La quête du boson de Higgs
Une épopée scientifique et humaine hors du commun

.

Ludwik Dobrzynski

Laboratoire Leprince Ringuet - Ecole polytechnique - CNRS - IN2P3

Centre National de la Recherche Scientifique

IN2P3

Ecole Polytechnique

Le boson de HIGGS!

Quel est le problème ?

En l'état actuel de nos connaissances,
37 particules élémentaires sont les constituants ultimes de notre Univers.

A l'exception de 2, elles ont chacune une masse.

Si elles ne possédaient pas une masse:
la matière ne serait pas structurée.

Nous n'existerions pas !

Mais d'après le SM
les particules ne devraient pas avoir de masse !

Quelle est l'origine de la masse ?

Epopée scientifique et humaine à l'échelle mondiale depuis près de 50 ans … pas encore complètement terminée.

L'état des lieux

- L'époque des théoriciens

  Retour en arrière: 1964

- L'époque des expérimentateurs

  Une quête de 48 années

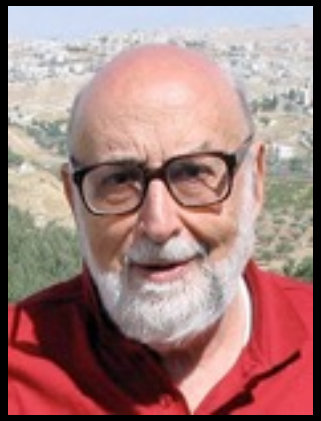
Retour en arrière: 1964

P. W. Anderson
Prix Nobel 1977

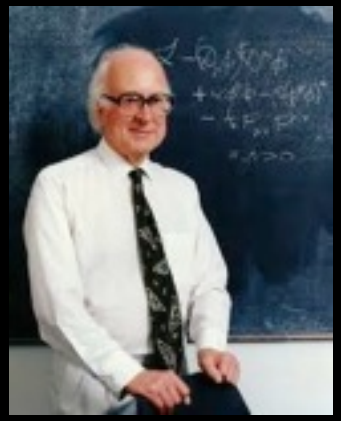
Y. Nambu
Prix Nobel 2008

J. Goldstone

R. Brout

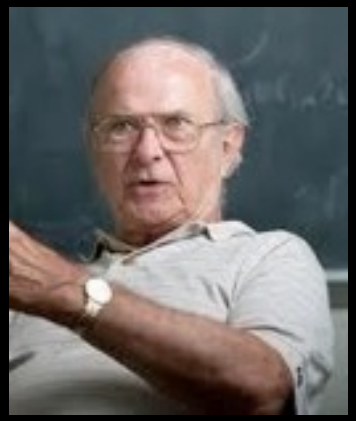


F. Englert



P. Higgs

G. S. Guralnik



C. R. Hagen

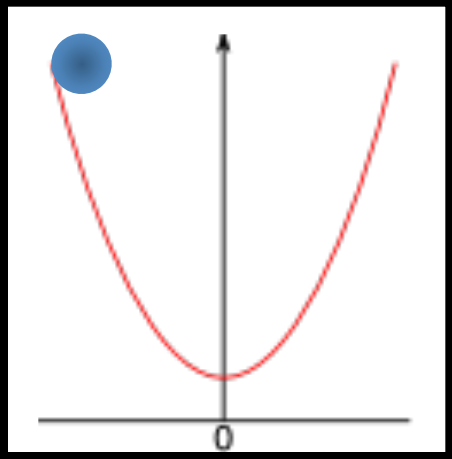
T. W. B. Kibble

Niveau fondamental en physique
Il existe dans la nature un Champ
Brisure spontanée de symétrie

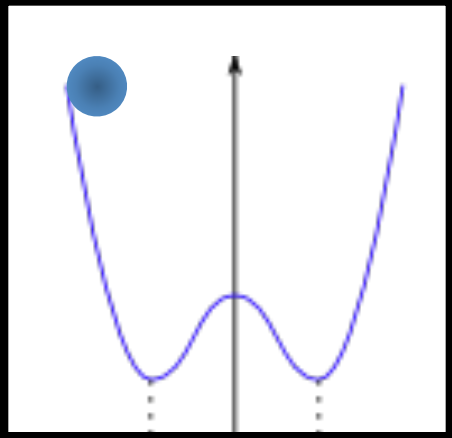
Notion de niveau fondamental en physique

- Il correspond au niveau de plus basse énergie.

  Exemple d'une bille dans une flûte à champagne ou dans la bouteille.



Le point bas
est à la position zéro



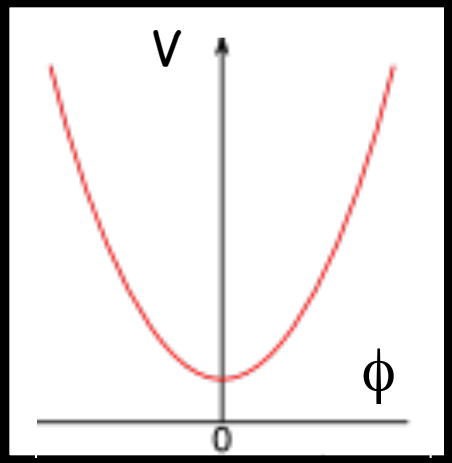
Le point bas
n'est pas à la position zéro

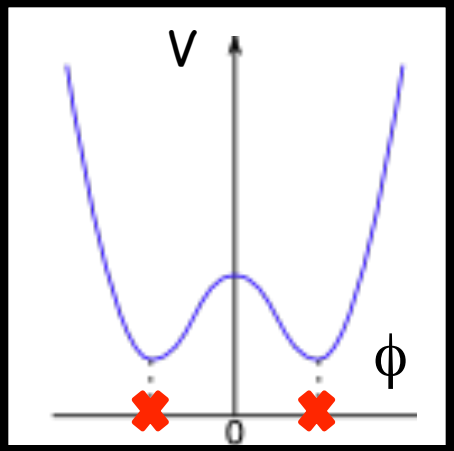
Équilibre non symétrique

Mécanisme de "Higgs"

Etat fondamental:
le plus bas potentiel V

- Brisure Spontanée de Symétrie créant un nouveau champ:
  un champ scalaire non nul à l'état fondamental.





Haute température:
champ nul dans l'état fondamental

Particules
dans un champ nul
® elles n'interagissent pas:
elles restent sans masse.

Basse température:
champ non nul dans l'état fondamental

Particules
dans un champ non nul
→ elles interagissent:
elles acquièrent une masse apparente.

S. L. Glashow A. Salam S. Weinberg G. 't Hooft M. Veltman

Unification: "théorie électrofaible" "Théorie électrofaible opérationnelle"

Prix Nobel 1979 Prix Nobel 1999

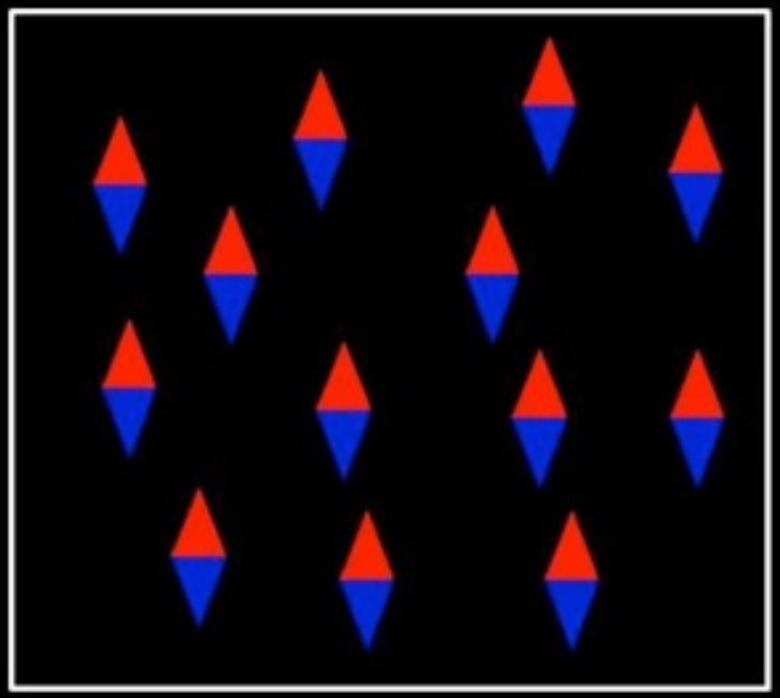
A partir de 2 ingrédients essentiels:

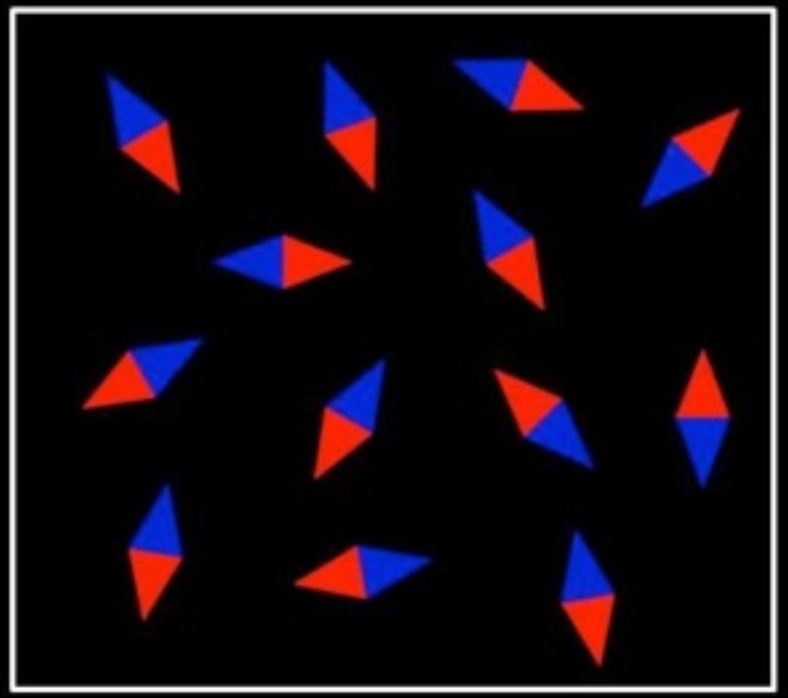
- La symétrie de jauge (Glashow),
  mais celle-ci implique des bosons médiateurs sans masse,
  alors que la force faible est à courte portée !
- La parade (Salam, Weinberg): mécanisme créant de la masse
  via la "Brisure Spontanée de Symétrie" BSS,
  mécanisme postulé par les 6 théoriciens BEHGHK.

La Brisure Spontanée de Symétrie

Un exemple:
Le magnétisme !

Considérons un matériau magnétique: exemple oxyde ferrique

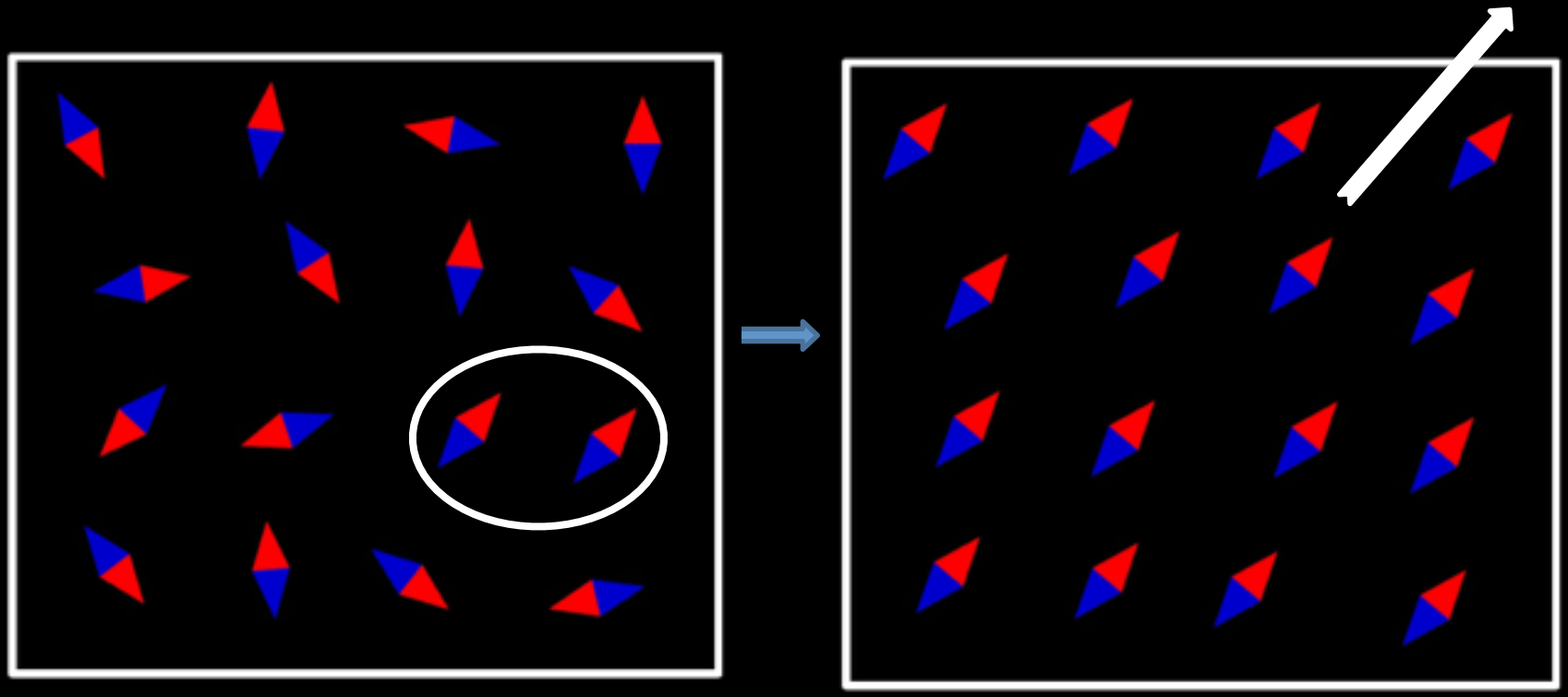




Température ambiante
(20°C)
Aimant:
Dipôles à l'échelle atomique
(Ferromagnétisme)

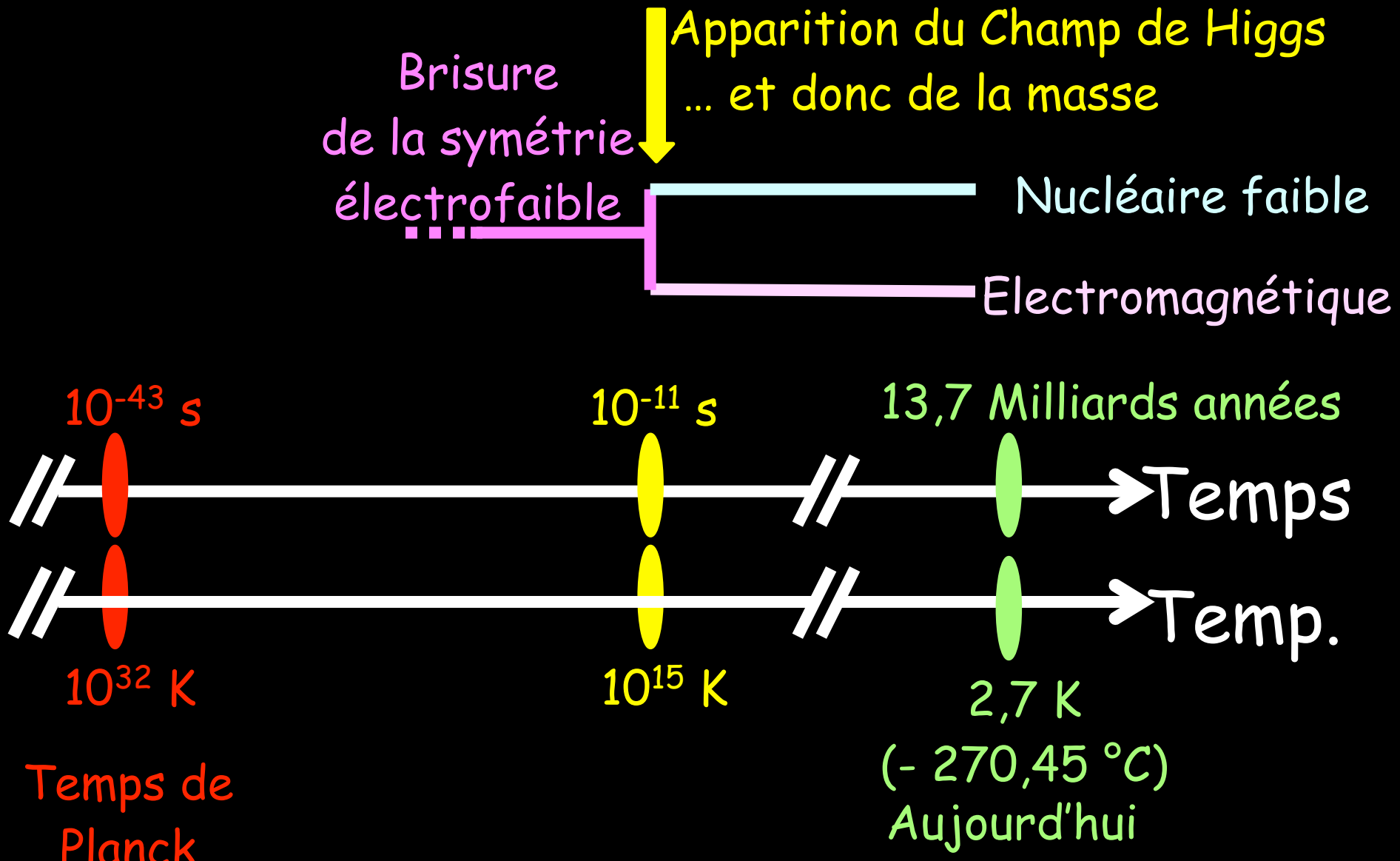
Chauffage > point de Curie
(858 °C pour Fe_3O_4)
Aimantation perdue:
Désordre des dipôles
(Paramagnétisme)

Refroidissement à température ambiante



Il suffit que 2 dipôles voisins aient même orientation → Aimantation retrouvée

Typiquement, une Brisure Spontanée de Symétrie avec un changement de phase.


Apparition du Champ de Higgs
... et donc de la masse
Brisure
de la symétrie
électrofaible
Nucléaire faible
Electromagnétique
10-43 s
10-11 s
13,7 Milliards années
Temps
Temp.
1032 K
1015 K
2,7 K
(- 270,45 °C)
Aujourd'hui
Temps de
Planck
Les particules
n'ont pas de masse
Les particules
sont massives

Les conséquences: depuis cette époque,

- les bosons vecteurs W^+ W^- et Z^0 acquièrent leur masse, mais pas les photons γ → tout rentre dans l'ordre !
- Ce n'est pas fini: il y a un bonus toutes les particules "massives" (leptons et quarks) acquièrent également une masse.
- Et puis, il y a un super-bonus: une nouvelle particule qui est une "excitation" du champ scalaire:

Le boson de "Higgs"

Exemple: Une piscine,
eau bien calme

Nous y jetons une boule

- Nous pouvons assimiler:
  - l'eau au champ de Higgs,
  - les ondes sonores qui s'y propagent au boson de Higgs.
- Si nous marchons dans l'eau, celle-ci s'oppose au mouvement:
  nous sommes plus "massifs".
- Notons bien que l'eau (le champ) existe en l'absence de l'onde (le Boson).

L'observation du boson de Higgs
serait la preuve absolue de la validité du mécanisme.

Mais

Les bosons scalaires de Higgs
abondamment créés lors de la Brisure Spontanée de Symétrie
ont disparu très rapidement
peu après la transition de phase… il y a 13,7 Milliards d'années.

Seul subsiste …
le champ de Higgs qui baigne tout notre Univers

…

si le mécanisme est vrai !

Alors,
comment procéder ?

Recréer en laboratoire
les conditions de l'époque
primordiale !

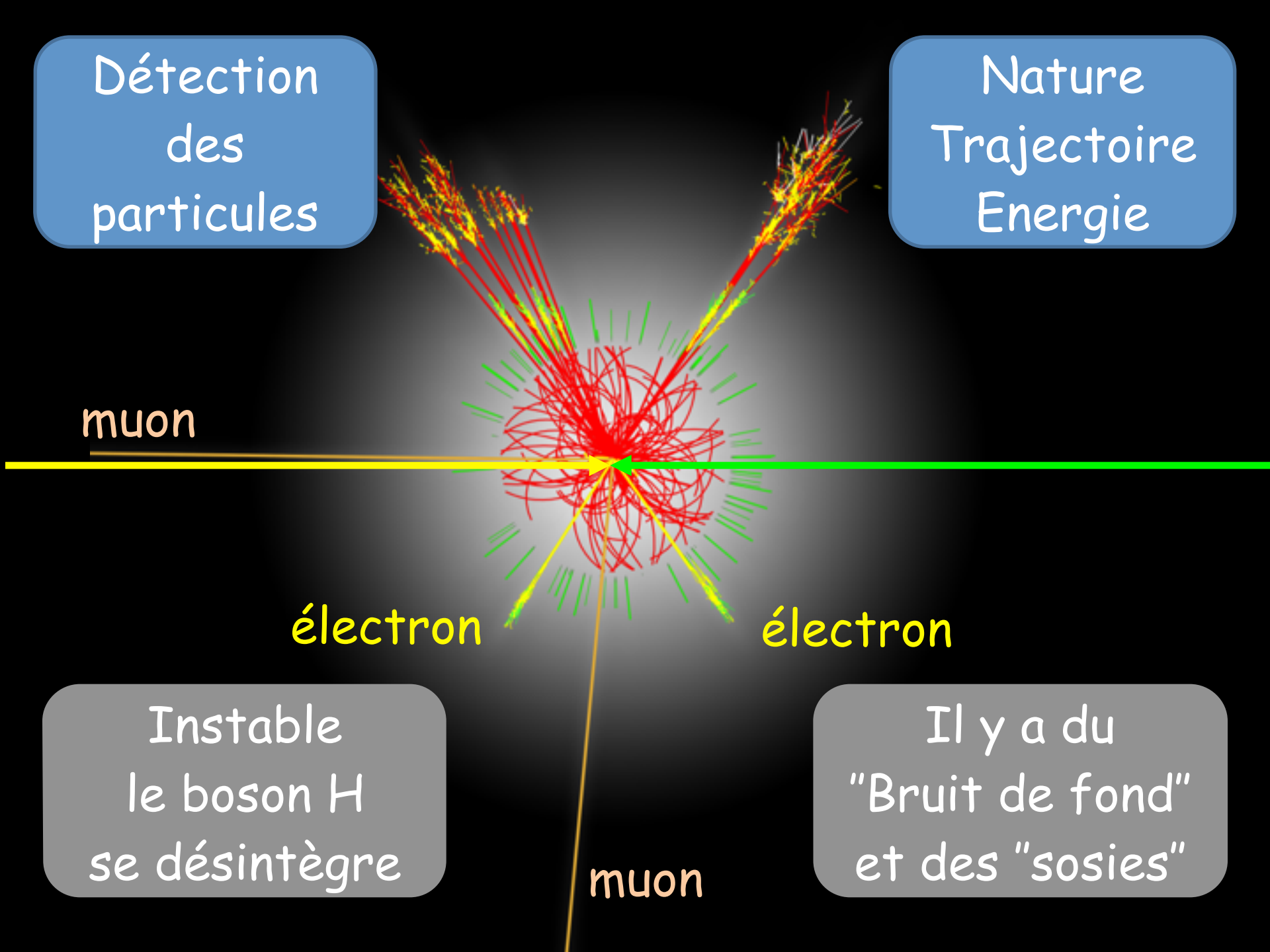
LHC: 9300 aimants
dont 1232 dipôles
- Longueur 14 mètres
- Masse 35 tonnes

Consommation:
120 MW
~ Canton
de Genève

Câbles
supraconducteurs
Niobium-Titane
à -271,3 °C

Détection des particules

Nature Trajectoire Energie



Instable le boson H se désintègre

Il y a du "Bruit de fond" et des "sosies"

A partir des débris:
nous remontons au boson de Higgs

Particule mère

Particules filles

et

petites filles

Chasse au Higgs depuis 2011:
valeurs attendues … s'il existe

Production d'un boson de 125 GeV

5 milliards de collisions → 1 boson H

"Bons" canaux étudiés (peu abondants)

$H \rightarrow \gamma\,\gamma$ 2,2 fois sur mille

$H \rightarrow Z\,Z^* \rightarrow 4\,l$ 1,3 fois sur 10 mille

Observation

Efficacités de détection/reconstruction:

≈ 40 et 25%

Il faut donc du temps et accumuler les données

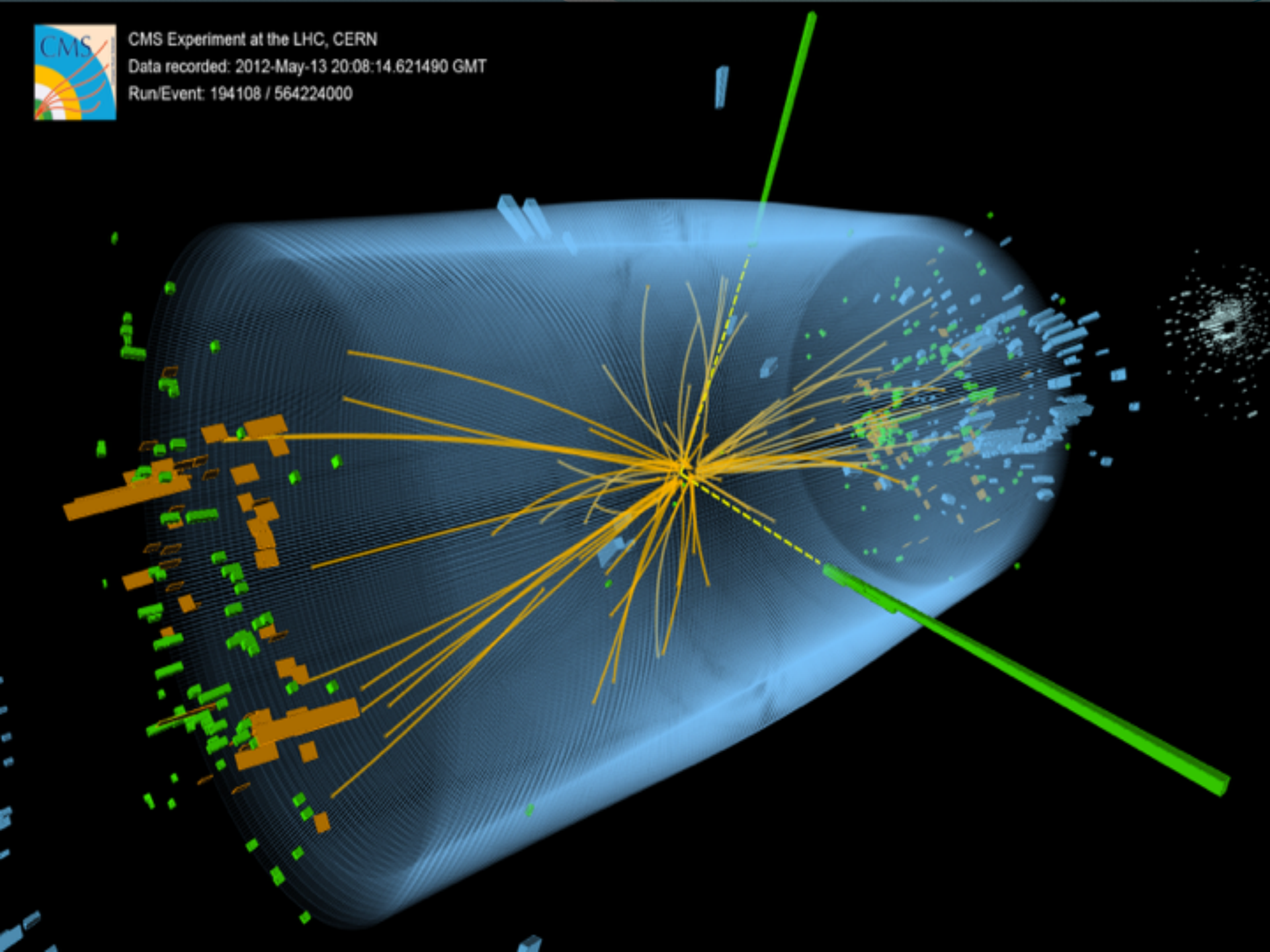
Date historique: 4 juillet 2012

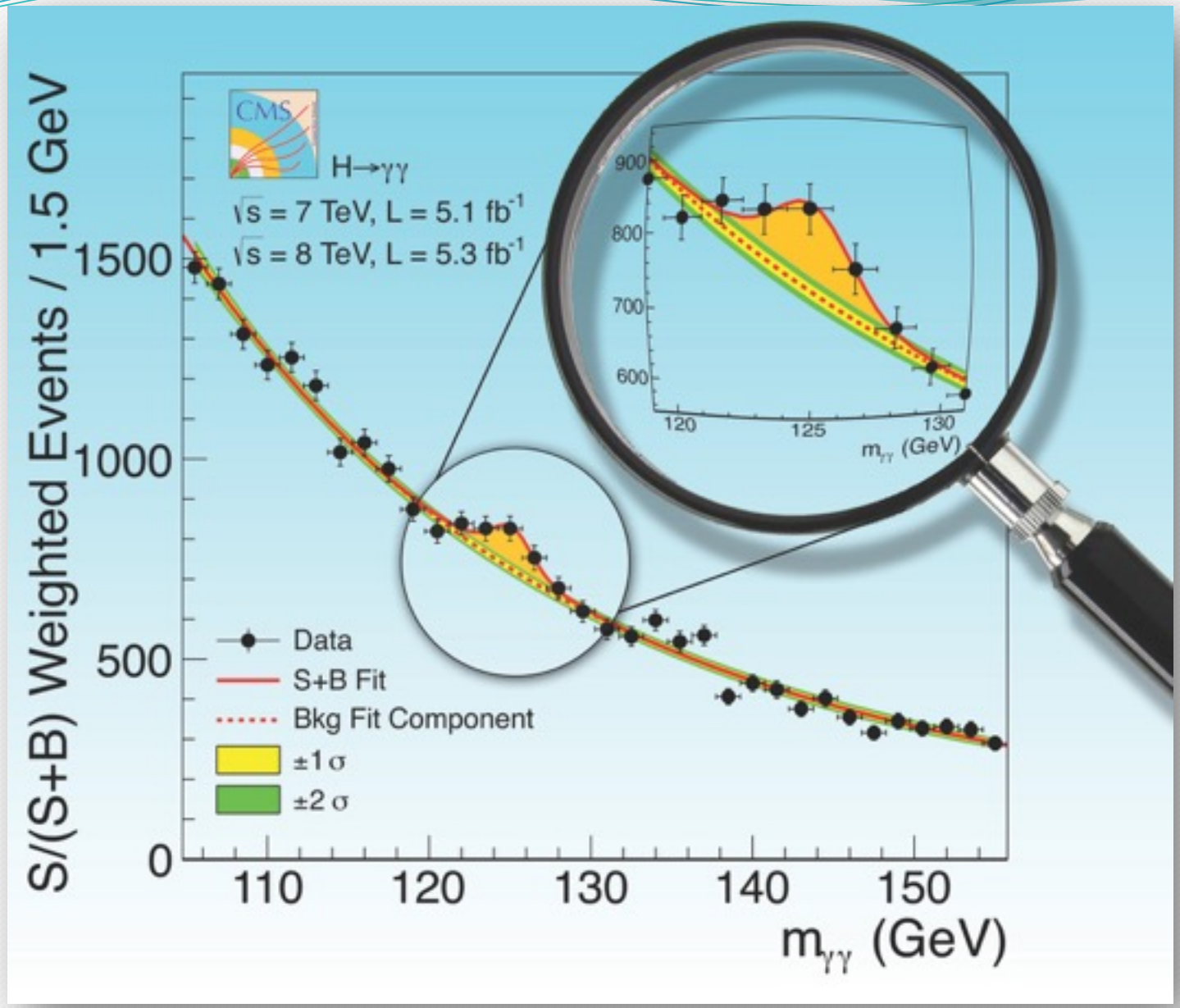
Duplex CERN/Melbourne (ICHEP) et monde entier

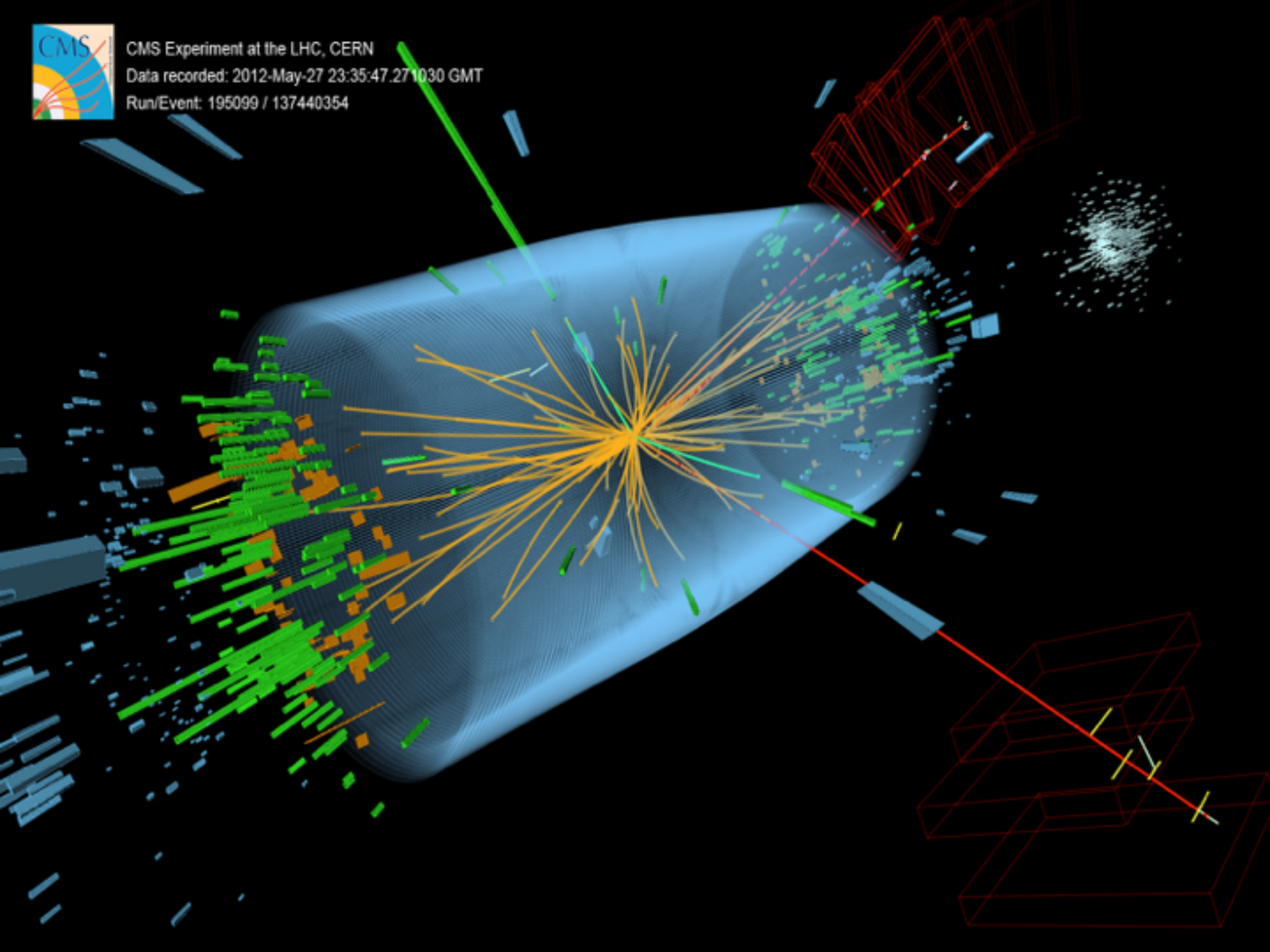
Joe Incandela (CMS)

Fabiola Gianotti (ATLAS)

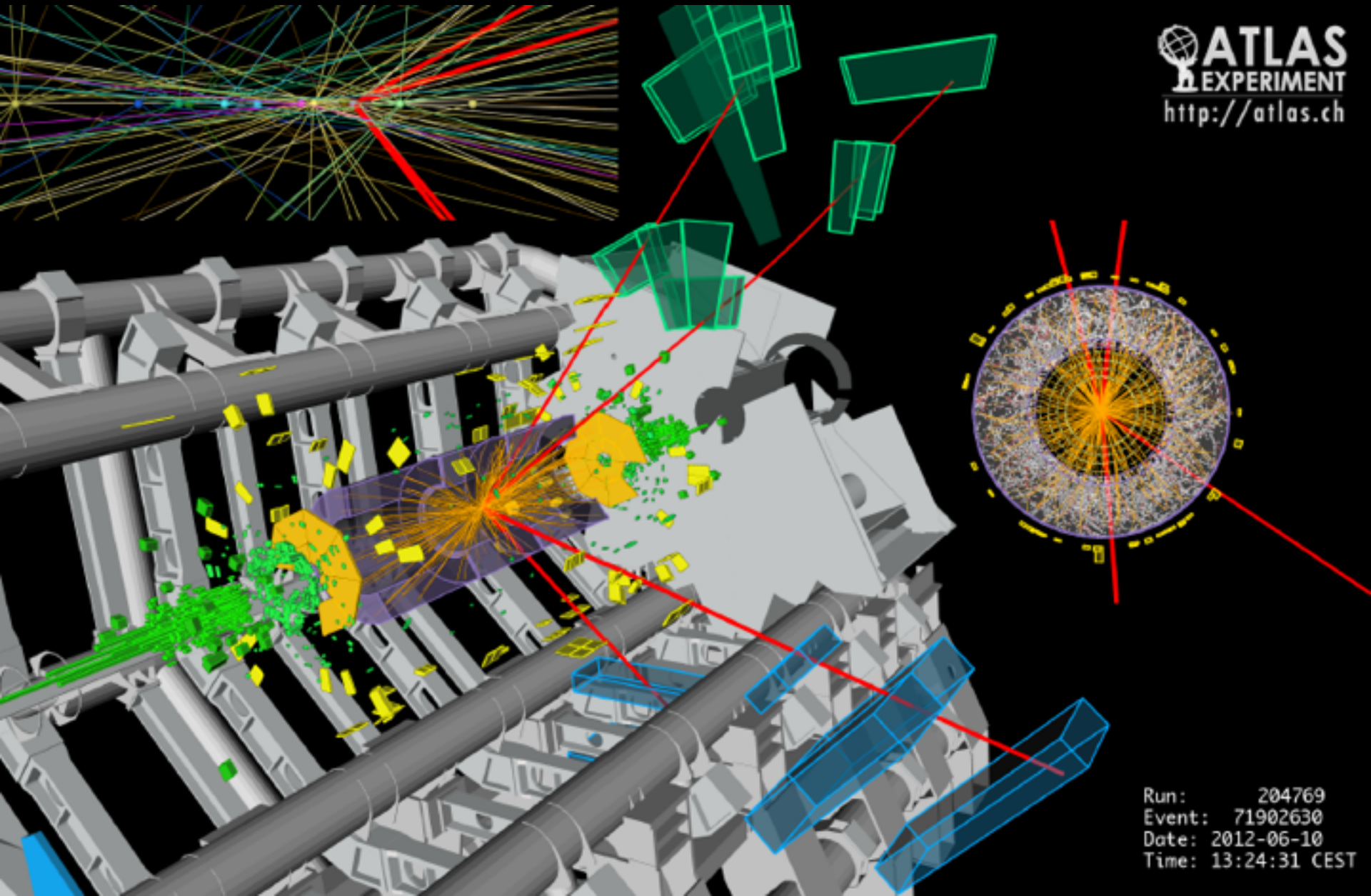
Première rencontre Englert-Higgs


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

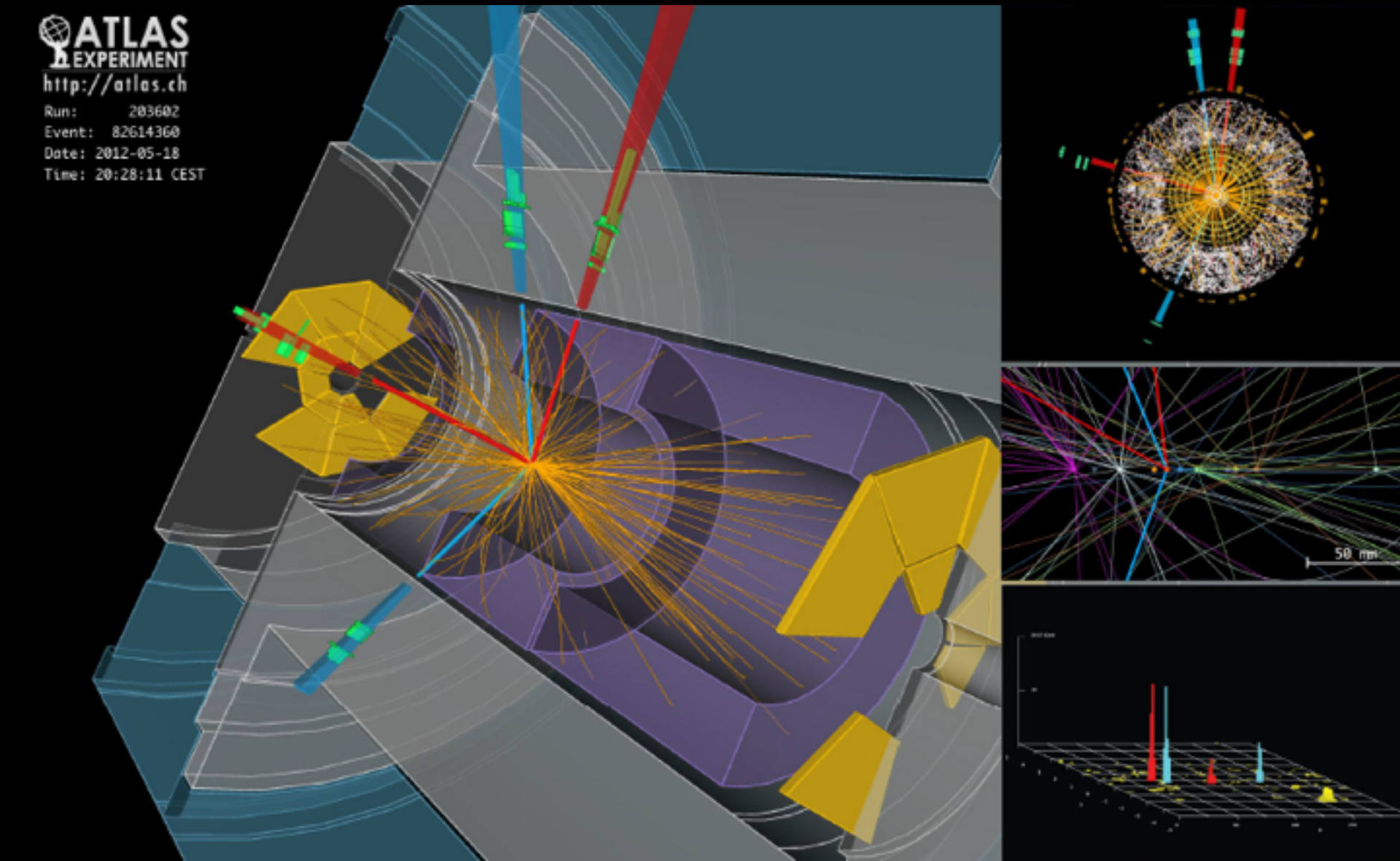

CMS
H→γγ
√s = 7 TeV, L = 5.1 fb-1
√s = 8 TeV, L = 5.3 fb-1
Data
S+B Fit
Bkg Fit Component
±1 σ
±2 σ
S/(S+B) Weighted Events / 1.5 GeV
0
500
1000
1500
110
120
130
140
150
mγγ (GeV)
900
800
700
600
120
125
130
mγγ (GeV)


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354

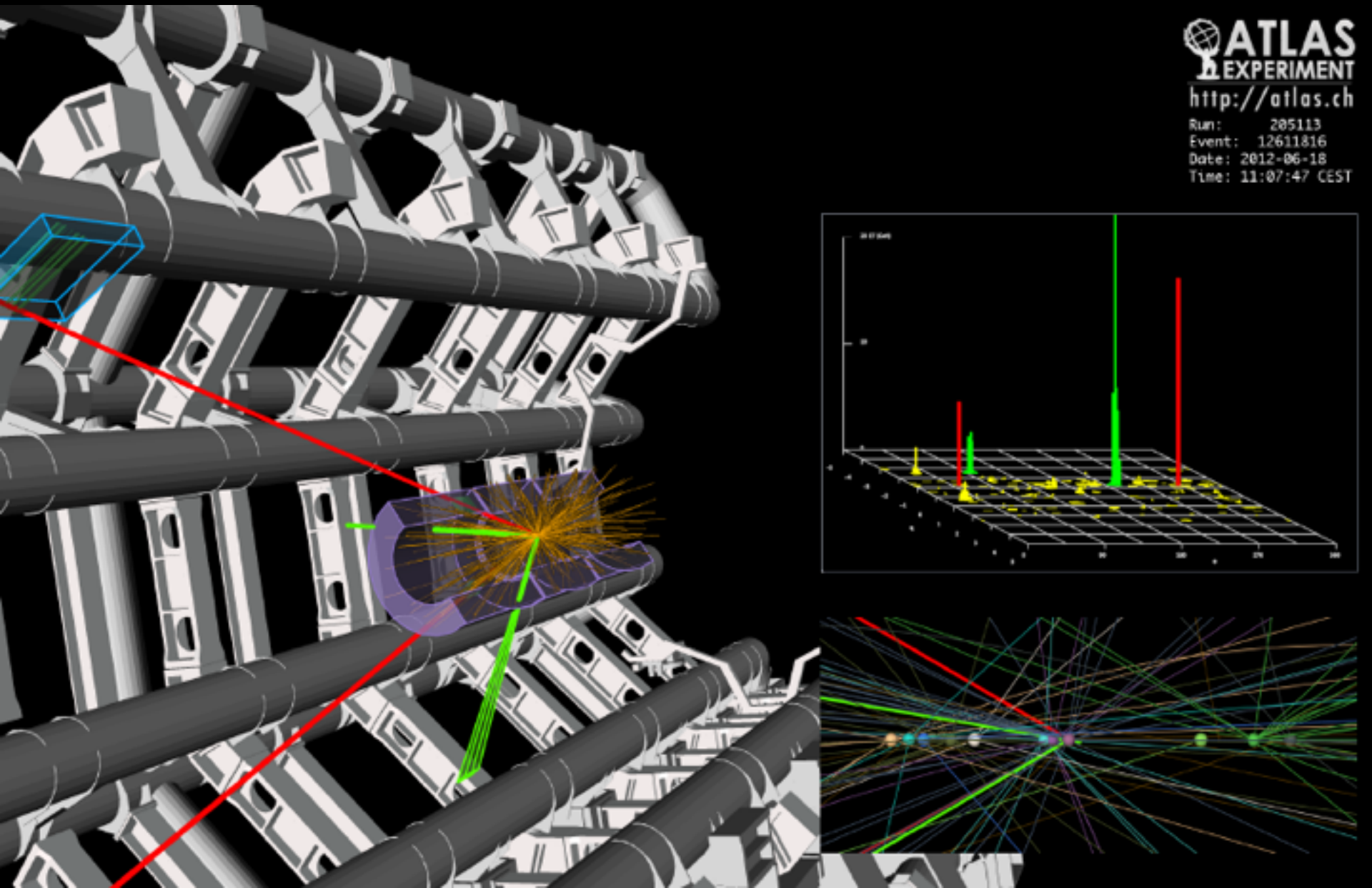
Candidat Higgs donnant 4 muons



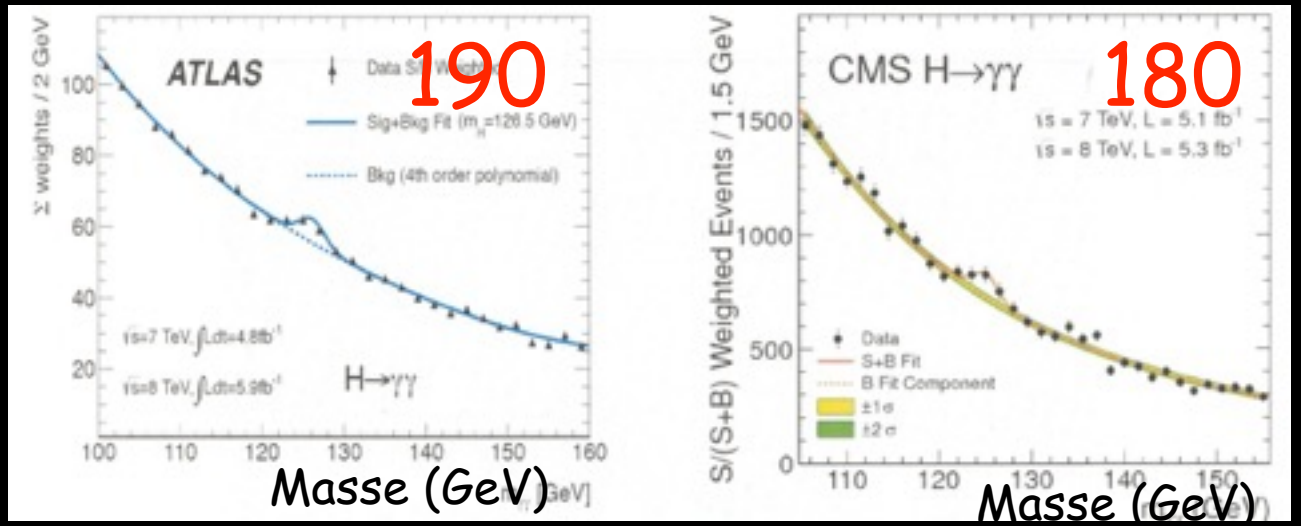
Candidat Higgs donnant 4 électrons



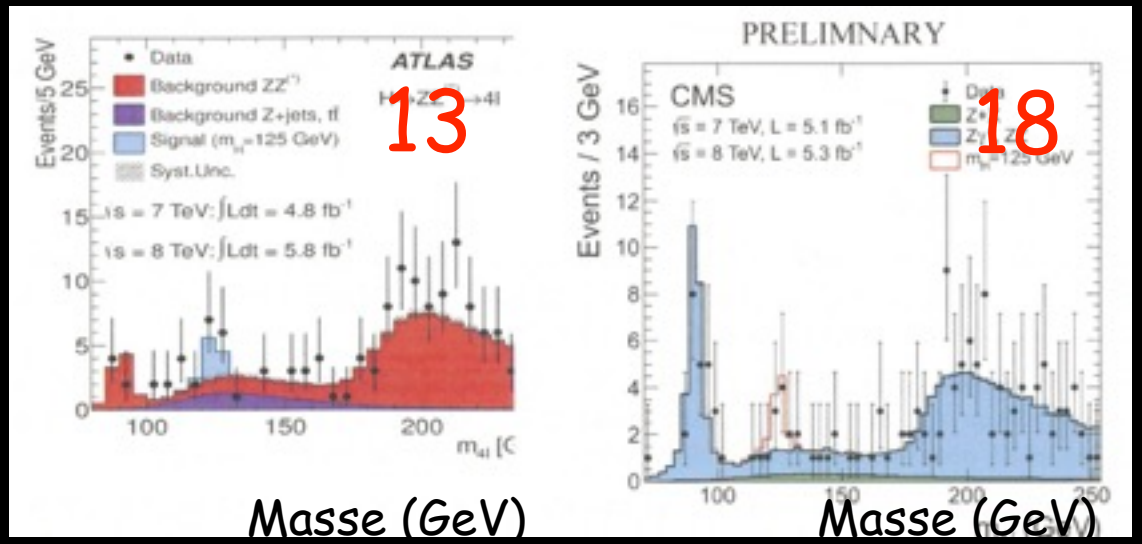
Candidat Higgs donnant 2 électrons et 2 muons



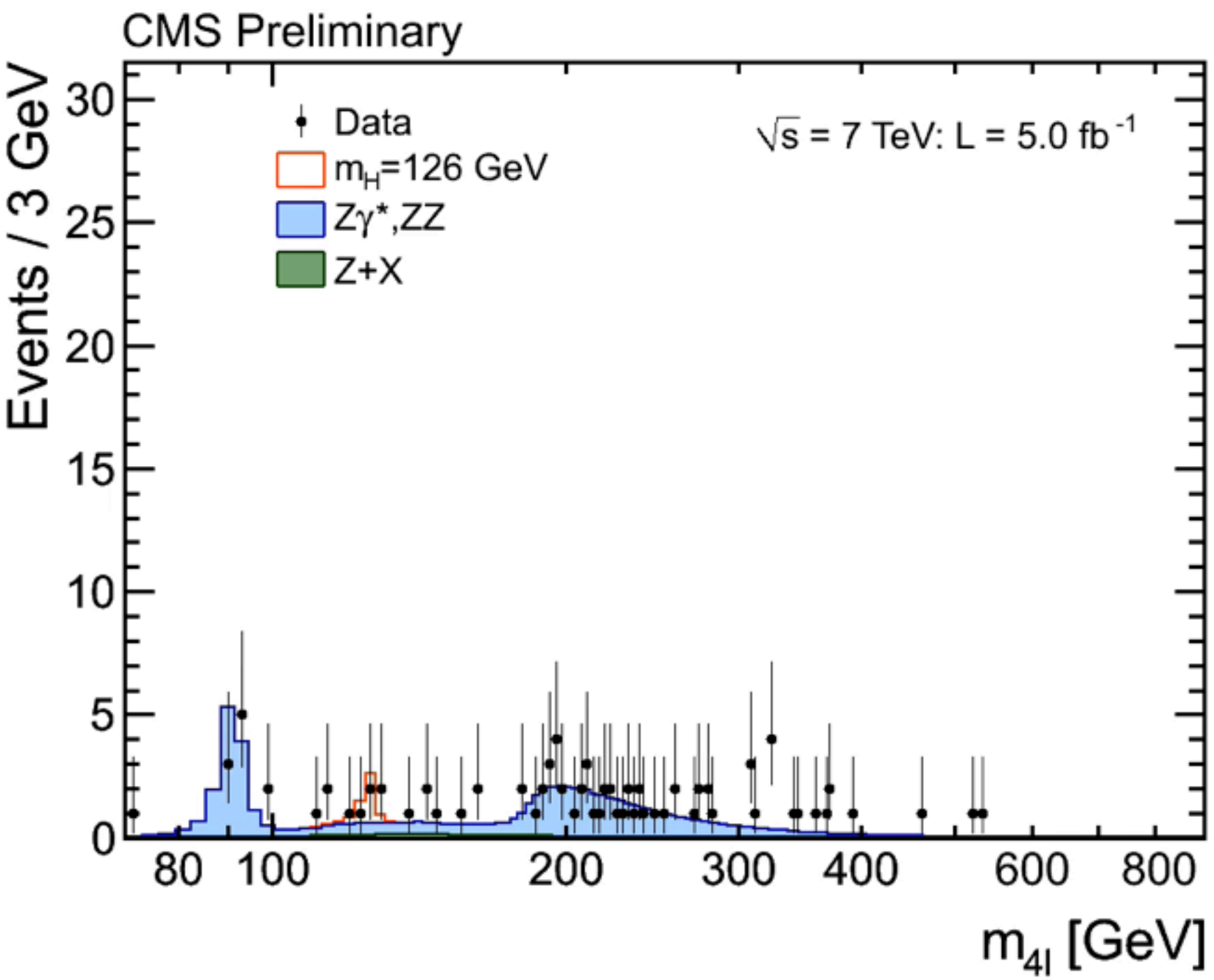
$H \rightarrow \gamma\,\gamma$

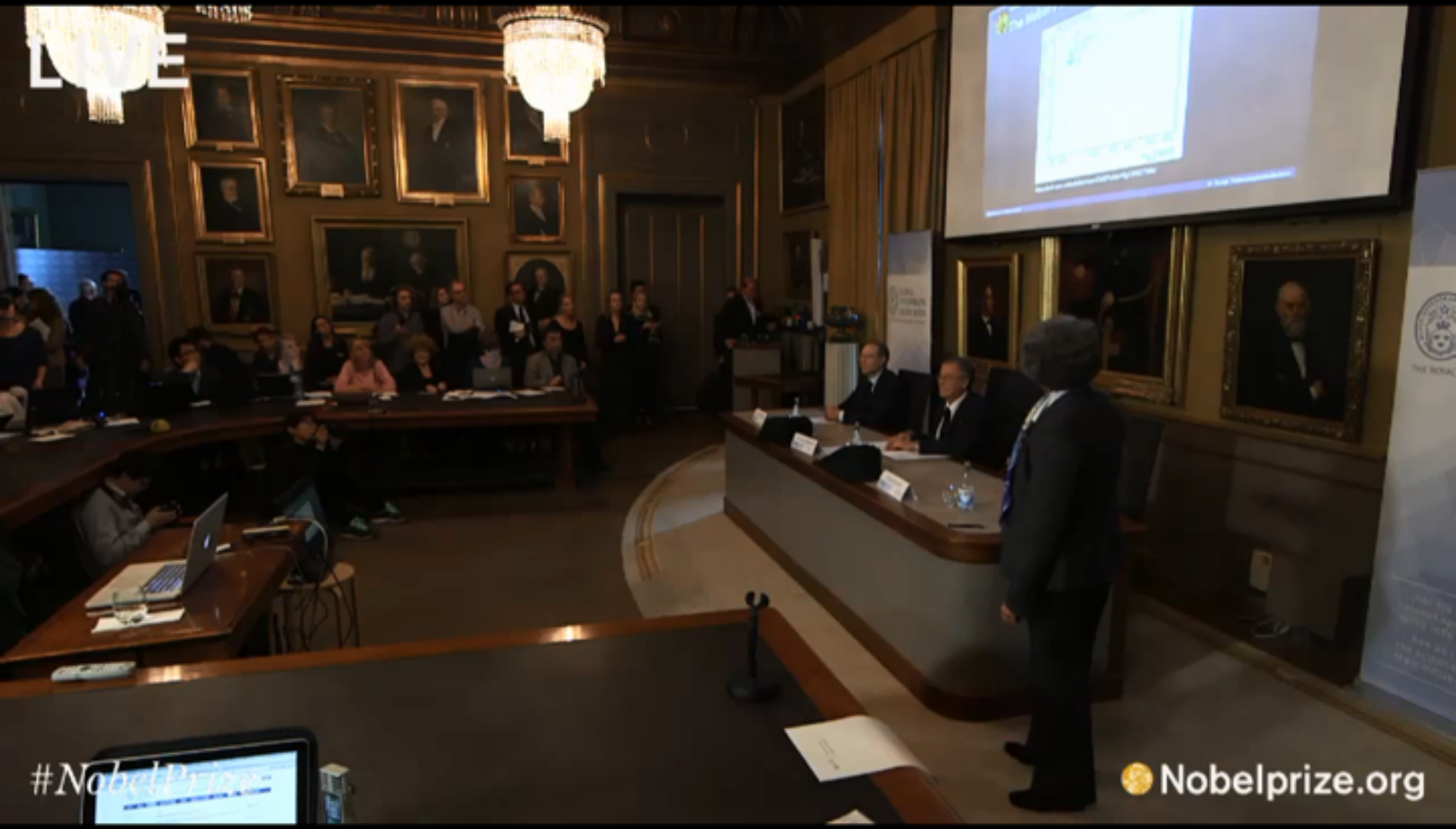


$H \rightarrow Z\,Z^*$
$\rightarrow$ 4 leptons



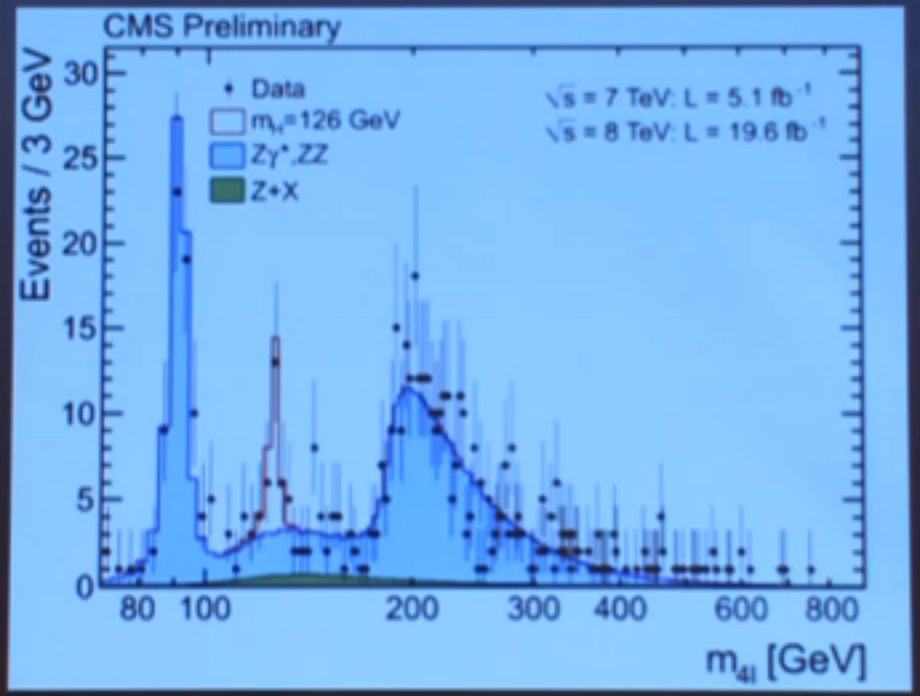
Annonces simultanées de la découverte d'un nouveau boson ressemblant au Higgs


CMS Preliminary
Data
m_H=126 GeV
Zγ*,ZZ
Z+X
$\sqrt{s}$ = 7 TeV: L = 5.0 fb^{-1}
Events / 3 GeV
0
5
10
15
20
25
30
80
100
200
300
400
600
800
m_{4l} [GeV]


#NobelPrize
Nobelprize.org

The Nobel Prize in Physics 2013

KUNGL. VETENSKAPS AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Evolution of the signal for the new particle in 2011 and 2012

https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/Hig13002TWiki

Prix Nobel 2013 pour Higgs et Englert !

- Pour la prédiction théorique
- Confirmée par la découverte

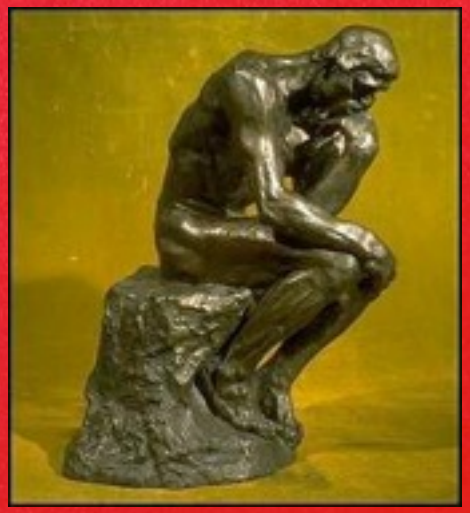
Et maintenant ?

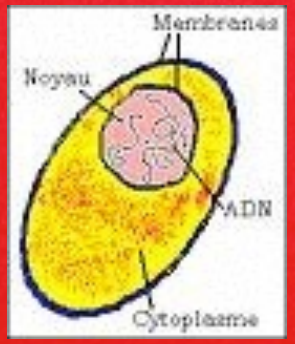
L'aventure continue

- La quête du "boson de Higgs":
  une épopée scientifique et humaine
  hors du commun
- Triomphe de l'intelligence humaine:
  Prix Nobel en 2013 !

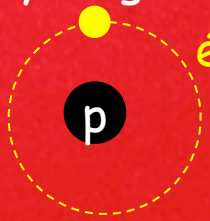
- Des chiffres uniques dans la démarche scientifique:
  - Le mécanisme dès 1964 … (peu de particules connues).
  - La durée de la quête: 48 ans.
  - Des collaborations mondiales.
  - Le "dispositif" le plus complexe jamais conçu par l'Homme.
  - Des calendriers sans équivalents:
    - Conception, construction et mise en route: 1989-2008.
    - Fonctionnement et améliorations: 2009-2034.

Voyage vers l'infiniment petit

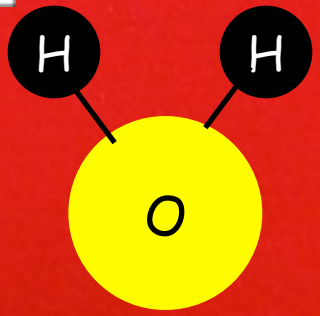




Hydrogène



Eau: H_2O



Noyaux

Quark up

Combien encore ?

Homme ~1 m

Cellule ~µm

Molécule ~nm

Atome ~Å

Noyau ~10 fm

Nucléon ~ fm

Quarks <am

Le champ de Higgs est présent partout

Il interagit avec les particules et leur donne une masse

Il interagit avec les particules et leur donne une masse

On peut exciter ce champ …

et faire apparaître le « boson de Higgs »