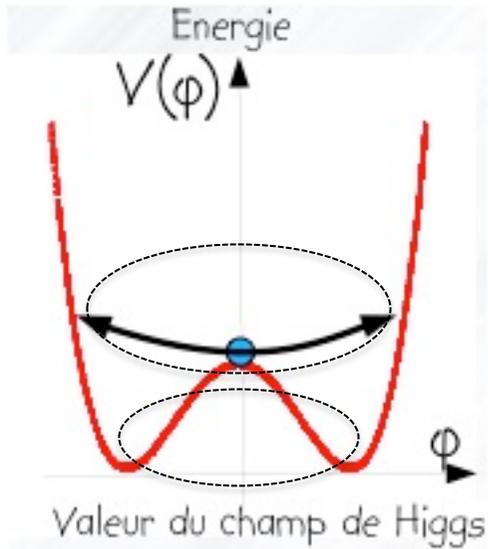
- Champ non orienté: **scalaire**
pression atmosphérique,
champ de Higgs.



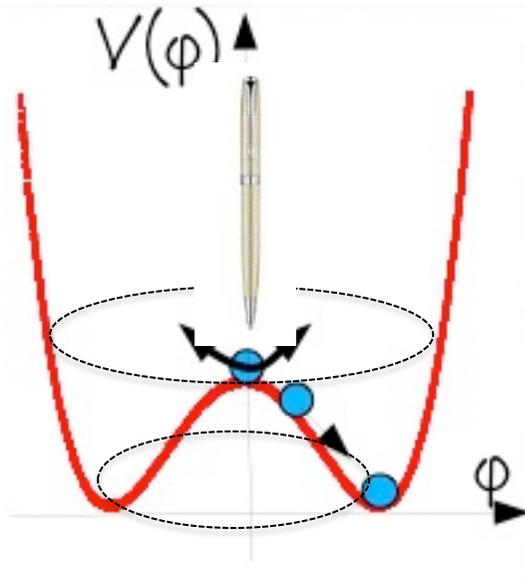


1964

Etat du vide



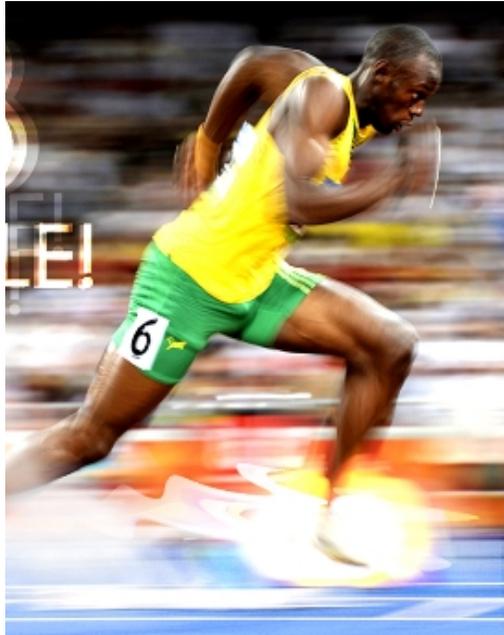
- Champ de Higgs scalaire initialement (juste après le Big Bang) de valeur moyenne nulle
- Le champ interagit avec les particules, mais elles gardent une masse nulle (vitesse de la lumière)



Réduction de la température

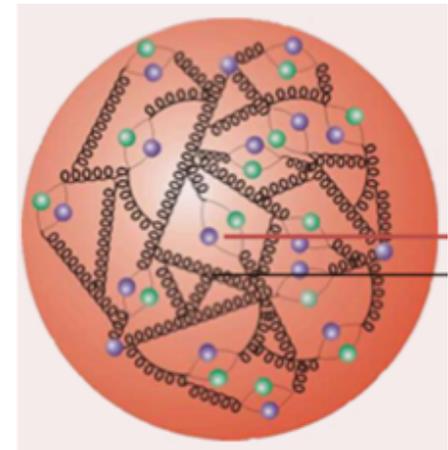
- \Rightarrow **brisure spontanée de symétrie**
- \Rightarrow le champ acquiert une valeur moyenne non nulle
- \Rightarrow les particules élémentaires, ralenties par le champ de Higgs, acquièrent une masse non nulle
- Bonus ! (envisagé par Higgs). Une excitation de ce champ est une nouvelle particule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

Une analogie



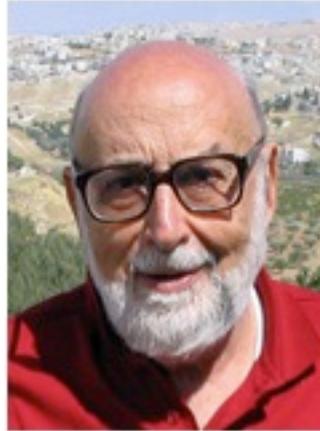
La masse de notre matière

- La masse de notre matière ne doit (presque) rien au boson de Higgs
- Protons et neutrons (masse $\sim 1\text{GeV}$ $\sim 2 \cdot 10^{-27}\text{g}$) sont composés de trois quarks (masse quelques 0.001 GeV)
- L'essentiel de la masse des protons et neutrons vient de l'énergie des gluons liant les quarks entre eux (et $E=mc^2$)
- Les protons et les neutrons (donc les atomes) **c'est à 99% de l'énergie pure...**
- Ceci-dit :
 - avec des quarks sans masse, les protons et neutrons se désintégreraient très vite
 - Avec des électrons sans masse, les atomes auraient des propriétés très différentes

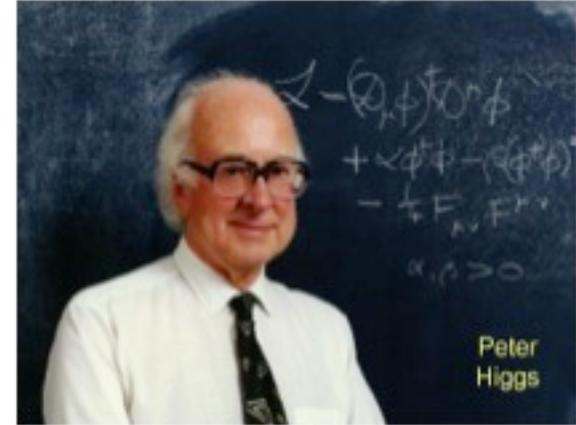




Robert Brout 1928-2011



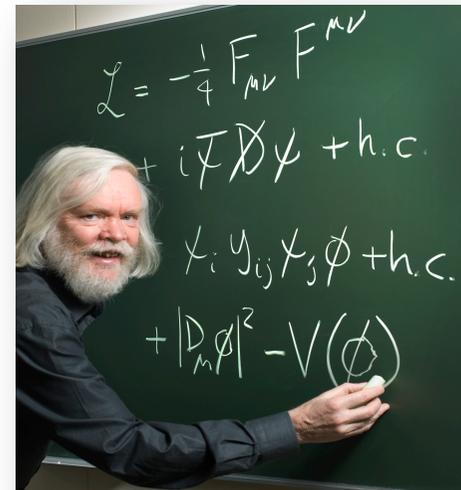
François Englert 1932-



Peter Higgs 1929-

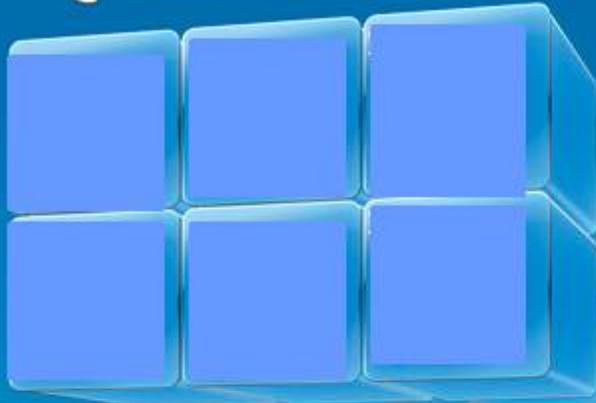
Également : G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble,

“We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson [...] We do not encourage big experimental searches for the Higgs boson”
J. Ellis et al (1976)



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.

Théoriciens et expérimentateurs

Un ping-pong perpétuel !

Théoriciens:

- Expliquent les phénomènes
- En prédisent de nouveaux
- Calculent les effets mesurables des différentes théories

Ils se battent souvent sur des critères d'élégance, de simplicité,...

Expérimentateurs:

- Mettent en évidence de nouveaux phénomènes
- Font des mesures précises pour tester les théories

La reproductibilité des résultats expérimentaux est essentielle

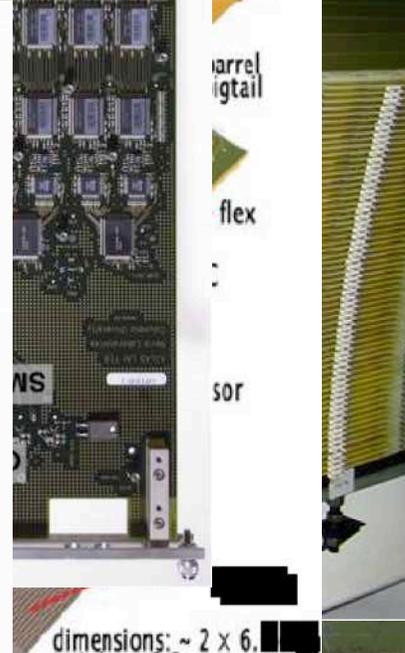
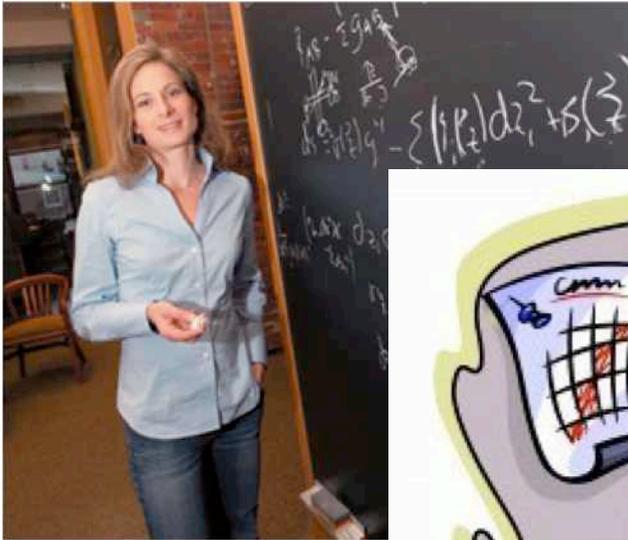
→ A un instant t : un unique ensemble de faits expérimentaux admis, mais de nombreuses théories compatibles avec ces faits

~~Supersymétrie, théorie des cordes, dimensions supplémentaires de l'espace-temps, théories sans boson de Higgs,...~~

Going Beyond

UnHiggs
Gaugephobic Higgs
Composite Higgs
Gauge Higgs
Simplest Higgs
Private Higgs
Intermediate Higgs
Fat Higgs
Twin Higgs
Phantom Higgs
Little Higgs
Littlest Higgs
Higgsless
Lone Higgs
Slim Higgs
Portal Higgs

Théoriciens et expérimentateurs





La Théorie Quantique

Prix Nobel

← expérimentateurs théoriciens →

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, prédit le positron

1930

PAULI : suggestion du neutrino dans les désintégrations β

1932

ANDERSON : découverte du positron

1937

HESS : observation du μ dans les rayons cosmiques

1947

BERKELEY : synchro-cyclotron produit les premiers p

1949

BUTLER et ROCHESTER : découverte du méson K^+ (au pic du Midi!)

Le Modèle Standard

Prix Nobel

← Expérimentateurs Théoriciens →

- 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 ν_e du ν_μ
- 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/ψ
- 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?

← Expérimentateurs Théoriciens →

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 ν_τ

2000

SNO : confirmation du déficit de neutrinos solaires

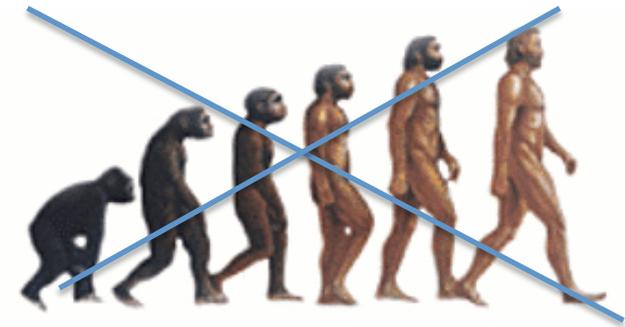
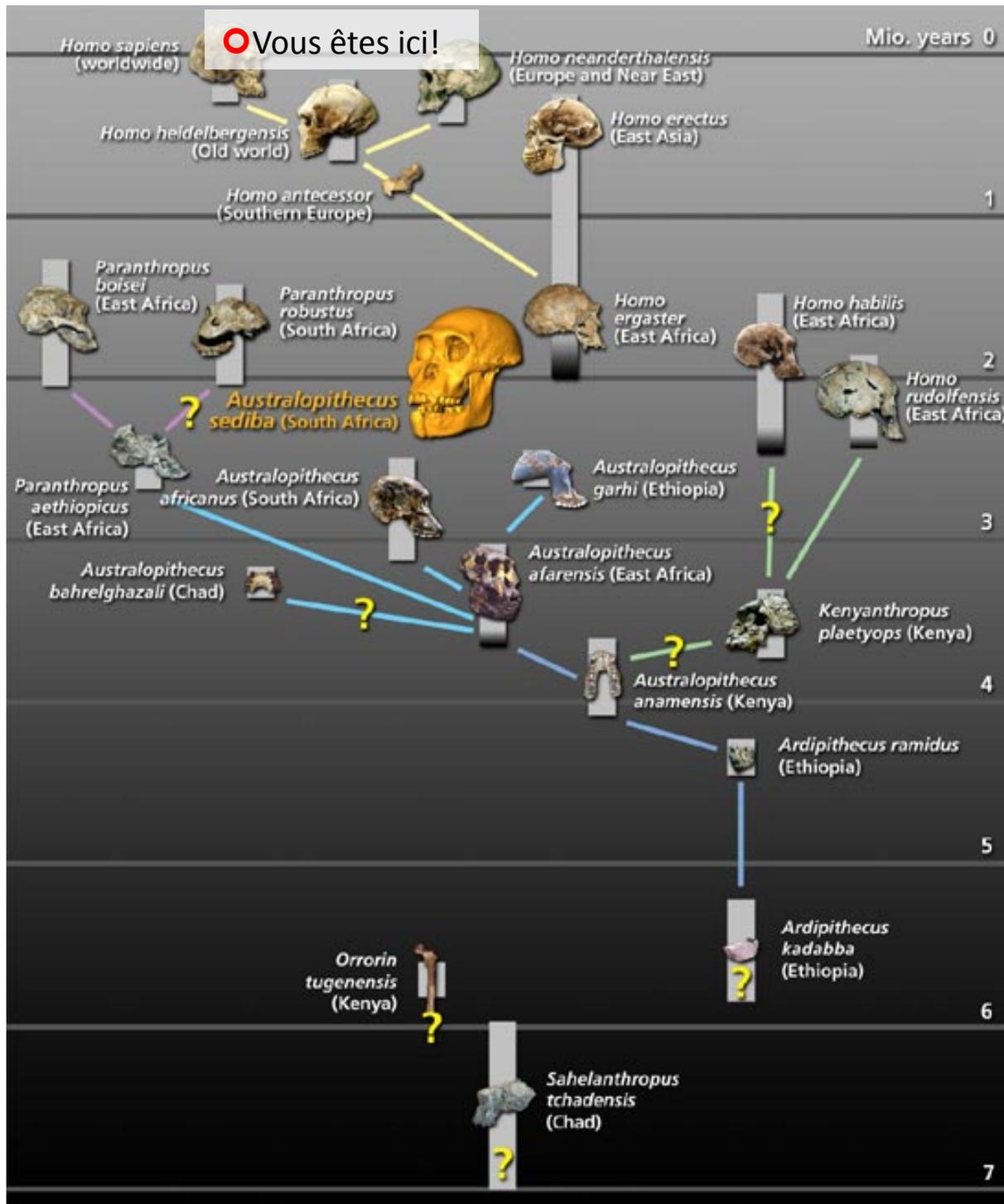
2001

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

2012

Atlas et CMS : découverte du boson de Higgs

Note : dernière avancée théorique nobélisée date de 1974!



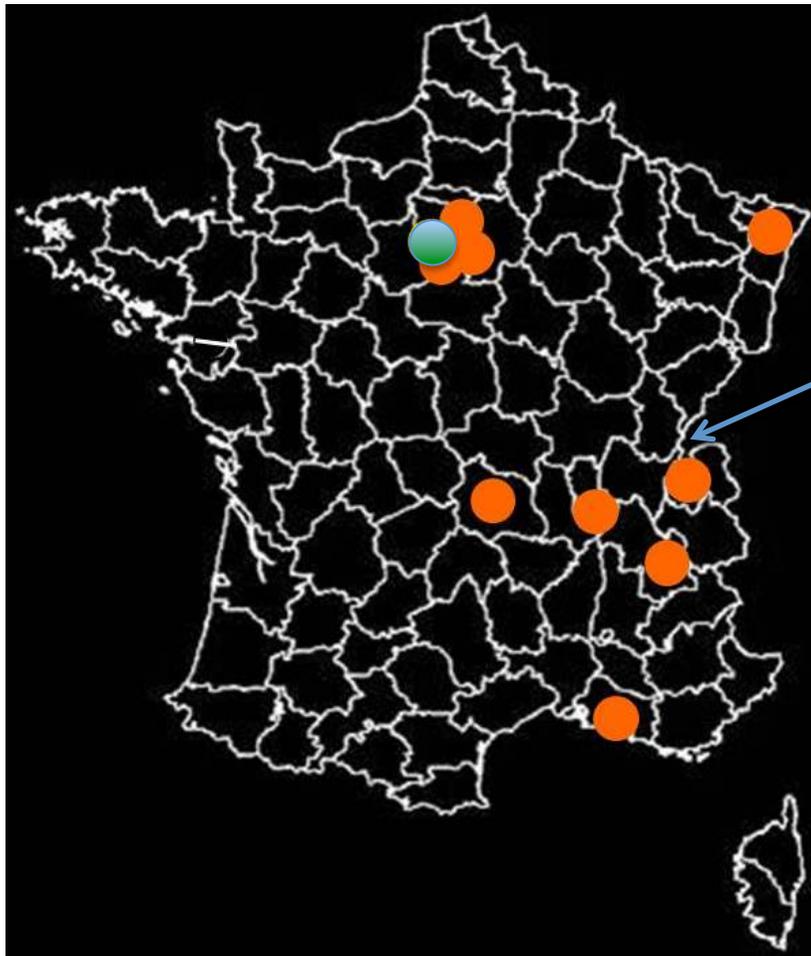
Mais attention à la fausse impression de linéarité!

N'oublions pas les théories invalidées par l'expérience...

et les résultats expérimentaux infirmés....

Qui sommes nous ?

Centre National de la Recherche Scientifique
Institut National de Physique Nucléaire et
de Physique des Particules



CERN

Anecy LAPP
Clermont-Ferrand LPC
Grenoble LPSC
Lyon IPNL
Marseille CPPM
Orsay LAL
Palaiseau LLR
Paris LPNHE
Strasbourg IPHC

CEA
Saclay-IRFU

Le CERN



1954 Genève:

12 états s'allient pour créer le CERN et reconstruire une communauté scientifique européenne détruite après la seconde guerre mondiale

Aujourd'hui :

- 🌐 **20** états membres
- 🌐 **2500** employés
- 🌐 **10 000** chercheurs visiteurs

Mais aussi:

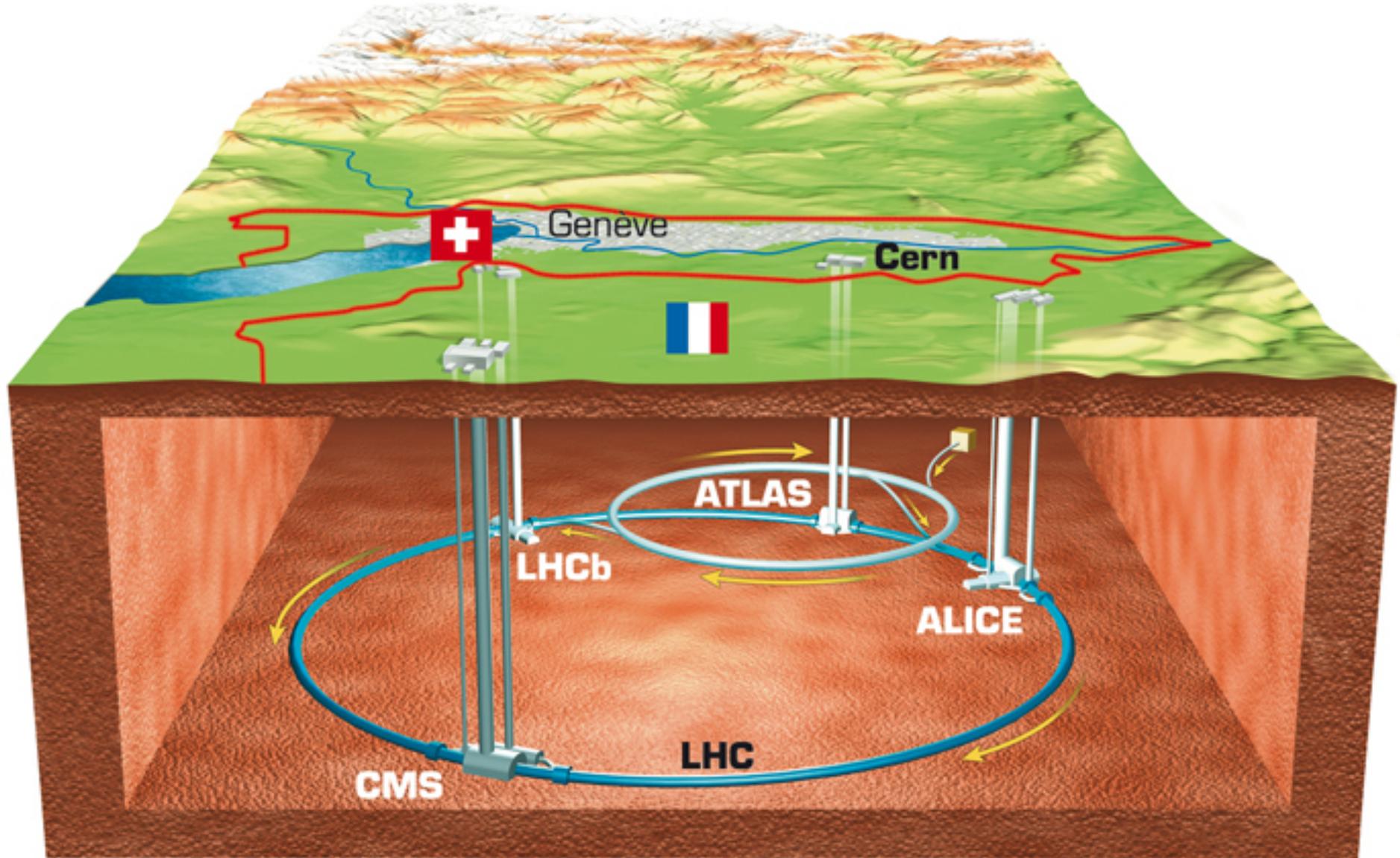
- 🌐 Participation aux expériences au niveau mondial : USA, Japon, Chine, etc...
- 🌐 → le premier centre mondial de recherche en physique fondamentale

La collaboration Atlas



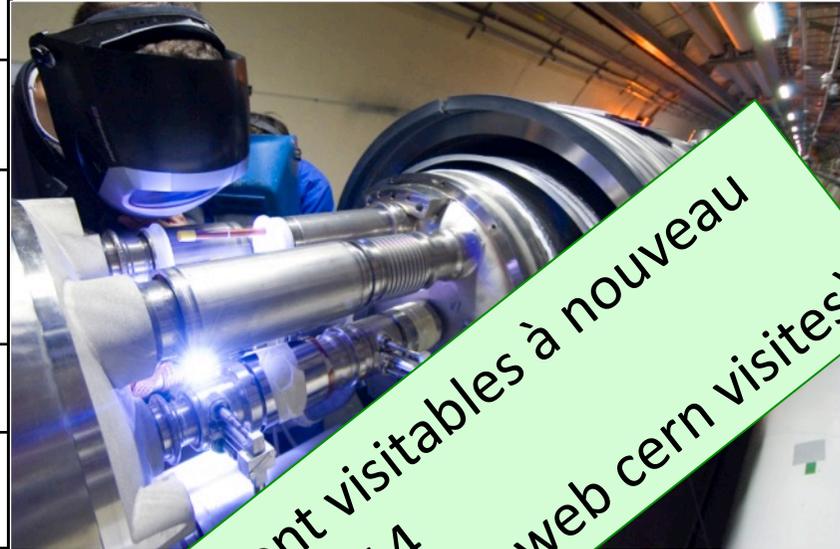


Le LHC



Le LHC: un quart de siècle de travaux

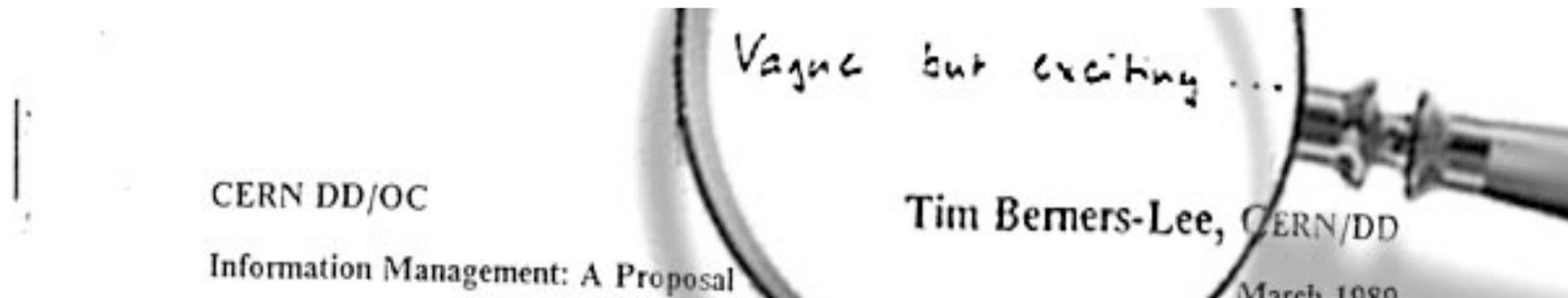
1984	Etude préliminaire
1994	Approbation par le cern
1996-1998	Approbation des 4 grandes expériences
2000	arrêt de l'accélérateur précédent (le LEP) et démarrage de la construction du LHC
2008	fin de la construction
septembre 2008	démarrage officiel du LHC et accident cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
30 mars 2010	premières collisions à 7000 GeV et Début de l'exploitation scientifique du LHC
2012	Collisions à 8000 GeV
2013-2014	Révision des aimants
>=2015	Collisions 14 TeV



Les installations souterraines sont visitables à nouveau jusqu'à ~nov 2014 (ouvertes à tous sur inscription, voir site web cern visites)



Vague, but exciting...



Inf

- **1989:** projet de Tim Berners-Lee pour le management du CERN
- Nouvel outil permettant l'accès à l'ensemble des informations entières
- 30 Avril 1993 : le CERN met officiellement la technologie du web dans le domaine public



Le détecteur Atlas

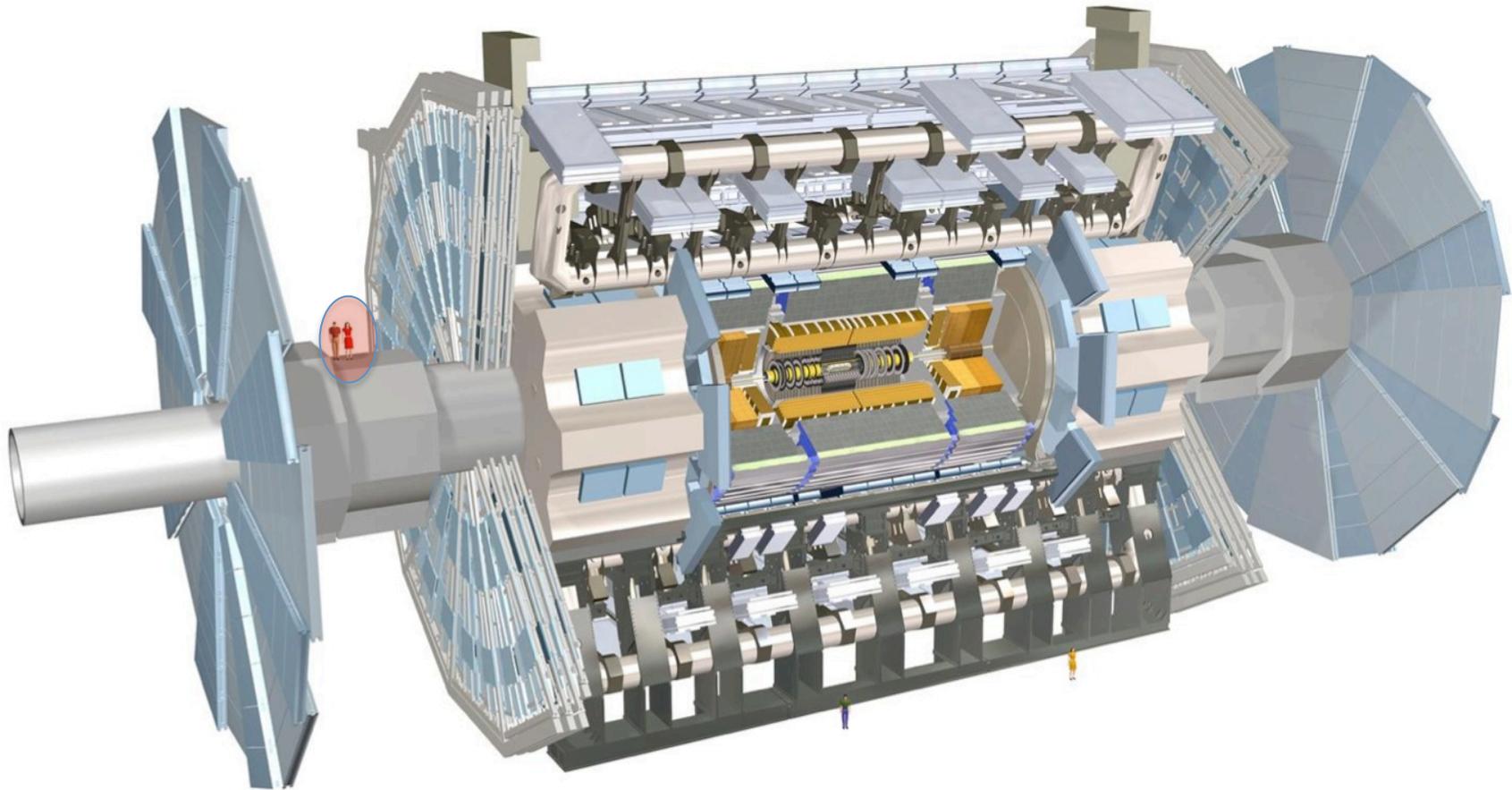
Diamètre: 25m

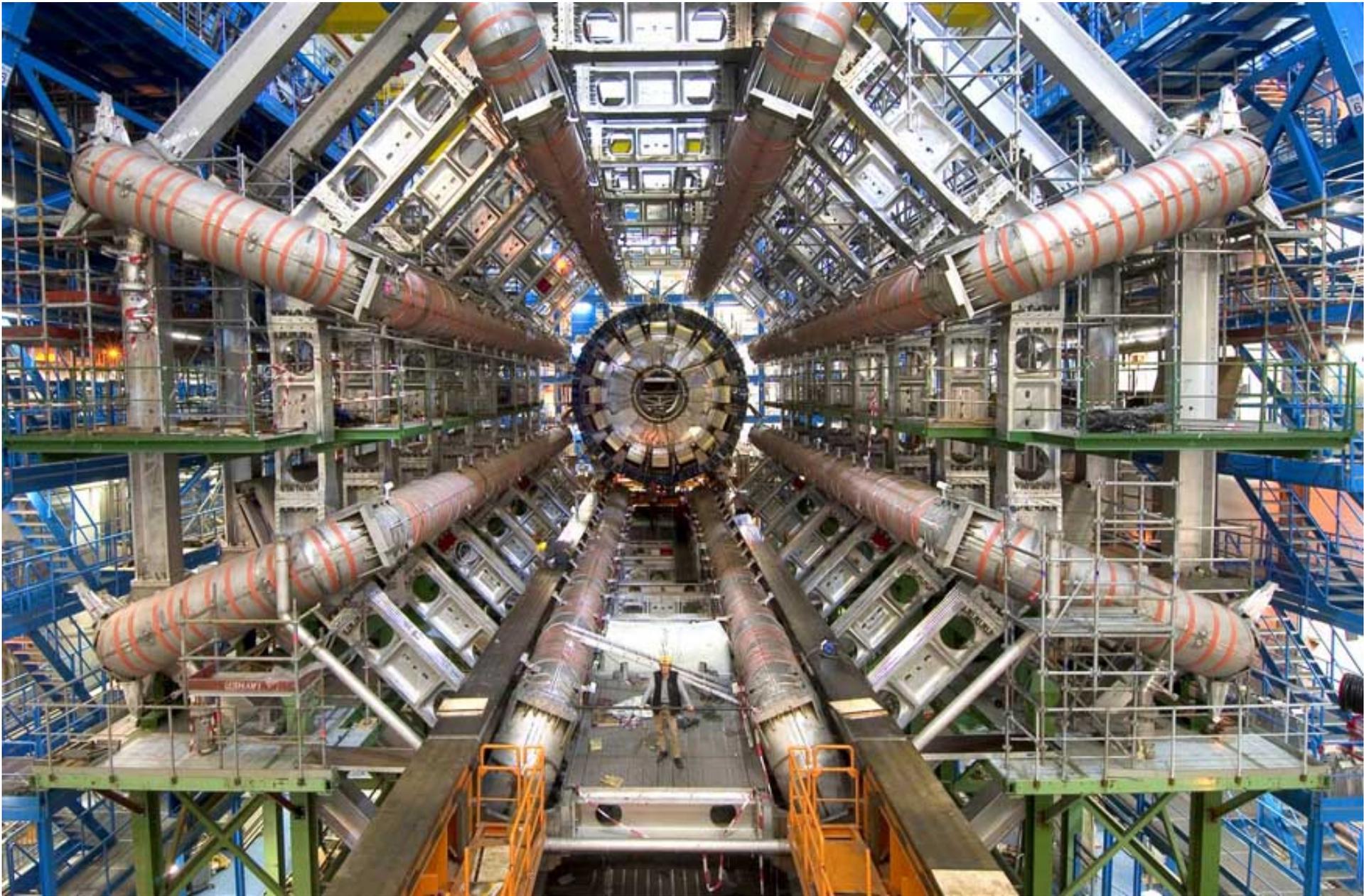
Longueur: 46m

Poids: 7000 tonnes

3000 km de câbles

100 millions de canaux

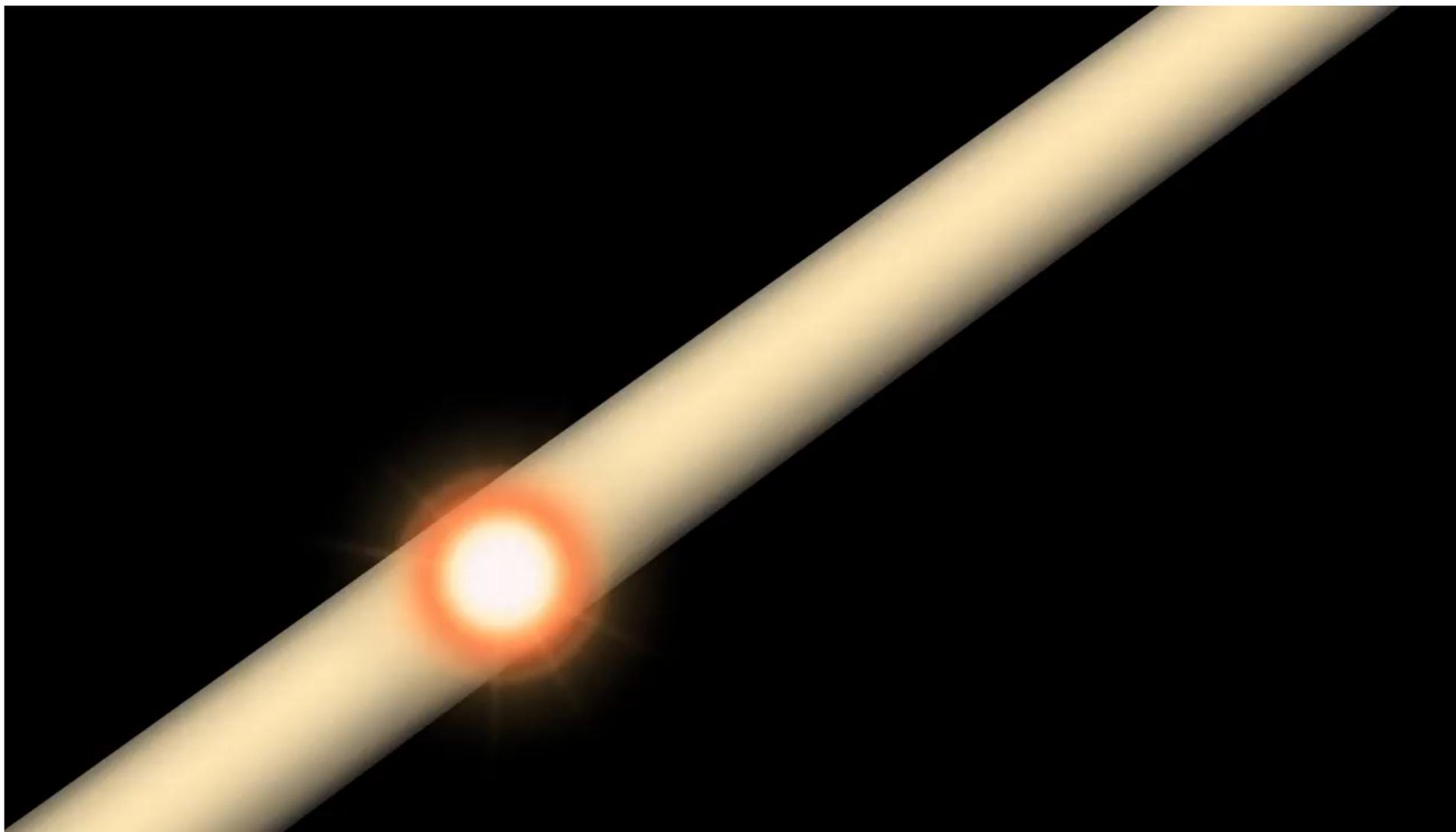




La collaboration Atlas



LD, booster

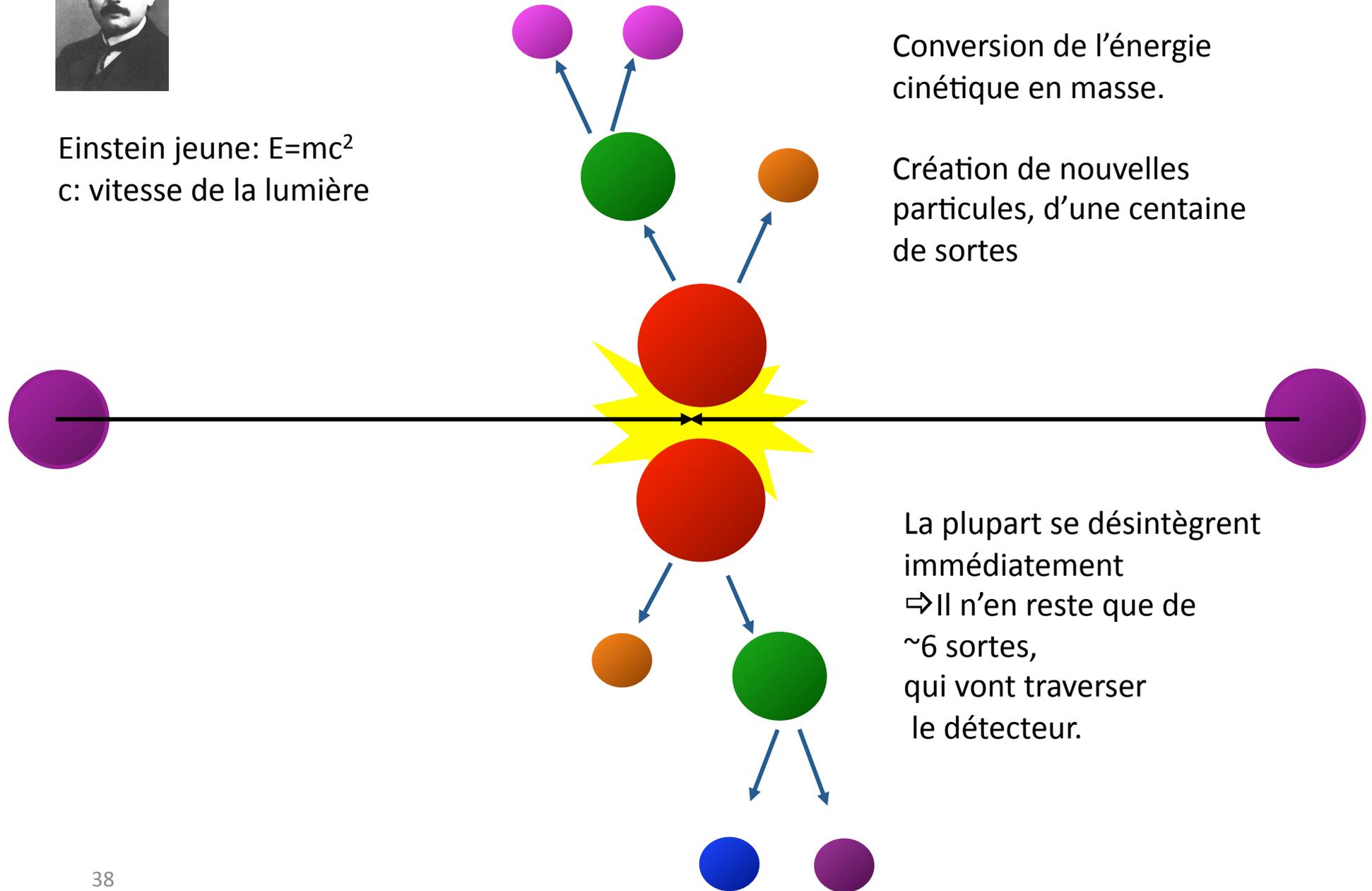


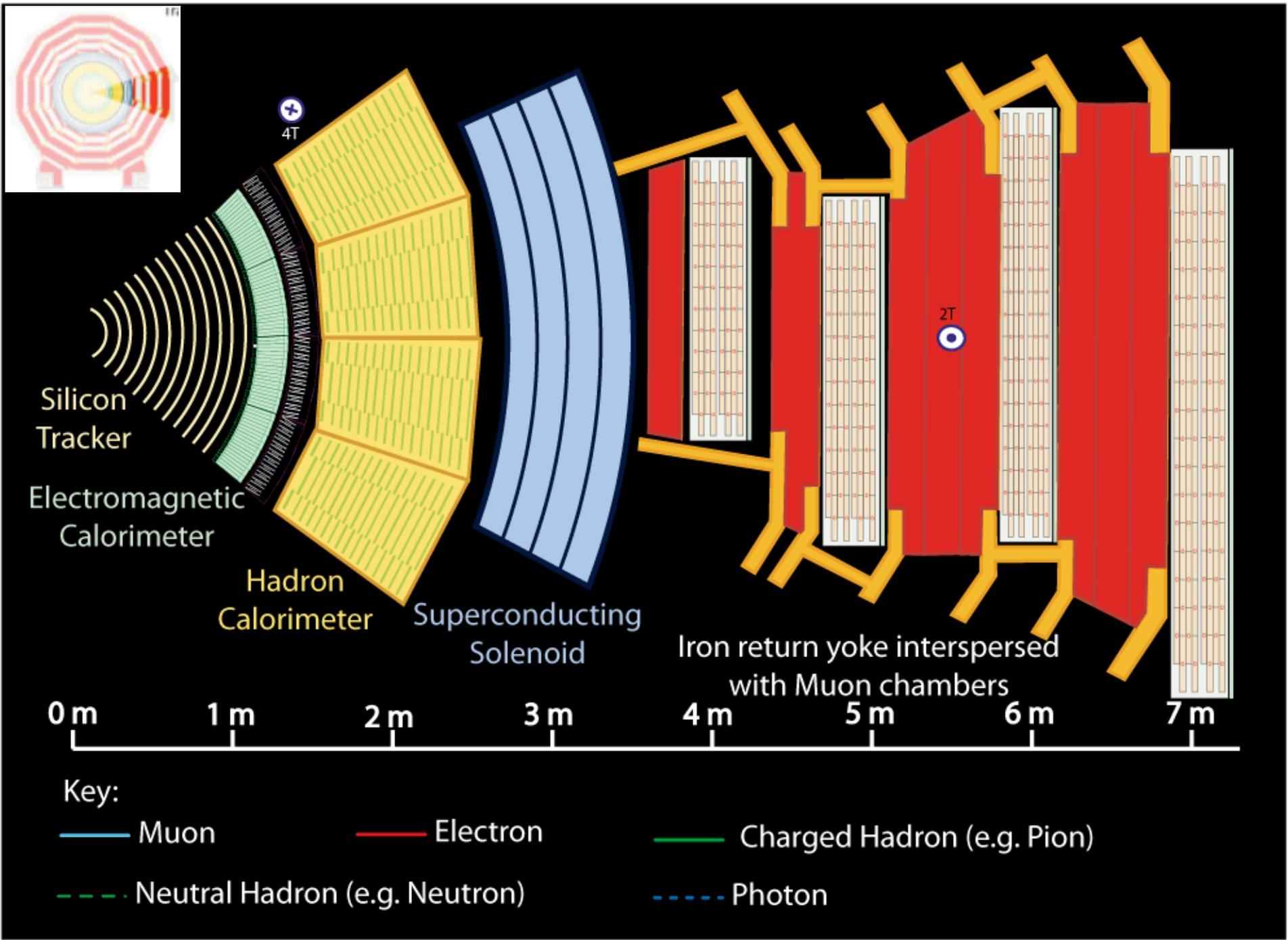
VOIR les particules ?

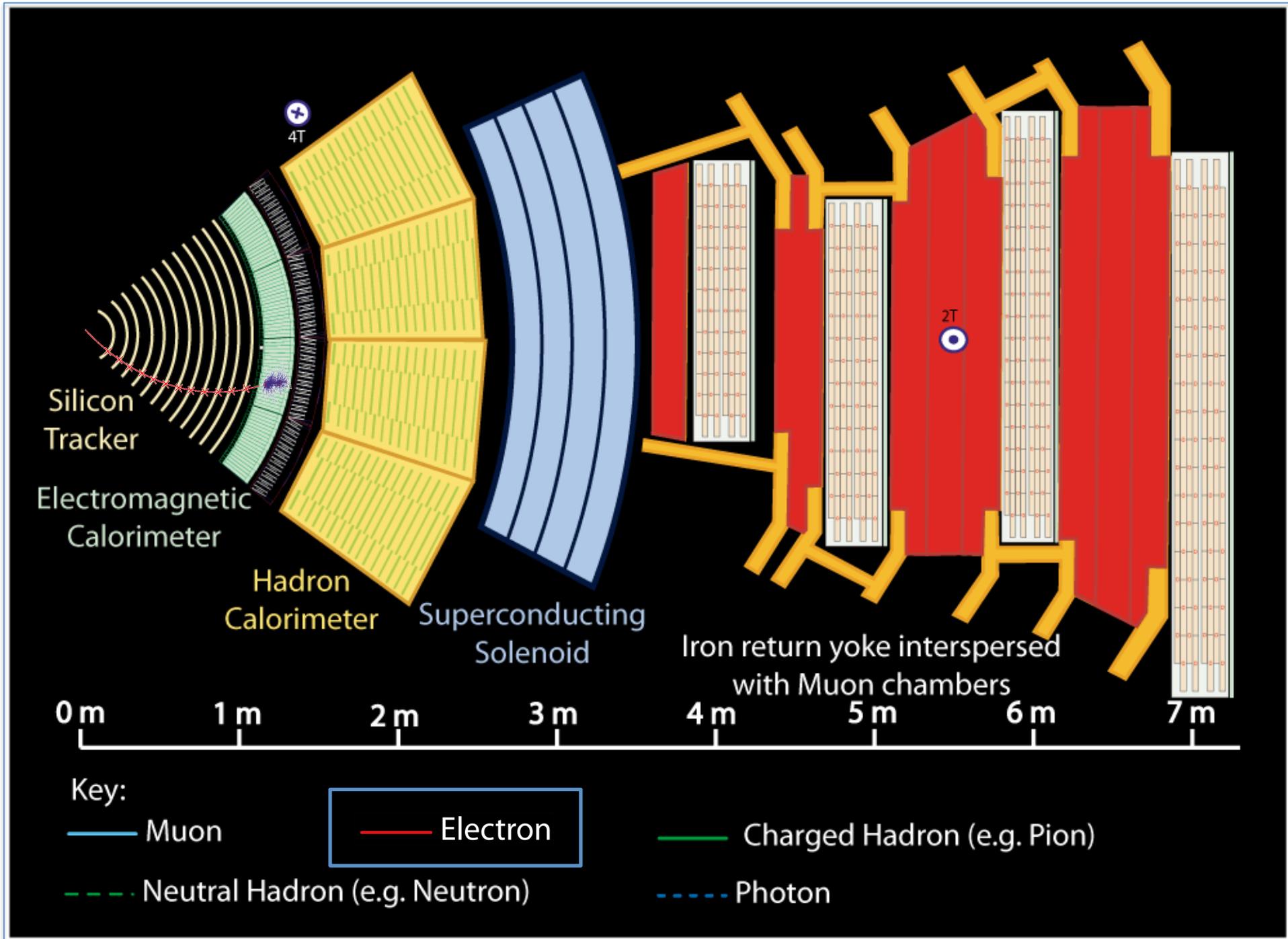


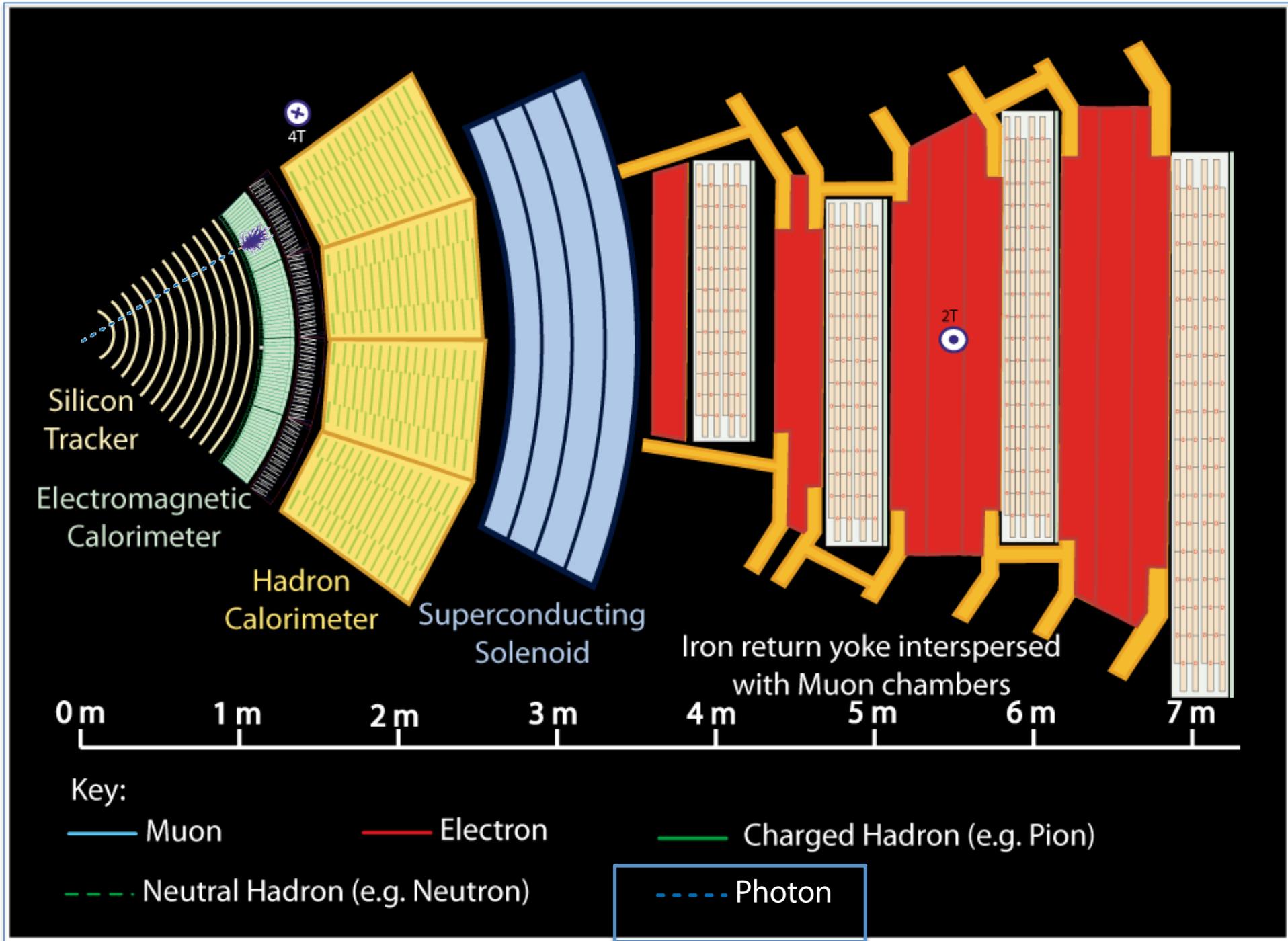
Einstein jeune: $E=mc^2$
c: vitesse de la lumière

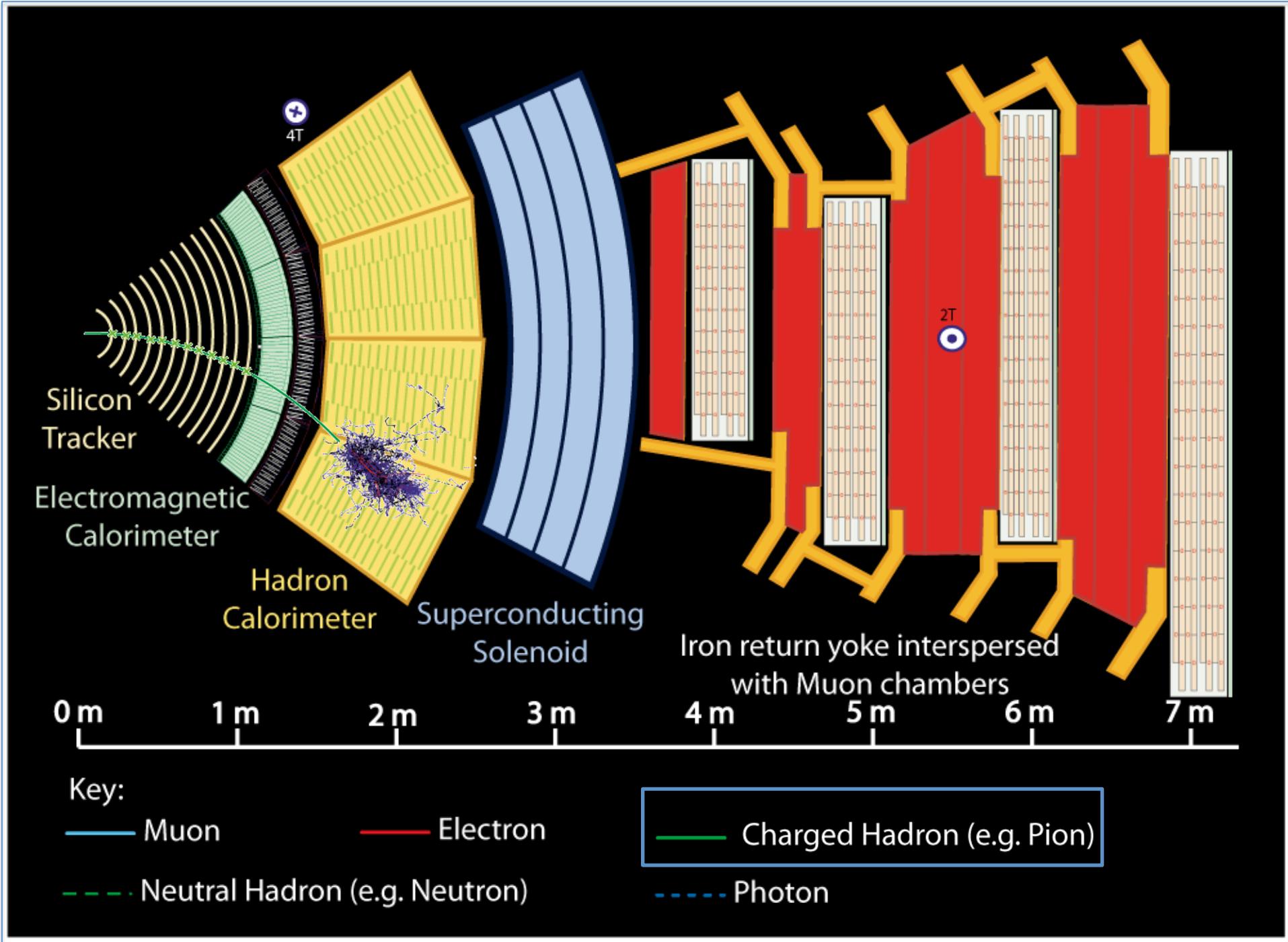
Collision de protons

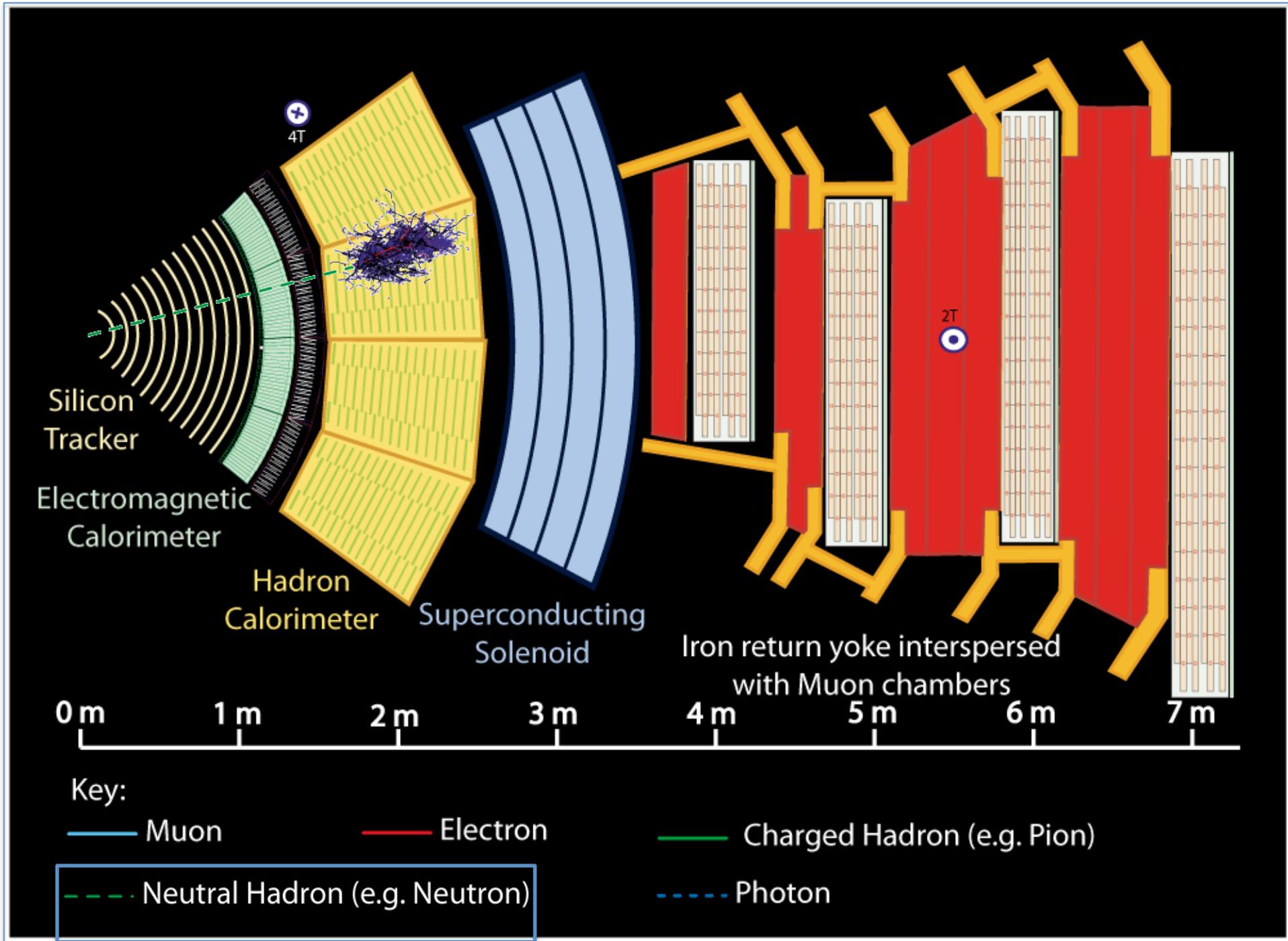


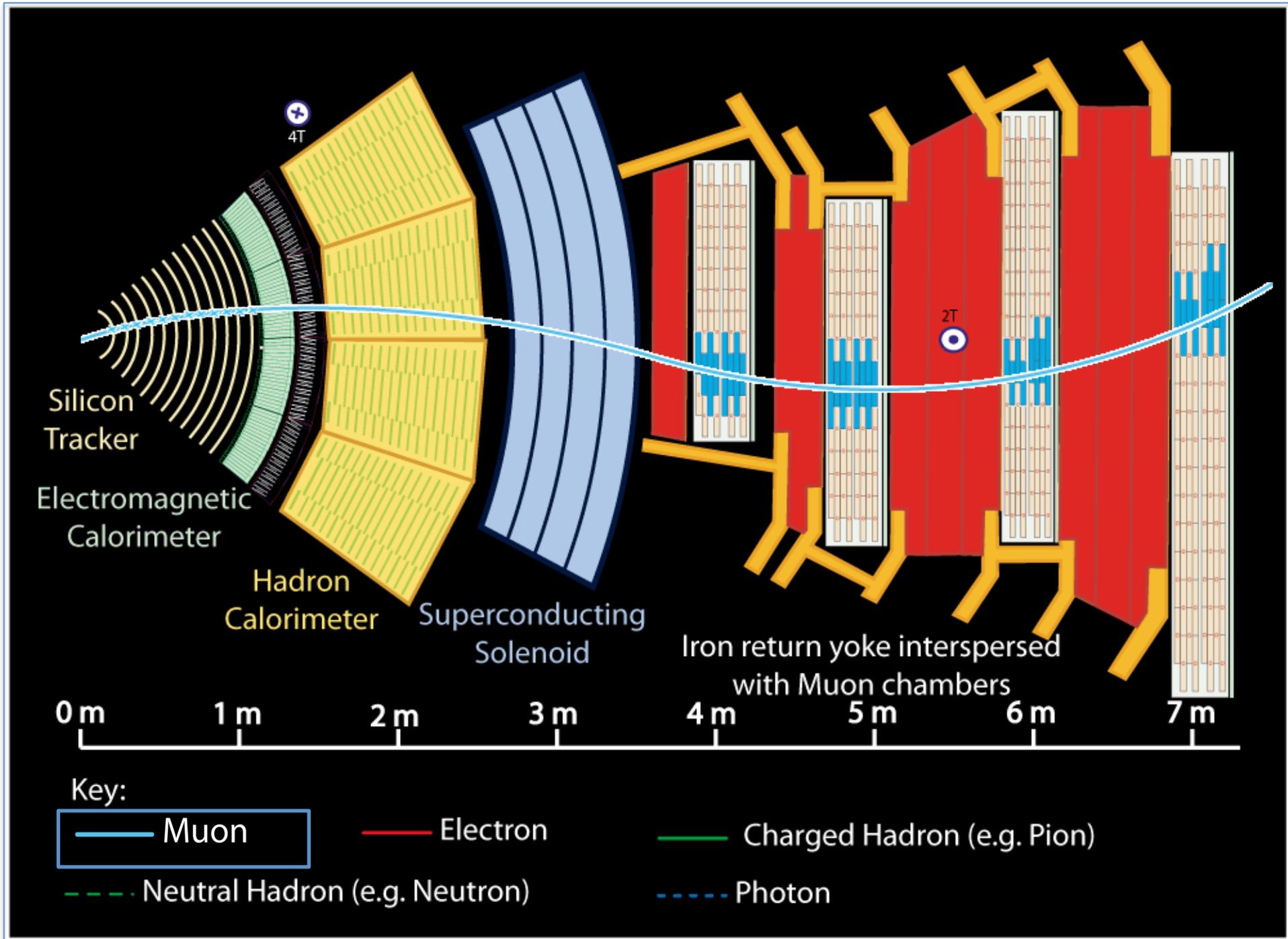












Découverte du positron (Anderson 1932), l'anti-électron
postulé par Dirac (mais Anderson l'ignorait)
(en joignant les équations de la mécanique quantique et de la relativité restreinte,
Dirac a vu apparaître comme solutions des électrons d'énergie négative)



Nobel 1936

Photo dans une chambre à brouillard (« de Wilson »),
soumise au rayonnement cosmique

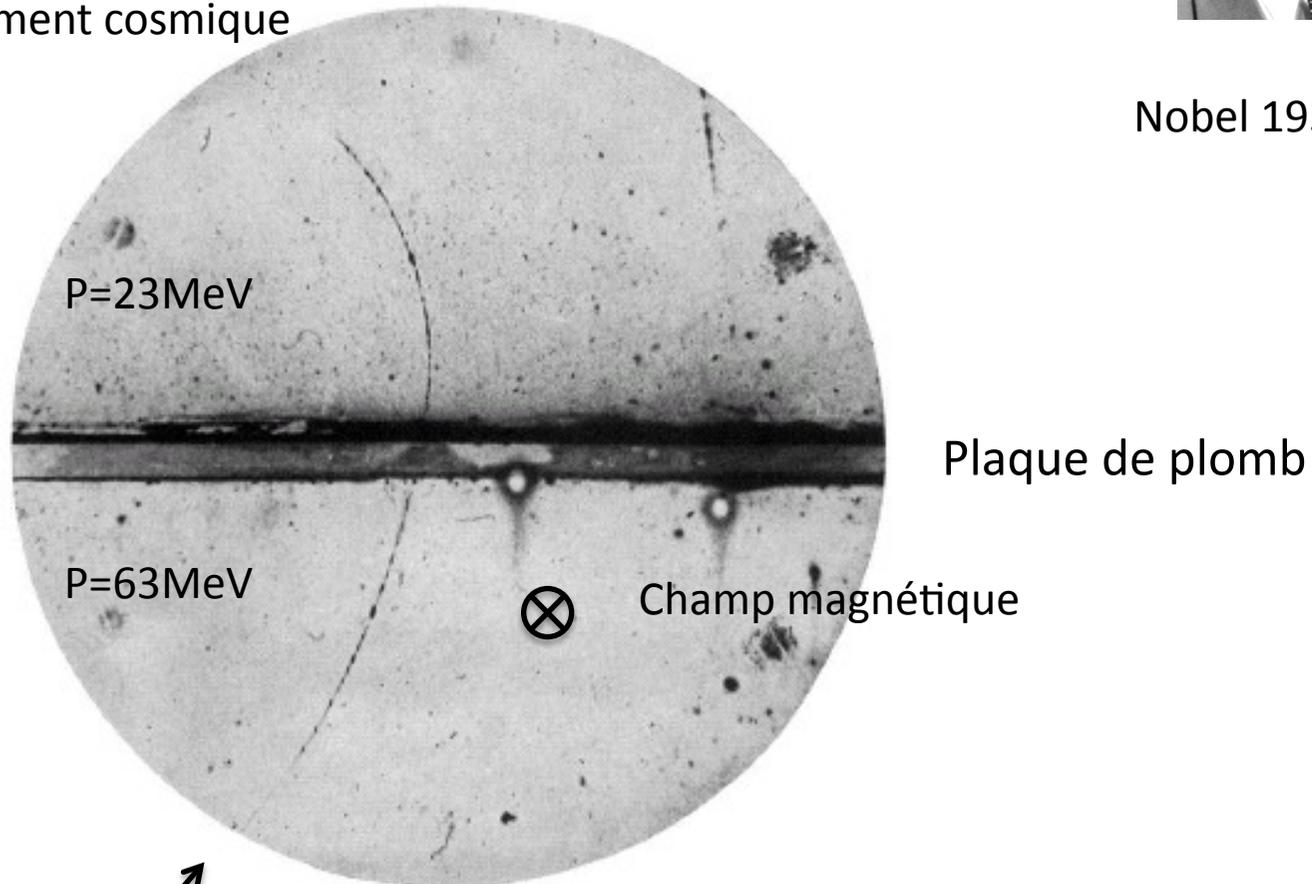
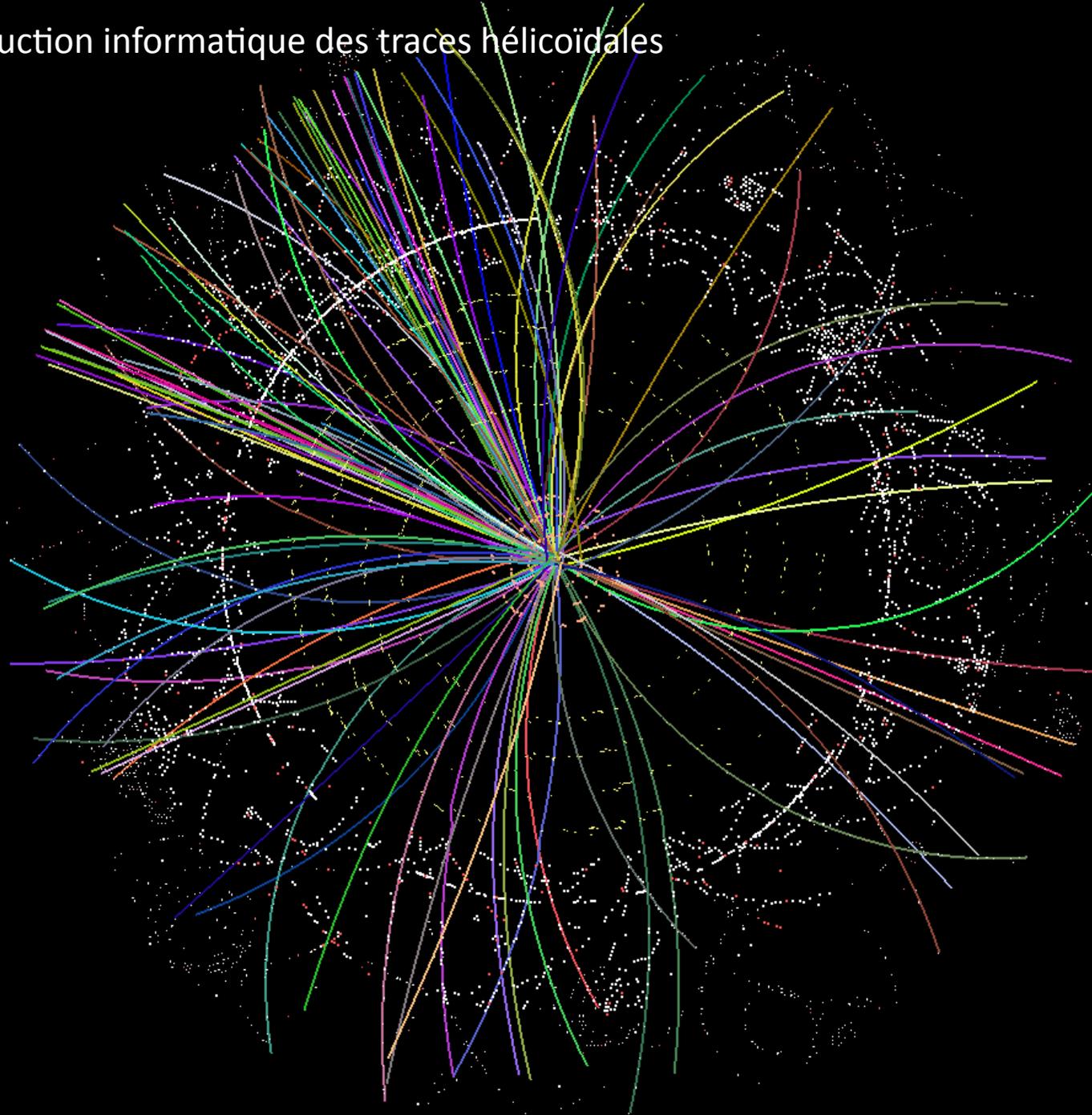


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho=2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho=7.5 \times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

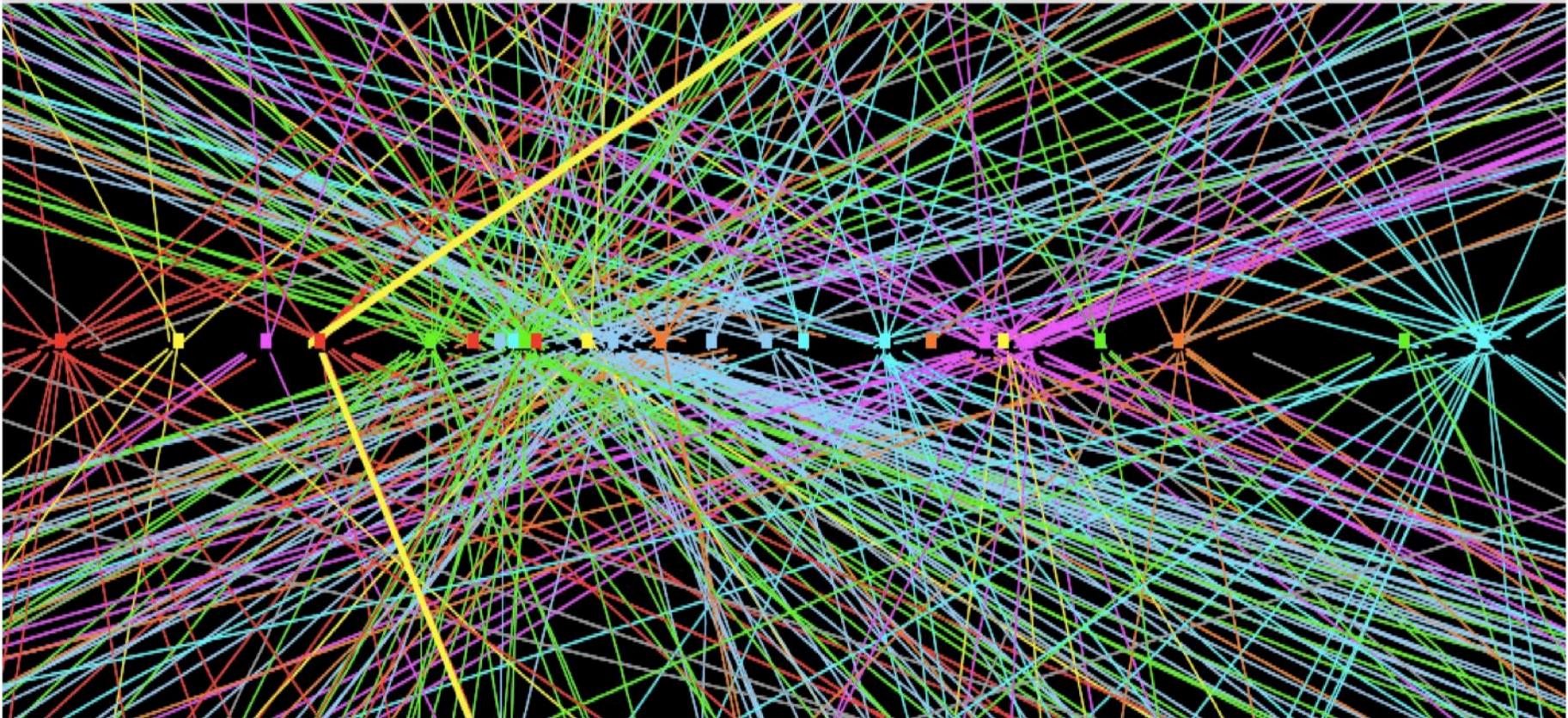
Reconstruction informatique des traces hélicoïdales



Détection du passage des particules



Un événement



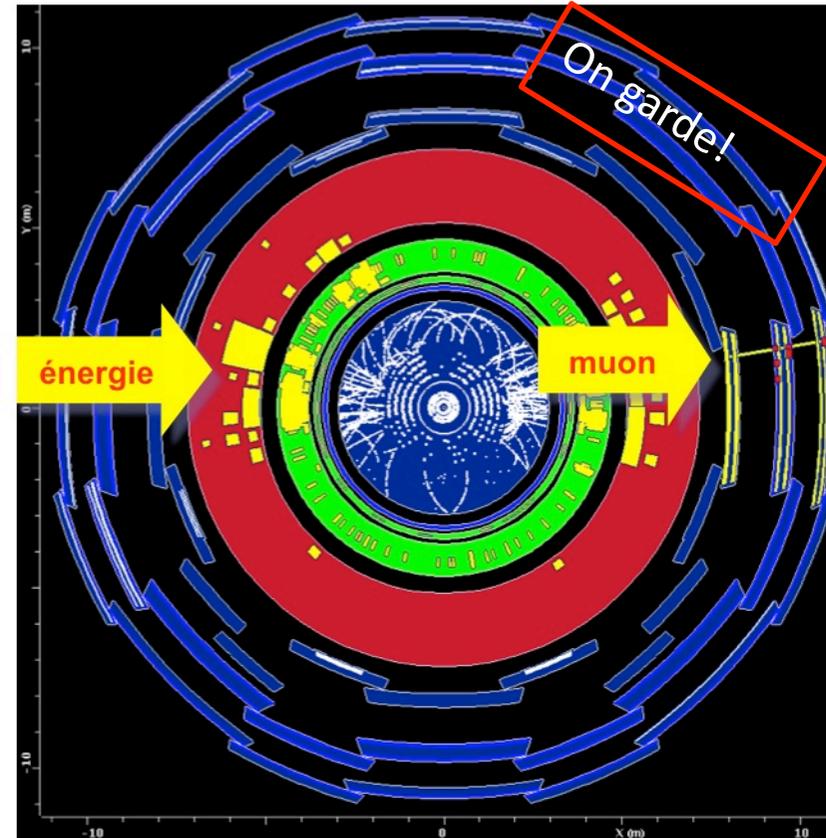
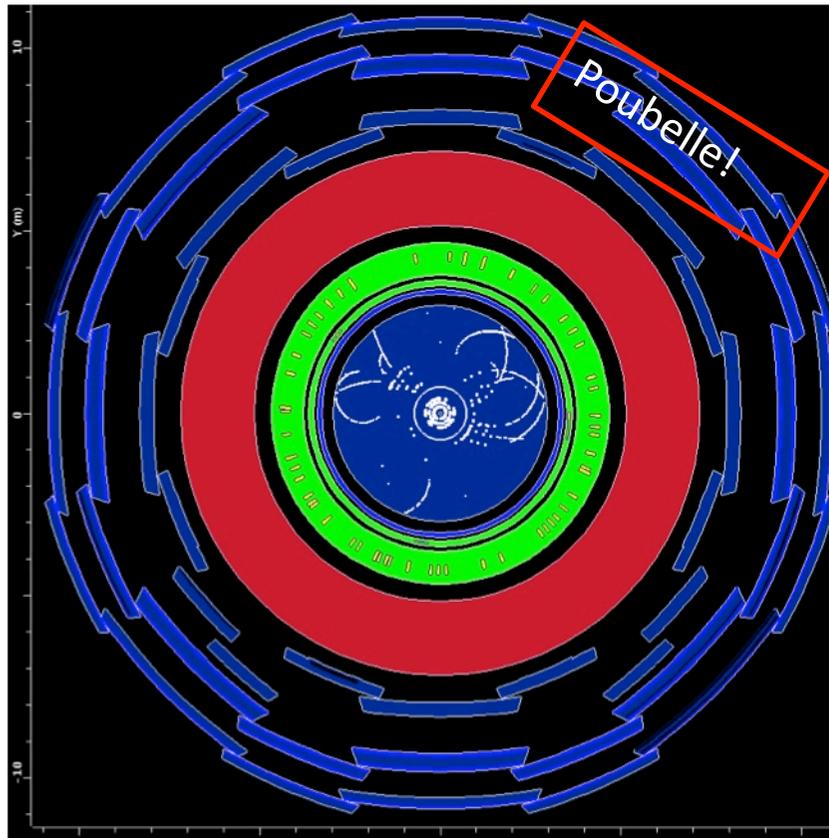
La précision obtenue permet de distinguer les traces venant de la collision intéressante de la 20aine de collision parasites au court de la collision des mêmes paquets de protons

Un événement



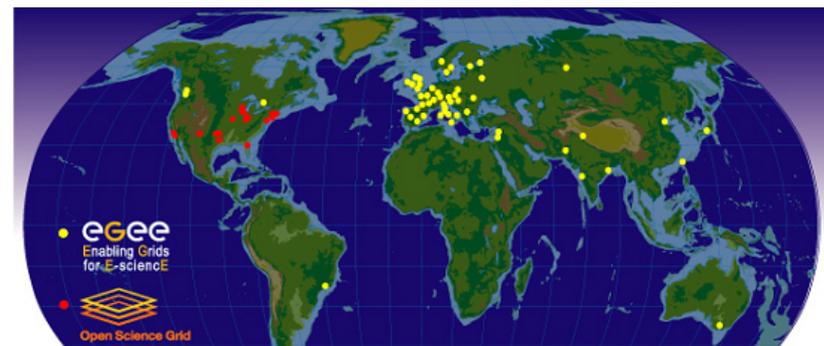
Sélection des événements en temps réel

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



Le traitement des données en chiffres

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



VOIR le boson de Higgs

Avant de le voir, on savait tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse

Particule très instable (10^{-22} s), se désintègrant immédiatement en paire d'autres particules, de façon imprévisible (sauf en moyenne)

**Probabilités de désintégration
prédites pour une masse de 125 GeV**

H \rightarrow bb 58%

H \rightarrow WW* 21%

H \rightarrow $\tau^+\tau^-$ 6.4%

H \rightarrow ZZ* 2.7%

H \rightarrow $\gamma\gamma$ 0.2%

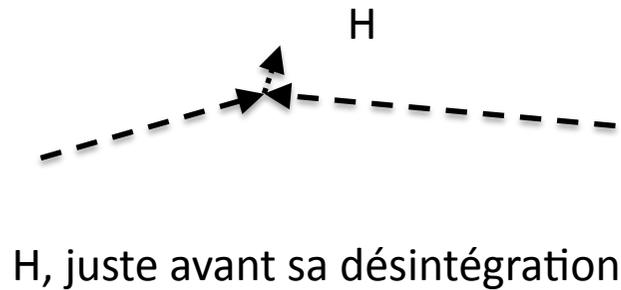
$$E=mc^2$$



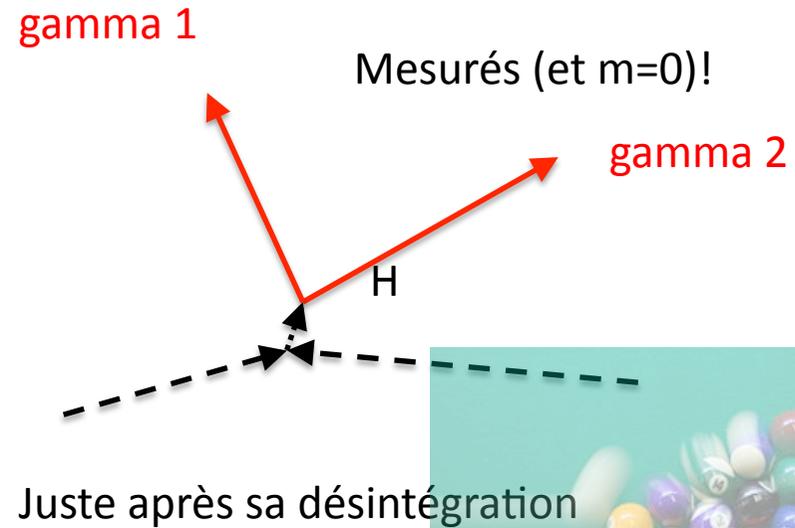
Einstein en 1905

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 :

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



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



$$E_H=E_{g1}+E_{g2}$$

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

⇒ on en déduit m_H !

Finalemment...

10^{14} collisions



Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque

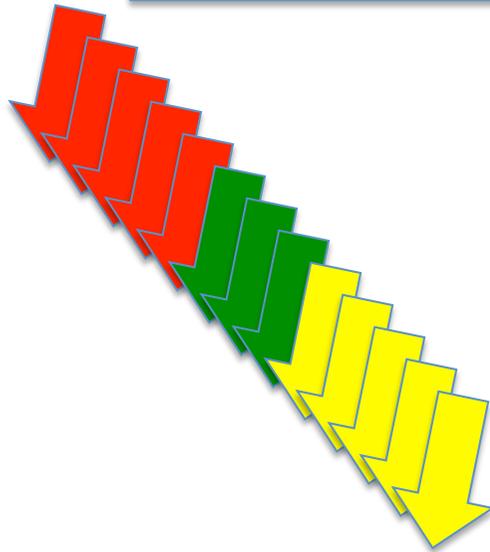
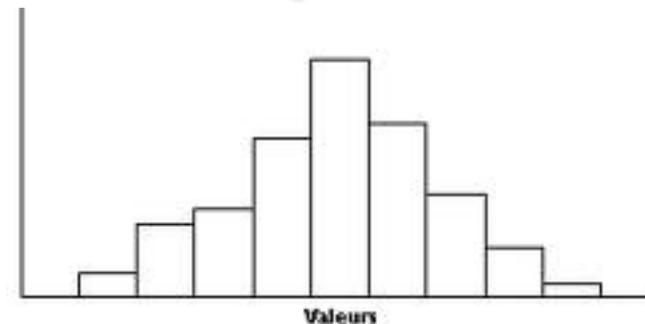


Tri précis

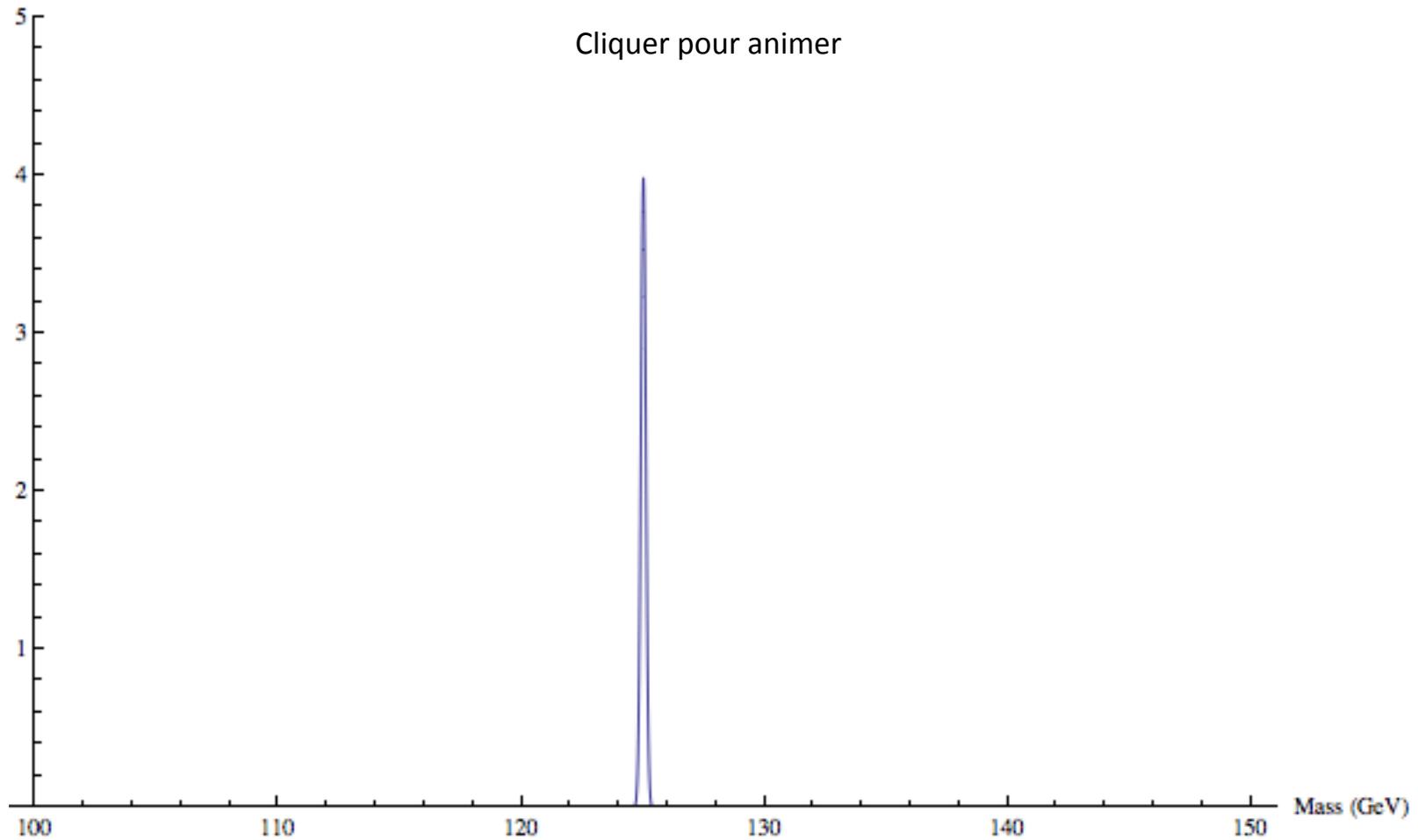
10^5 événements à 2 gamma



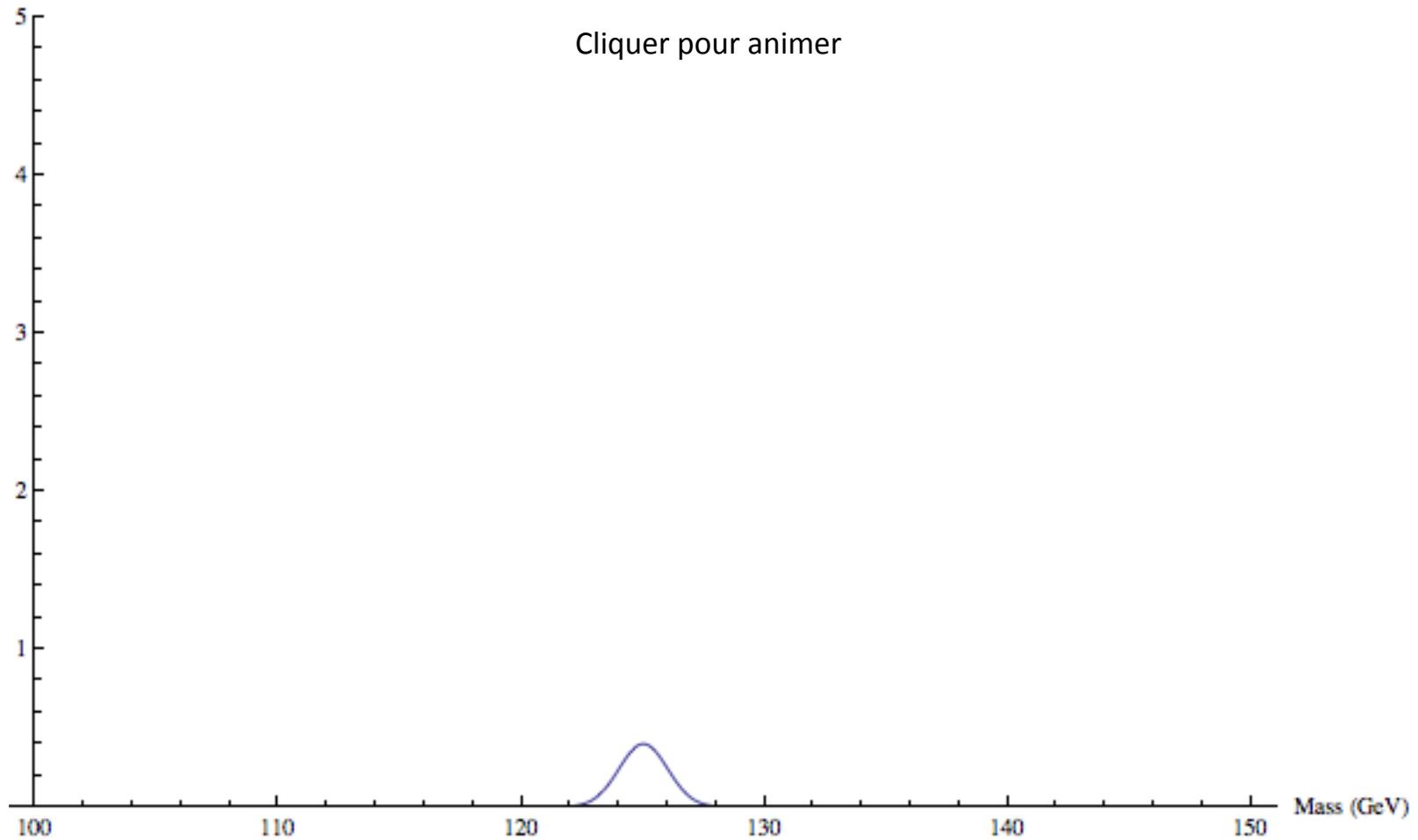
Calcul de la masse
→ histogramme



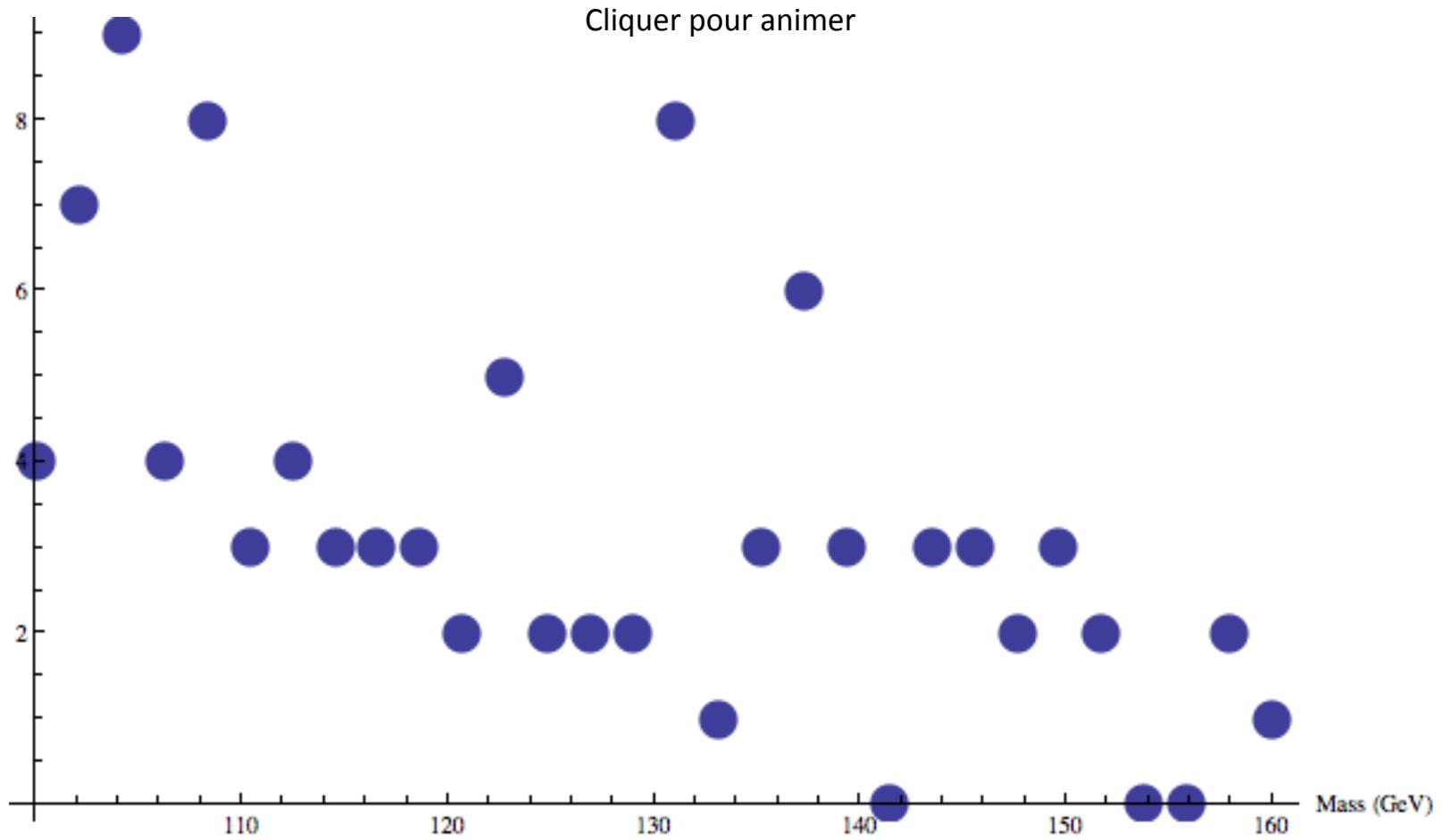
Effet de la précision du détecteur



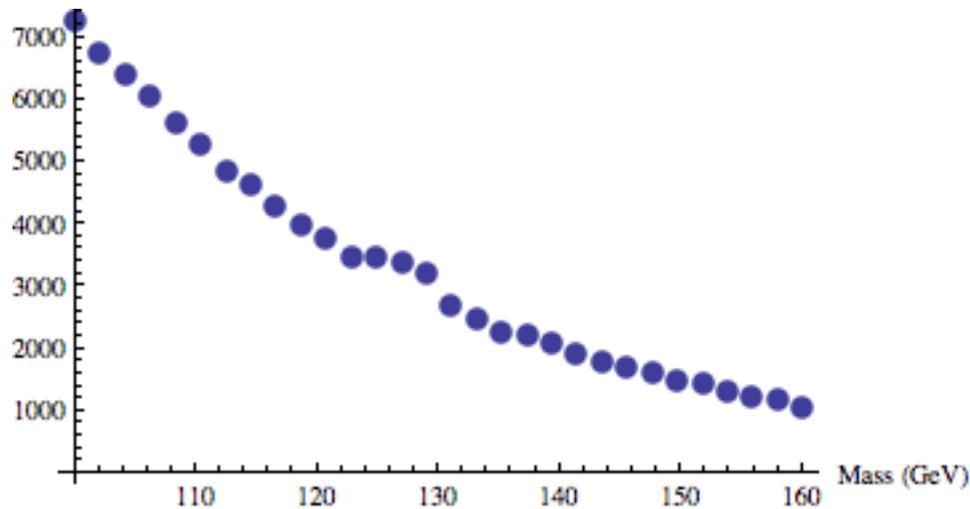
Effet du bruit de fond



Effet de la statistique



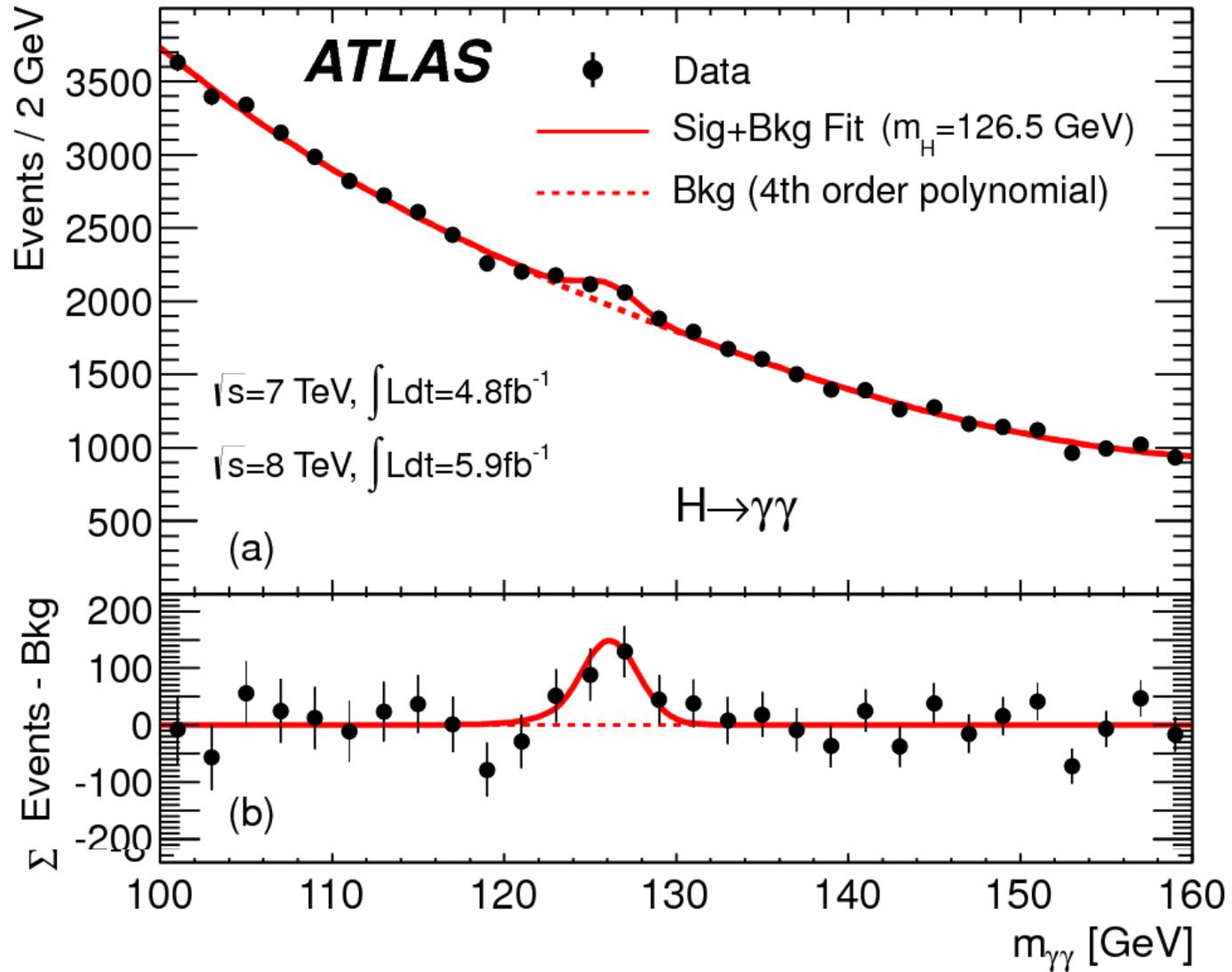
Jobs du physicien



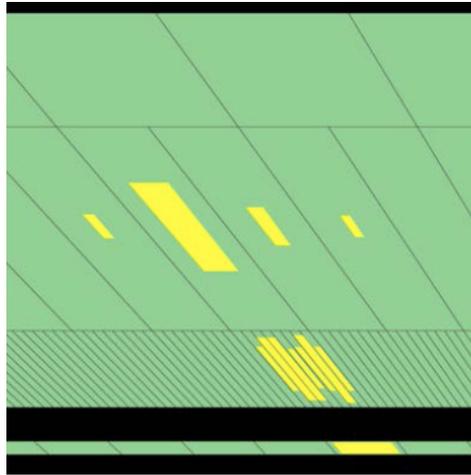
- Augmenter la taille du pic
- Réduire sa largeur
- Réduire le fond
- Evaluer les incertitudes (le plus difficile!)

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

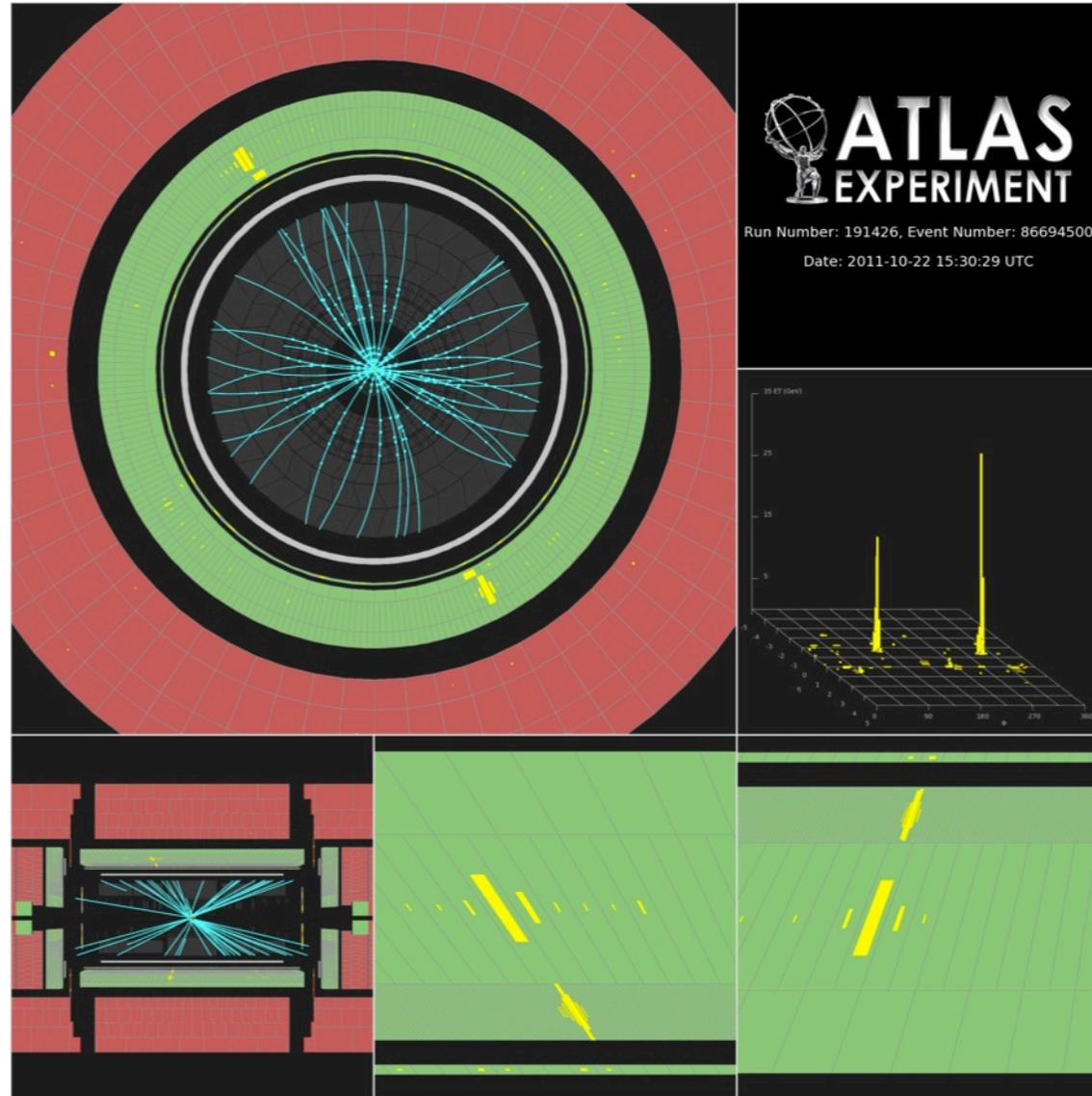
Et maintenant « en vrai » (Juillet 2012)



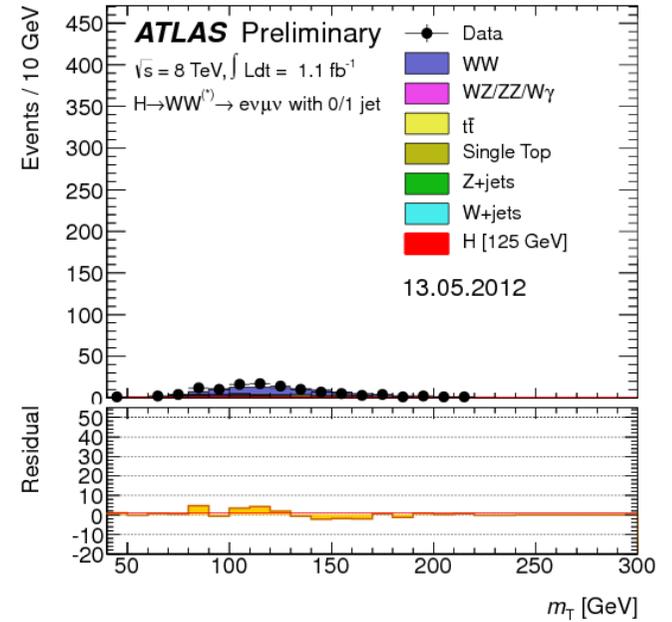
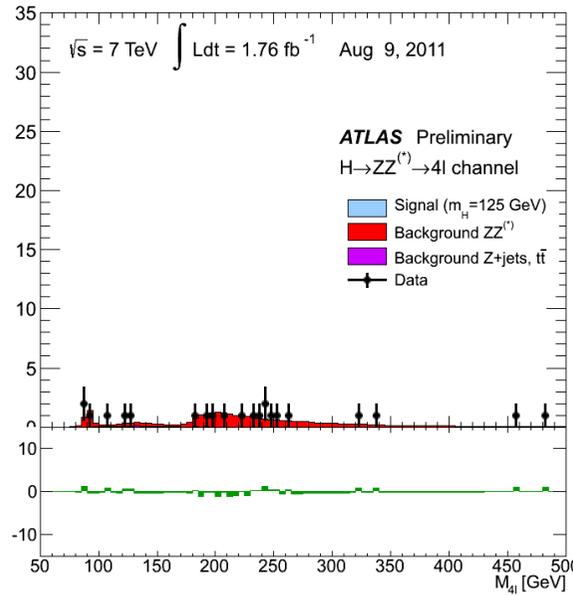
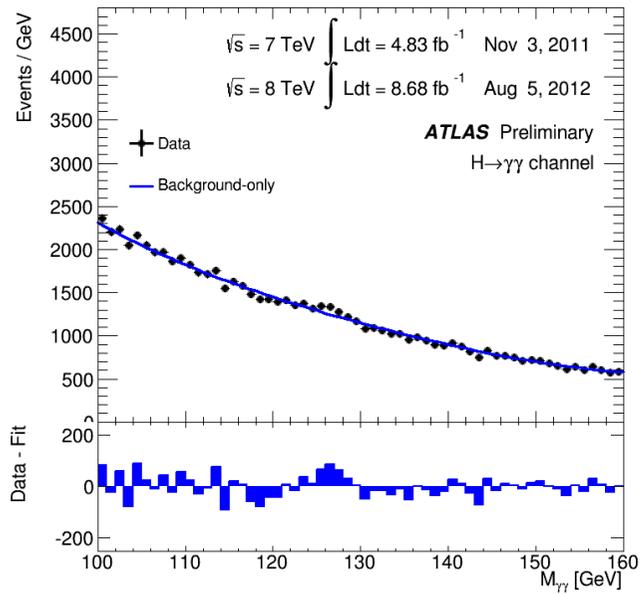
Candidat $H \rightarrow \text{gamma gamma}$



Pion neutre dans un événement de bruit de fond



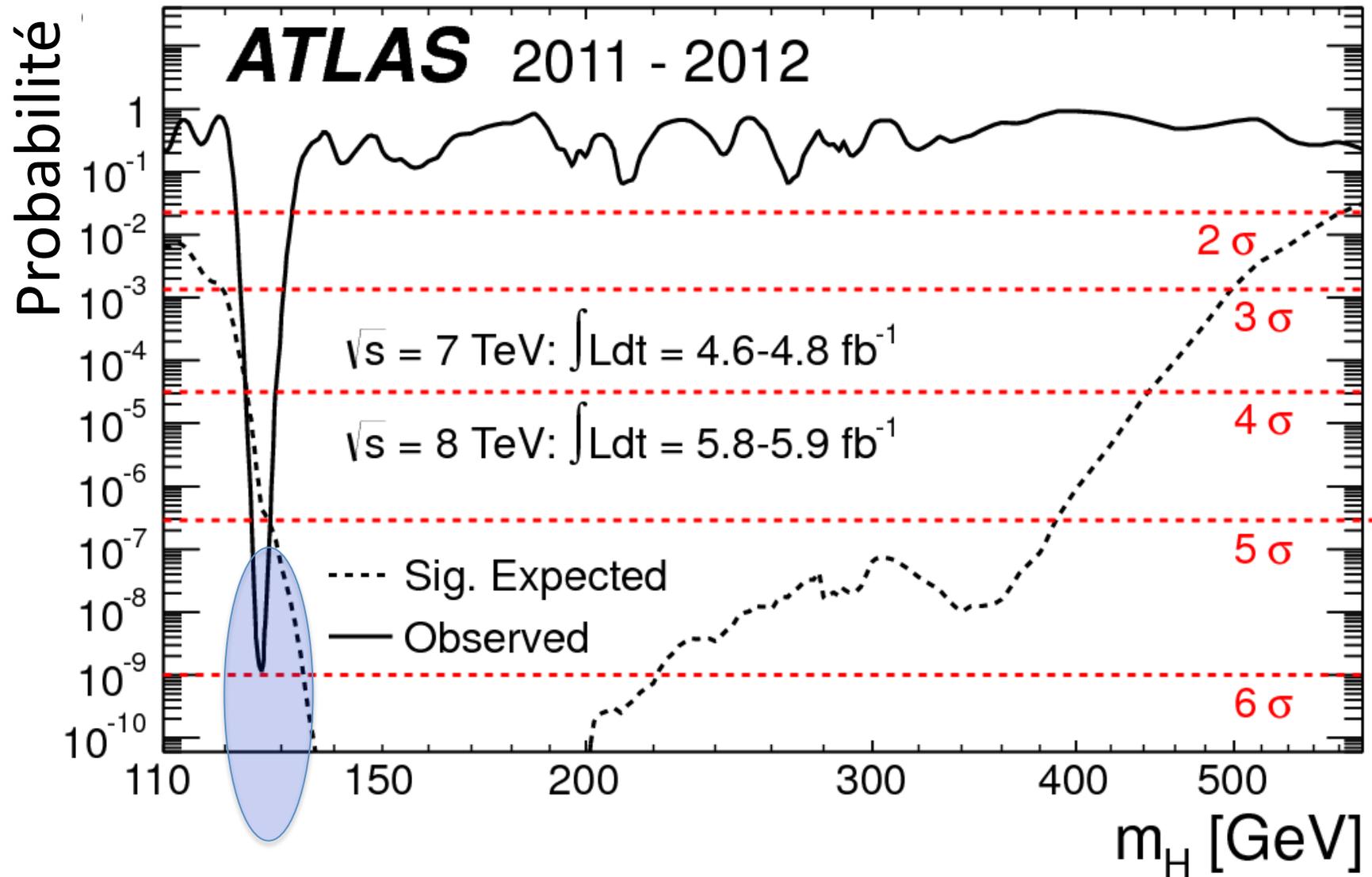
Mise à jour 2013



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

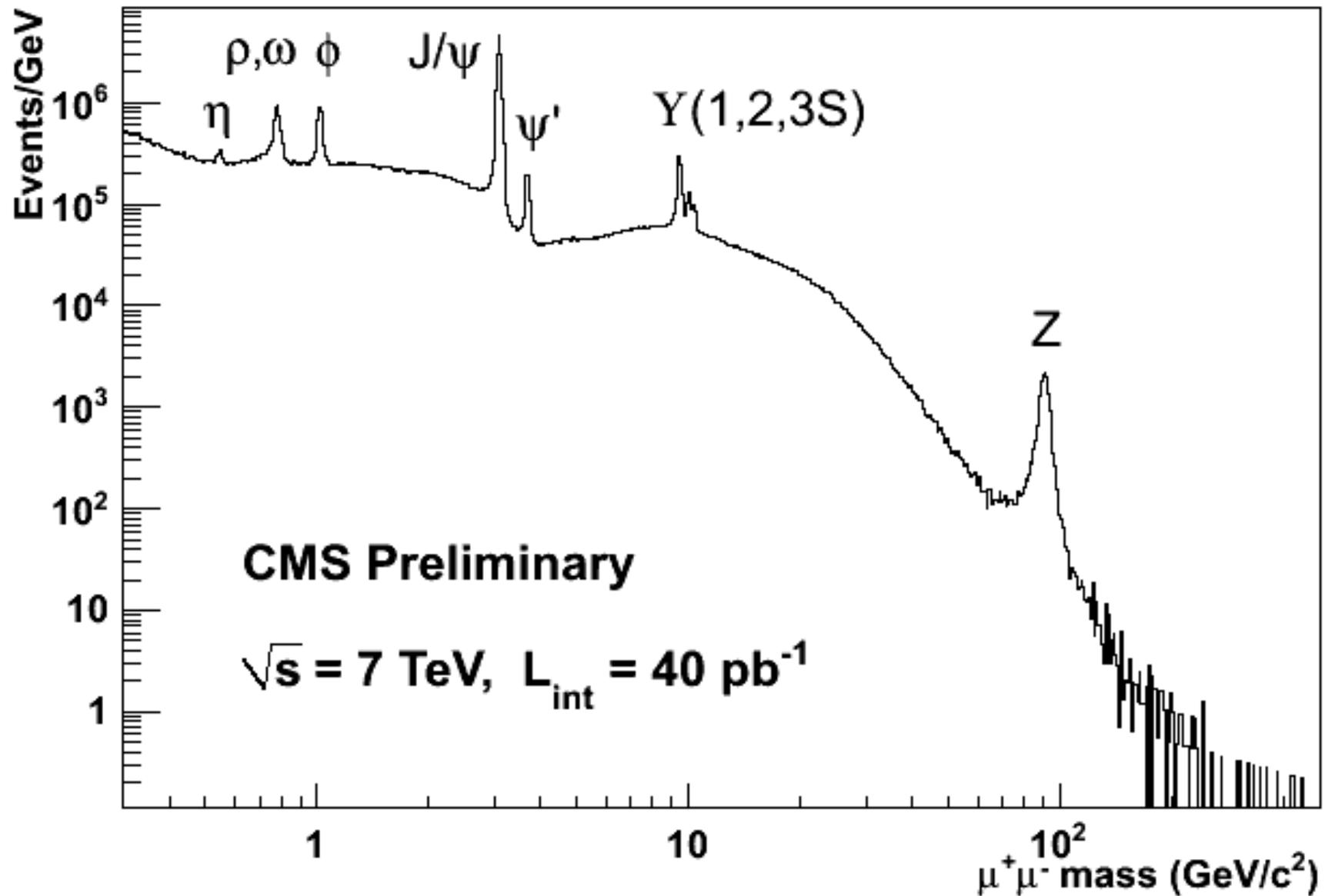
- Certitude au sens physique, non mathématique!
- On évalue : « la probabilité pour voir ce que l'on voit si il n'y avait que du bruit de fond » (en combinant toutes les informations dont on dispose, et en tenant compte de toutes les incertitudes)
- Si cette probabilité est meilleure que 5 écarts standards, on peut, « légitimement » parler de découverte .
- 5 écarts standards :
 - probabilité $\sim 3 \cdot 10^{-7}$, une chance sur 3 millions,
 - ou bien \sim la probabilité de tirer les quatre as d'un jeu de 52 cartes, dans l'ordre





- Oui mais : l'observation par Opera des neutrinos allant plus vite que la lumière était à 6 sigmas...
- ...pour un câble mal branché...

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.
- ATLAS et CMS, de technologies complètement différentes, conçues et exploitées par des équipes différentes, ont trouvé sans se concerter les mêmes excès d'événements à la même masse

Séminaire du 4 juillet 2012 au CERN



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

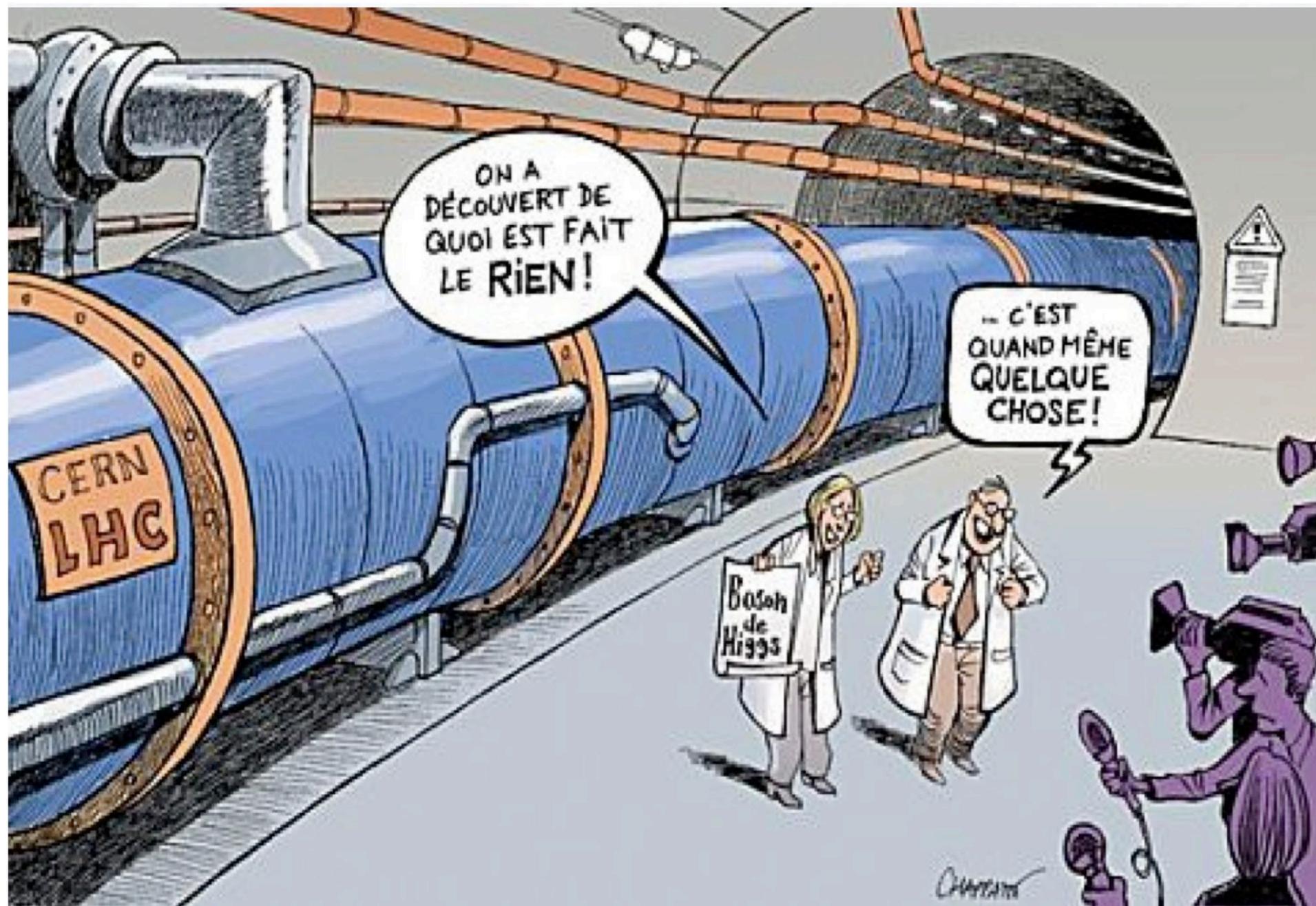
$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

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

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

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

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



ON A DÉCOUVERT DE QUOI EST FAIT LE RIEN!

... C'EST QUAND MÊME QUELQUE CHOSE!

Boson de Higgs

CERN LHC

CHAMPAGNE

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

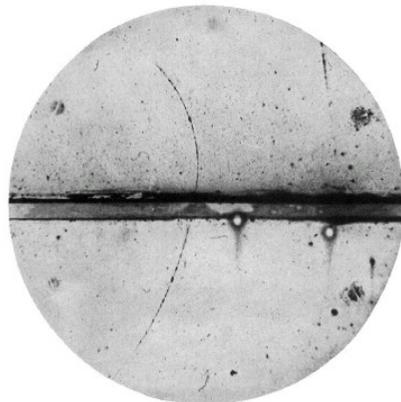


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_0=2.1 \times 10^9$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_0=7.5 \times 10^8$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



(~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 [☆]

ATLAS Collaboration ^{*}

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 fb^{-1} collected at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in 2011 and 5.8 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 1.7×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

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



(~3000
signataires en
annexe)

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC [☆]

CMS Collaboration ^{*}

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

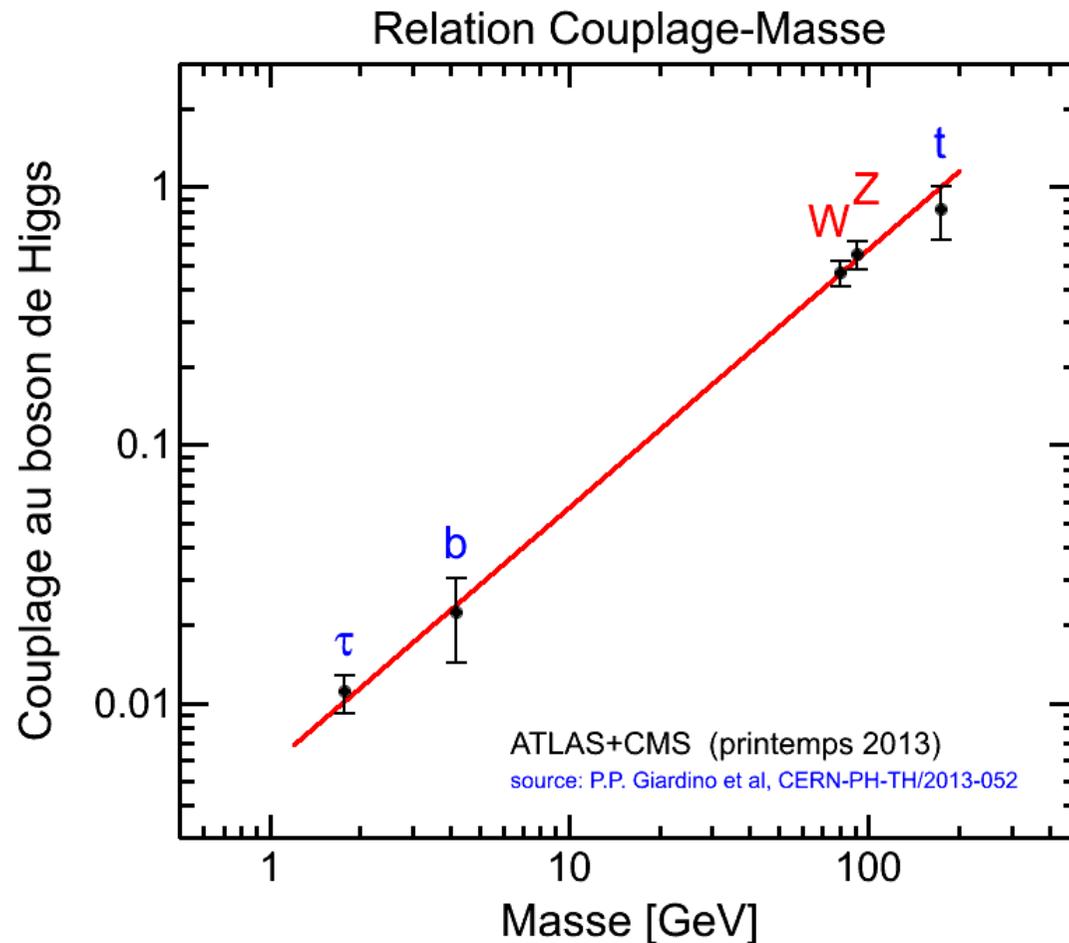
Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb^{-1} at 7 TeV and 5.3 fb^{-1} at 8 TeV. The search 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.

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

Relation couplage-masse

entre ce boson et différentes particules



→ parfaitement proportionnelle !

→ relation privilégiée de ce boson à la masse

→ exactement comme prévu

Qu'est-ce que VOIR une particule ?

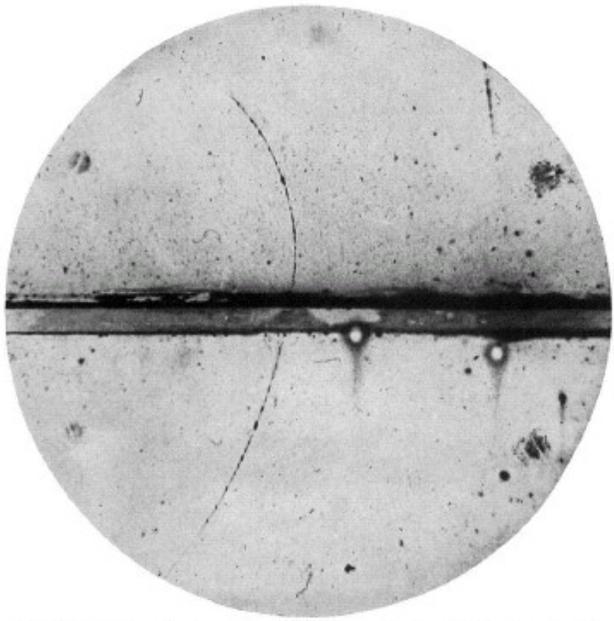
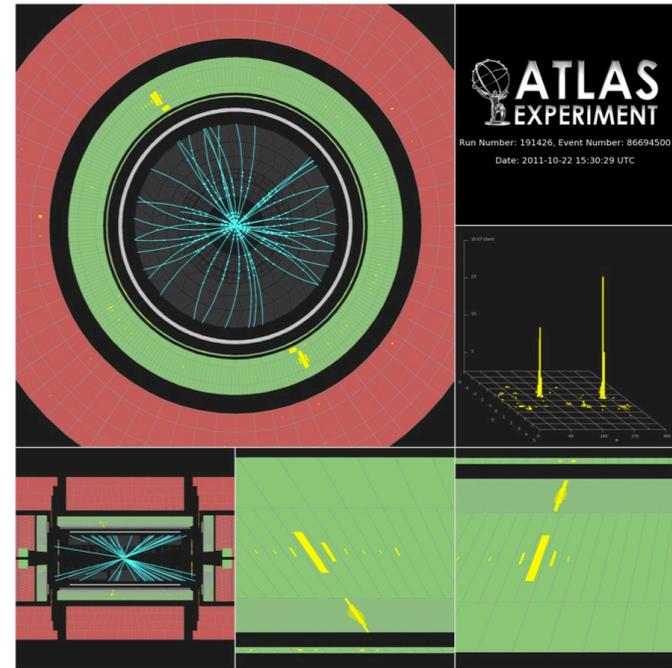
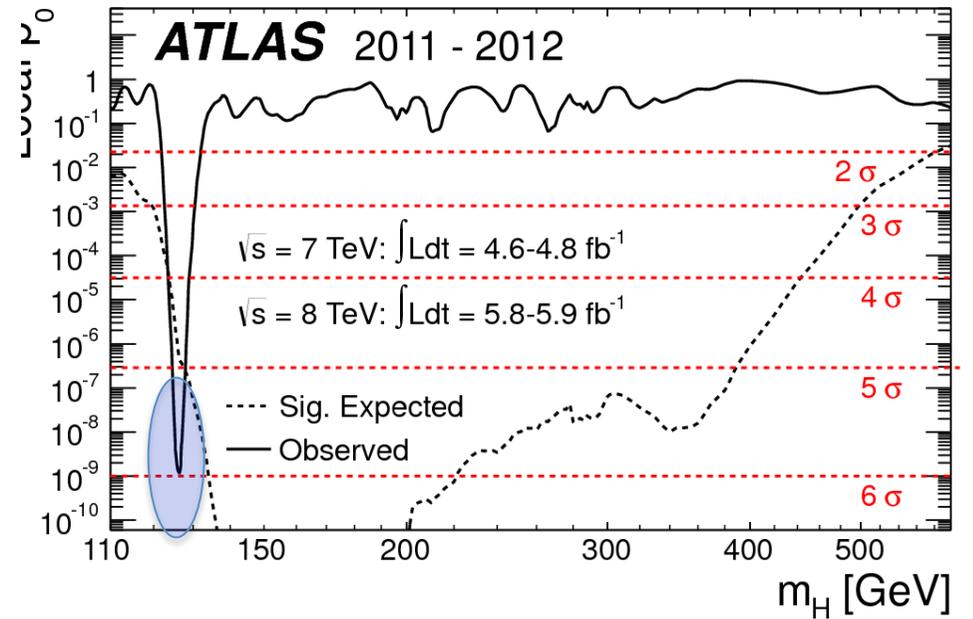
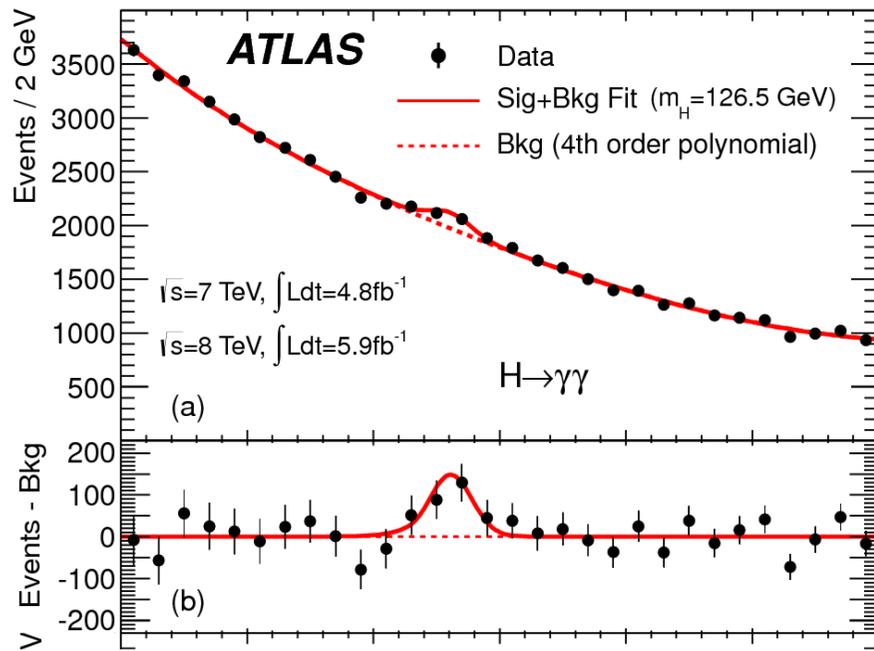


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H\rho = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho = 7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



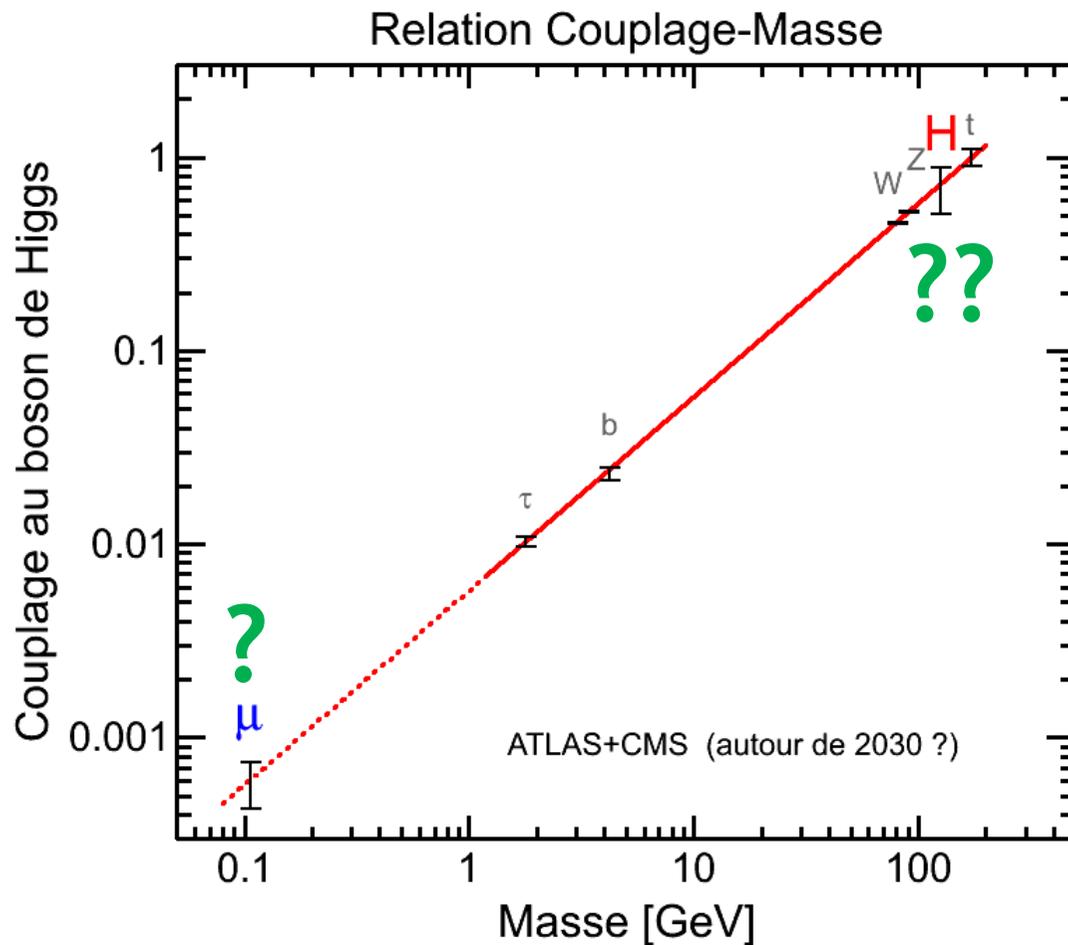
ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 191426, Event Number: 66694500
Date: 2011-10-22 15:30:29 UTC



Le boson de Higgs: la fin d'un commencement

Terra incognita



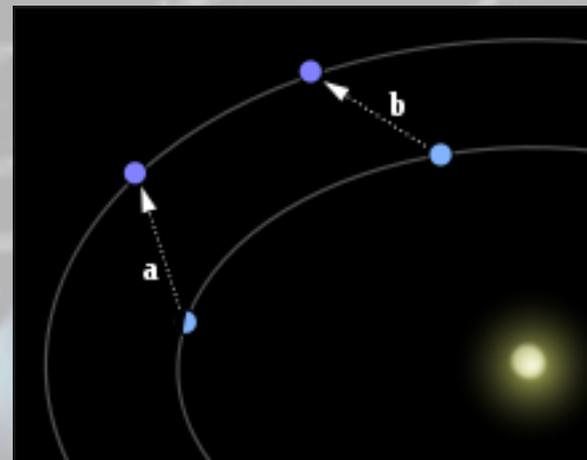
Les physiciens pénètrent
un nouveau territoire

celui du « secteur de Higgs »

Mesurer les
propriétés du nouveau boson!

Flash-back: 1846

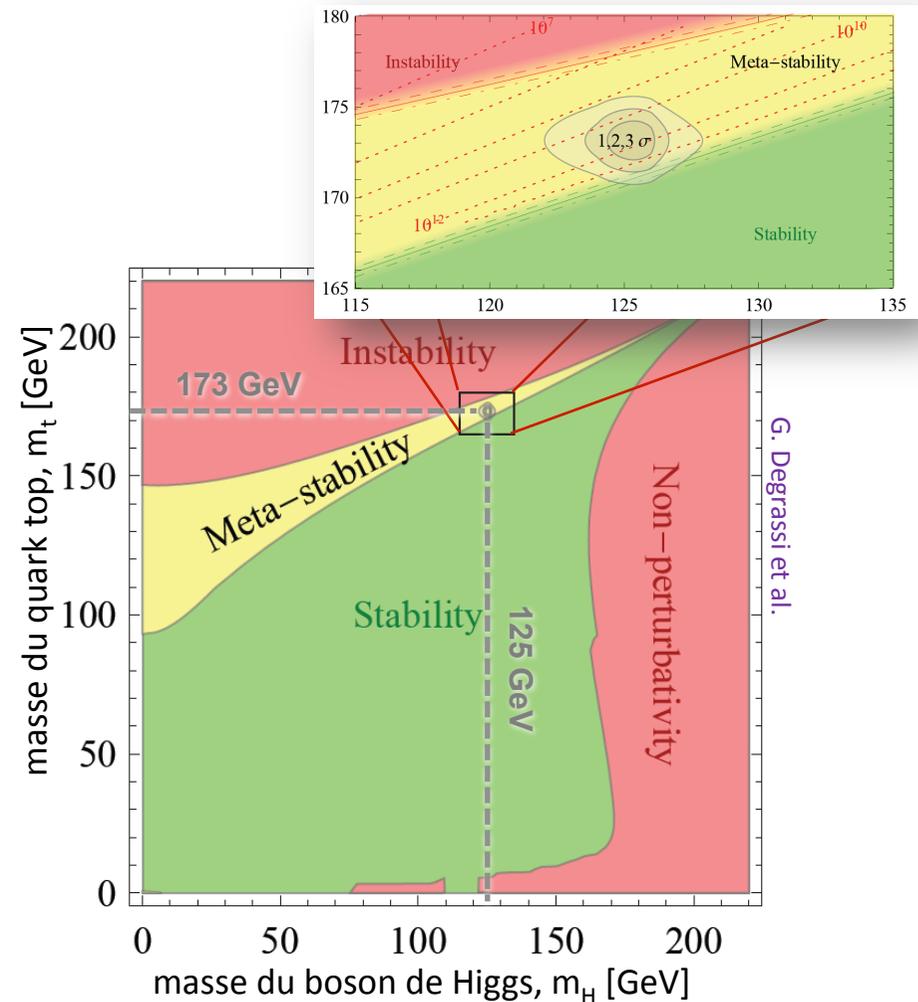
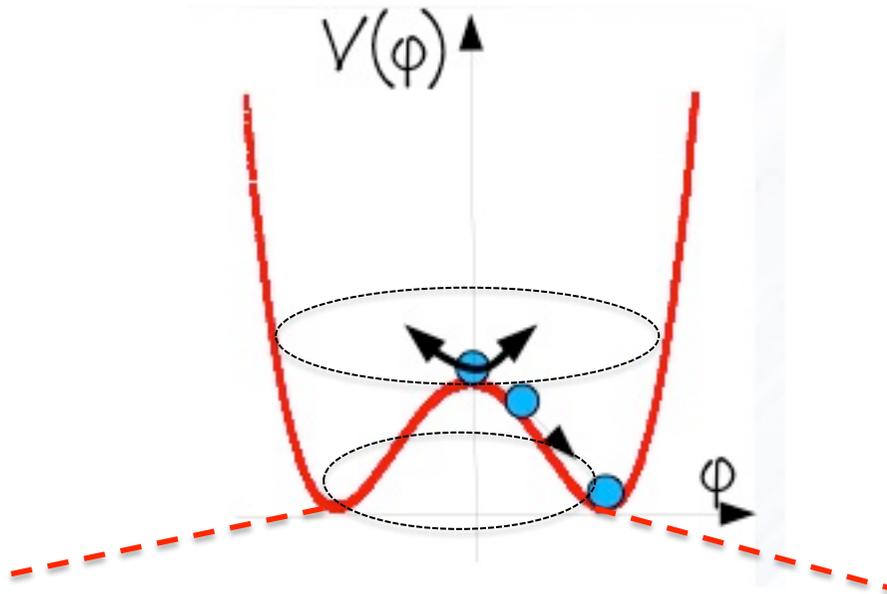
- Observations de minuscules déviations de la position d'Uranus
- Urbain Le Verrier calcule et prédit l'existence d'une nouvelle planète...
- ...Neptune effectivement découverte quelques semaines plus tard à l'endroit indiqué



L'Univers est-il stable ?

La **stabilité** du **vide**
dépend des **masses** du
boson de Higgs et du **quark top**

Notre Univers vit au bord du précipice !



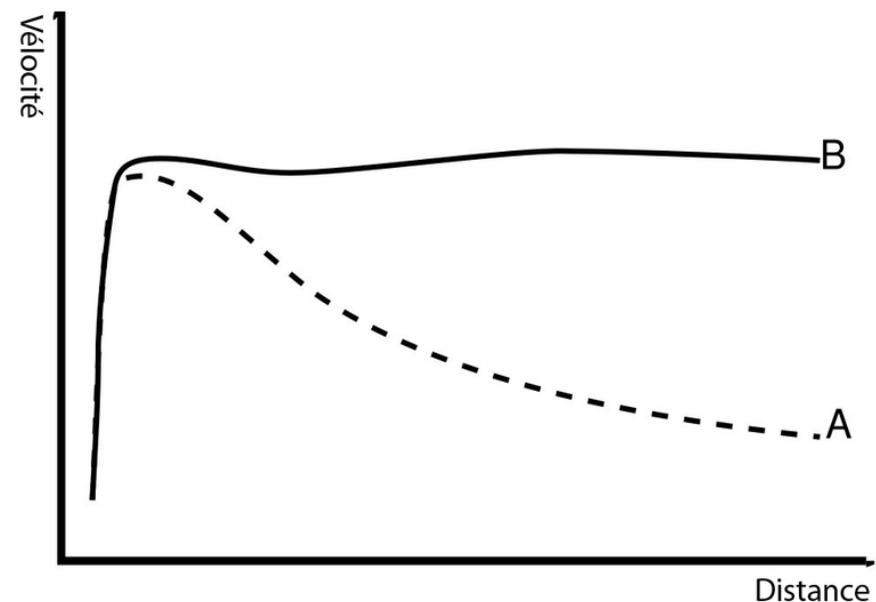
Questions ouvertes

- Quelle est la nature de la **matière noire** ?
- Pourquoi des particules de masse si différentes ?
- La Nature est-elle **super-symétrique** ?
- Rôle du **champ de Higgs** sur les tous premiers instants du **Big-Bang**?
- Quel est son lien avec **l'énergie sombre** ?
- Relation avec la gravitation ?
- Pourquoi l'anti-matière est-elle presque absente de l'univers ?
- Quel est rôle fondamental des **neutrinos** ?
- etc...
- (~400 articles publiés par Atlas sur le boson de Higgs)

Ces questions fondamentales justifient la **poursuite** de la quête de **Nouvelle Physique** auprès du **LHC**, et des **machines futures**

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**
 - ⇒ 5 fois plus que la matière visible
 - ⇒ aucune explication à ce jour



“Physique des deux infinis”



IN2P3
Les deux infinis

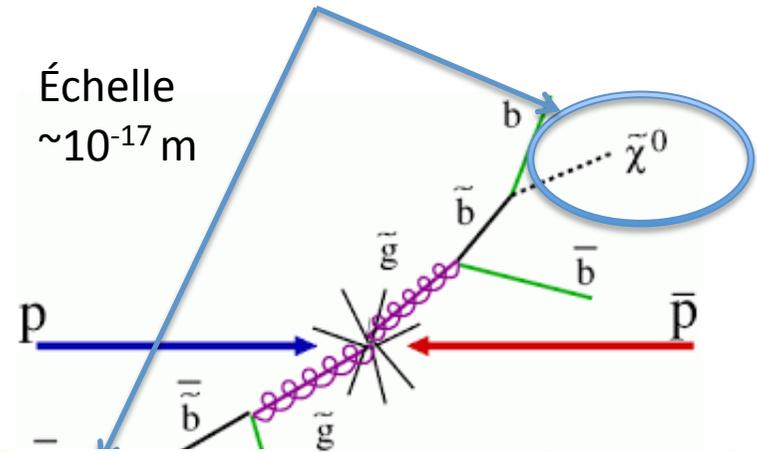
Matière noire



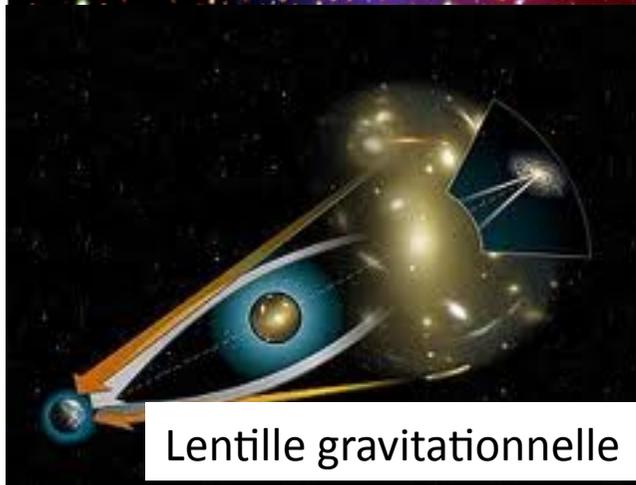
Échelle $\sim 10^{22}$ m

Matière lumineuse

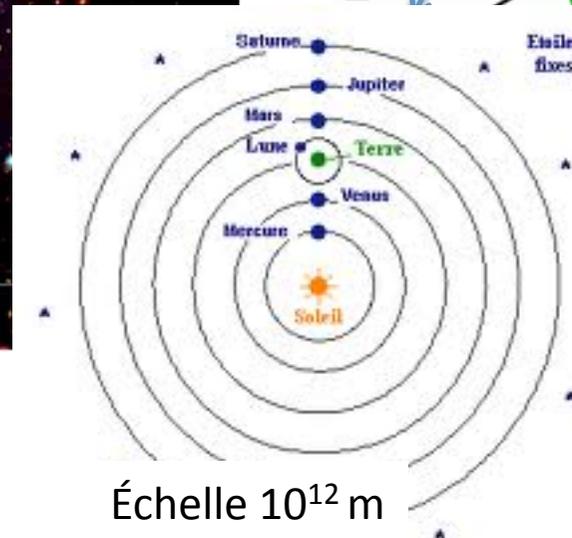
Matière noire



Échelle $\sim 10^{-17}$ m



Lentille gravitationnelle



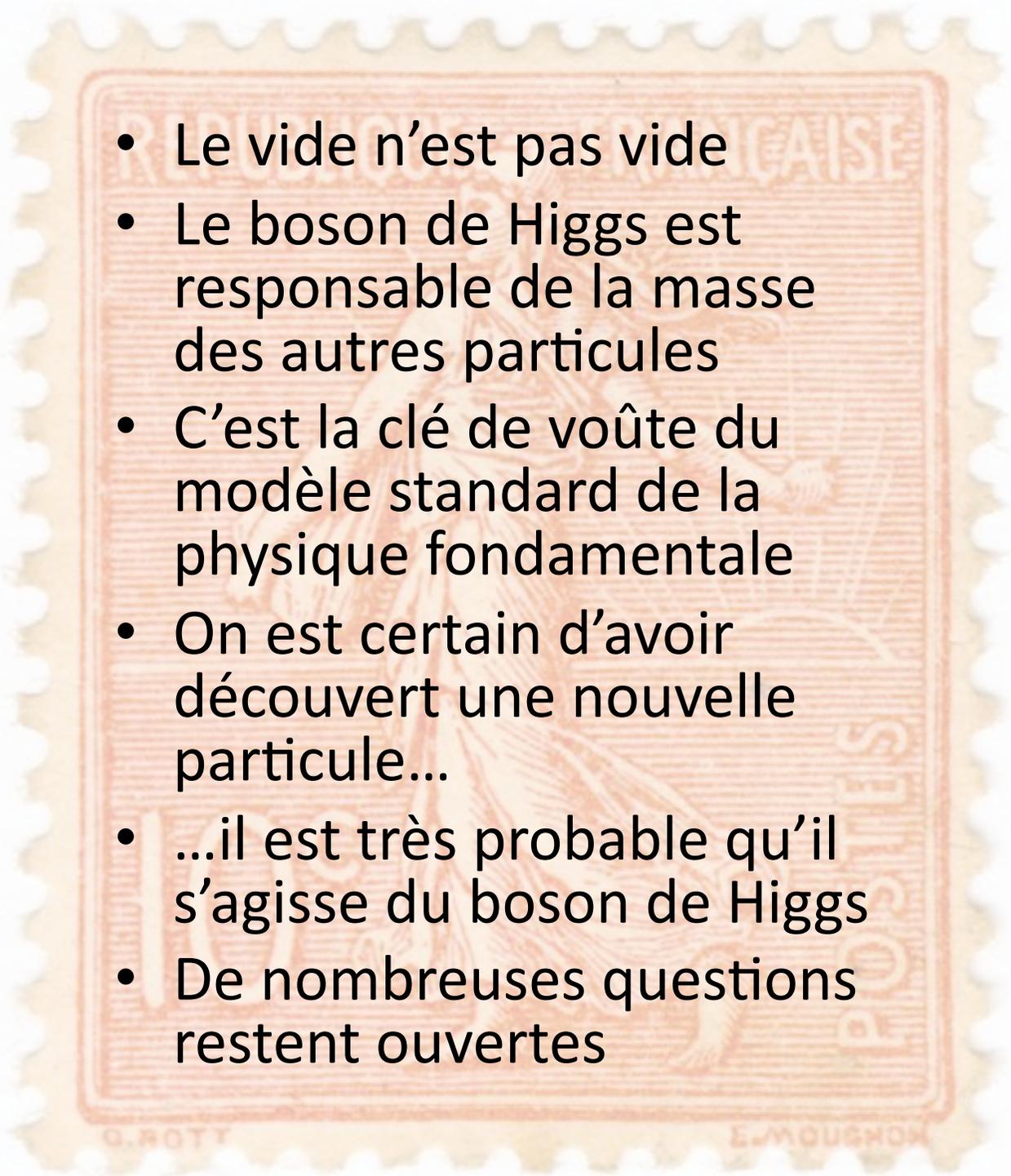
Échelle 10^{12} m

le Système héliocentrique

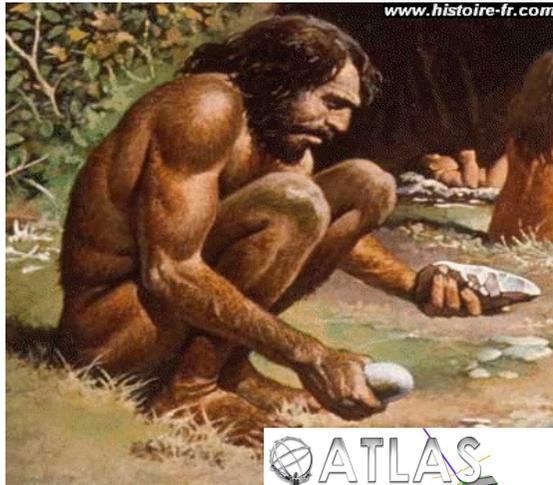


Échelle 1 m

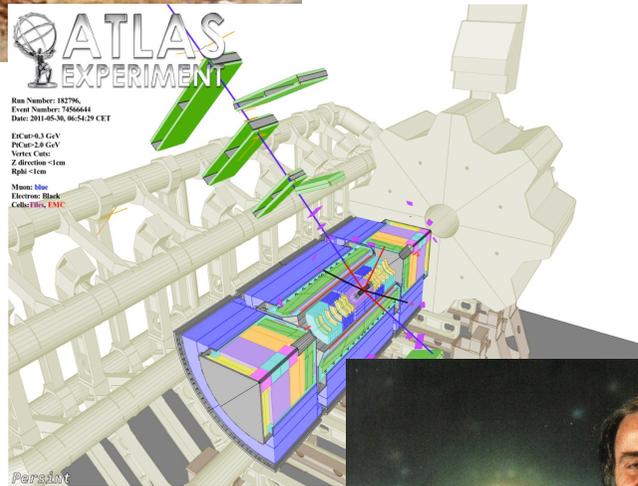
Conclusions

- 
- Le vide n'est pas vide
 - Le boson de Higgs est responsable de la masse des autres particules
 - C'est la clé de voûte du modèle standard de la physique fondamentale
 - On est certain d'avoir découvert une nouvelle particule...
 - ...il est très probable qu'il s'agisse du boson de Higgs
 - De nombreuses questions restent ouvertes

Pourquoi cherche-t-on ?

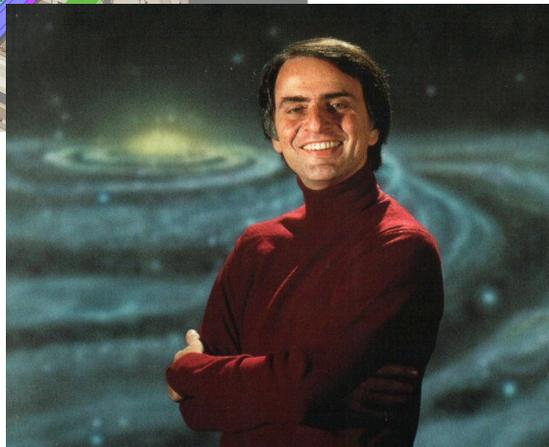


Depuis la nuit des temps, l'humain se questionne



Il cherche à **SAVOIR**.

Mais personne ne sait pourquoi il cherche



**“We are a way for the
Cosmos to know itself”**

Carl Sagan

(philosophe et exobiologiste)

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.



Suppléments

Expérimentation technologique

- **Energie des collisions:**

- Nominal: 14000 GeV (prévu pour 2015)
 - 1GeV $22.4 \cdot 10^{-10}$ Joules
- Actuelle: 8000 GeV

- **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

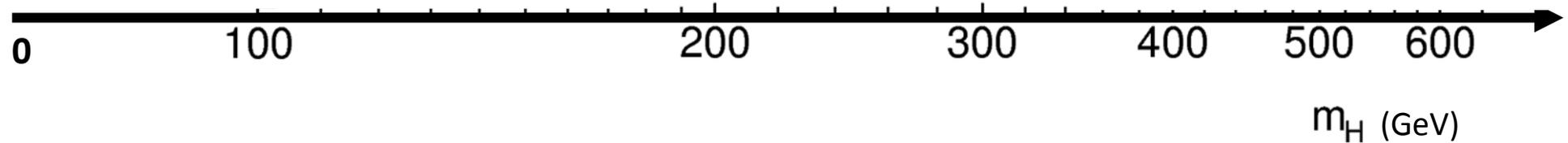
- **Le plus grand réfrigérateur**

- les aimants doivent être refroidis à -271°C , une température plus froide que celle de l'espace intersidéral

La chasse au boson de Higgs était
ouverte depuis longtemps

Etat initial

?

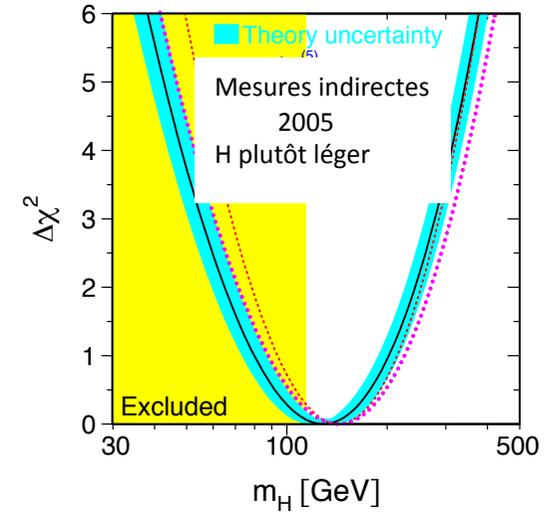


- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie $\Rightarrow m_H < 1000$ GeV

⁹¹
1GeV \sim masse d'un proton/atome d'hydrogène

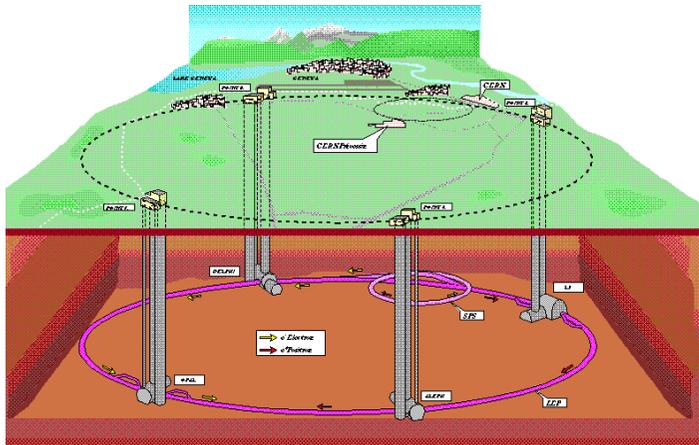
La chasse au boson de Higgs

LEP
1989-2000

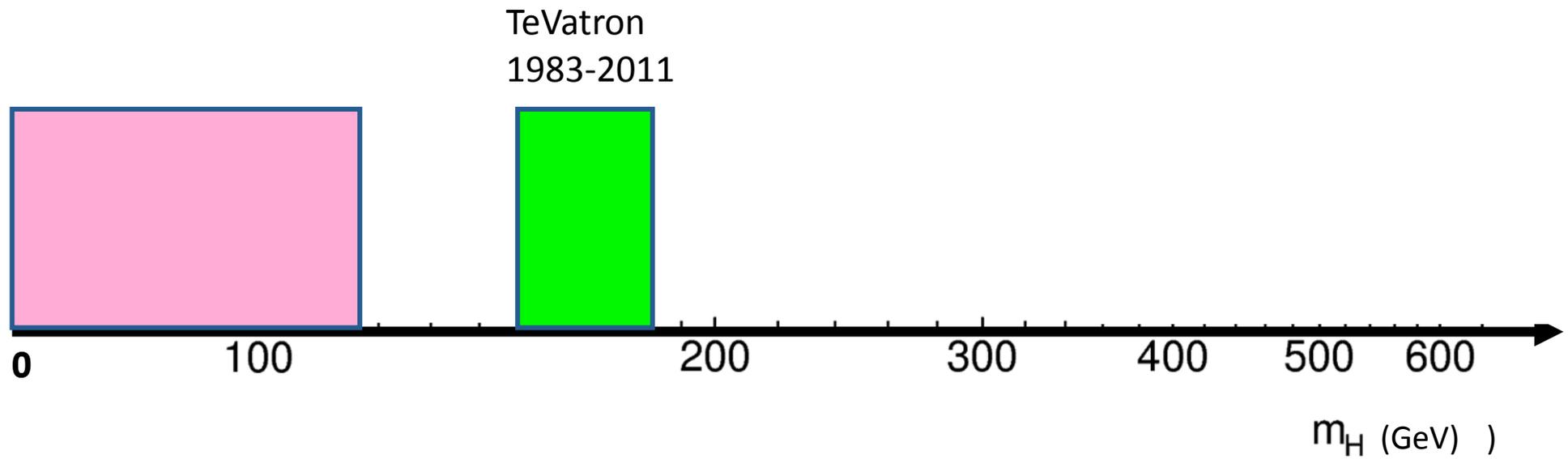


m_H (GeV)

Le LEP au cern
(pres de Genève)



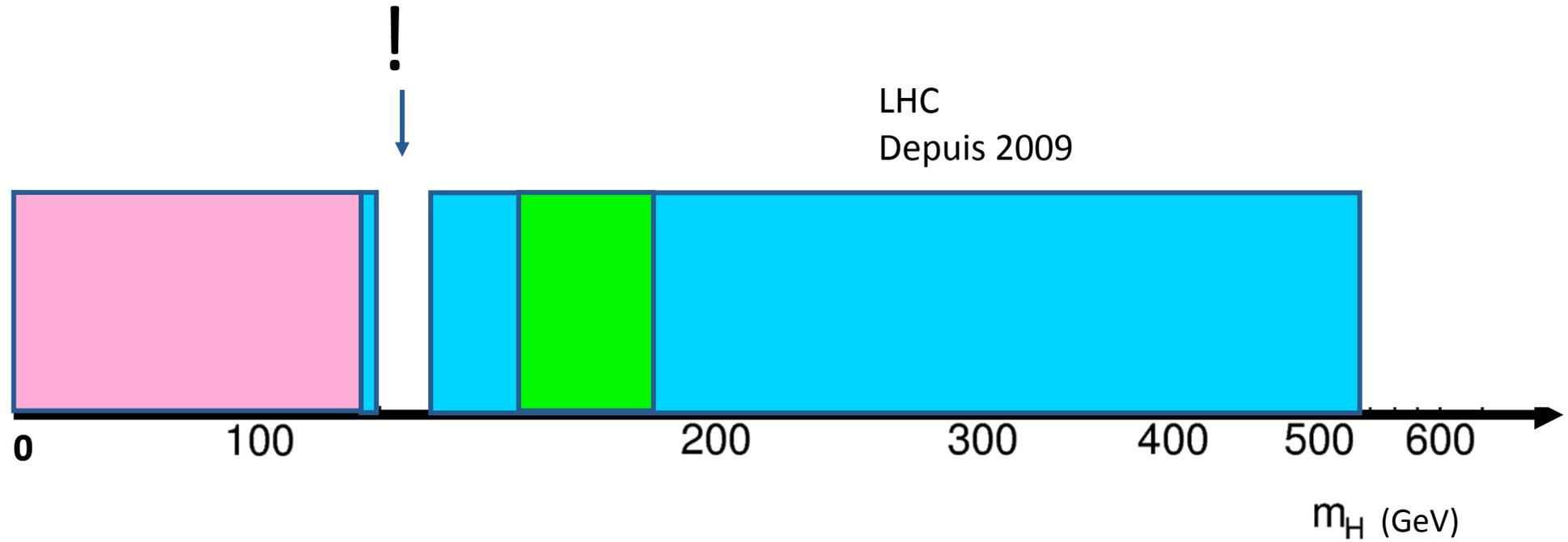
La chasse au boson de Higgs



Le TeVatron à Fermilab
(pres de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



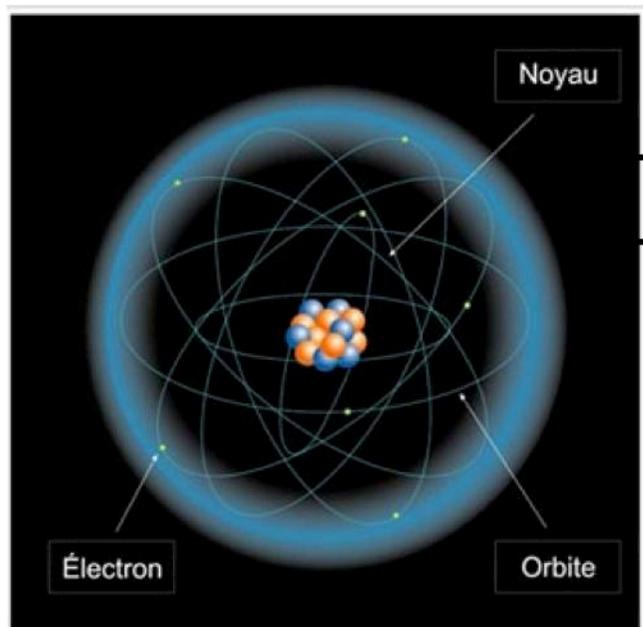
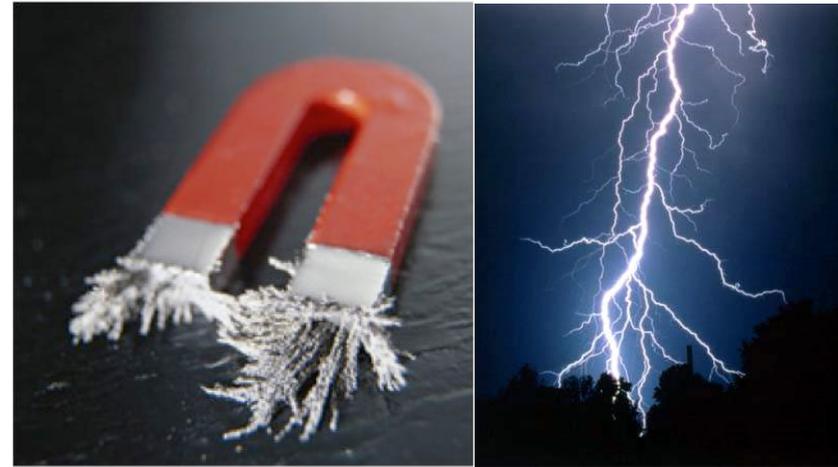
Le LHC au cern



L'interaction électromagnétique

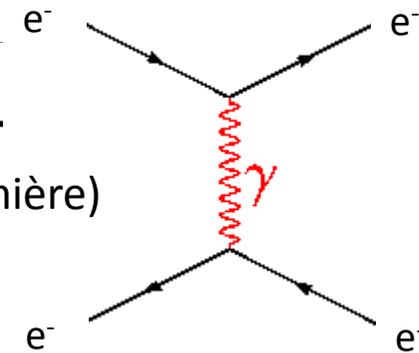
Responsable des phénomènes
électriques et magnétiques :
aimantation, lumière,
cohésion des atomes,...

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



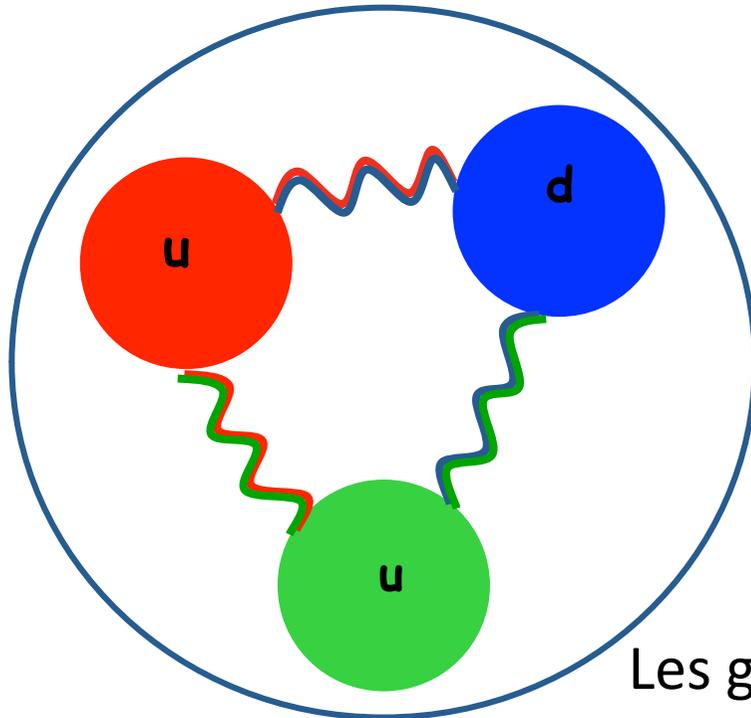
Médiateur : **photon (ou gamma)**

$m=0$ (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

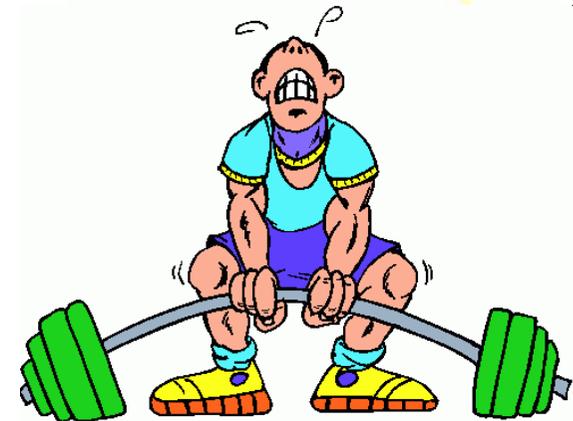
Médiateurs: **gluons**

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

L'interaction faible

Médiateurs : W^+ , W^- et Z^0

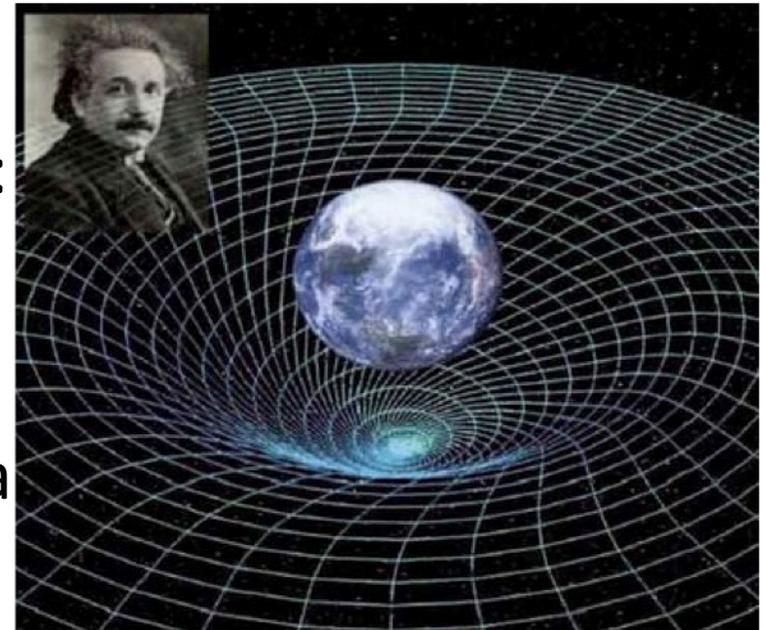
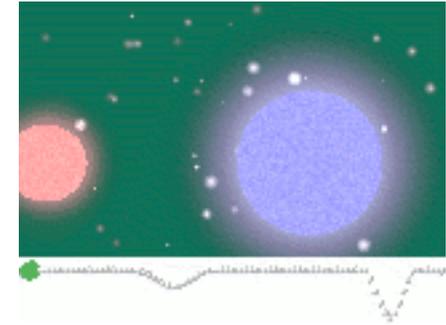
- Interaction faible
 - Radioactivité β
 - Participe aux réactions nucléaires au coeur du Soleil
- 100,000 fois plus faible que l'interaction forte,
 - Influence limitée au noyau atomique.
 - Expliquée par la grande masse des bosons vecteurs de l'interaction faible.



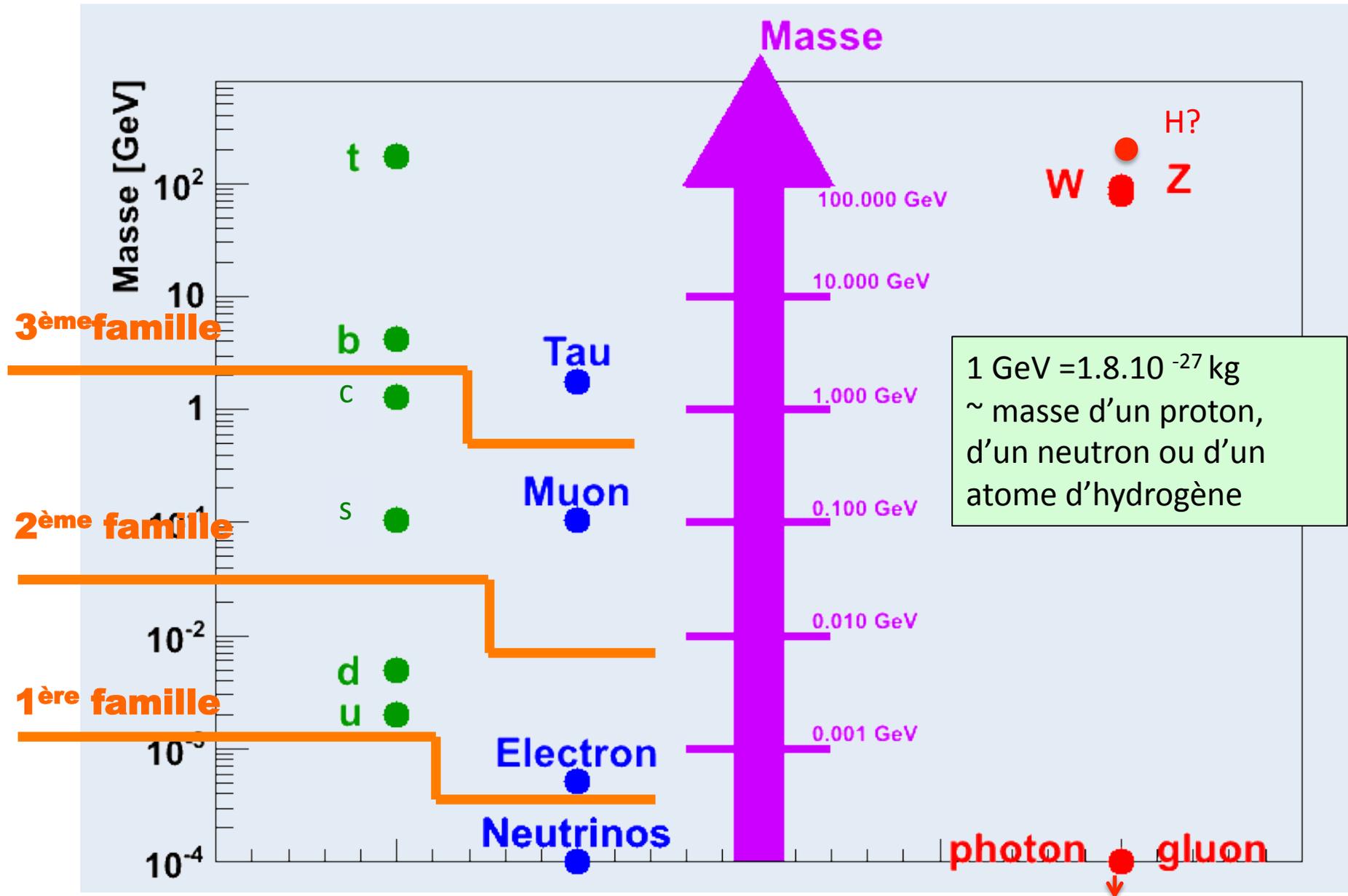
La gravitation

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

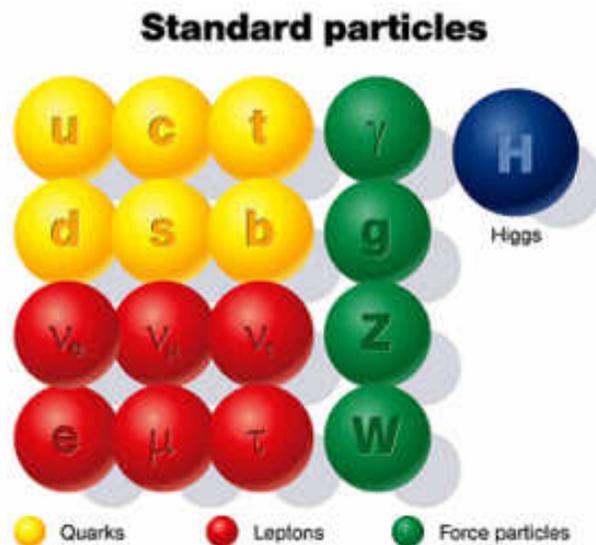


Echelle des masses



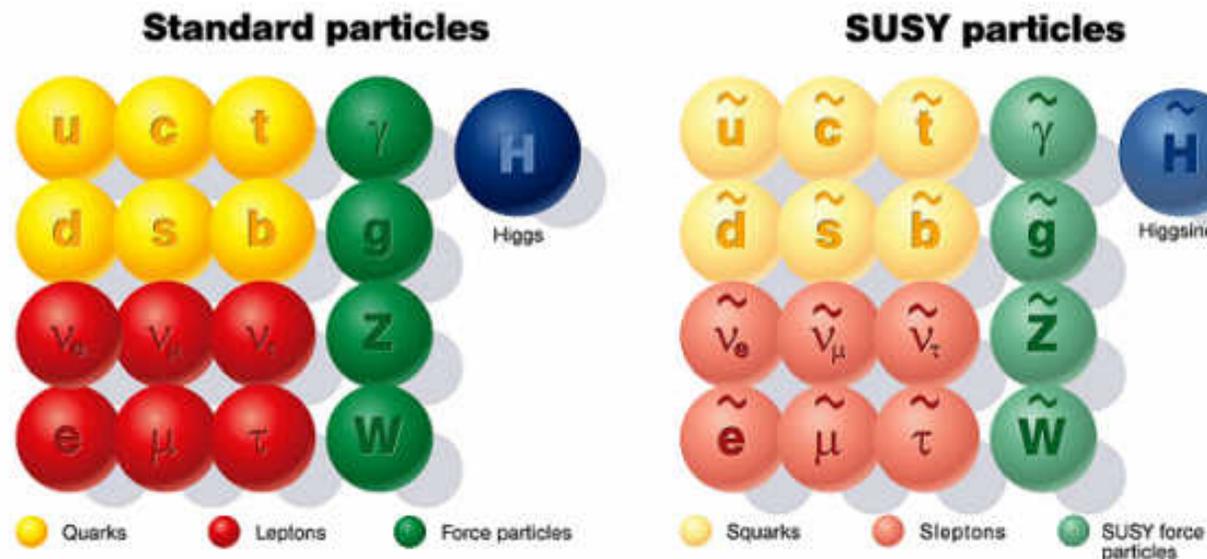
La supersymétrie

- 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

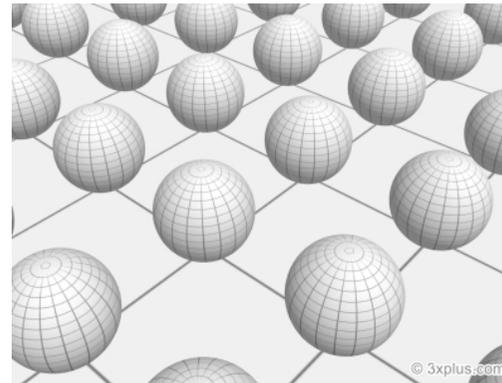
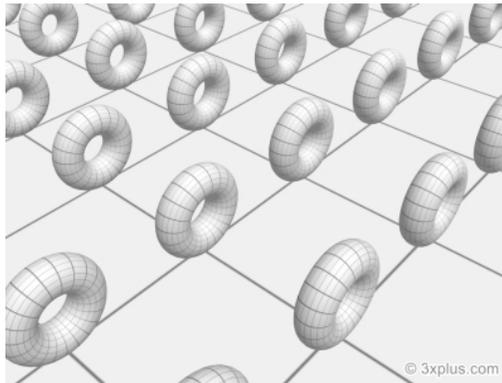


La supersymétrie

- 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



Dimensions supplémentaires



Dimensions supplémentaires de l'espace repliées
La gravitation est "diluée" dans un espace plus grand
Fournit aussi un candidat de matière noire "gravitino"

Test des Front-End Board

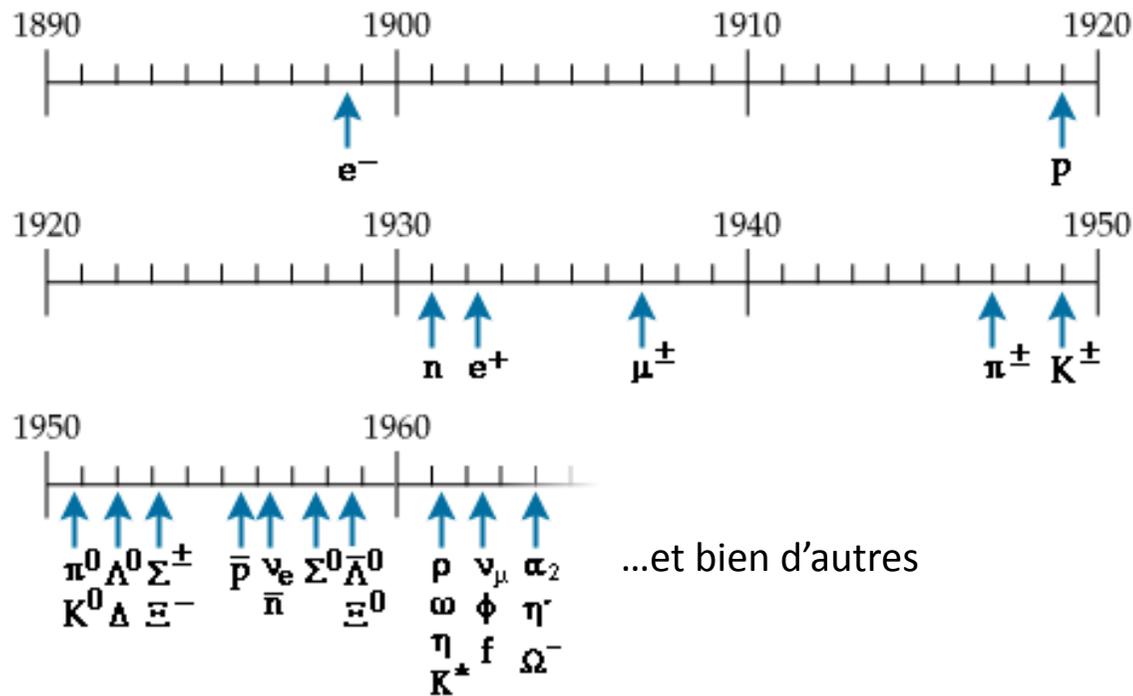
MAC based SBIT3
With TMacLib

LV U and I

LV Power Supply

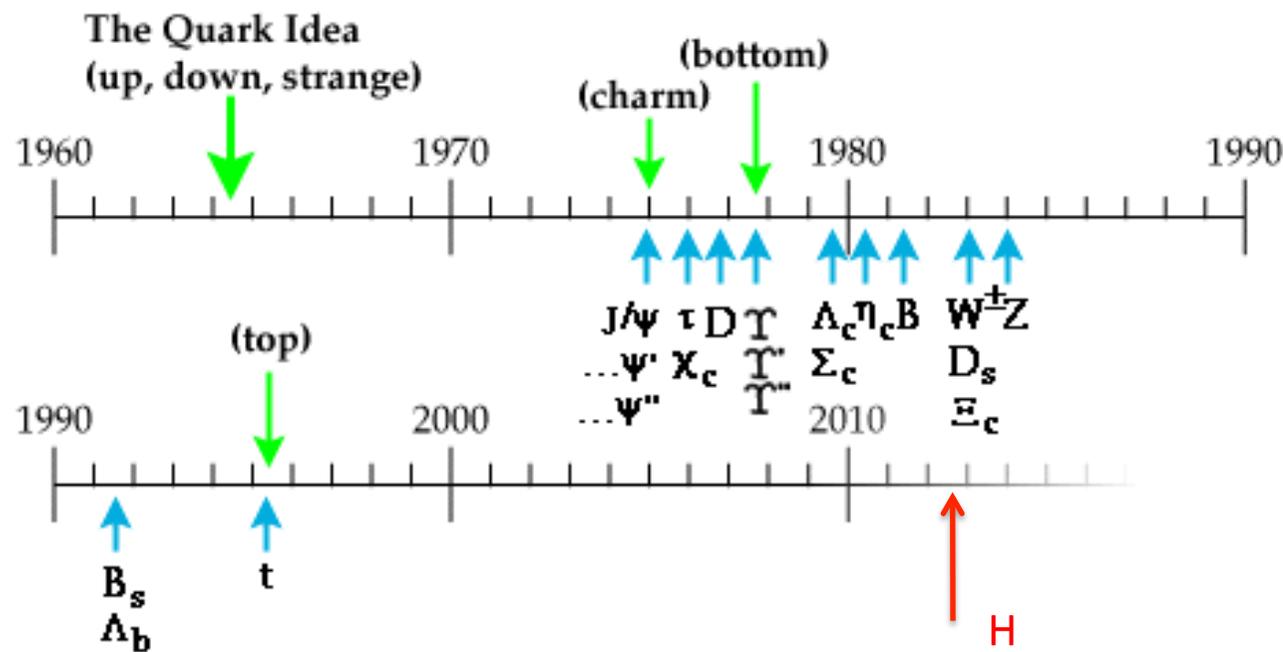
VME:

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

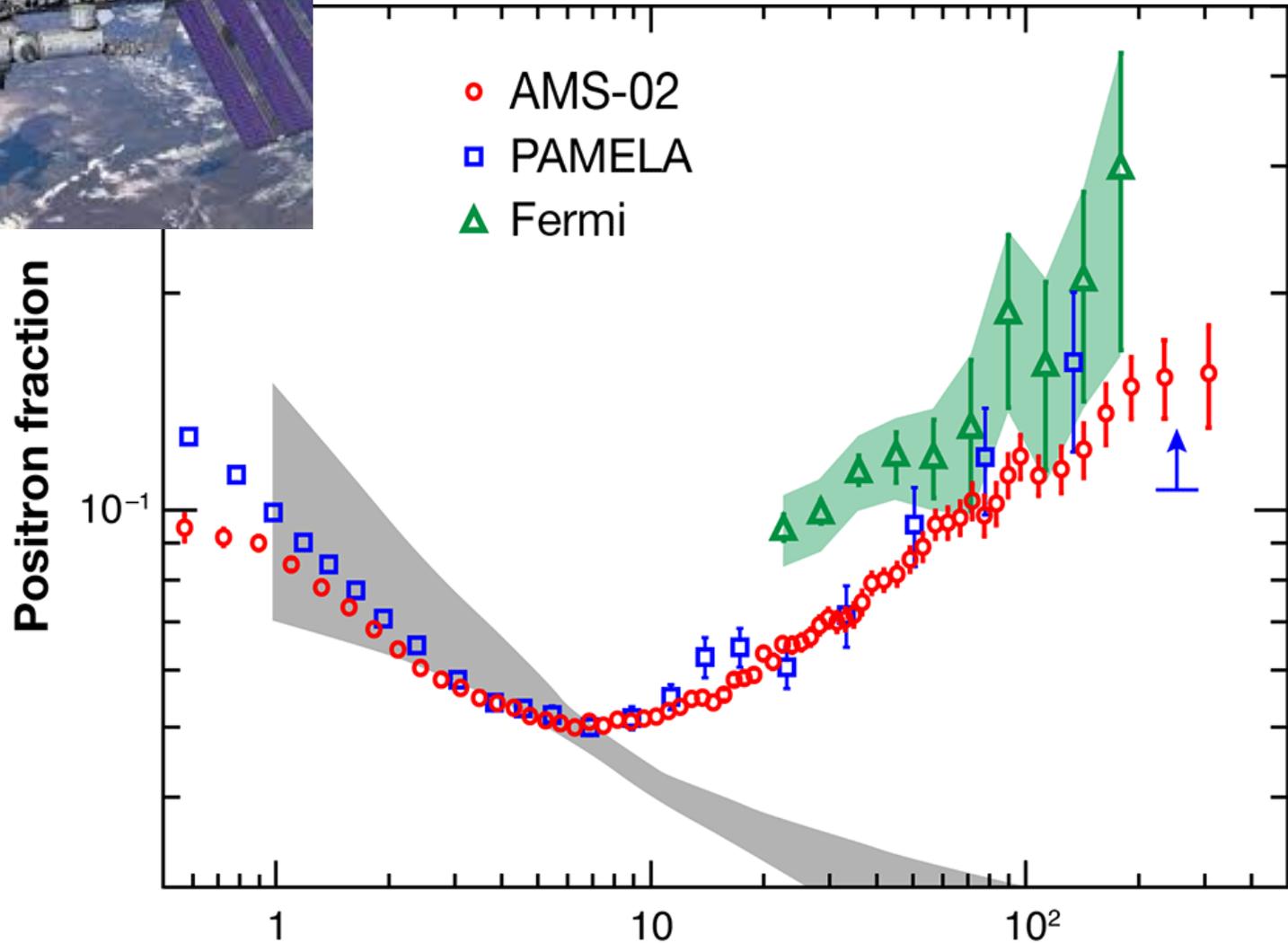
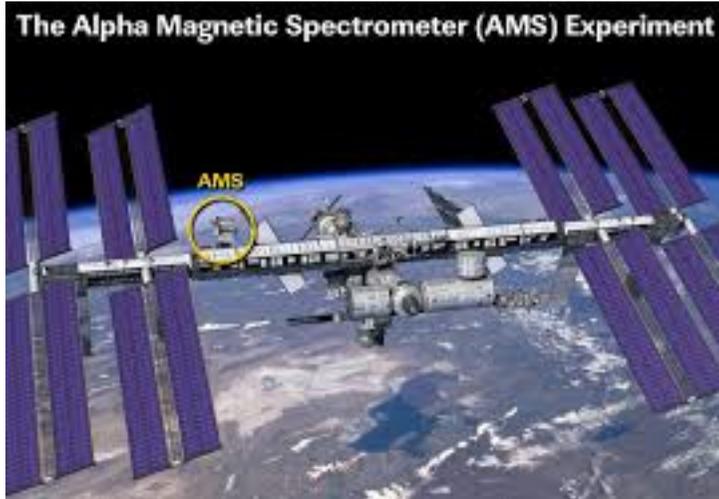


Une maturation d'un siècle...

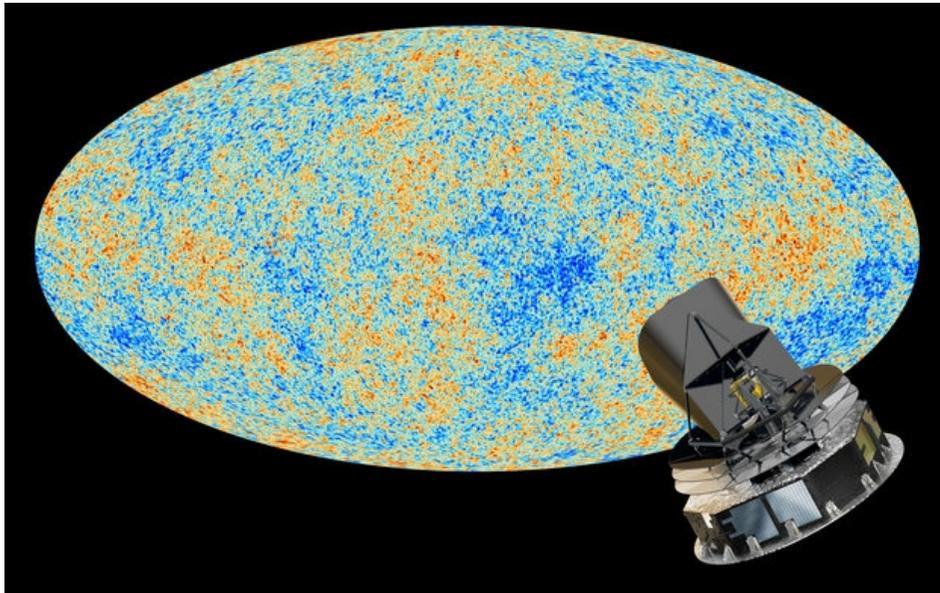
...et bien d'autres



AMS : recherche d'antimatière dans l'espace

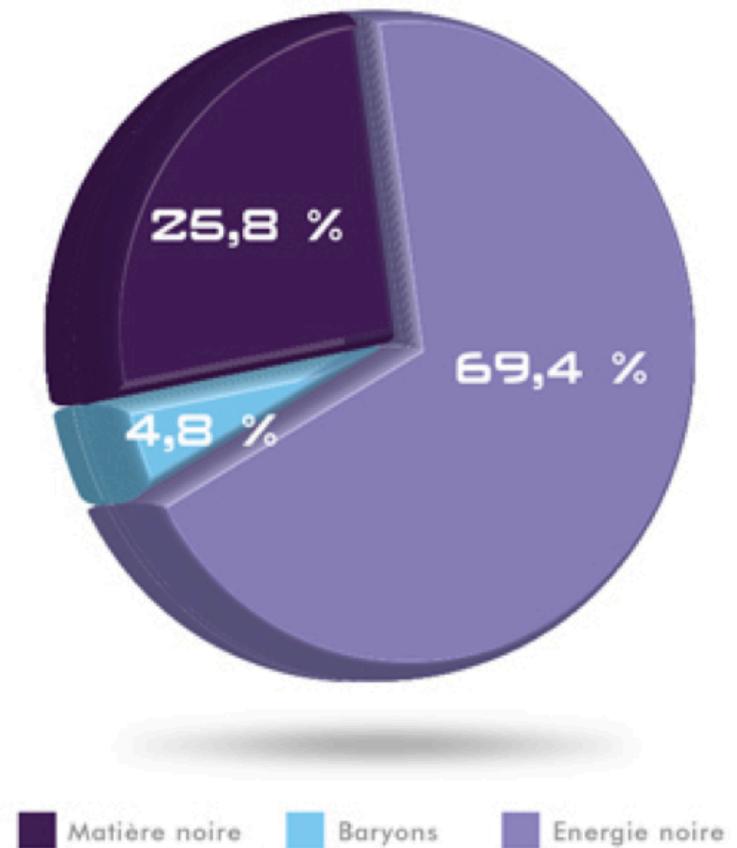


Matière/énergie noire



Satellite Planck : avril 2013

Après Planck



Combien ça coûte ?

- Construction du LHC + 4 expériences:
 - 7 milliards d'euros dépensés sur 15 ans
 - 60% payés par le CERN (22 pays)
 - 40% partagés entre les collaborations (113 pays)
- Soit (rapporté par année):
 - 0.1% de la crise des subprimes (500 milliards en 1 an)
 - 0.5% de la guerre en Irak (600 milliards sur 7 ans)
 - 0.7% de la fraude fiscale en France (60 milliards par an)
 - 2 Charles de Gaulle (3 milliards)
 - 1 seul si on compte les 40 rafales qui vont dessus

L'expérience scientifique la plus onéreuse de l'histoire !

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 Λ
- Il a été élaboré dans les années 1960-70
- Il est basé sur:
 - Mécanique quantique
 - Relativité restreinte $E = mc^2$
 - Symétrie (invariance de jauge)
- Il a été testé 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, dimensions supplémentaires, théorie des cordes...), mais qui doivent être compatibles avec les mêmes résultats expérimentaux



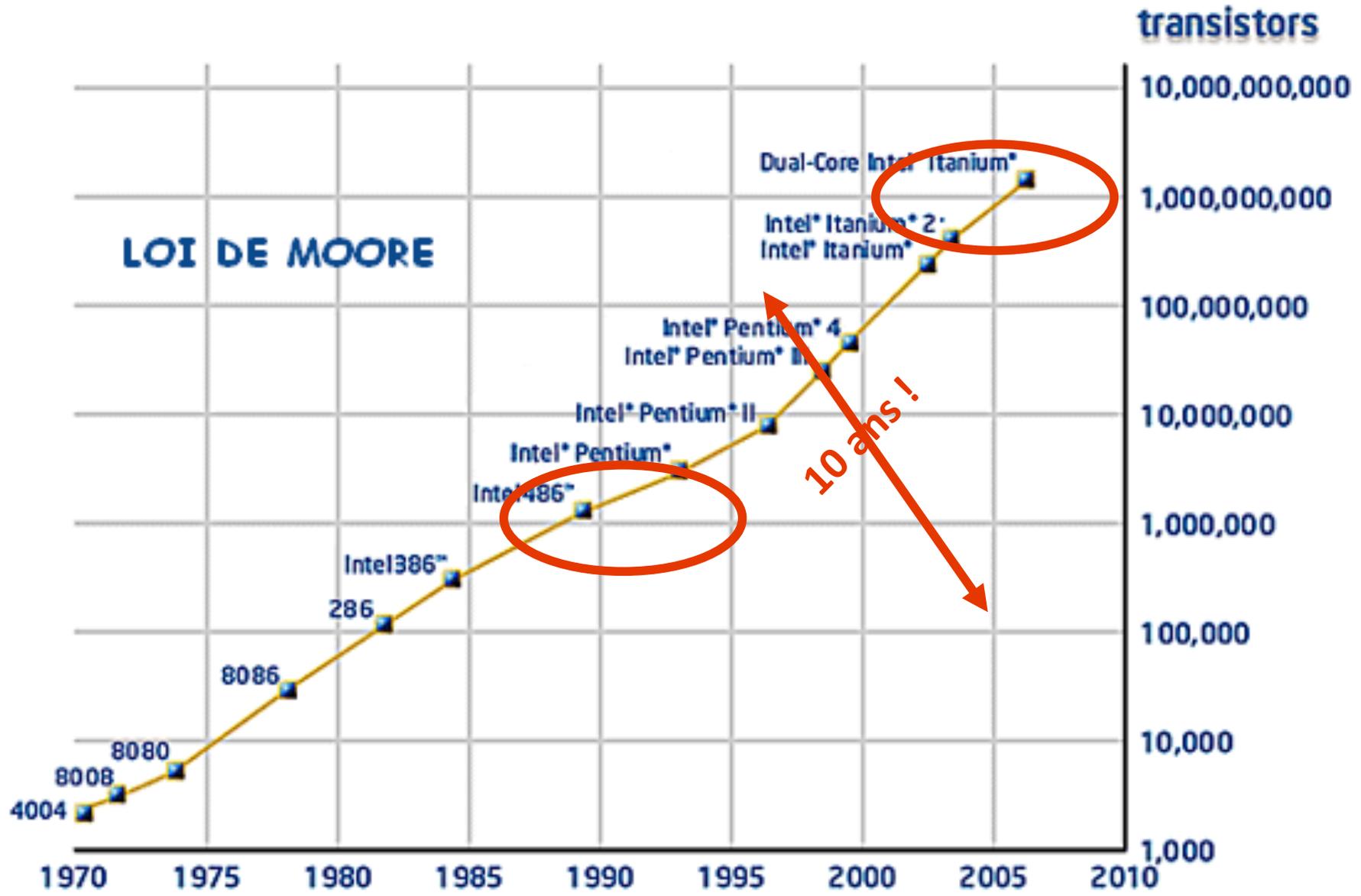
Science GRID



Mise en commun de ressources informatiques à l'échelle planétaire pour traiter les PetaOctets (=millions de GigaOctets) de données

- Aide au développement pour les pays émergents

Pari technologique



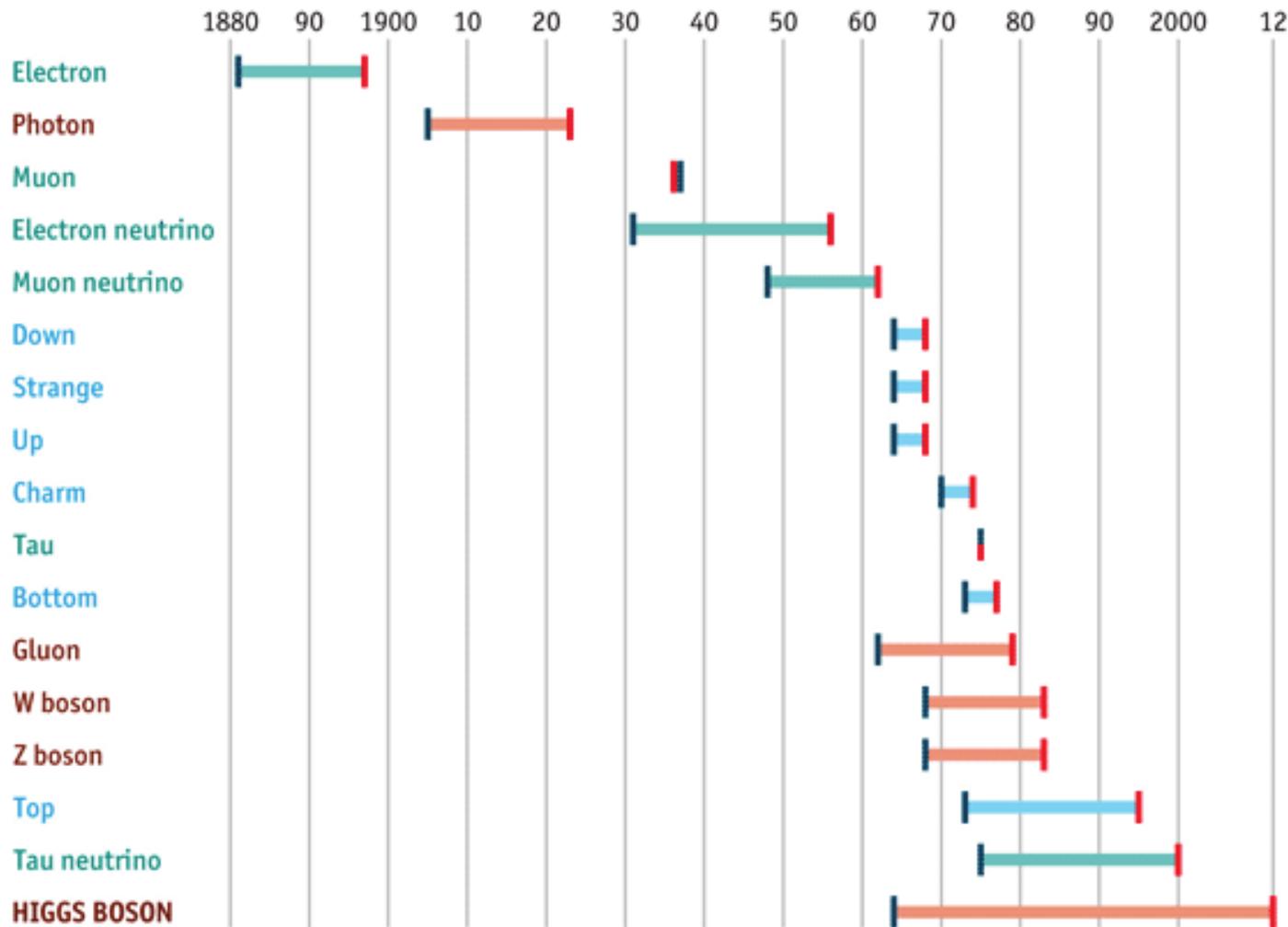
Discovery vs prediction

The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery

Leptons
Bosons
Quarks

Theorised/explained
Discovered



Source: *The Economist*

Une analogie

Mécanisme de Brout-Englert-Higgs



Boson de Higgs





ATLAS EXPERIMENT

Candidat

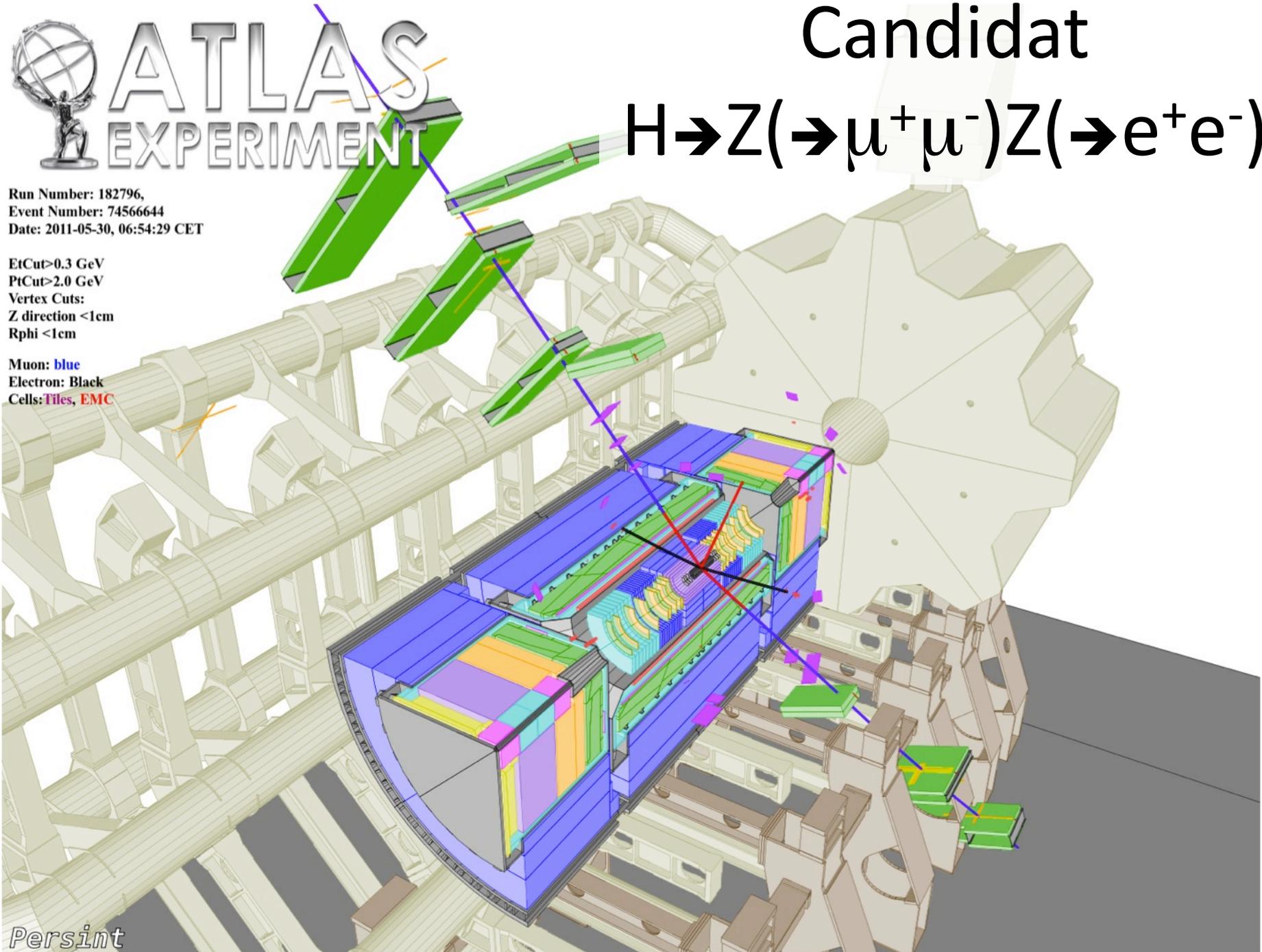
$H \rightarrow Z(\rightarrow \mu^+ \mu^-) Z(\rightarrow e^+ e^-)$

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

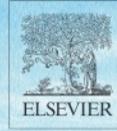
Persint



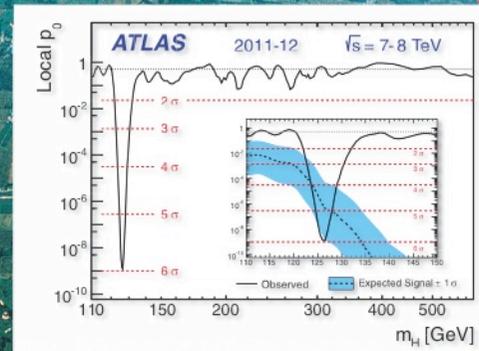
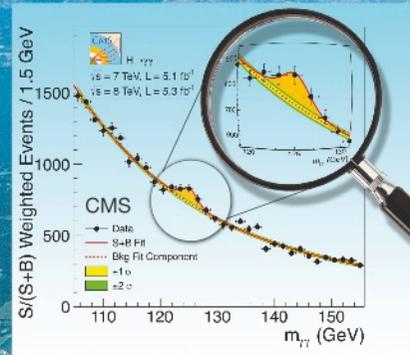
Il est probable que la particule observée soit le boson de Higgs:

- 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,
 - nouvelle confirmation printemps 2013

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



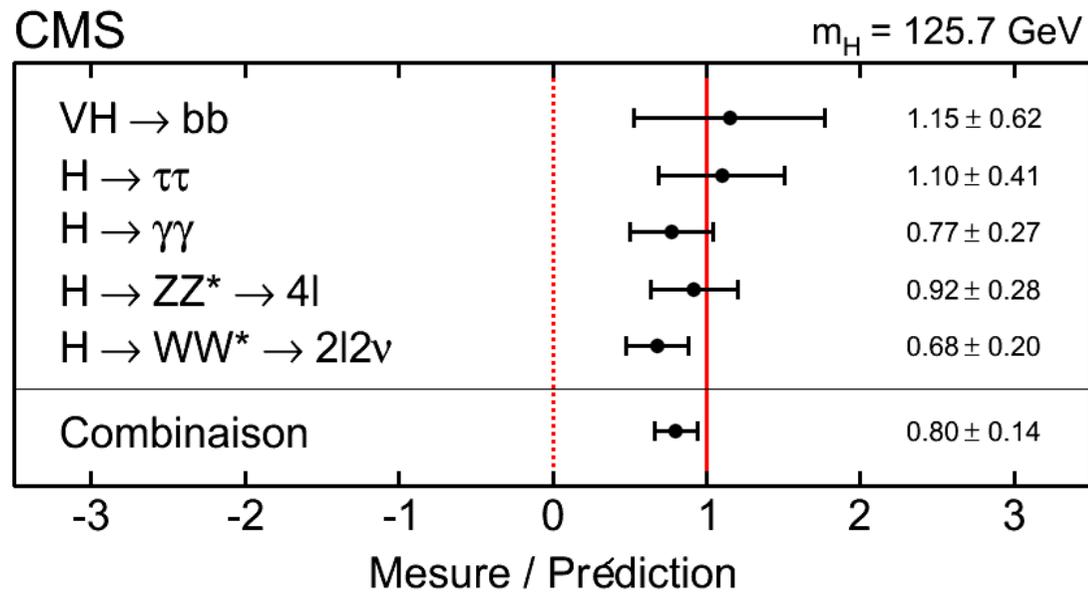
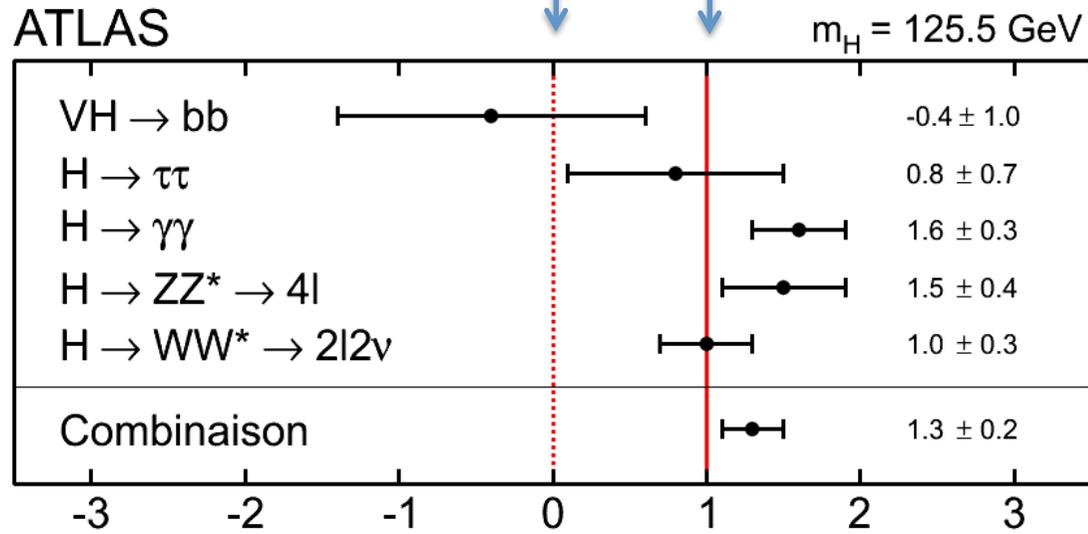
First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



www.elsevier.com/locate/physletb

Pas vu! Vu!

Situation
expérimentale
au printemps 2013



Signal rapporté aux
prédictions du
modèle standard