

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

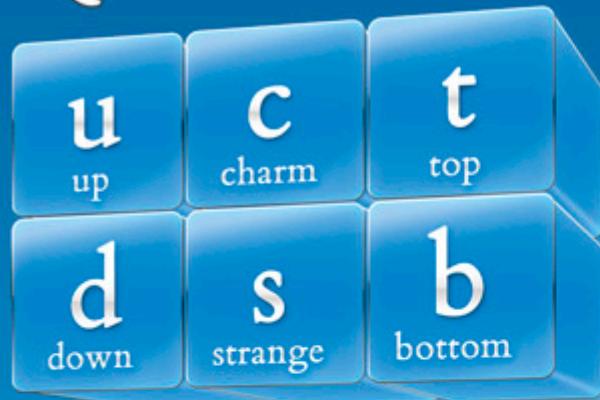
**David Rousseau
LAL-Orsay, CNRS/IN2P3**

rousseau@lal.in2p3.fr

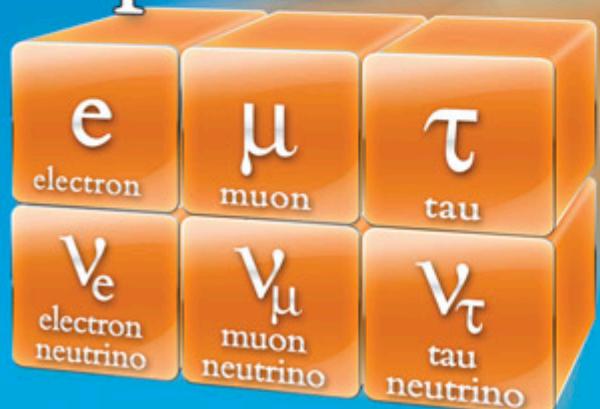
Remerciements à : Nicolas Arnaud, Sandro de Cecco, Laurent Chevalier, Johann Collot, Laurent Duflot, Daniel Fournier, Gautier Hamel de Monchenault, Marumi Kado, Fabienne Ledroit, Jessica Lévêque, Nikola Makovec, Françoise Maréchal, Pierre Matricon, Frédéric Rousseau, Estelle Scifo, François Vazeille,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

La Matière: les FERMIONS

Quarks

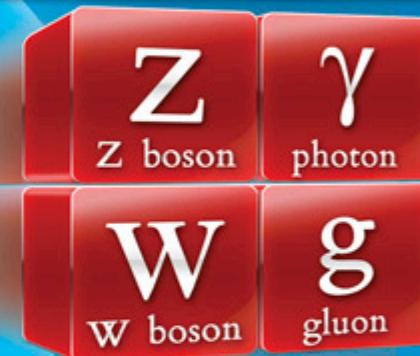


Leptons



Modèle Standard
des particules

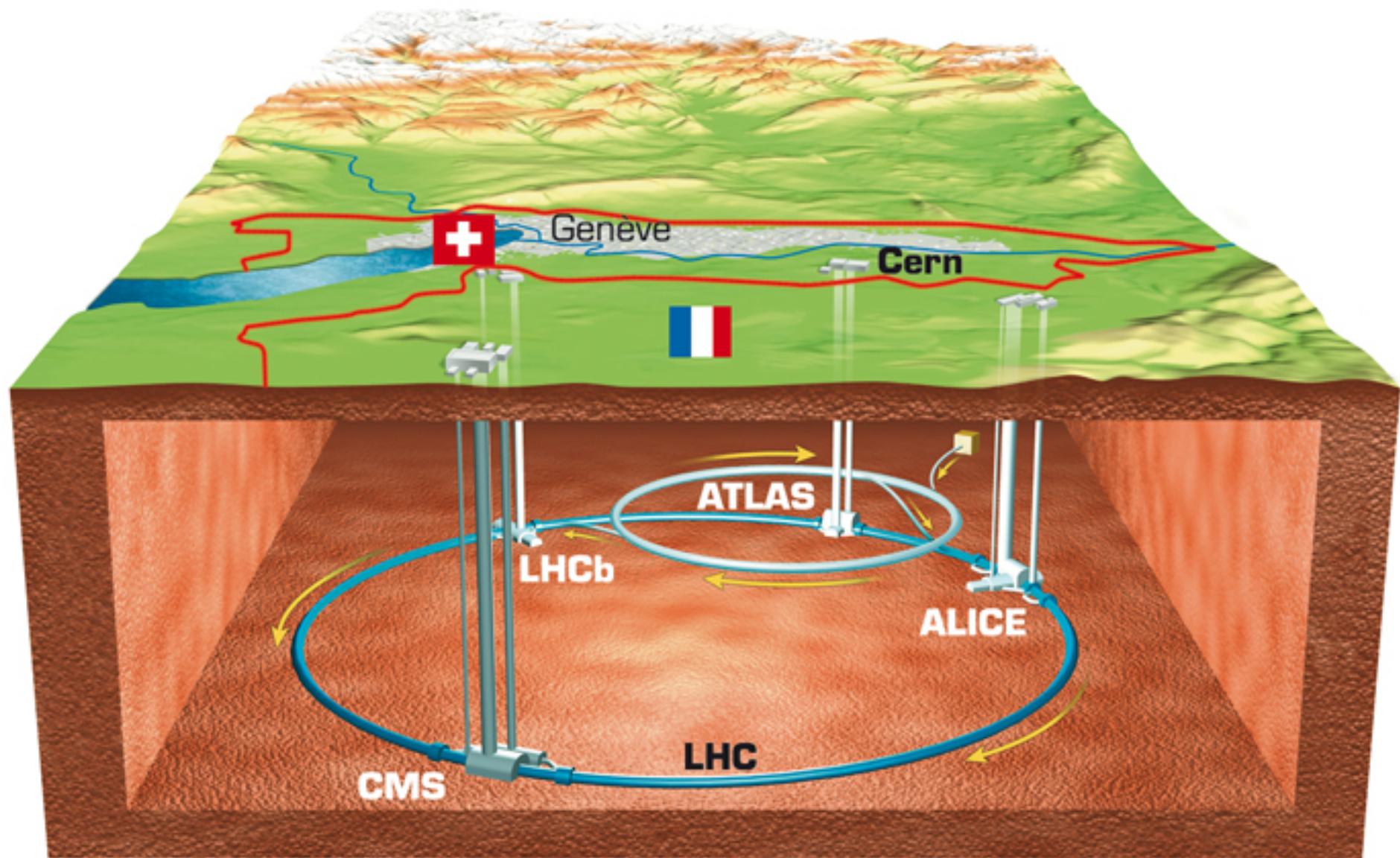
Les Forces: les BOSONS



+Antiparticules

VOIR les particules ?

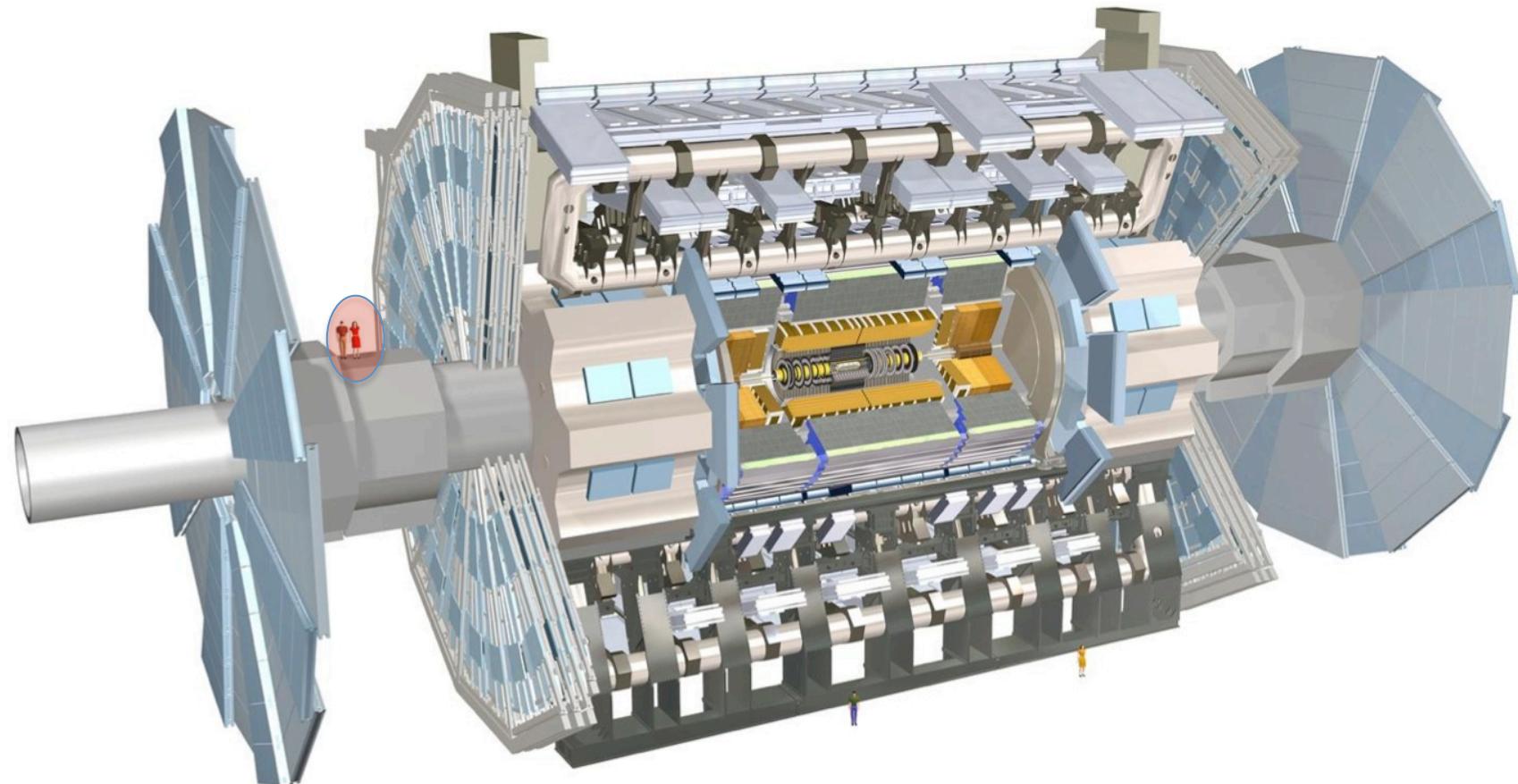
Le LHC



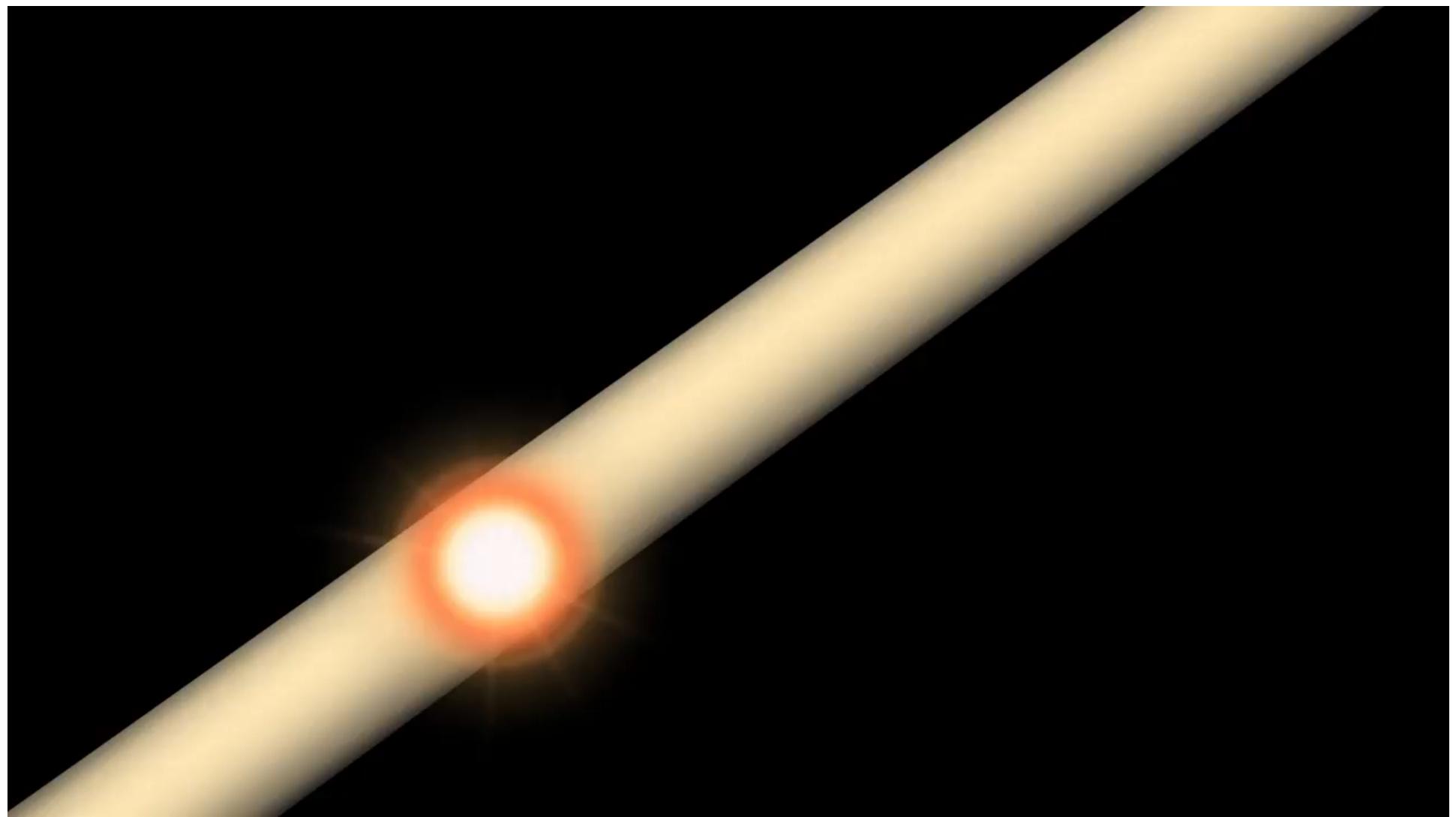
Le détecteur Atlas

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

3000 km de câbles
100 millions de canaux



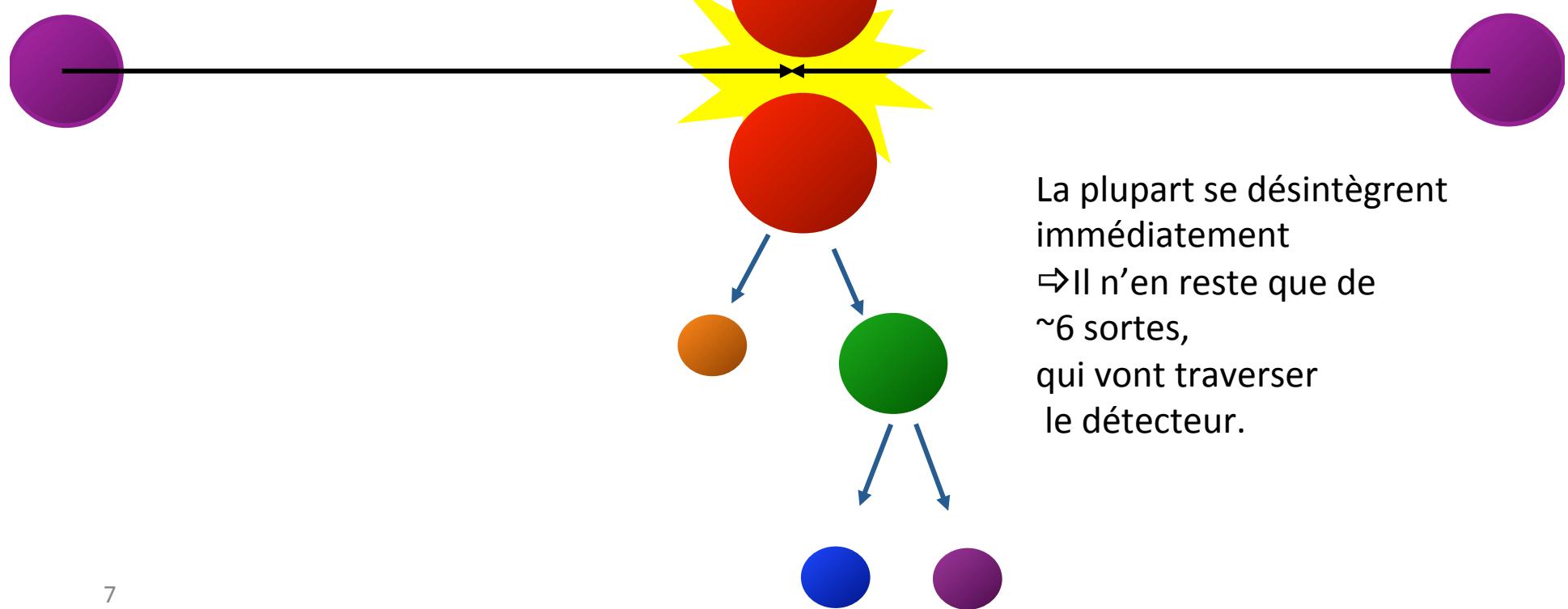
LD, booster





Collision de protons

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



Conversion de l'énergie cinétique en masse.

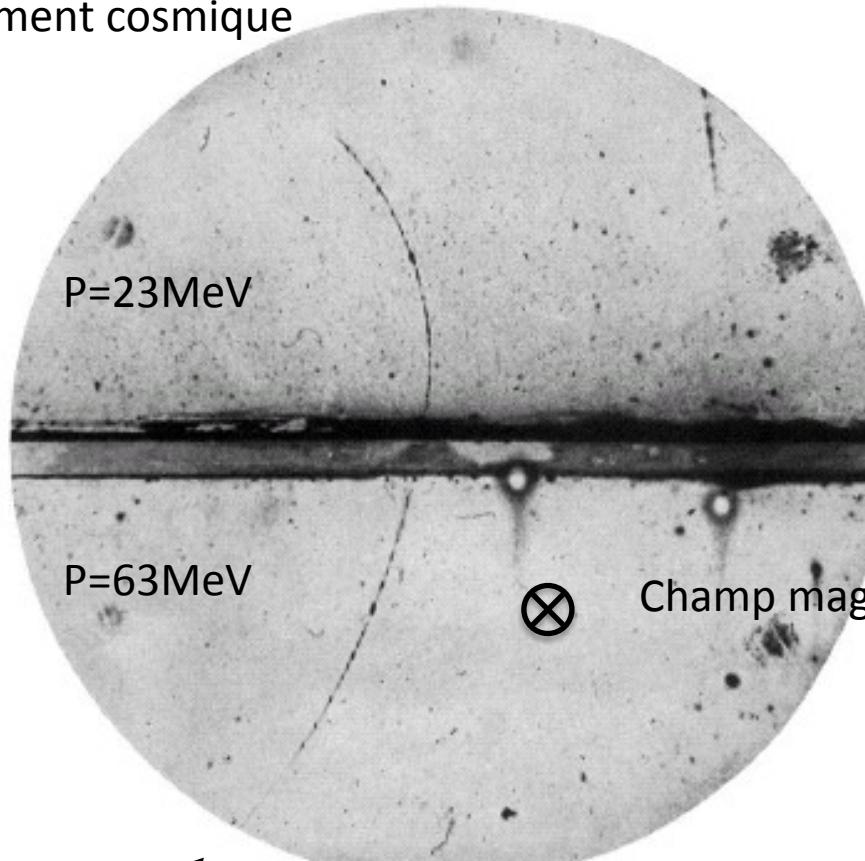
Création de nouvelles particules, d'une centaine de sortes

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)
(en joignant les équations de la mécanique quantique et de la relativité restreinte, Dirac a vu apparaître comme solutions des électrons d'énergie négative)



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



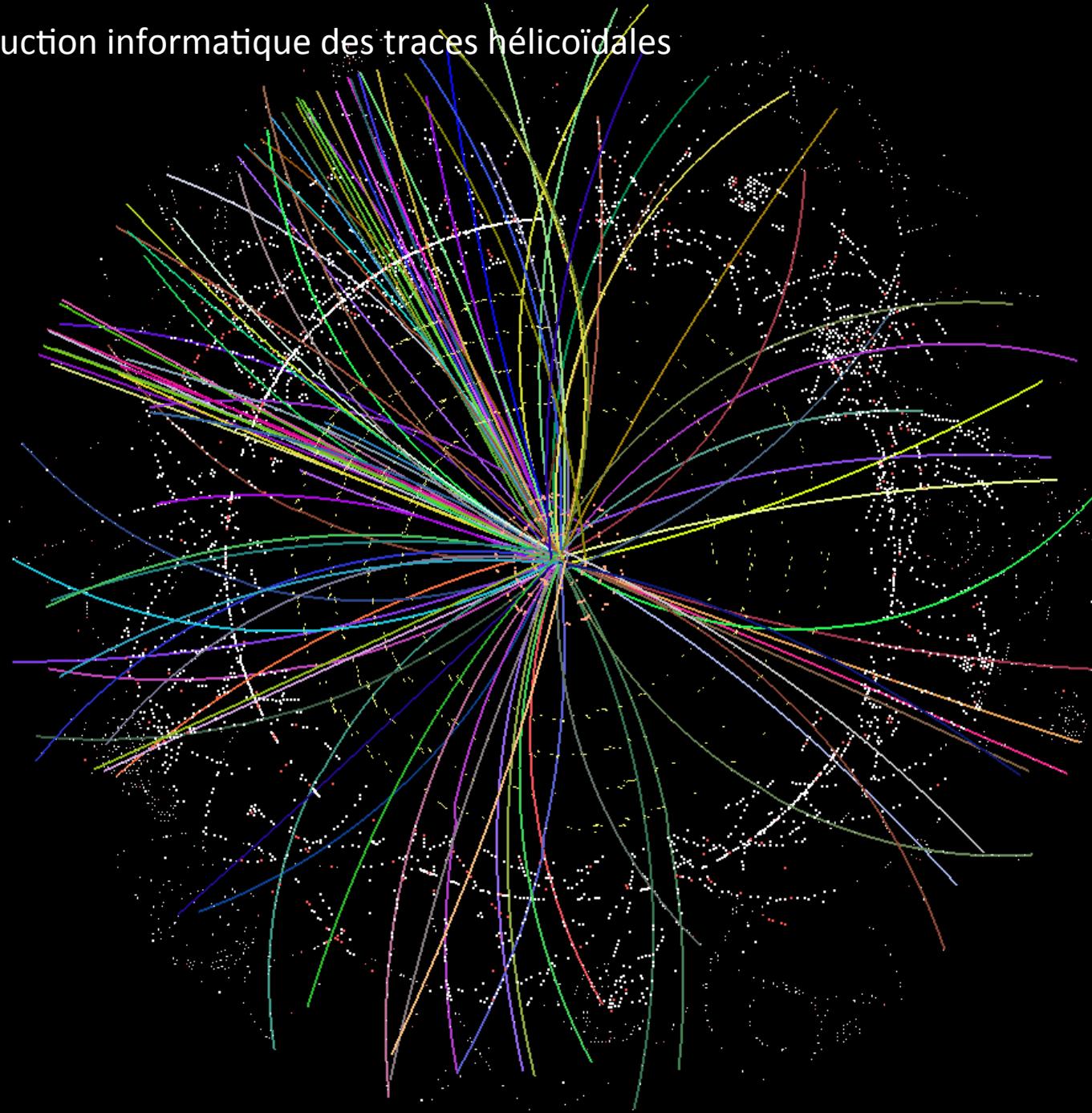
Nobel 1936

Plaque de plomb

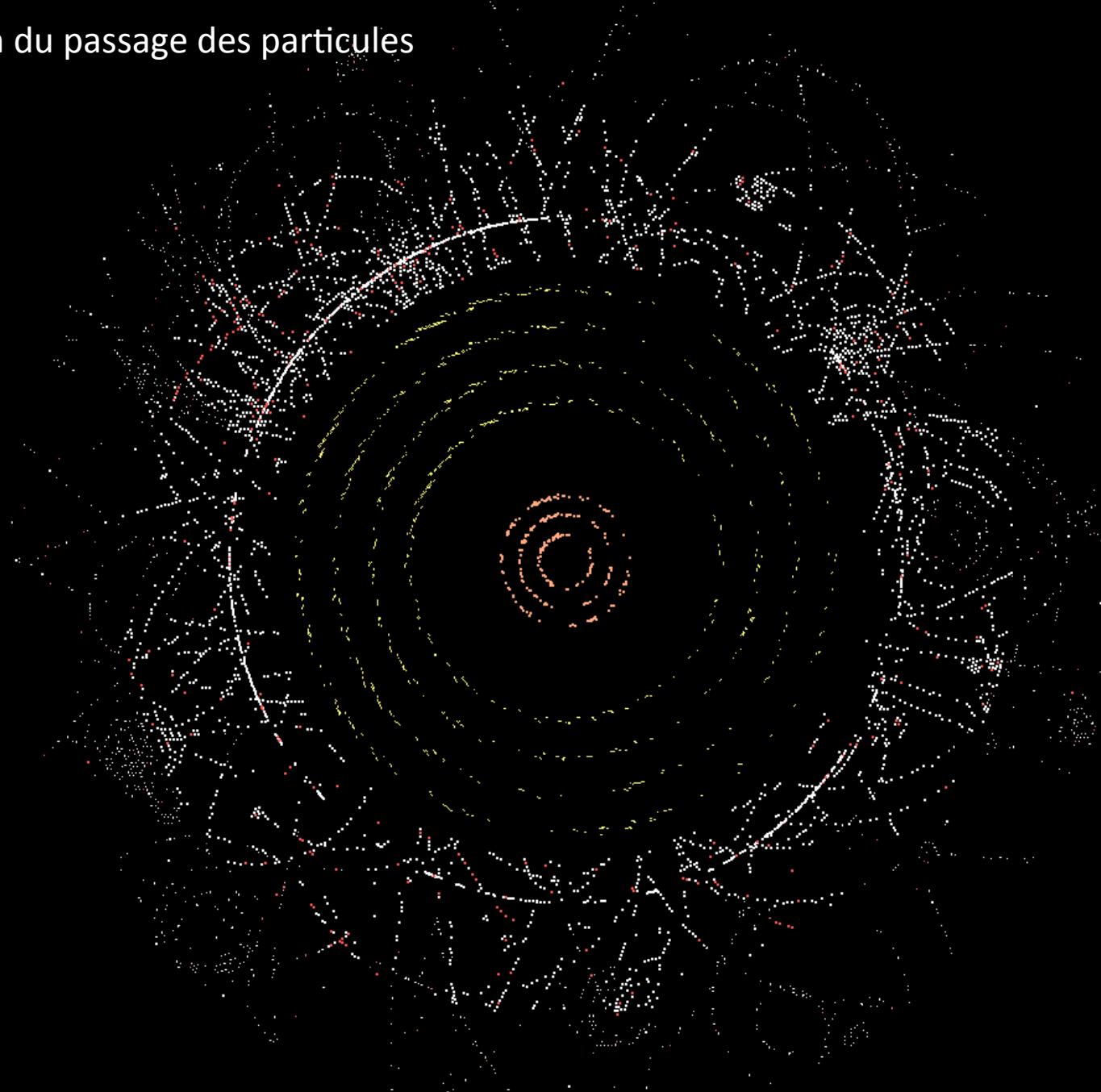
⊗ Champ magnétique

FIG. 1. A 63 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 ($H_P = 7.5 \times 10^5$ 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

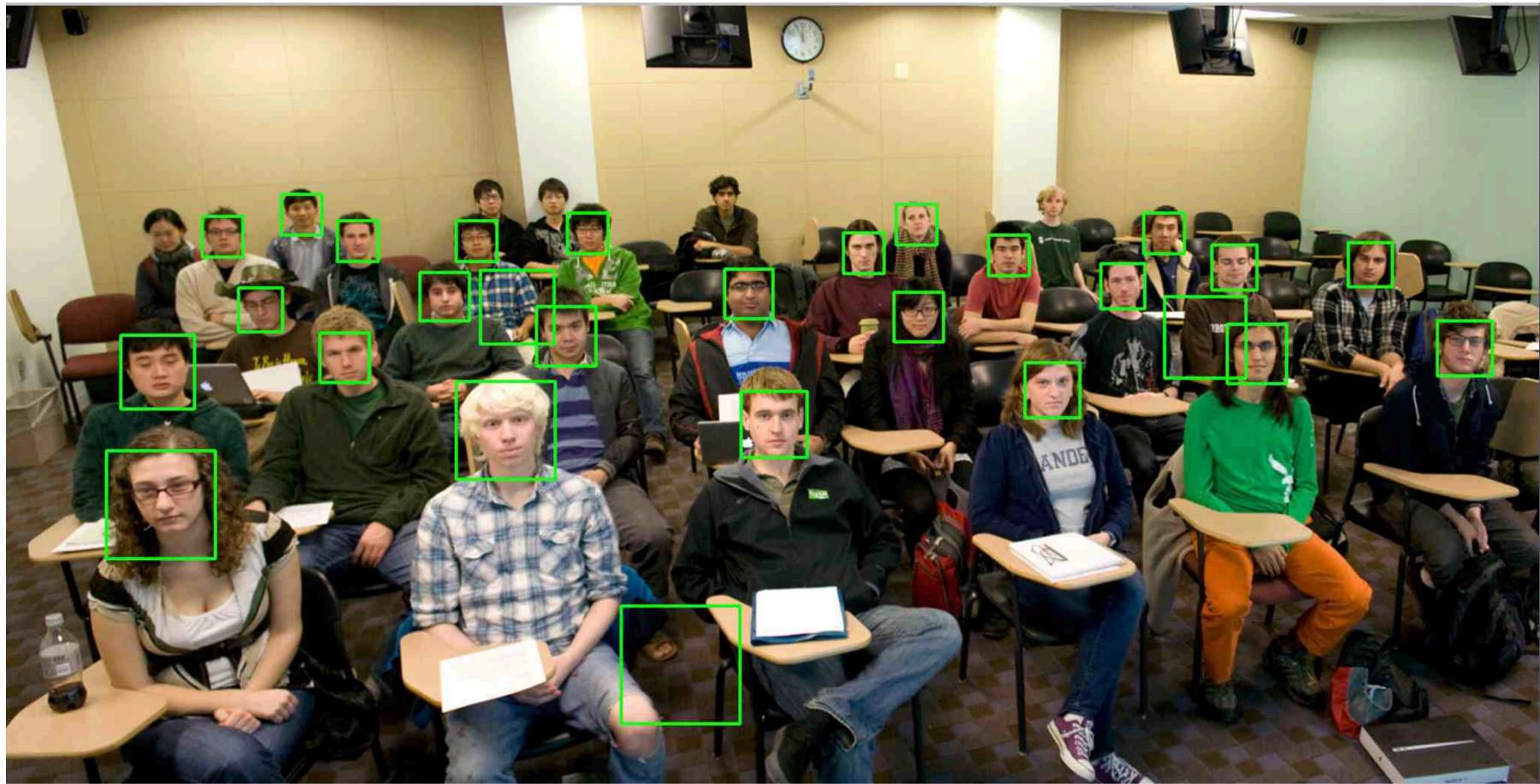


Détection du passage des particules



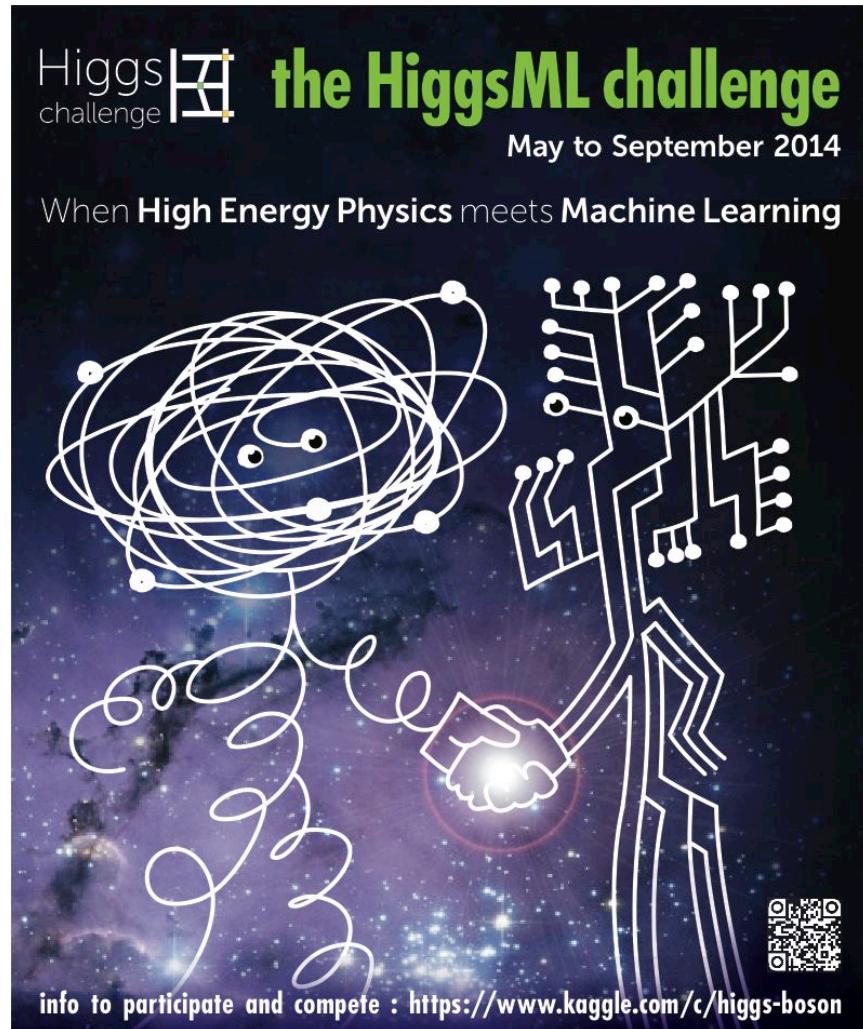
The inverse problem....





→ introduction récente d'algorithmes (cf FB) d'Intelligence Artificielle

Higgs Machine Learning challenge



Idée : simplifier une analyse Higgs, poster les données simulées sur le web, demander aux spécialistes de « Machine Learning » de l'améliorer

Machine Learning =
apprentissage
automatique=intelligence
artificielle, discipline de la
science des données



Completed • \$13,000 • 1,785 teams

Higgs Boson Machine Learning Challenge

Mon 12 May 2014 – Mon 15 Sep 2014 (34 days ago)

Dashboard

Private Leaderboard - Higgs Boson Ma

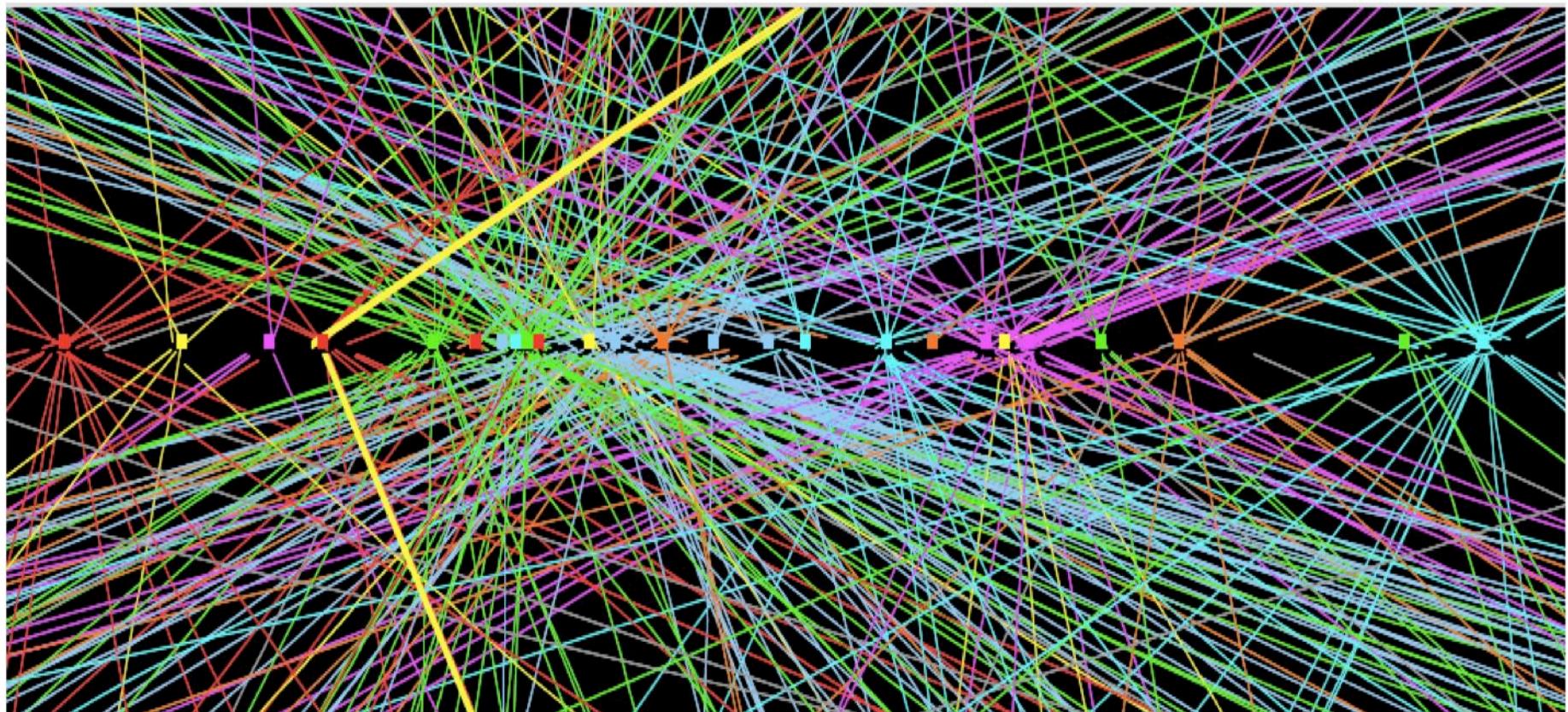
This competition has completed. This leaderboard reflects the final standings.

| # | Δ1w | Team Name | model uploaded | * in the money | Score |
|----|-----|-------------------------------------|----------------|----------------|---------|
| 1 | ↑4 | Gábor Melis ‡ * | | 7000\$ | 3.80581 |
| 2 | ↓1 | Tim Salimans ‡ * | | 4000\$ | 3.78913 |
| 3 | — | nhlx5haze ‡ * | | 2000\$ | 3.78682 |
| 4 | ↑55 | ChoKo Team | | | 3.77526 |
| 5 | ↑23 | cheng chen | | | 3.77384 |
| 6 | ↓2 | quantify | | | 3.77086 |
| 7 | ↑73 | Stanislav Semenov & Co (HSE Yandex) | | | 3.76211 |
| 8 | ↓1 | Luboš Motl's team | | | 3.76050 |
| 9 | ↓1 | Roberto-UCIIM | | | 3.75864 |
| 10 | ↑5 | Davut & Josef | | | 3.75838 |

991 TMVA (CERN standard)

- ~20% amélioration!
- Est-ce utilisable « en vrai » pour une analyse réelle ?
- Méthodologie ?
- Logiciels ?
- On verra dans un an ou deux

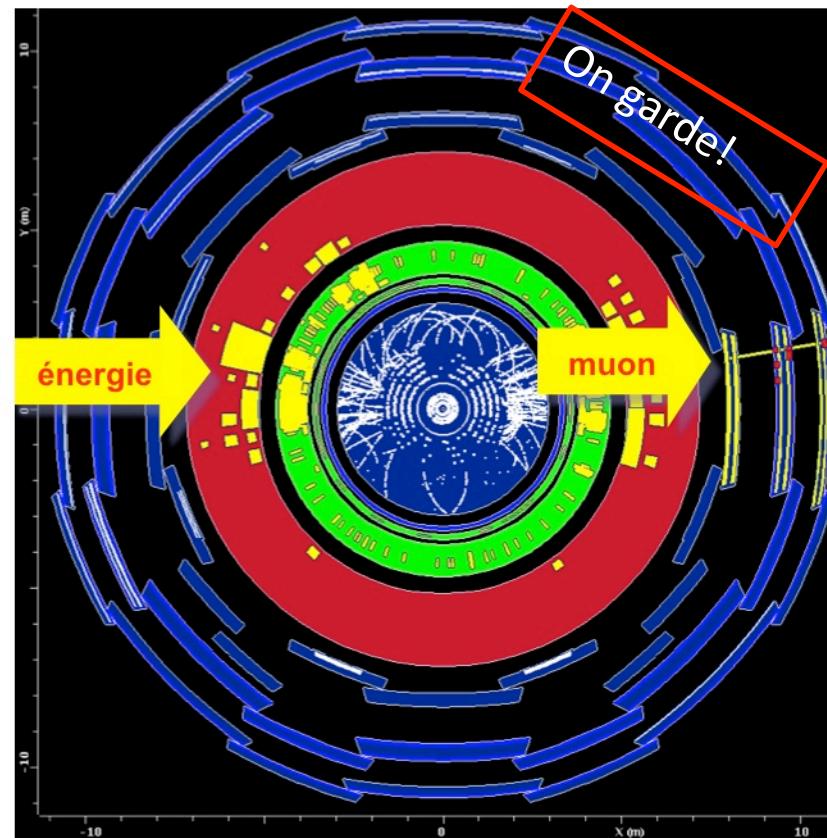
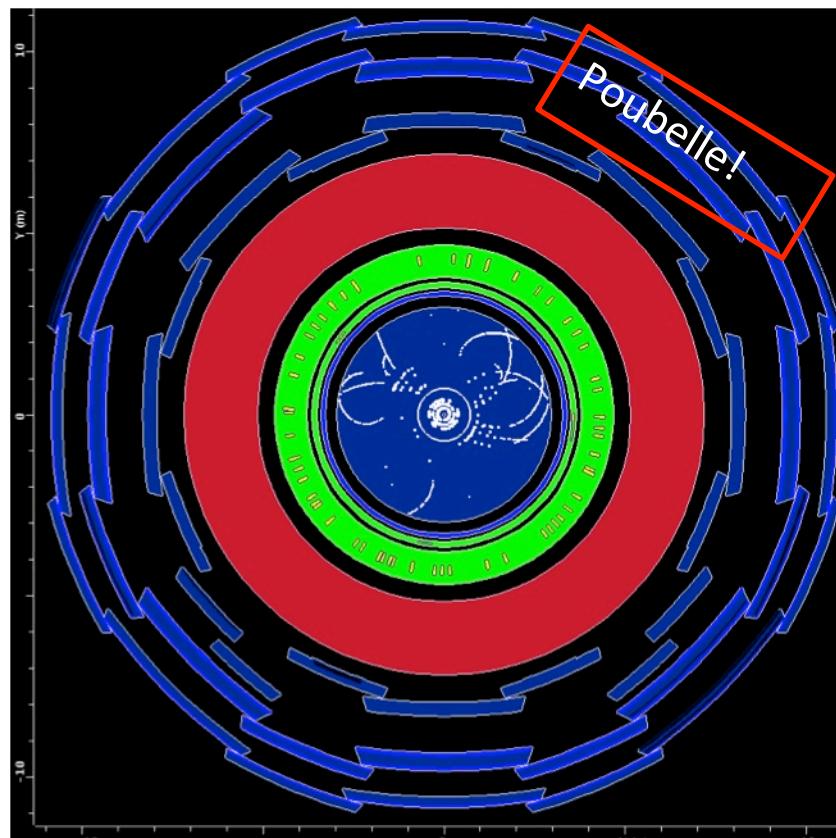
Un événement

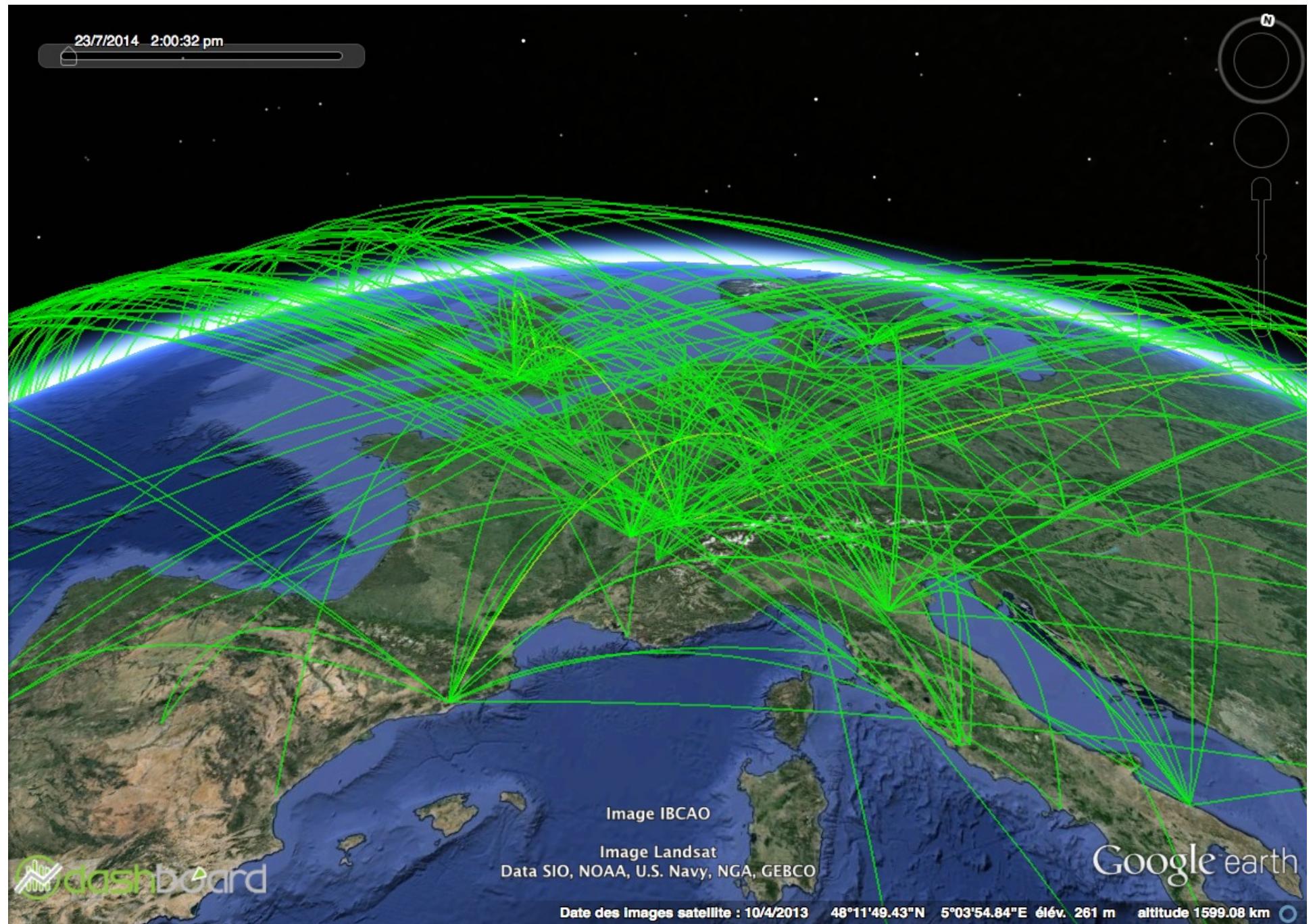


La précision obtenue permet de distinguer les traces
venant de la collision intéressante de la 20aine de collision parasites
au court de la collision des mêmes paquets de protons

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 μ s-1s sur des *signatures*





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 désintégrant 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%

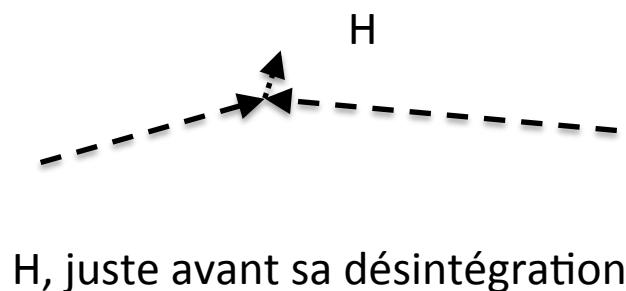
$$E=mc^2$$



Einstein en 1905

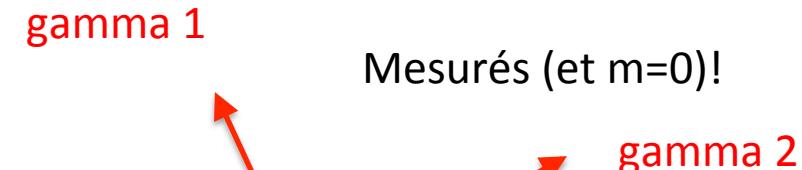
En fait, la formule complète est $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
p est l'impulsion, mv en mécanique classique
En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c:

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



H, juste avant sa désintégration

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



Juste après sa désintégration



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

⇒ on en déduit
 m_H !

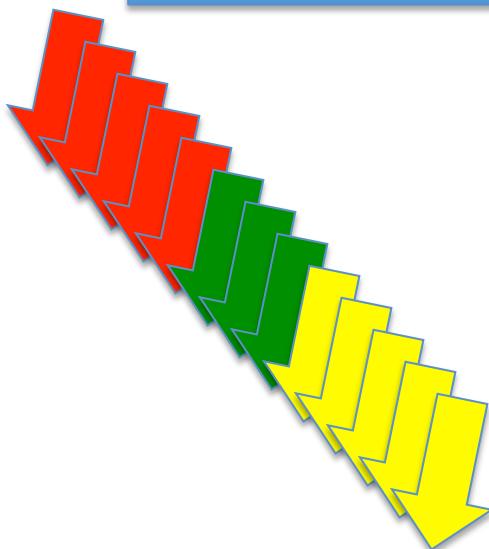
10^{14} collisions

Finalement...



Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque

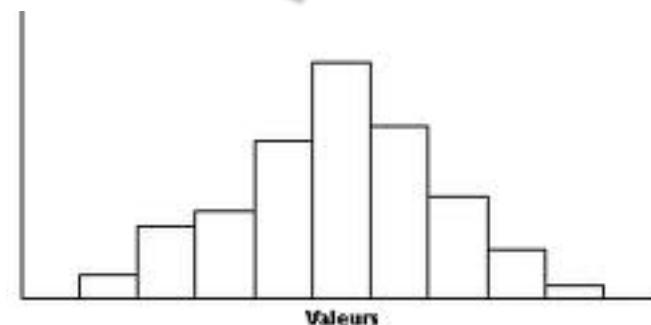


Tri précis

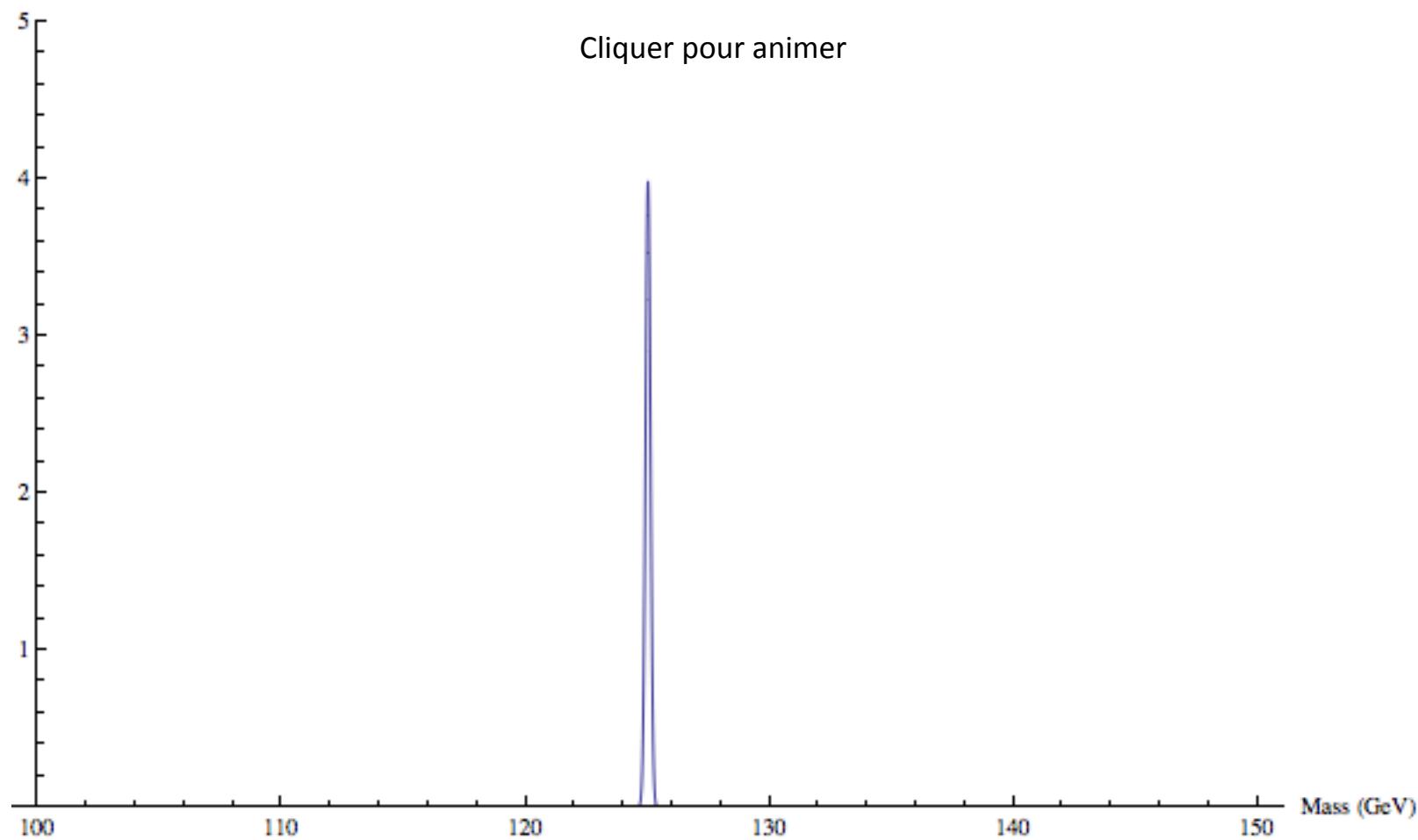
10^5 événements à 2 gamma



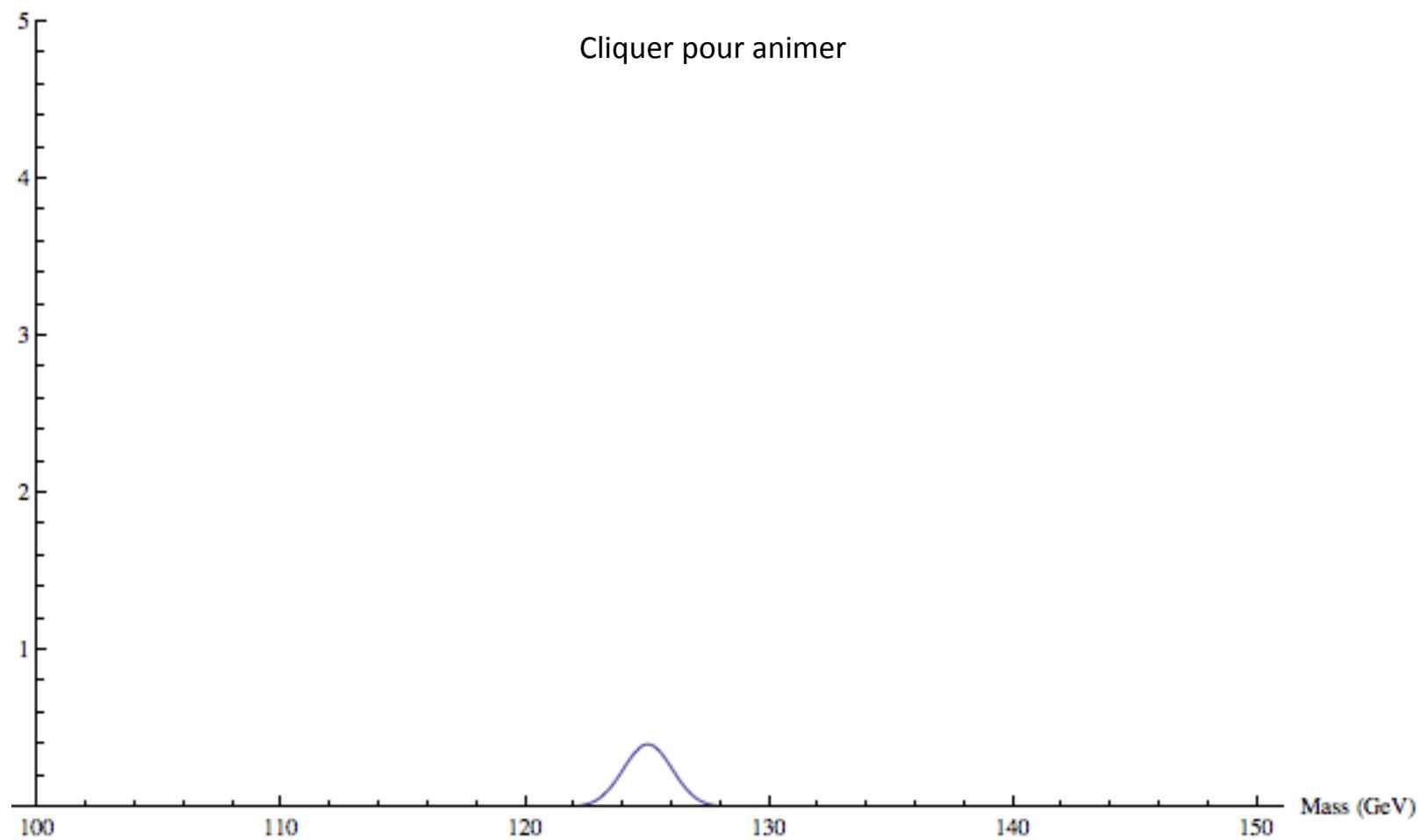
Calcul de la masse
→histogramme



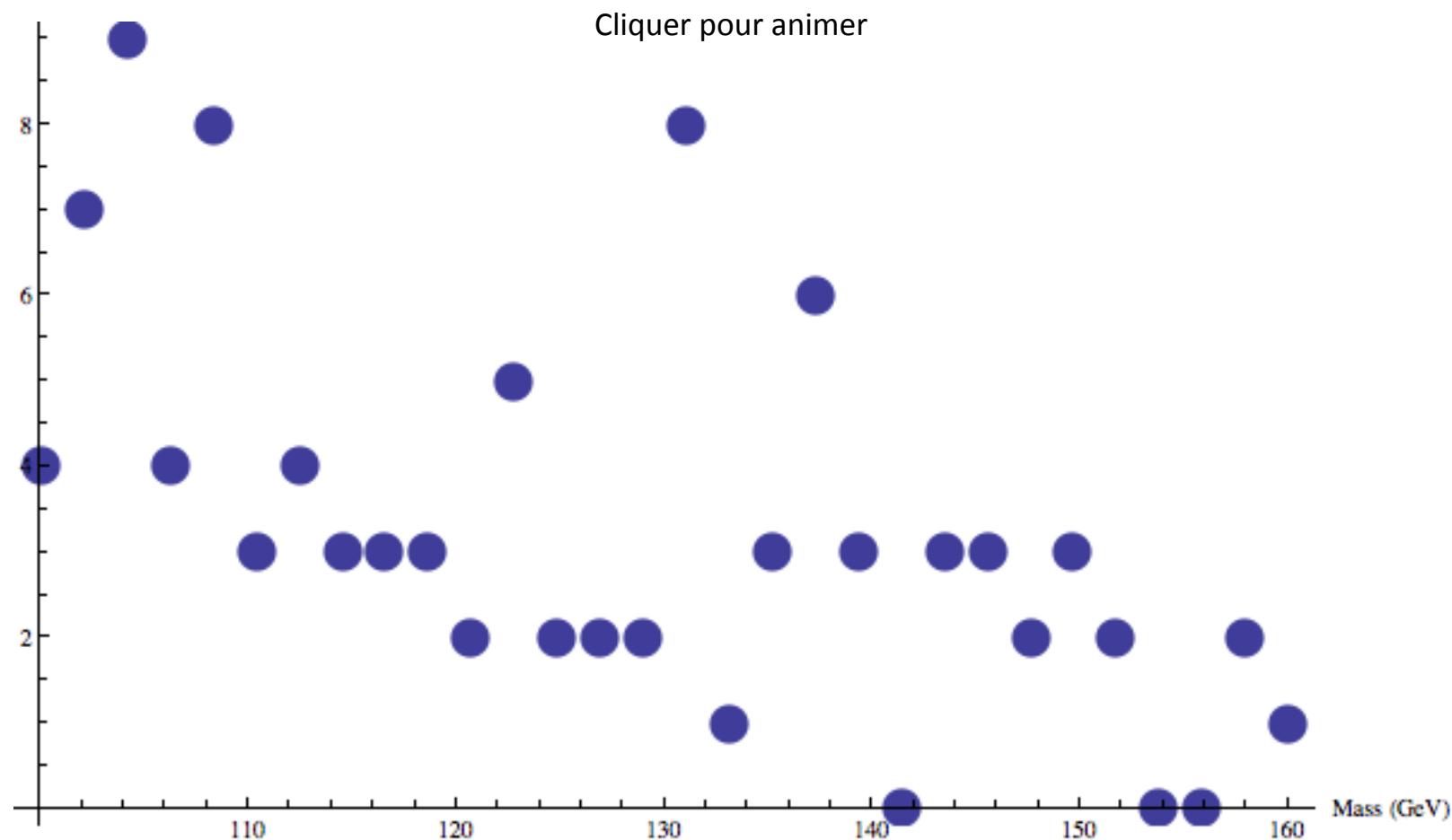
Effet de la précision du détecteur



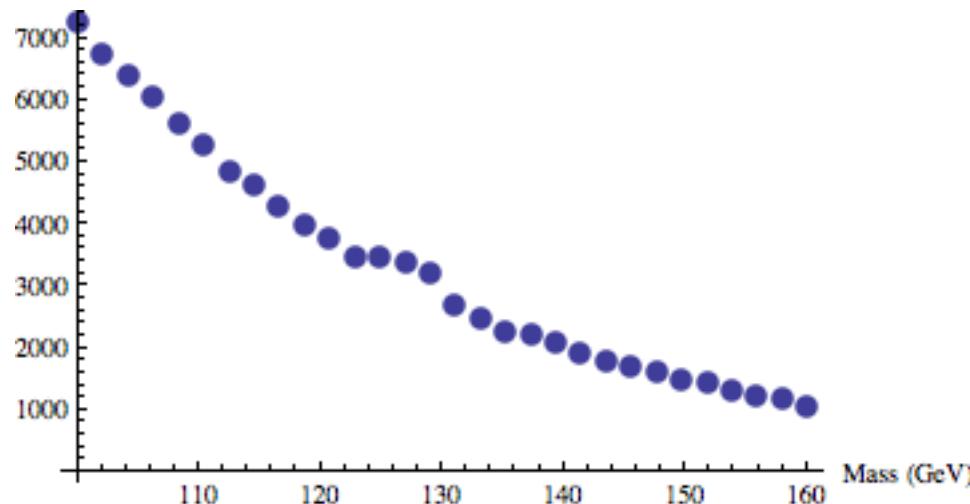
Effet du bruit de fond



Effet de la statistique



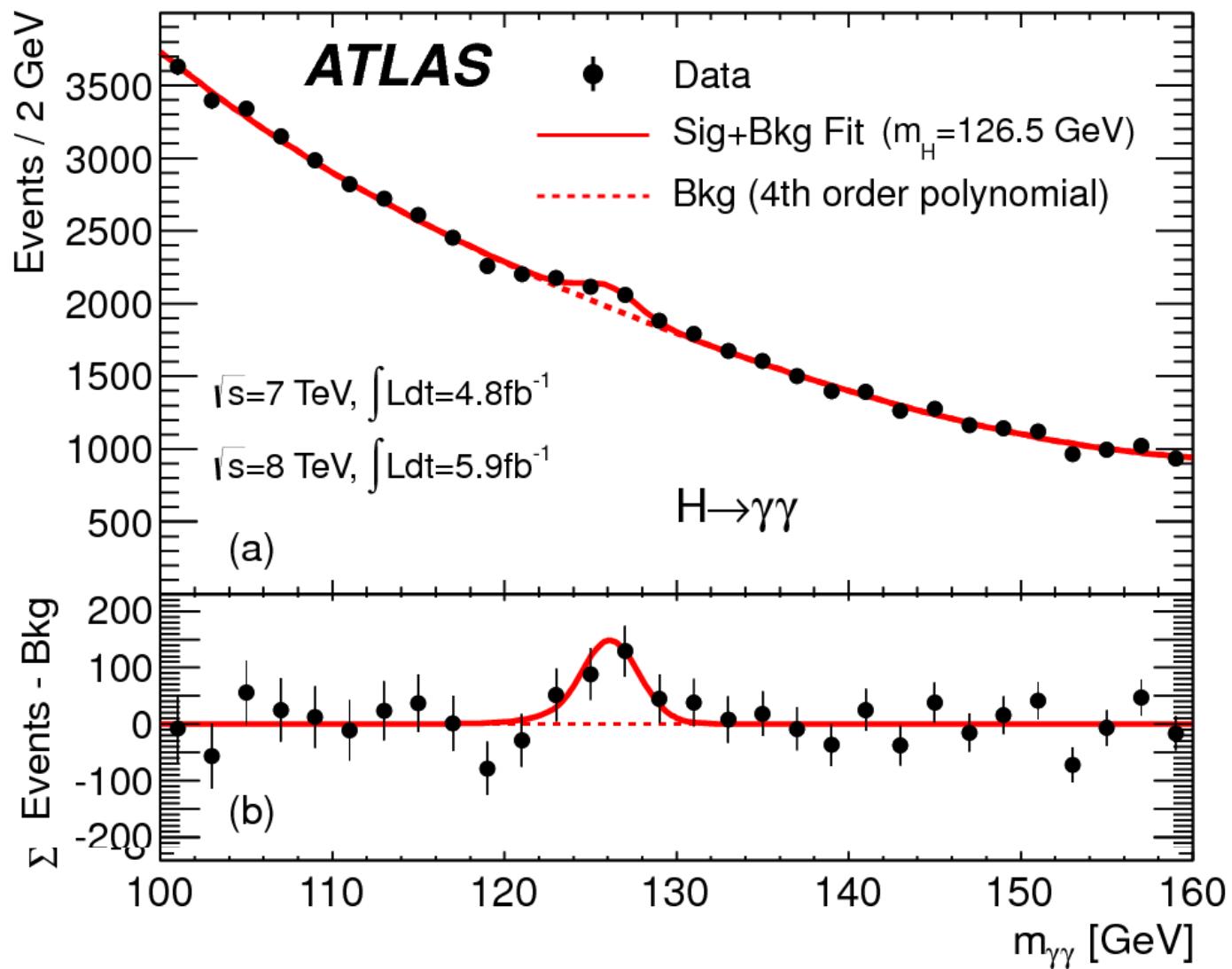
Jobs du physicien



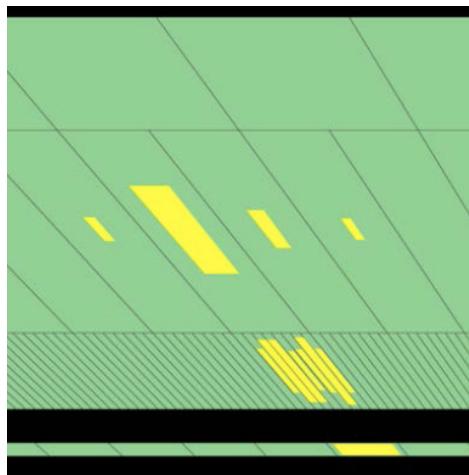
- Augmenter la taille du pic
- Réduire sa largeur
- Réduire le fond
- Evaluer les incertitudes (le plus difficile!)

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

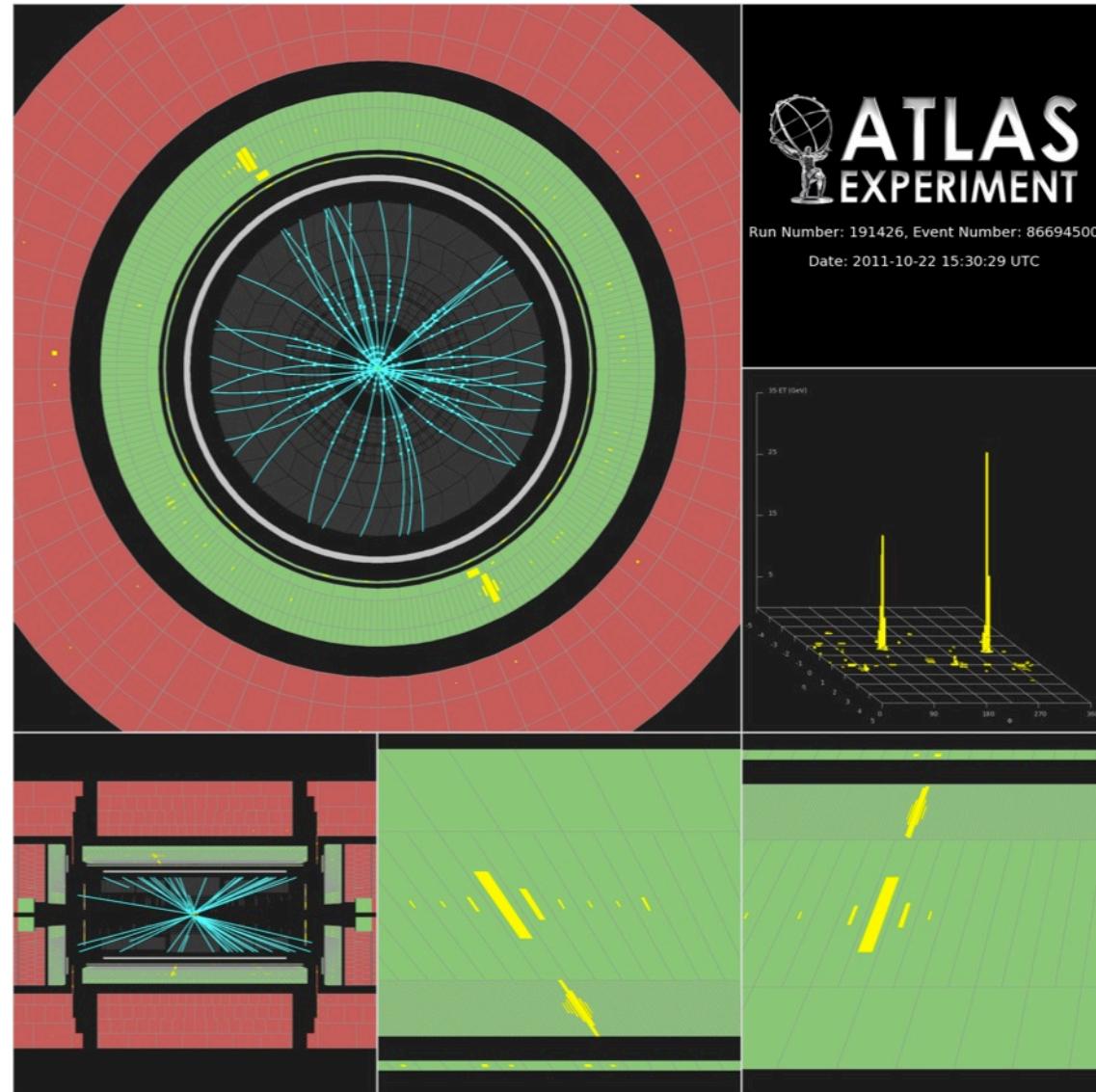
Et maintenant « en vrai » (Juillet 2012)



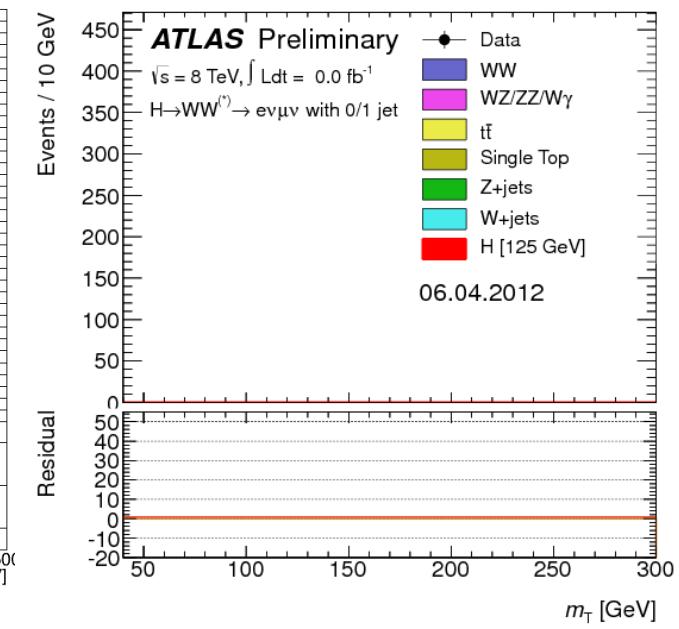
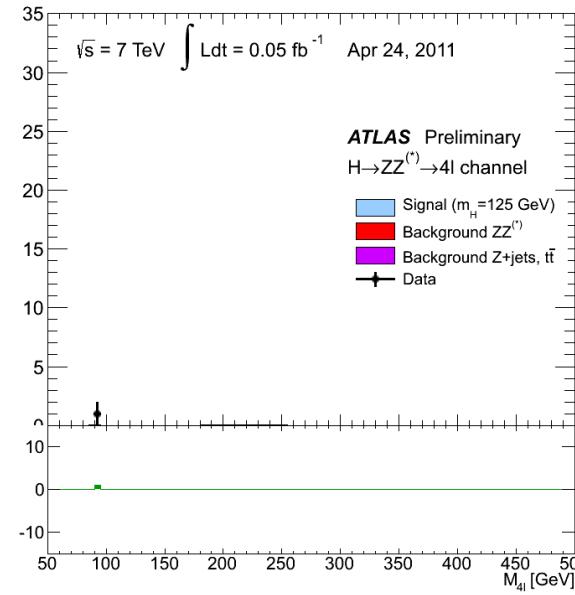
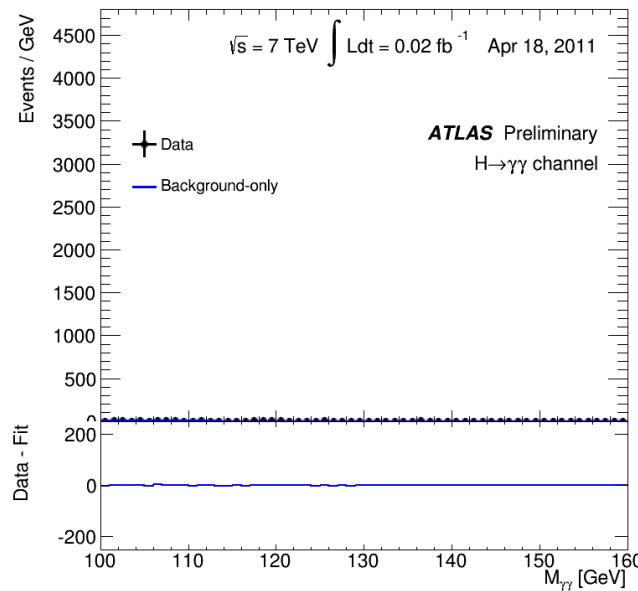
Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



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 essaye d'évaluer la probabilité $P(H|E)$ (=probabilité que le boson de Higgs existe étant donnés les résultats de notre Expérience)
- Si cette probabilité est meilleure que 5 écarts standards, on peut, « légitimement » parler de découverte .

- 5 écarts standards :

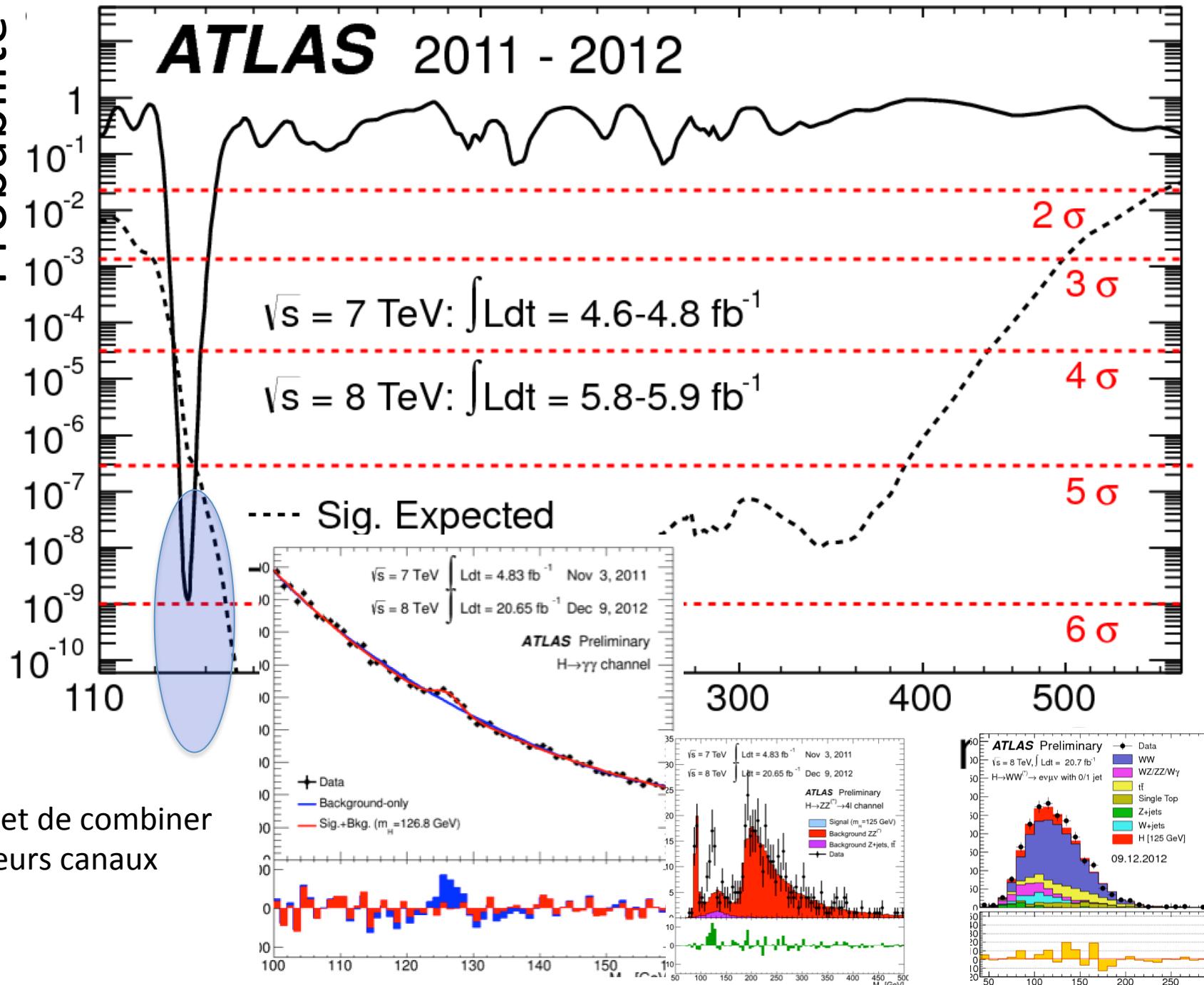
- loi de Gauss: probabilité $\sim 3 \cdot 10^{-7}$, une chance sur 3 millions,
- ou bien \sim la probabilité de tirer les quatre as d'un jeu de 52 cartes, dans l'ordre



Un peu plus de proba

- On voudrait calculer $P(H|E)$ (=probabilité que le boson de Higgs existe étant donnés les résultats de notre Expérience)
- $P(H|E) P(E) = P(H \& E)$ (théorème de bayes)
- $\rightarrow P(H|E) = 1/(1+P(E|non H)*P(non H)/P(E|H)*P(H))$: ça devrait marcher
- Problème : $P(H)$: probabilité *a priori* (avant l'expérience) que le boson de Higgs existe est arbitraire et subjective!
- \rightarrow après beaucoup de discussions on est tombé d'accord pour calculer $P(E| non H)/P(E|H(m))$ (lemme de Neyman Pearson)
- \rightarrow probabilité pour que l'expérience donne ce que l'on voit en l'absence de boson de Higgs, divisé par cette probabilité en présence d'un boson de Higgs de masse m

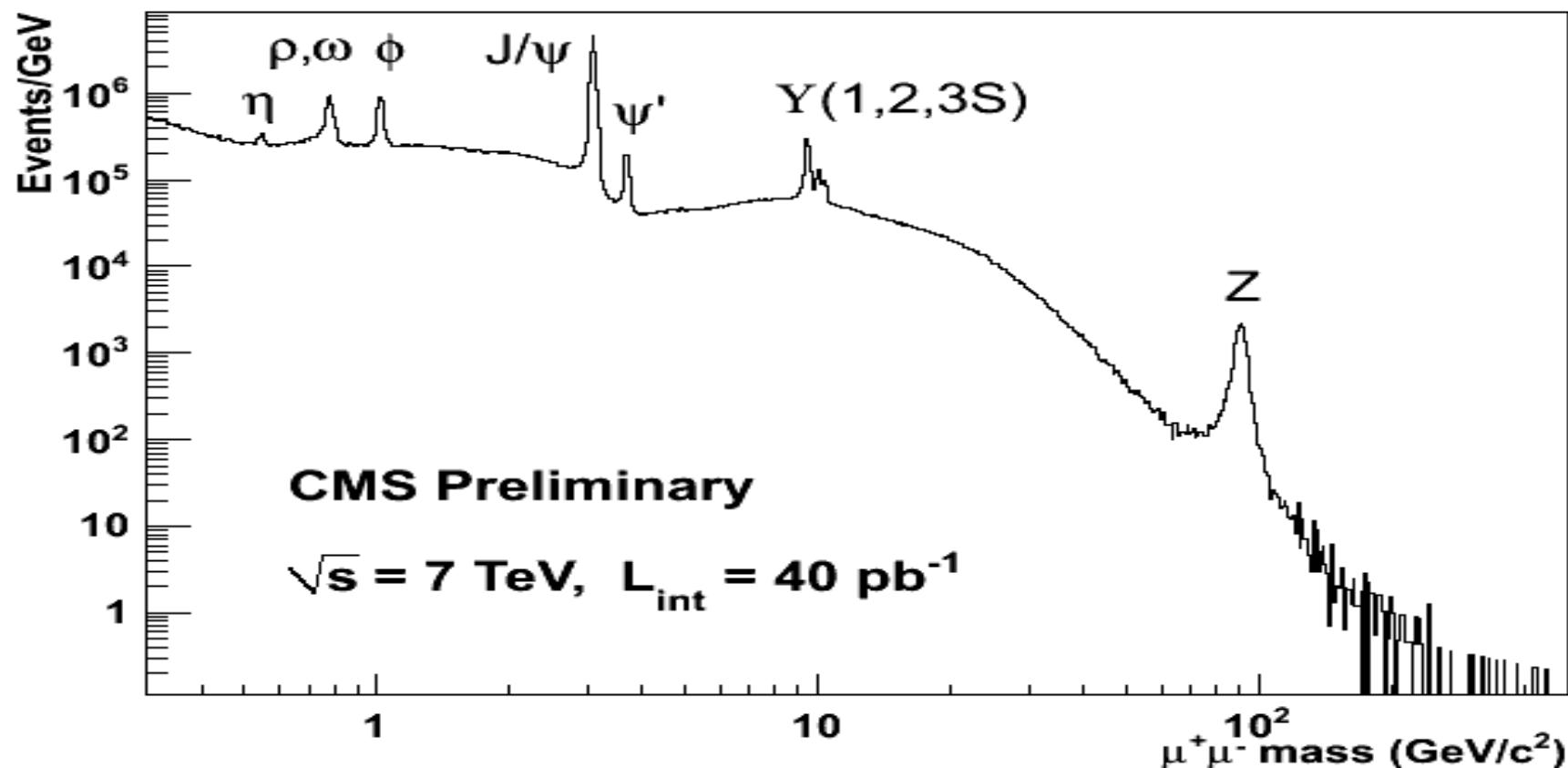
Probabilité



Permet de combiner
plusieurs canaux

- 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



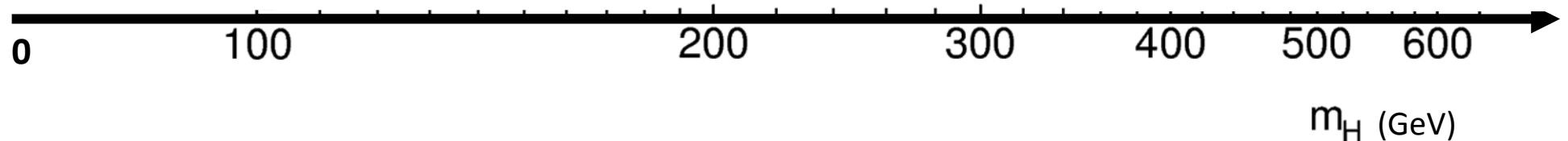
De plus:

- 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

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

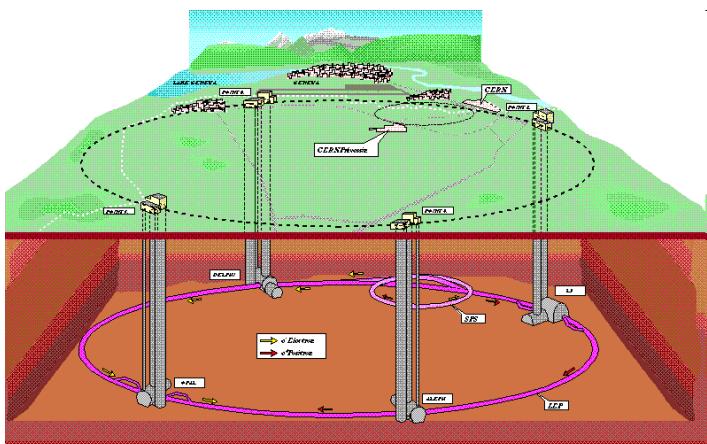
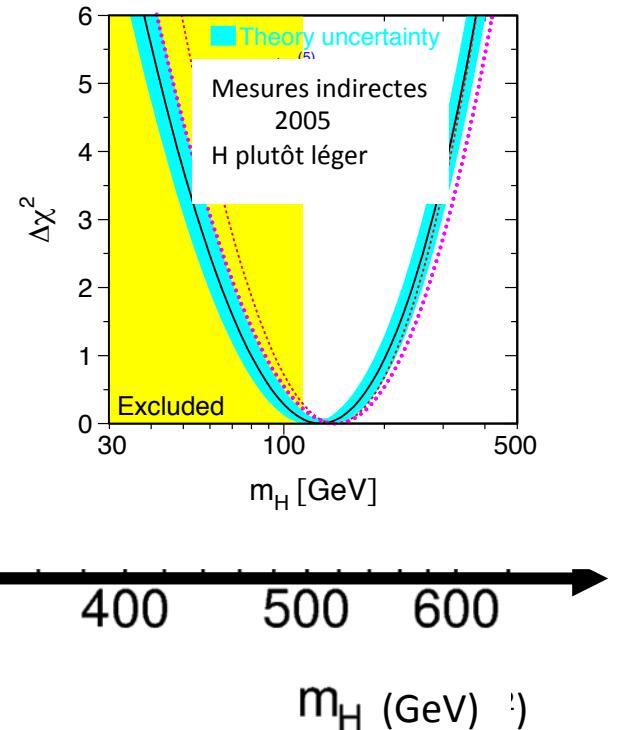
$1\text{GeV} \sim$ masse d'un proton/atome d'hydrogène

La chasse au boson de Higgs

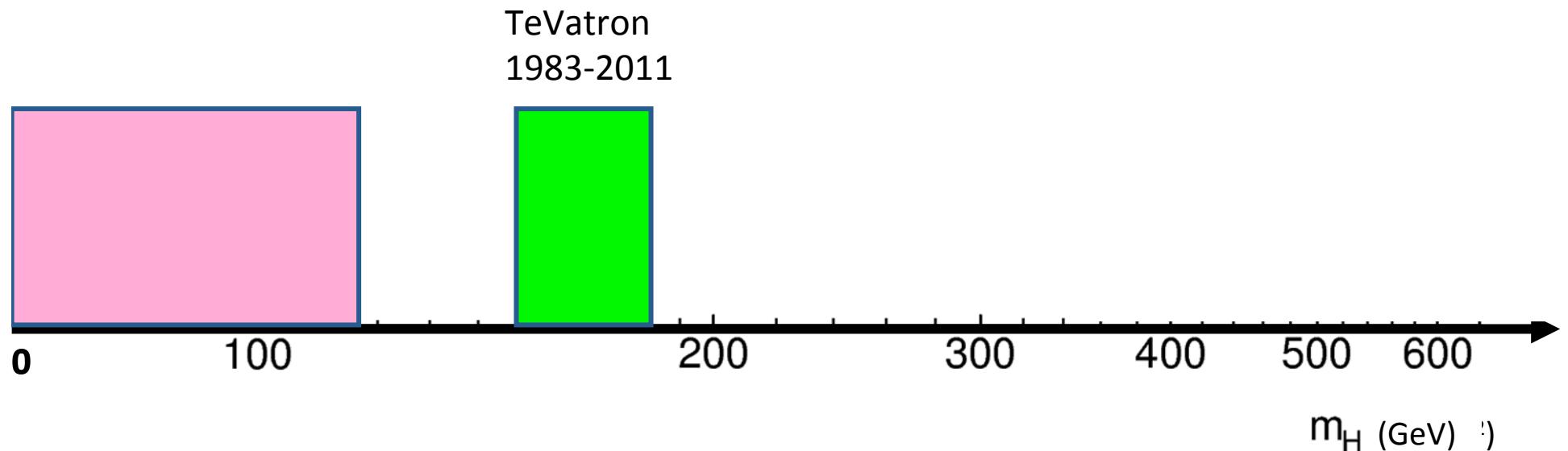
LEP
1989-2000



0 100 200 300 400 500 600



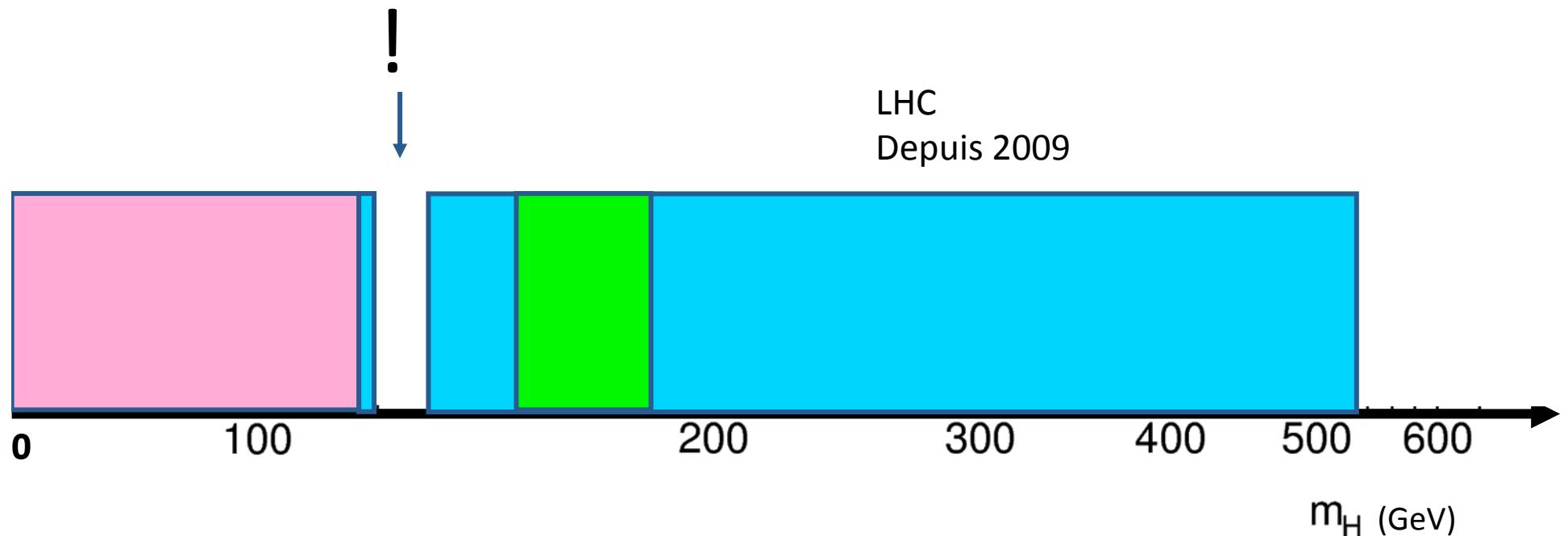
La chasse au boson de Higgs



Le TeVatron à Fermilab
(pres de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



Le LHC au cern



Séminaire du 4 juillet 2012 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.

the guardian

World of the year | 4 July 2012 | Last updated less than one minute ago

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

Weather | London | Your Search Results | The Guardian | Log In | Sign Up | Help

Breaking news: Weather not limitations end Mount McKinley climb - AP

Diamond set to come out fighting as he faces MPs

Chief executive to resign over role of City watchdog and Whistleblowing Council

Baroness Amos resigns over inquiry into UK's role in Libya

Wales into independence talks with Scotland

All 100 members of the Labour shadow cabinet

Full coverage of the Higgs boson discovery

Pakistan ends supply route dispute

Study of Venezuela's toxic waste facility shows US embassy of US for details of Pakistan's secret

Europe crisis: Troika talks begin

EU's top economic and financial officials meet to discuss the future of the eurozone

EU's top economic and financial officials meet to discuss the future of the eurozone

Hedge fund manager stampeded by crowd

I'm stampeded by crowd and other buffeting British

Sport

Man Utd to float? |

Most Popular

U.S. Edition ▾

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

4 WEEKS FOR 99¢

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 26](#)

Au musée Jacquemart-André, à Paris, une exposition passionnante s'attarde sur la période tardive de l'antiquité égyptienne, souvent oubliée.

Les derniers feux des pharaons

PAGES 24/25

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

Olivier Tomblot, qui dirigeait l'opérateur téléphonique lors de la vague de suicides dans l'entreprise en 2007 et 2009, est visé par une enquête de la justice pour harcèlement moral.

A nos lecteurs

En raison d'un manque de générosité de la part de nos lecteurs, la rédaction s'est dégrisée qui vous a été offerte gratuitement. Tous nos lecteurs.

PAGES 26

Le Monde

Science: la matière dévoilée

Le boson de Higgs, partie de l'univers pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert

Spécial Festival d'Avignon

La 66^e Fête du théâtre démarre le 7 juillet

Le Monde

EL PAÍS

Wednesday, July 4, 2012 | Actualizado a las 02:00

Actualidad | Sociedad | Político | Opinión | Cultura | Deportes | Internacionales | Ciencia | Economía | Caso Netanyahu | Vídeo

Portada | Sociedad | Política | Economía | Caso Netanyahu | Vídeo

Actualidad | Opinión | Cultura | Deportes | Internacionales | Ciencia | Economía | Caso Netanyahu | Vídeo

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

Los científicos del Cern anuncian el descubrimiento de una partícula que podría ser el bosón de Higgs, la "partícula de la felicidad".

El posible descubrimiento de la partícula es un paso crucial hacia la explicación del origen del universo.

"Puede confirmar la existencia del bosón de Higgs."

Search

El uso de resultados he basado en su criterio de criterio

The New York Times

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

Higgs boson discovery is a breakthrough for science

IMAGES DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢

OPINION »

EDITORIAL

Too Quiet, A Health Care

The Obama care law has forcefully countered the Republican majority's efforts to roll back the reform law.

MARKETS »

Britain | Germany

LE FIGARO

Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les chercheurs de l'organisme européen pour la recherche nucléaire européenne ont dévoilé le nouveau "Grail de la physique".

OPINION »

EDITORIAL

Too Quiet, A Health Care

The Obama care law has forcefully countered the Republican majority's efforts to roll back the reform law.

MARKETS »

Britain | Germany

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 phenome-

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

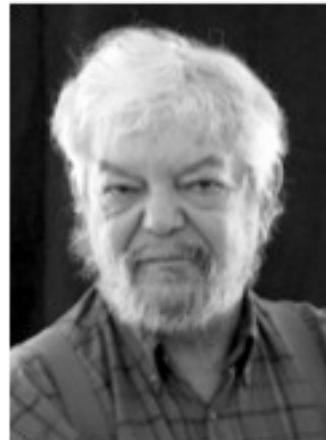
$$\partial^\mu \{\partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu\} = 0, \quad (2a)$$

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

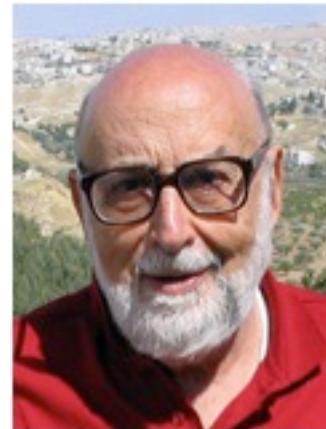
$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{\partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu\}. \quad (2c)$$

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

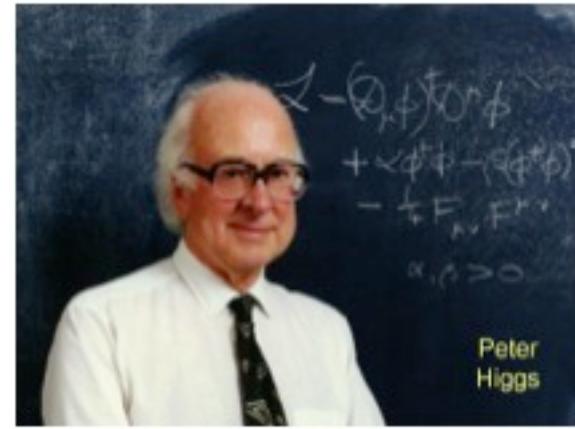
$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$



Robert Brout 1928-2011



François Englert 1932-



Peter Higgs 1929-

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



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

Champ de Higgs

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

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

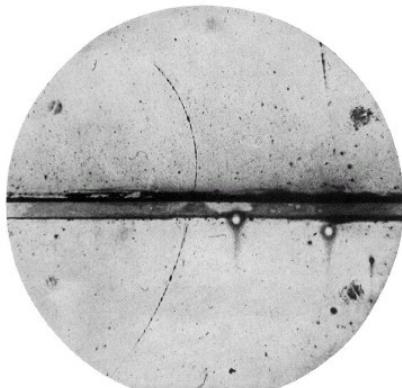


FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_0 = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_0 = 7.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

(~3000
signataires en
annexe)

Physics Letters B 716 (2012) 1–29

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb





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 $H \rightarrow ZZ^{(*)}$, $WW^{(*)}$, bb 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 $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (syst)} \text{ GeV}$ 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.

Physics Letters B 716 (2012) 30–61

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 [☆]

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

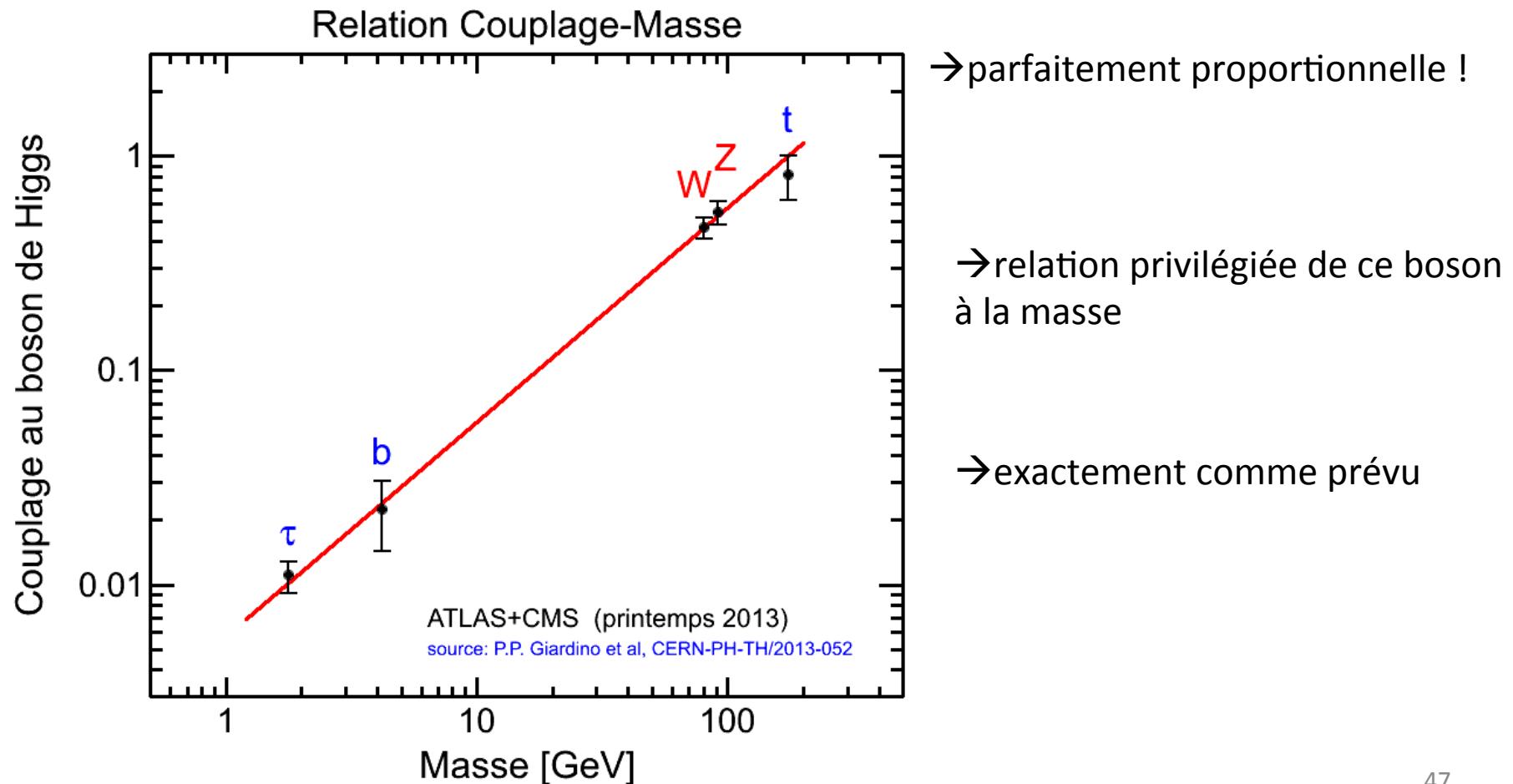
Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb^{-1} at 7 TeV and 5.3 fb^{-1} at 8 TeV . The search is performed in five decay modes: $\gamma\gamma$, ZZ , W^+W^- , $\tau^+\tau^-$, and bb . 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 $125.3 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst}) \text{ GeV}$. 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



Qu'est-ce que VOIR une particule ?

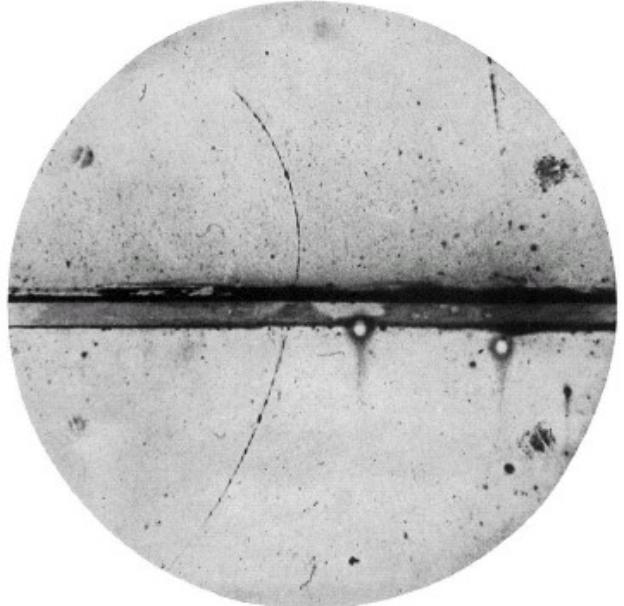
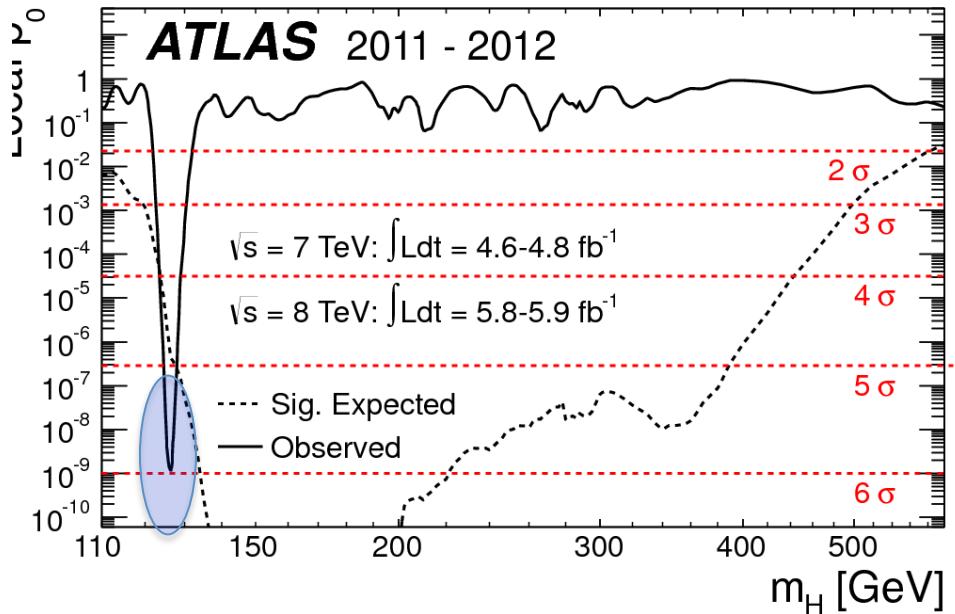
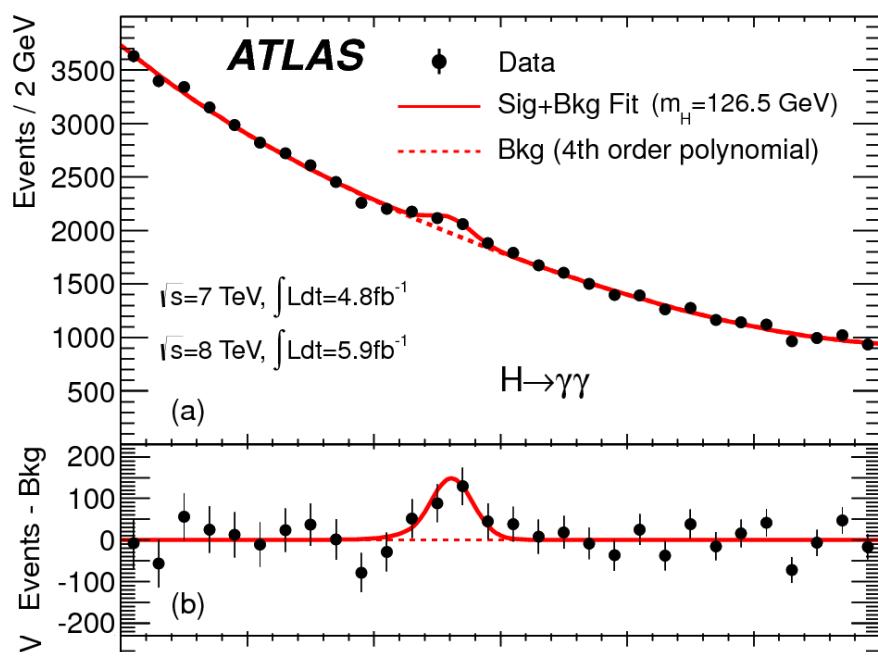
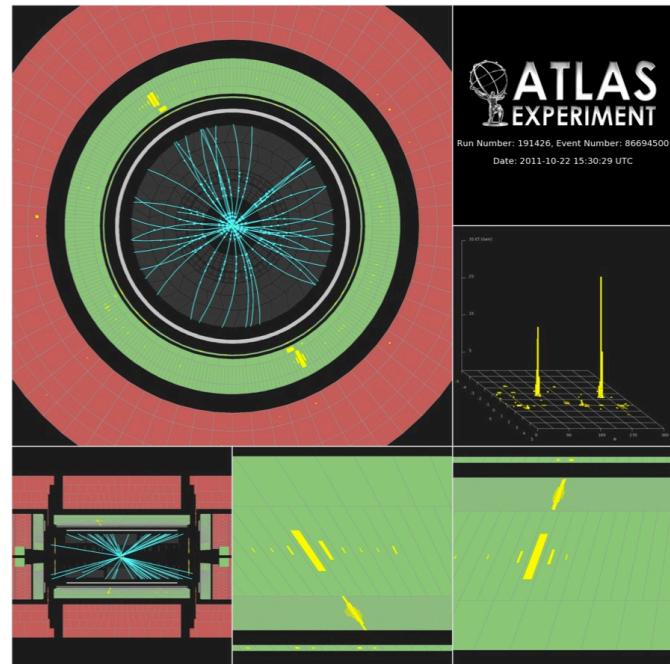
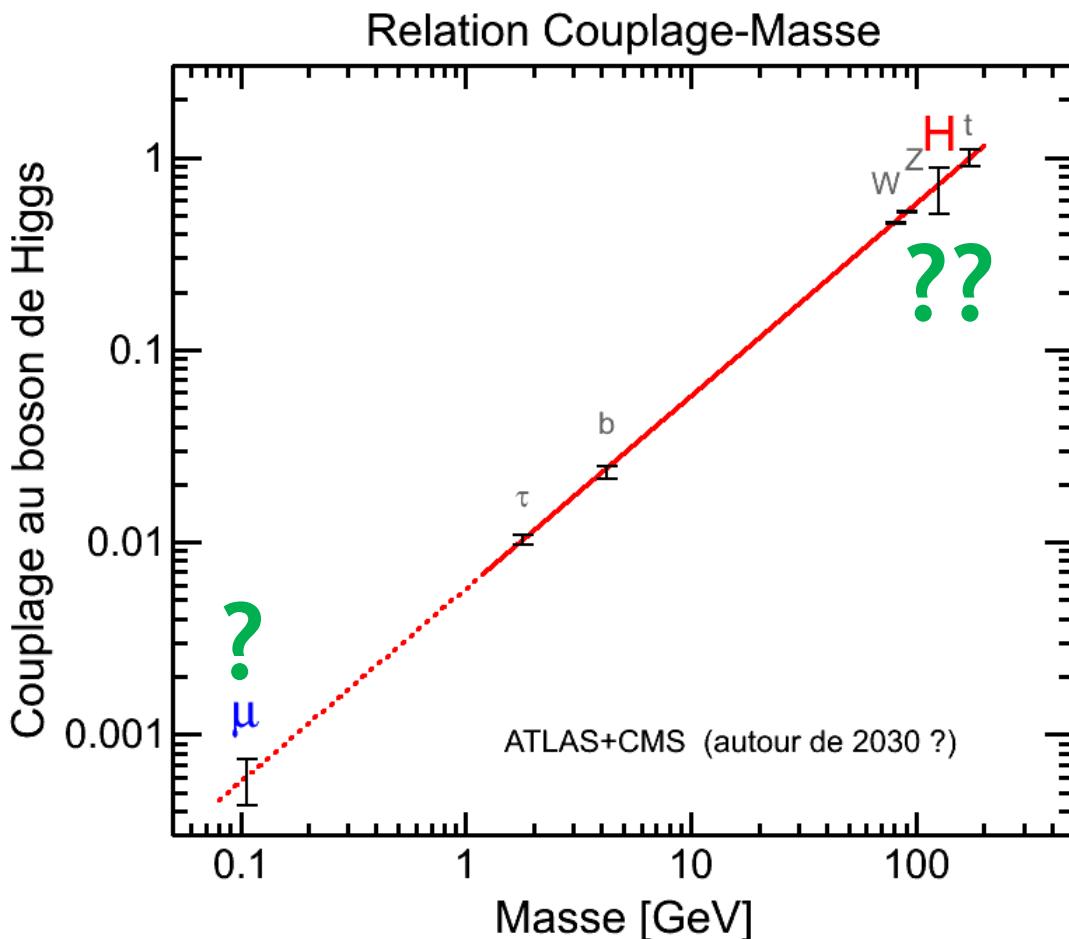


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H_P = 2.1 \times 10^8$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_P = 7.5 \times 10^8$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



Le boson de Higgs: la fin d'un commencement

Terra incognita



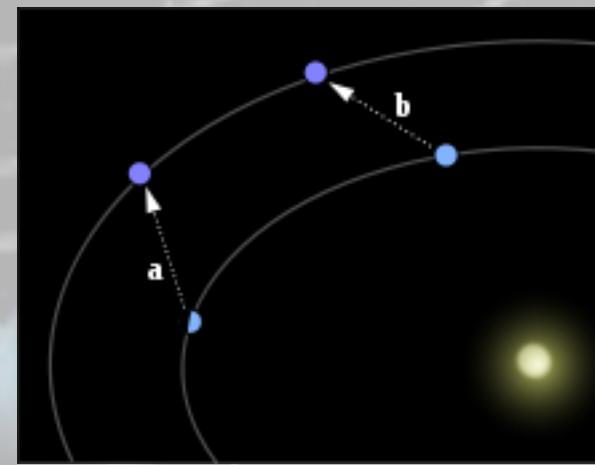
Les physiciens pénètrent
un nouveau territoire

celui du « secteur de Higgs »

Mesurer les
propriétés du nouveau boson!

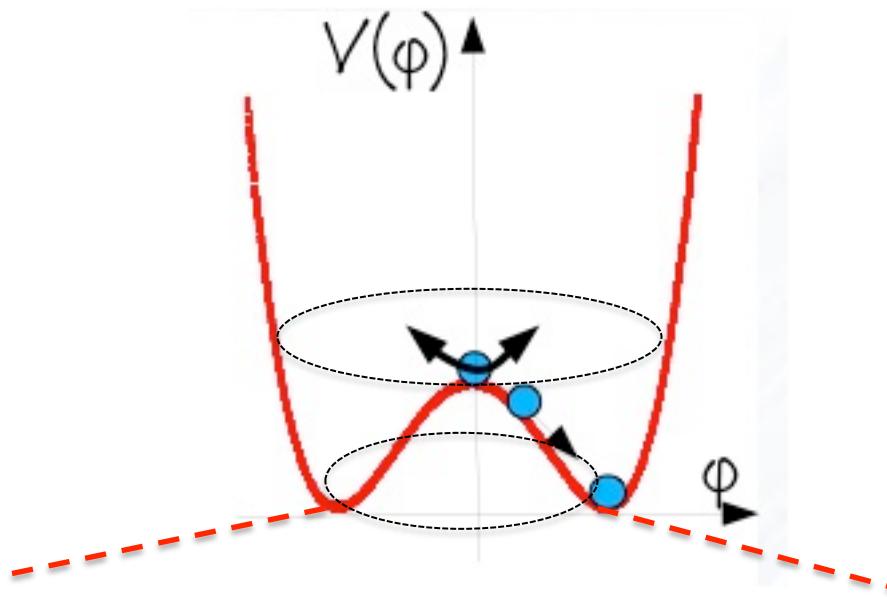
Flash-back: 1846

- 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

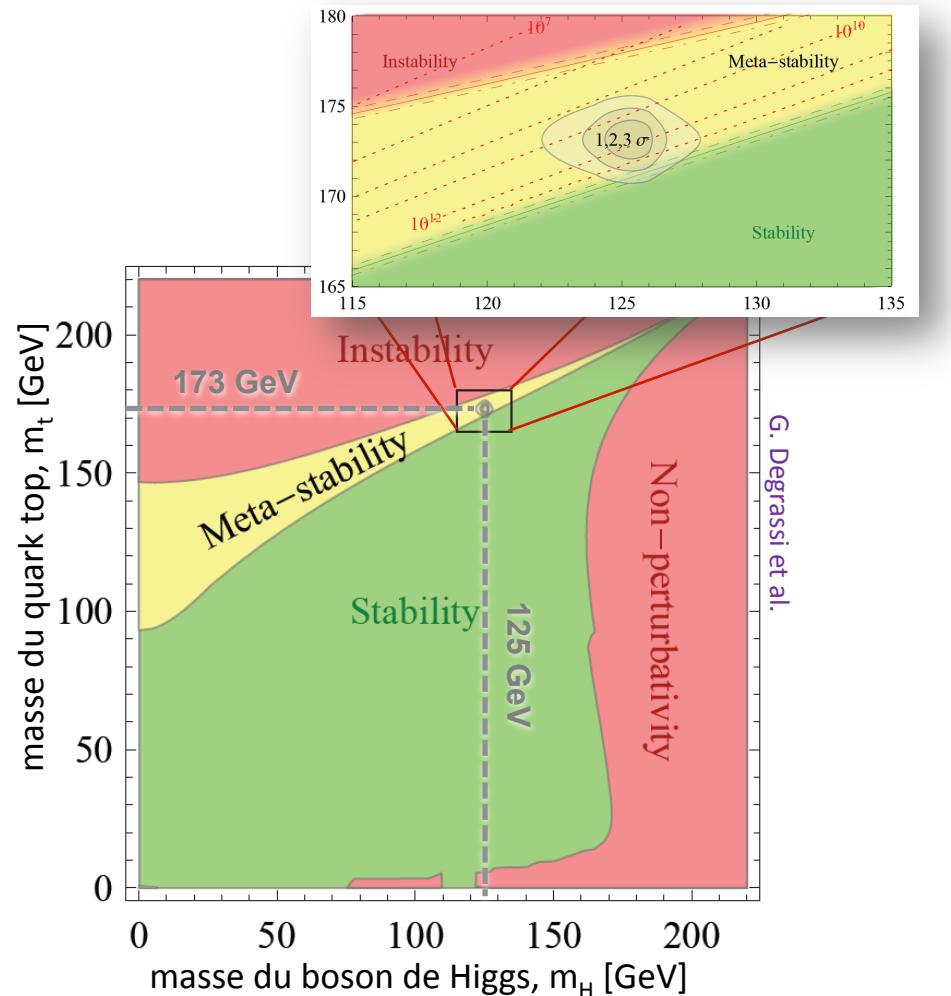


L'Univers est-il stable ?

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



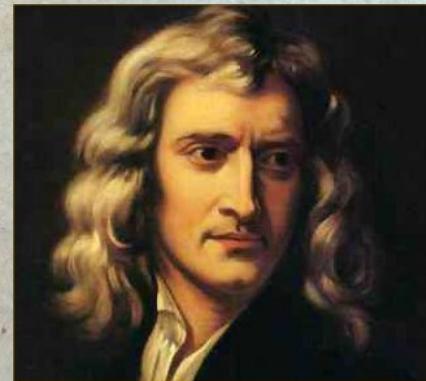
Notre Univers vit au bord du précipice !



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

lectrice de Magnetisme. Il viendra un tems peut-être, où l'on aura un amas assez grand d'expériences pour reconnaître quelqu'autres principes cachés. Tout nous avertit que la matière 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 Sphère de nos connaissances.



FIN.

