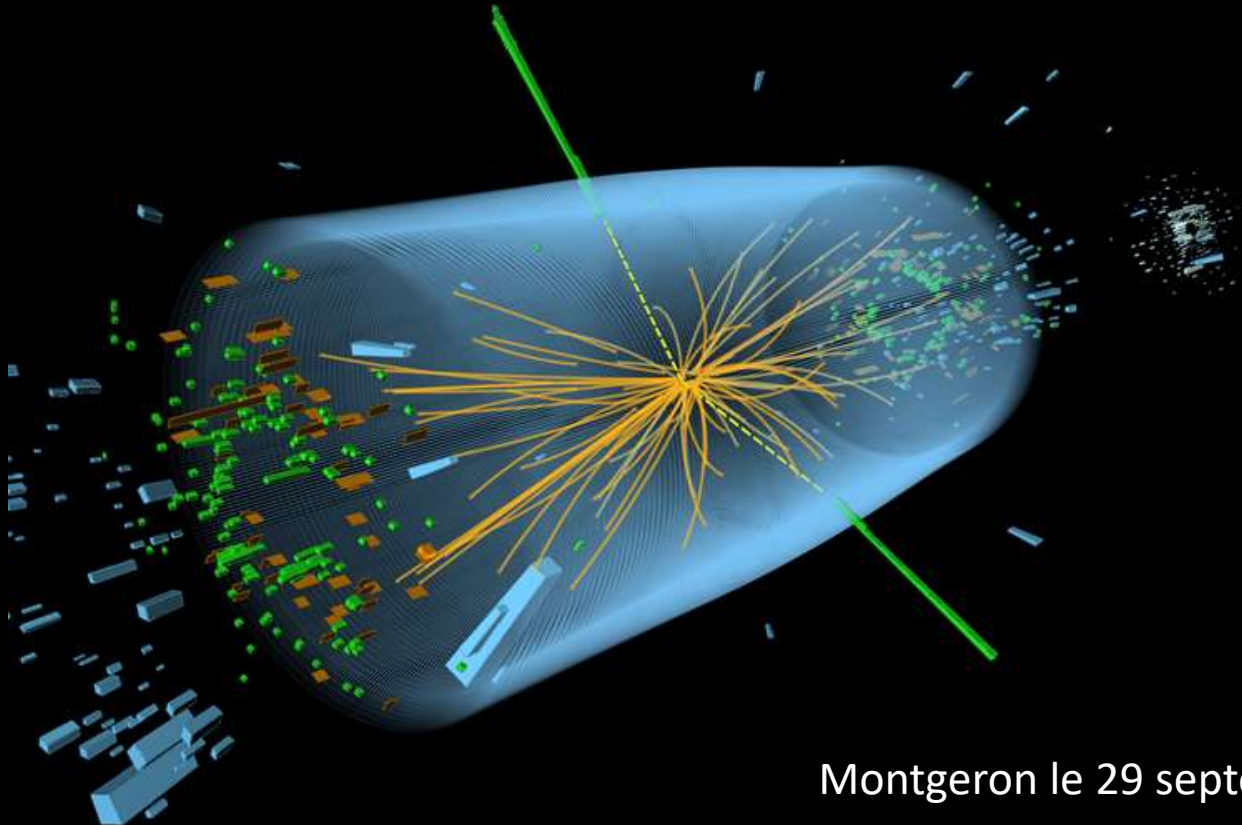


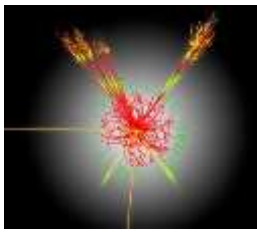
L'AVENTURE DU COLLISIONNEUR LHC ET LA RECHERCHE DU BOSON DE HIGGS



Claude Guyot, CEA/IRFU/ Saclay

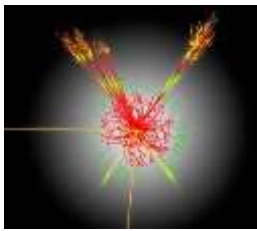


Montgeron le 29 septembre 2019



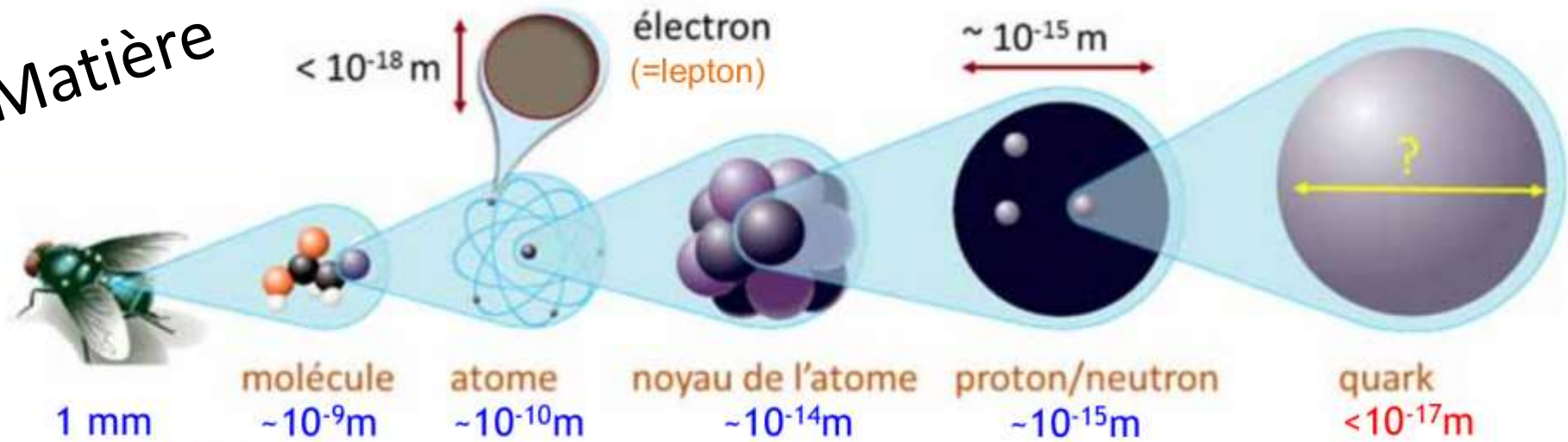
Plan de l'exposé

- Particules et forces
- Le Modèle Standard de la physique des particules
- Le boson de Higgs
- Les insuffisances du Modèle Standard et la nécessité d'une nouvelle physique
- Les accélérateurs et les expériences en physique des particules
- Comment produire et détecter le boson de Higgs
- Le projet LHC
- Les expériences ATLAS et CMS
- La découverte du boson de Higgs
- Est-ce bien le boson de Higgs prédit par le Modèle Standard?
- Le boson de Higgs et les grandes questions de la physique des particules
- Le futur



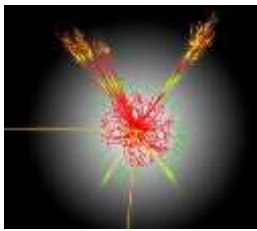
Particules et forces

Matière



Le proton :
n'est pas élémentaire ; il est constitué de 3 quarks

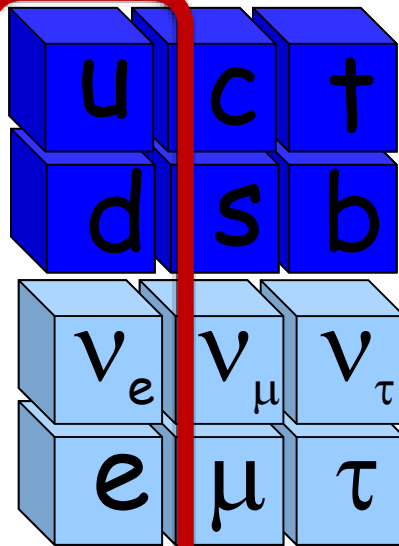
Electrons & quarks :
sont des particules élémentaires



Particules

matière

Ouarks



Leptons

Matière ordinaire (stable)



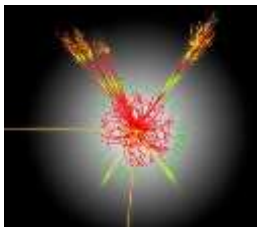
Symétrie

Antiquarks



Antileptons

antimatière

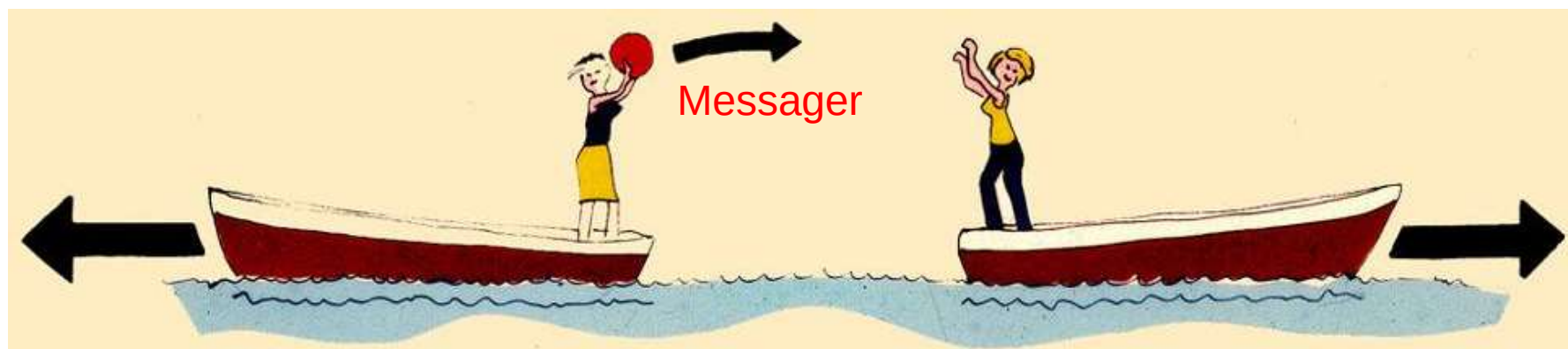


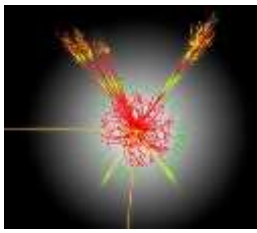
Forces

forces

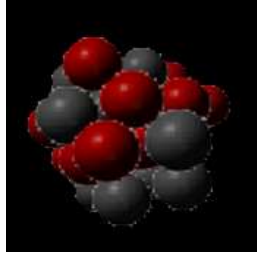


interactions





Forces

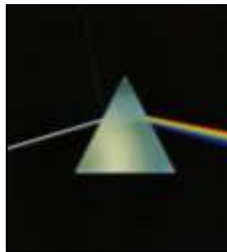


Interaction Forte

Messenger

Intensité

Gluons (8) (1)



Électromagnétisme
Électricité

Photons (γ) ($\sim 10^{-2}$)

Rayons γ , X, UV, lumière,
IR, micro-onde, radio...
Cohésion des atomes, molécules...



Faible

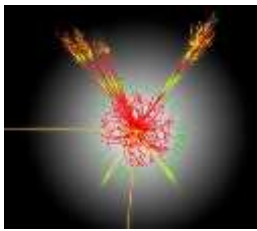
W^+ , W^- , Z ($\sim 10^{-5}$)

Ex: désintégration bêta $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

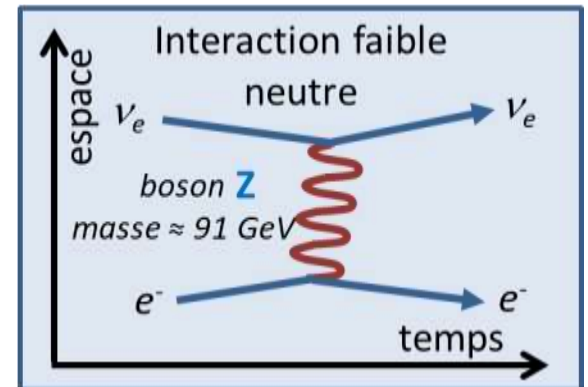
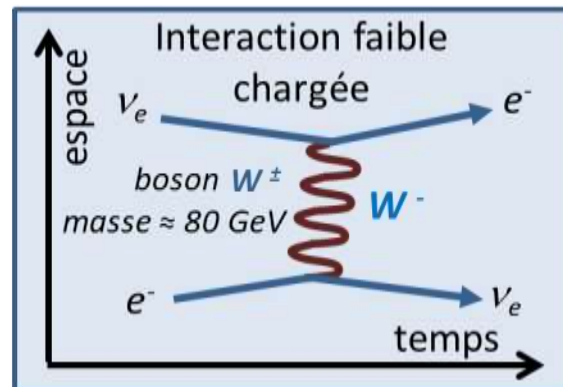
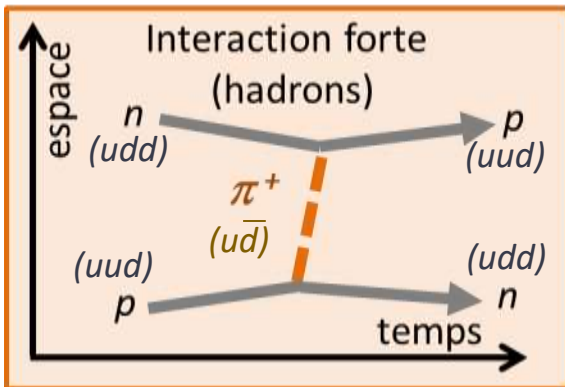
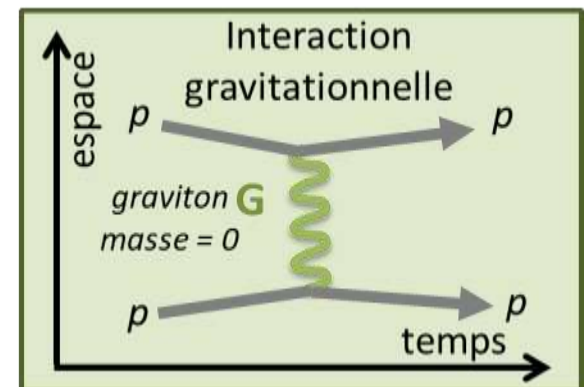
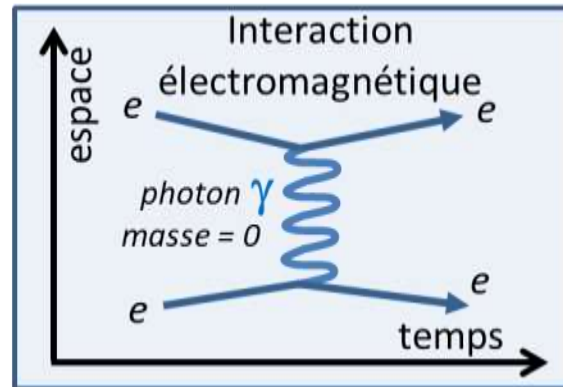
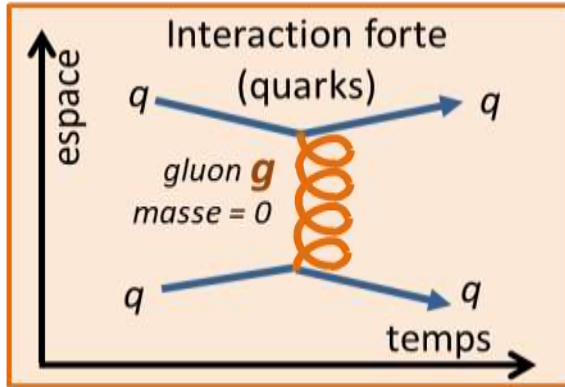


Gravitation

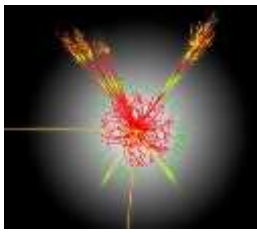
Graviton(?) ($\sim 10^{-38}$)



Particules et forces



NB: masses exprimées en unité d'énergie (eV: électron-Volt) suivant la relation $E = mc^2$



Forces, interactions et champ

Force $\Leftrightarrow$ interactions
Également associé à la notion de champ

Le **champ** est un objet mathématique qui associe aux points de l'espace des valeurs (température, direction et sens du vent,...)

Champ de température (scalaire $\rightarrow$ nombre)

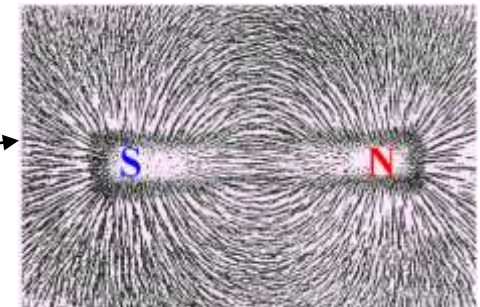
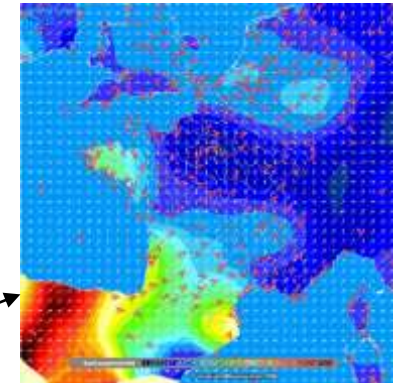
Champ de vitesse du vent (vectoriel $\rightarrow$ vecteur)

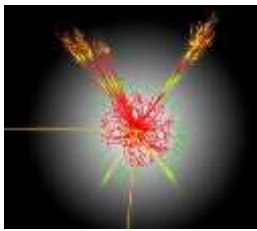
Champ électrique (vectoriel)

Champ magnétique (vectoriel)

Champ de gluons (vectoriel)

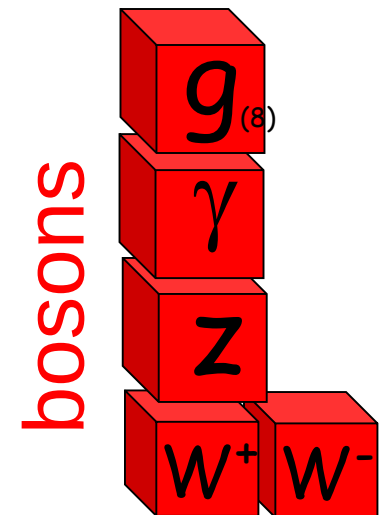
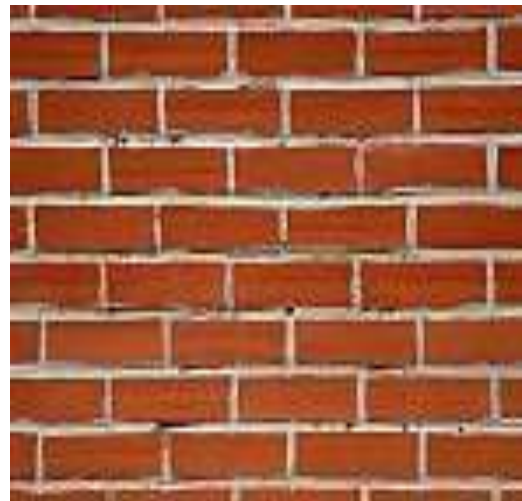
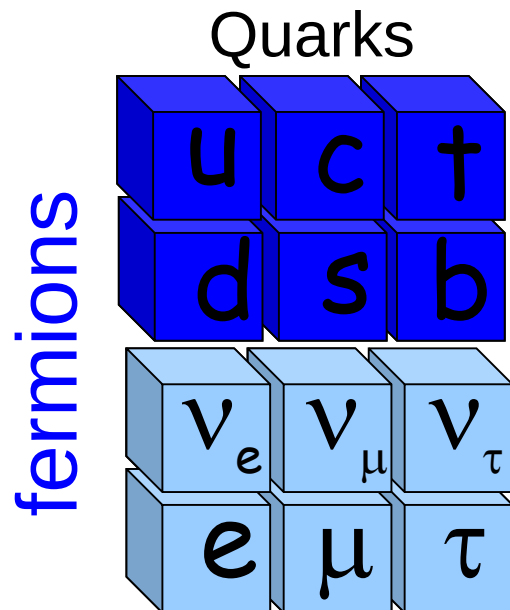
Ch	Interaction électromagnétique	$\Rightarrow$	Champ électromagnétique (photon)
	Interaction forte	$\Rightarrow$	Champs de gluons
	Interaction faible	$\Rightarrow$	Champs de Z et W

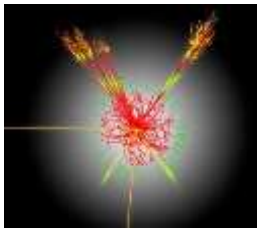




Le Modèle Standard (MS)

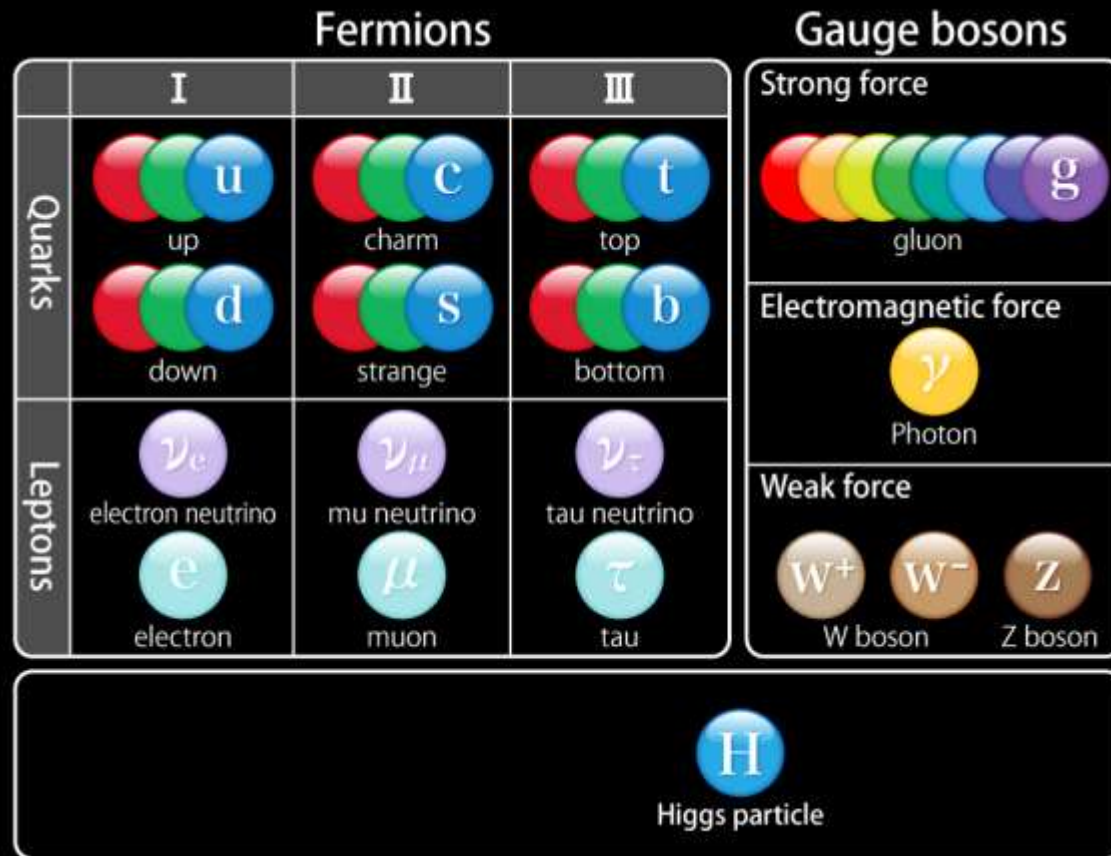
matière & forces





Le Modèle Standard (MS)

matière & forces (champs vectoriels)



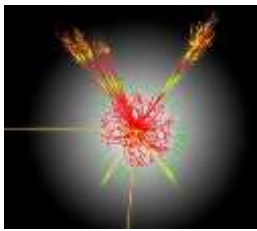
Théories mathématiques sous-jacentes:

-Chromodynamique quantique (quarks-gluons) basée sur le groupe de symétrie de jauge $SU(3)$ de la « couleur »

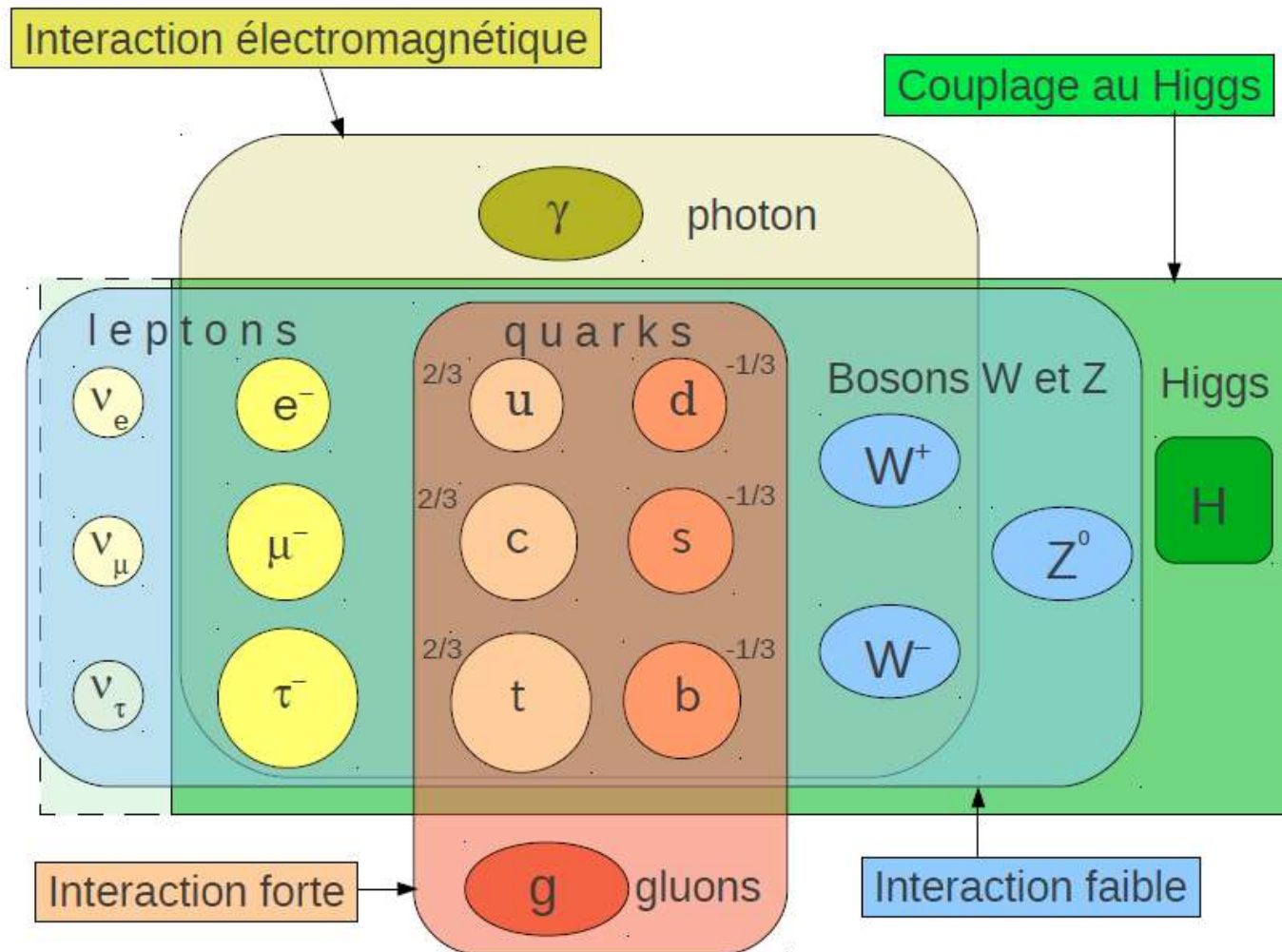
-Théorie de jauge électrofaible (interactions électromagnétique et faible) basée sur le groupe de symétrie $SU(2) \times U(1)$

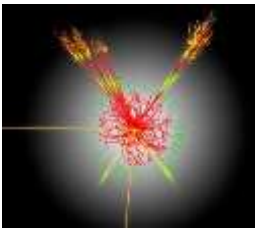
- Mécanisme BEH de brisure de symétrie électrofaible

Champ
scalaire



Le Modèle Standard (MS)





Le Modèle Standard : Les masses

GeV

100

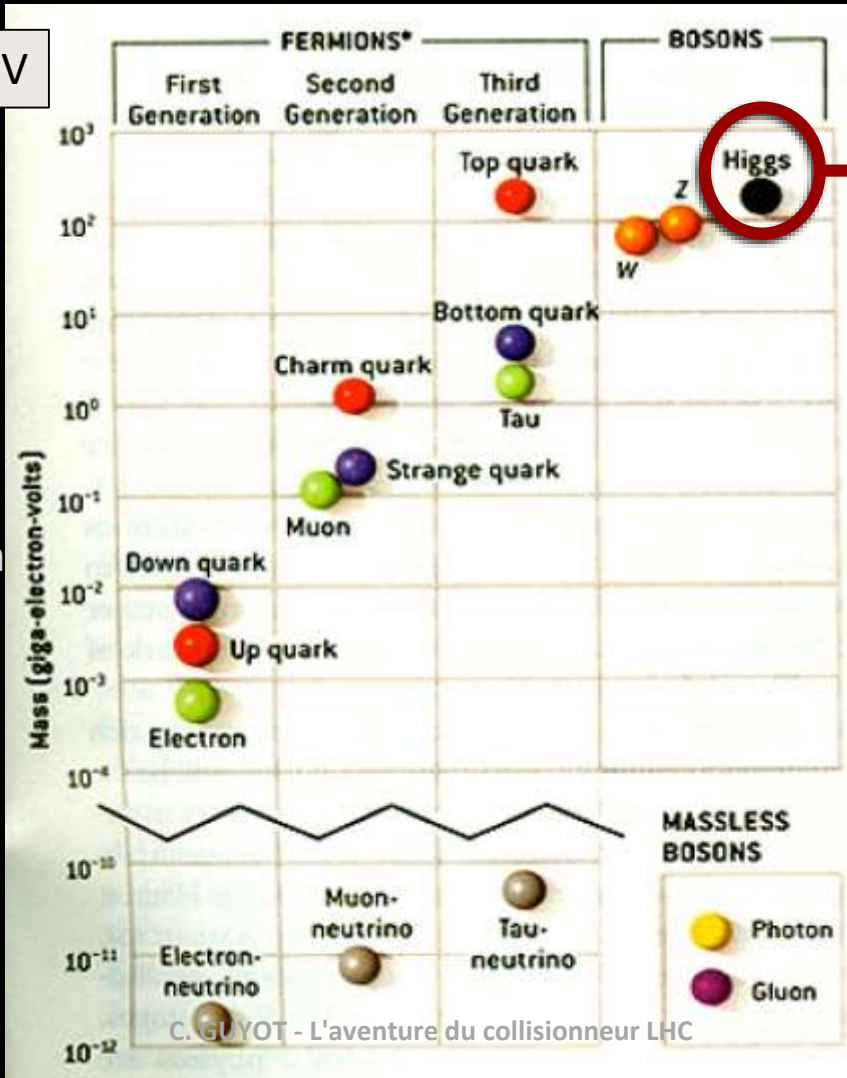
Masse du proton ~ 1 GeV

1

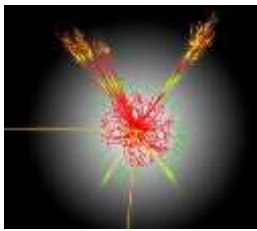
Ma

0,001

10^{-11}



C. GUYOT - L'aventure du collisionneur LHC



Pourquoi le Boson de Higgs

1960 Première tentative d'unification de l'électromagnétisme et de l'interaction faible



Faible



Électromagnétisme

$W^+ W^- Z$

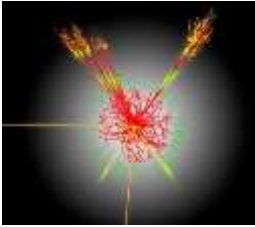
γ

} interaction électrofaible

Question centrale du (pré)Modèle Standard:

La théorie mathématique (théorie quantique des champs de jauge) qui décrit les particules et leurs interactions prévoit a priori une masse nulle pour tous les bosons vecteurs (avec une portée infinie de la force associée).

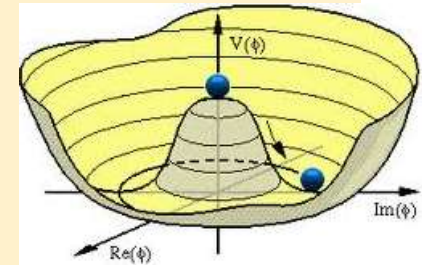
Les expériences montrent que la force faible (W^+, Z) est de très courte portée, compatible avec des masses de boson d'environ 100 GeV (~100 fois la masse du proton).

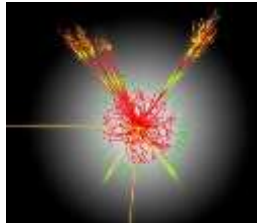


Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

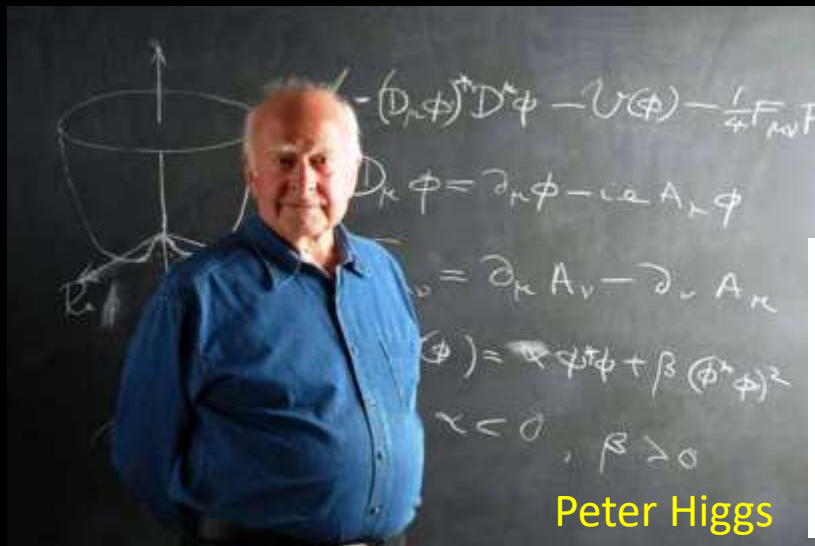
La solution a cette énigme a été apportée en 1964 par le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (P. Higgs; F. Englert - R. Brout):

- Un nouveau champ scalaire (appelé champ de Higgs) remplit tout le vide de l'espace-temps.
- Ses propriétés sont telles que le vide (minimum d'énergie) correspond a une valeur non nulle de ce champ.
- Les particules interagissent avec ce champ, ce qui ralenti leur mouvement (vitesse $< c$, donc effet équivalent a celui d'une masse).
 - L'action du champ de Higgs est l'équivalent d'une sorte de viscosité du vide (mais sans l'effet dissipatif).
- L'excitation quantique de ce champ (au voisinage de son minimum d'énergie) est une particule appelée boson de Higgs (ou parfois BEH).





Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs



Peter Higgs

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

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

(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction: by a gauge vector meson we mean a

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

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,

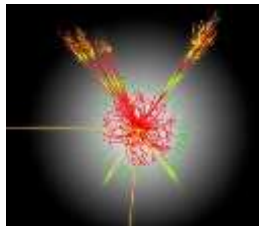
about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

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

$$\{ \partial^2 - 4\omega_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta \varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

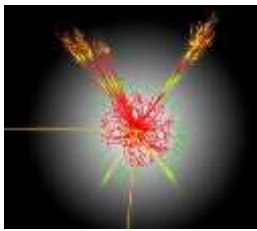
$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e \varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta \varphi_1) - e \varphi_0 A^\mu \}, \quad (2c)$$





Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs est la clef de l'unification électrofaible en expliquant la différence de masse entre les bosons W/Z et photon γ tout en fournissant un moyen de donner une masse aux fermions.



Le Boson de Higgs



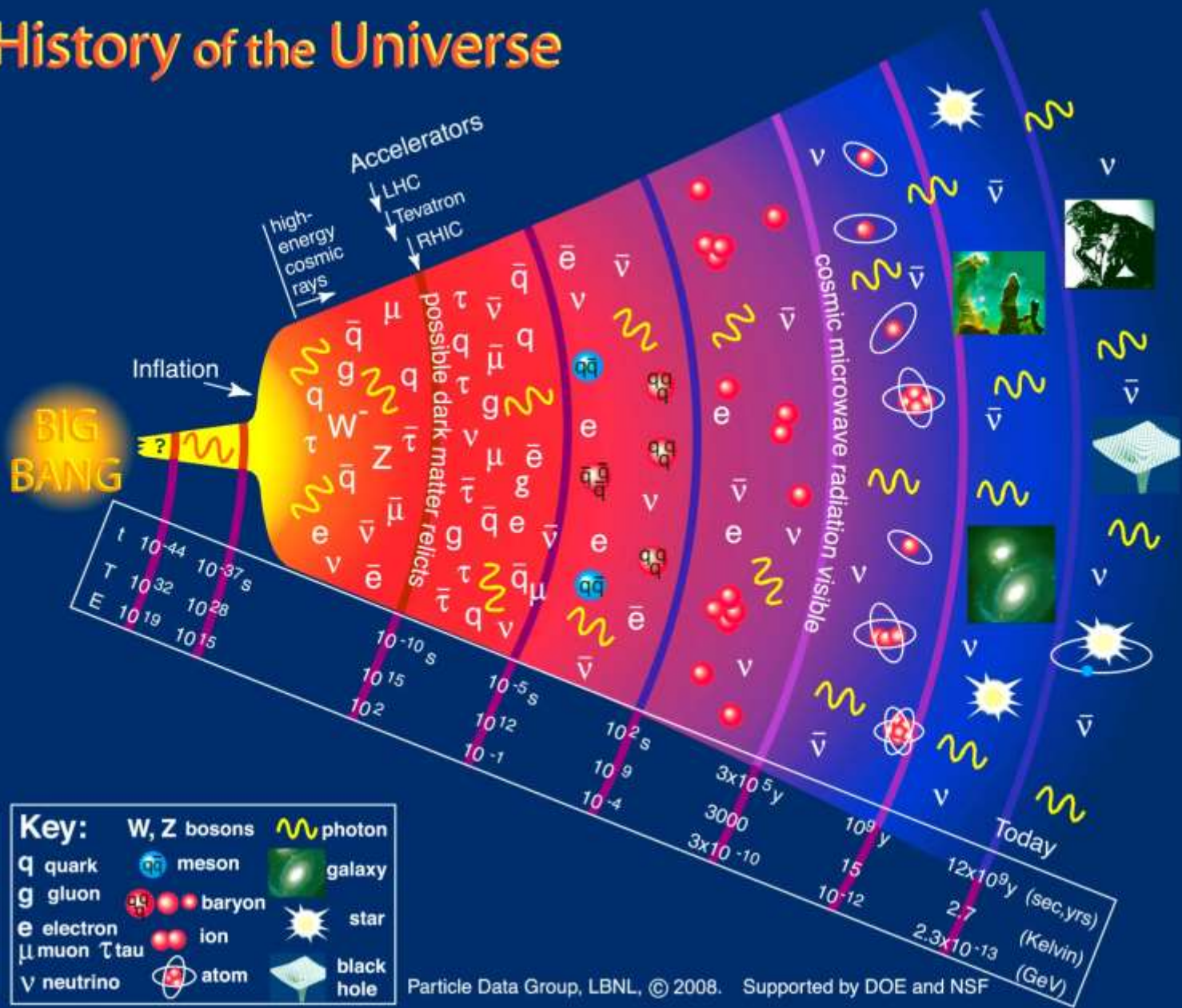
Une rumeur est lancée dans la pièce remplie par le « champ » de Higgs



Un amas (une « excitation » du champ) se forme, c'est une nouvelle particule

Le vide (quantique) constitué par le champ de Higgs peut « s'auto-condenser » (si on injecte suffisamment d'énergie localement), c'est le boson de Higgs. C'est ce qu'on fait au LHC dans les collisions proton-proton.

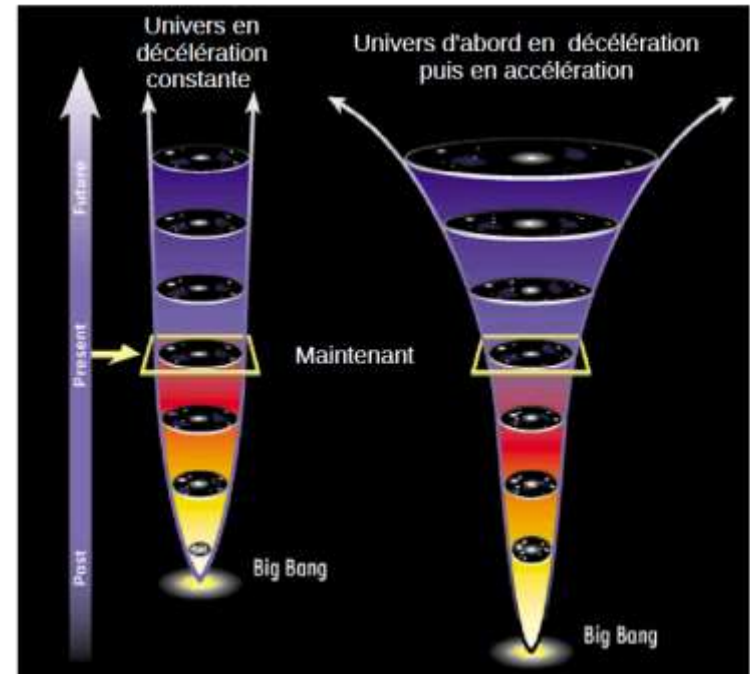
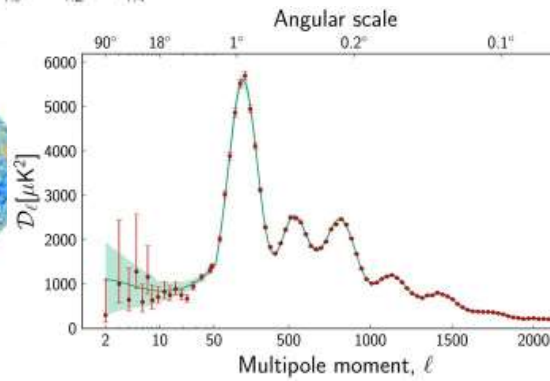
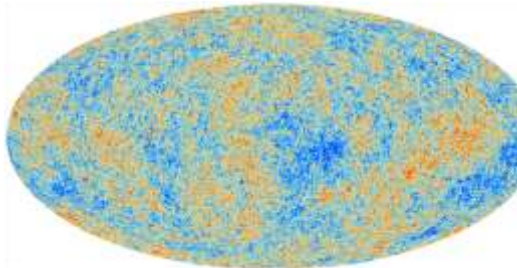
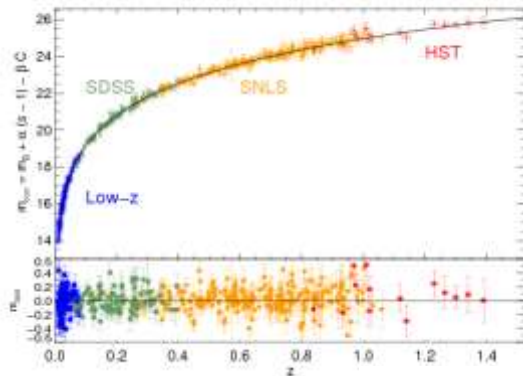
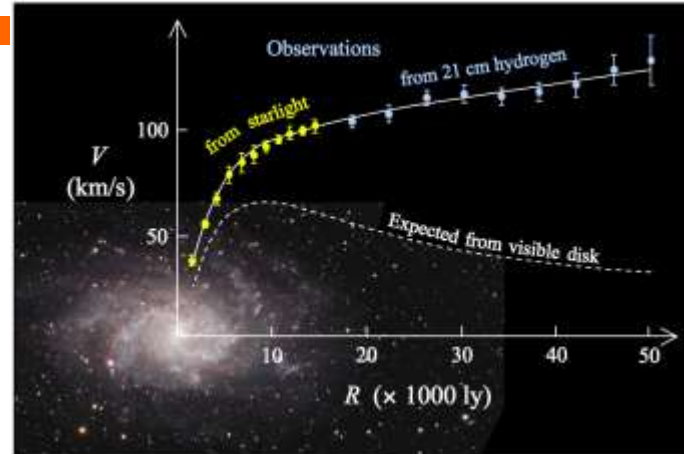
History of the Universe

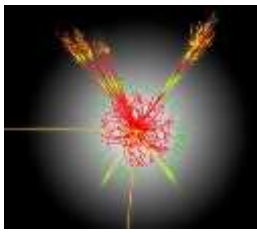


Ce que le Modèle Standard n'explique pas(1)

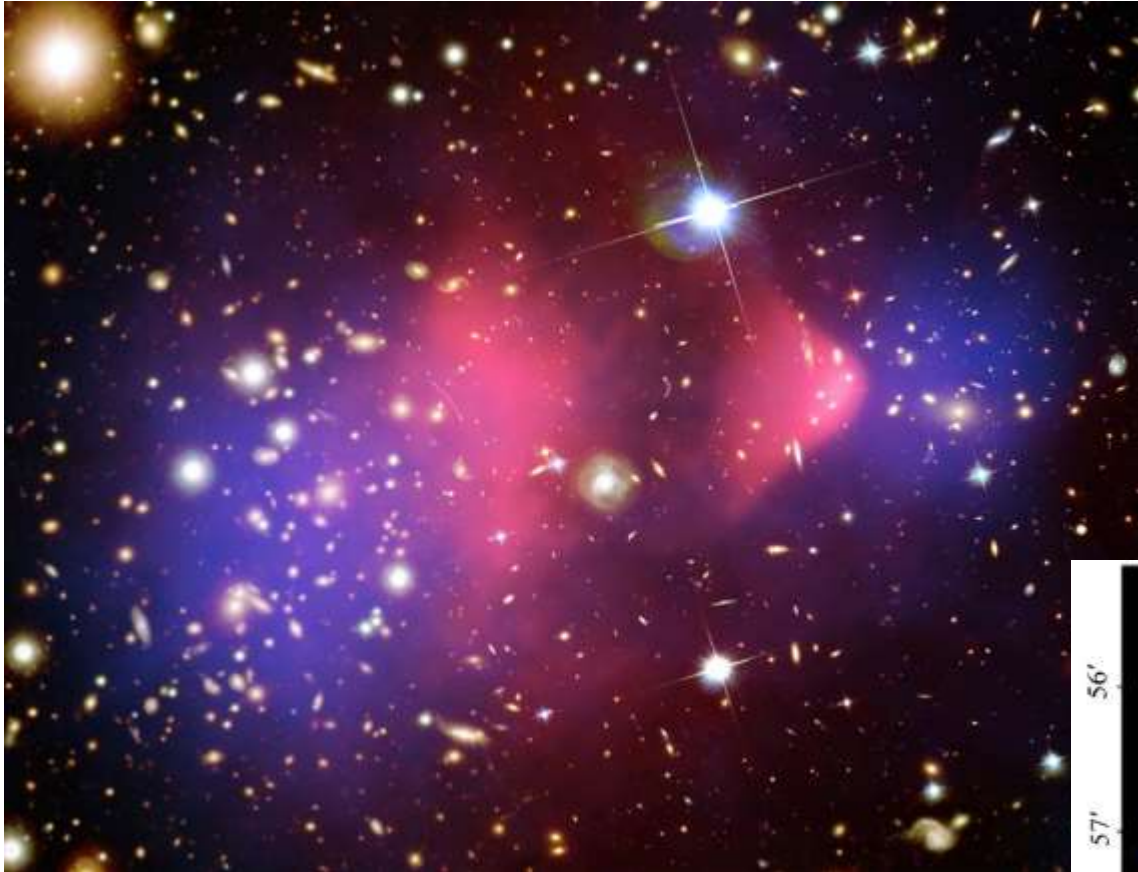
❑ La matière noire

❑ L'énergie noire

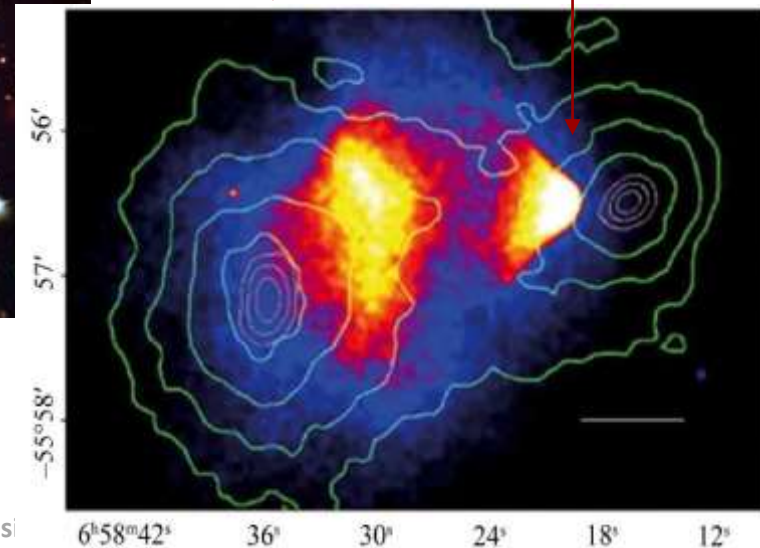




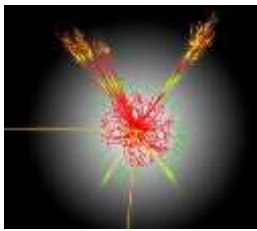
La matière noire



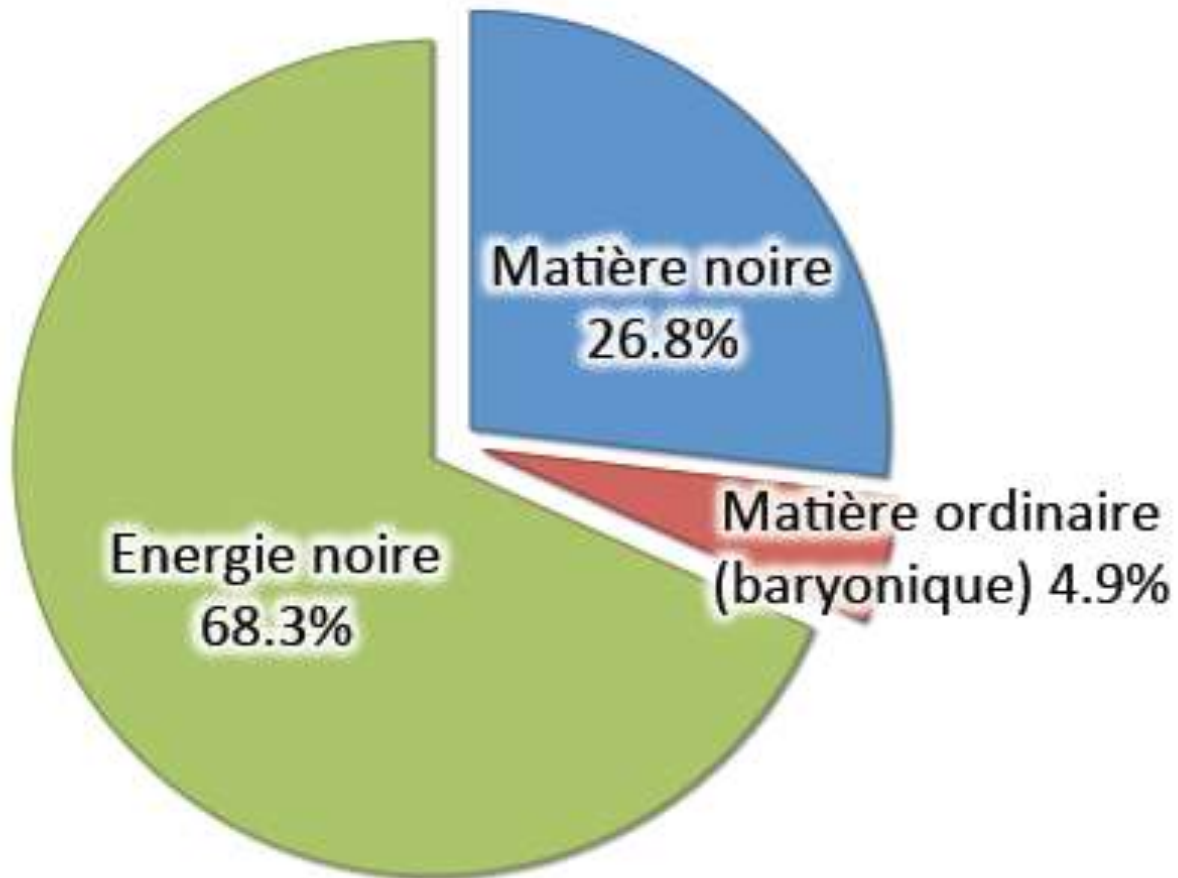
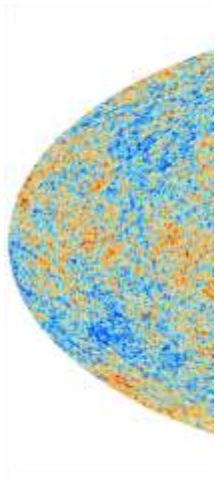
Matière visible
Matière noire



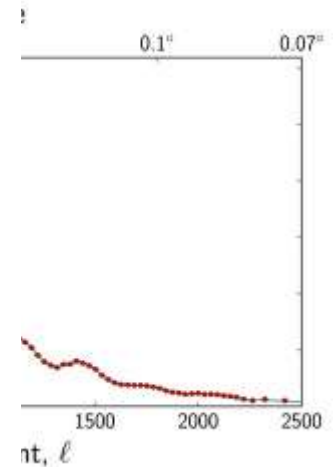
Bullet cluster (amas de la Balle):
Collisions de deux amas de galaxies



Ce que le modèle standard n'explique pas(2)



ire



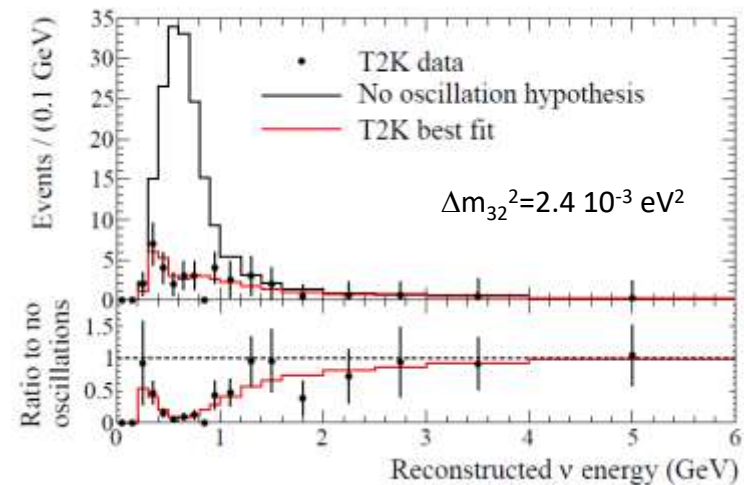
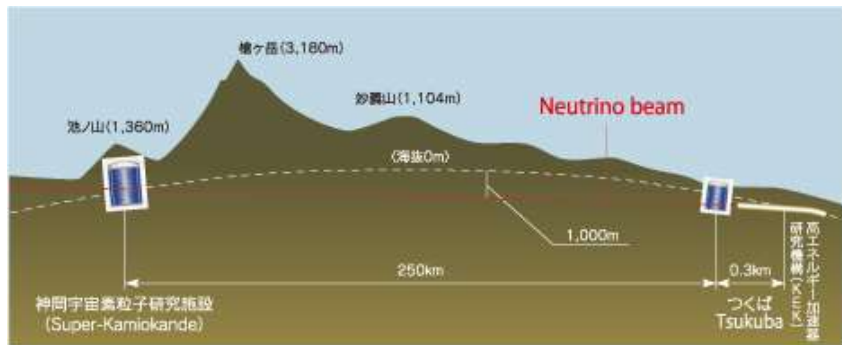
Ce que le modèle standard n'explique pas (3)

❑ La gravitation

- Pas encore de théorie satisfaisante de la gravité quantique

❑ La masse des neutrinos

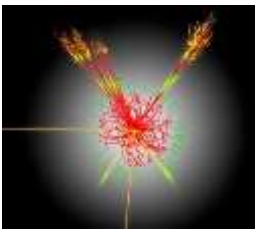
- Expérience SuperKamiokande



❑ L'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers

- La violation de CP observée dans les désintégrations des mésons K^0 et B^0 est insuffisante

❑ L'absence de violation de CP dans les interactions fortes

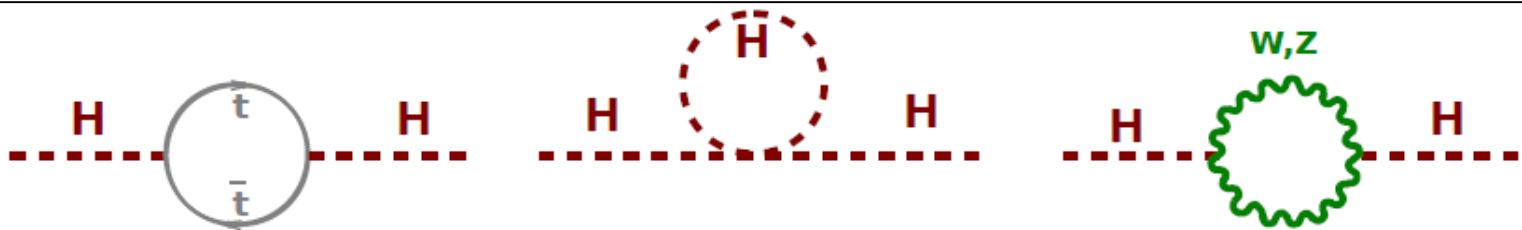


Ce que le modèle standard n'explique pas (3)

❑ La masse du boson de Higgs

- Pourquoi cette masse n'est-elle pas de l'ordre de $\Lambda \sim 10^{15}$ GeV

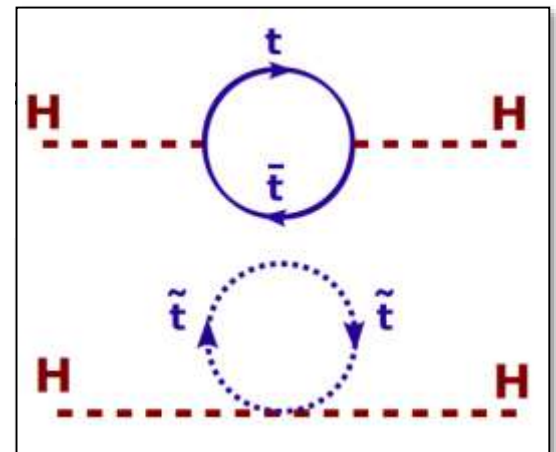
Diagrammes à une boucle virtuelle contribuant aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.

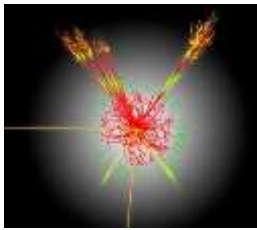


❑ =>Théorie au-delà du Modèle Standard:

- Supersymétrie?

Diagrammes à une boucle contenant le quark top (haut) et son partenaire supersymétrique, le stop (bas), contribuant aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.



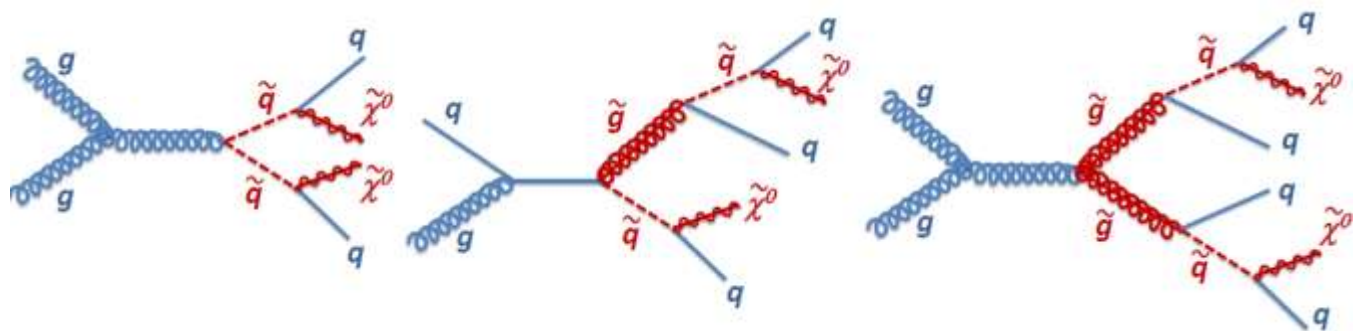
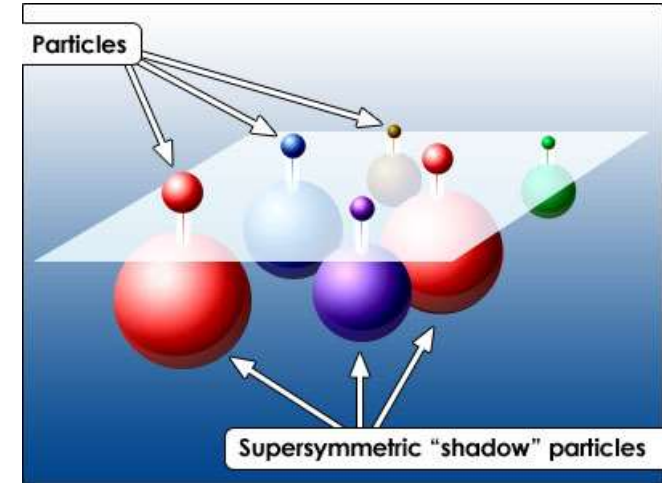
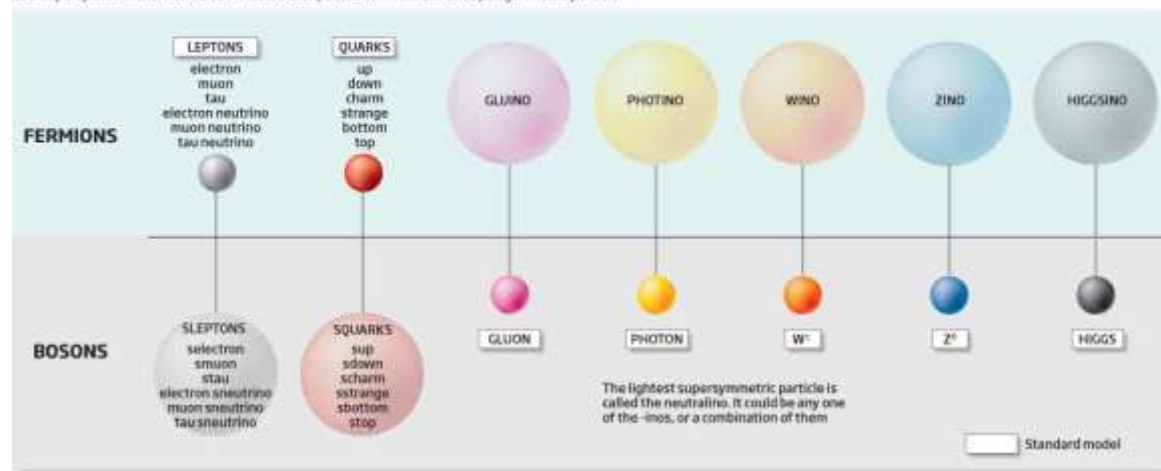


La supersymétrie

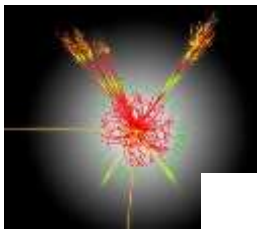
Particle zoo

Particles are divided into two families called bosons and fermions. Among them are groups known as leptons, quarks and force-carrying particles like the photon. Supersymmetry doubles the number of particles, giving each fermion a massive boson as a super-partner and vice versa. The LHC is expected to find the first supersymmetric particle

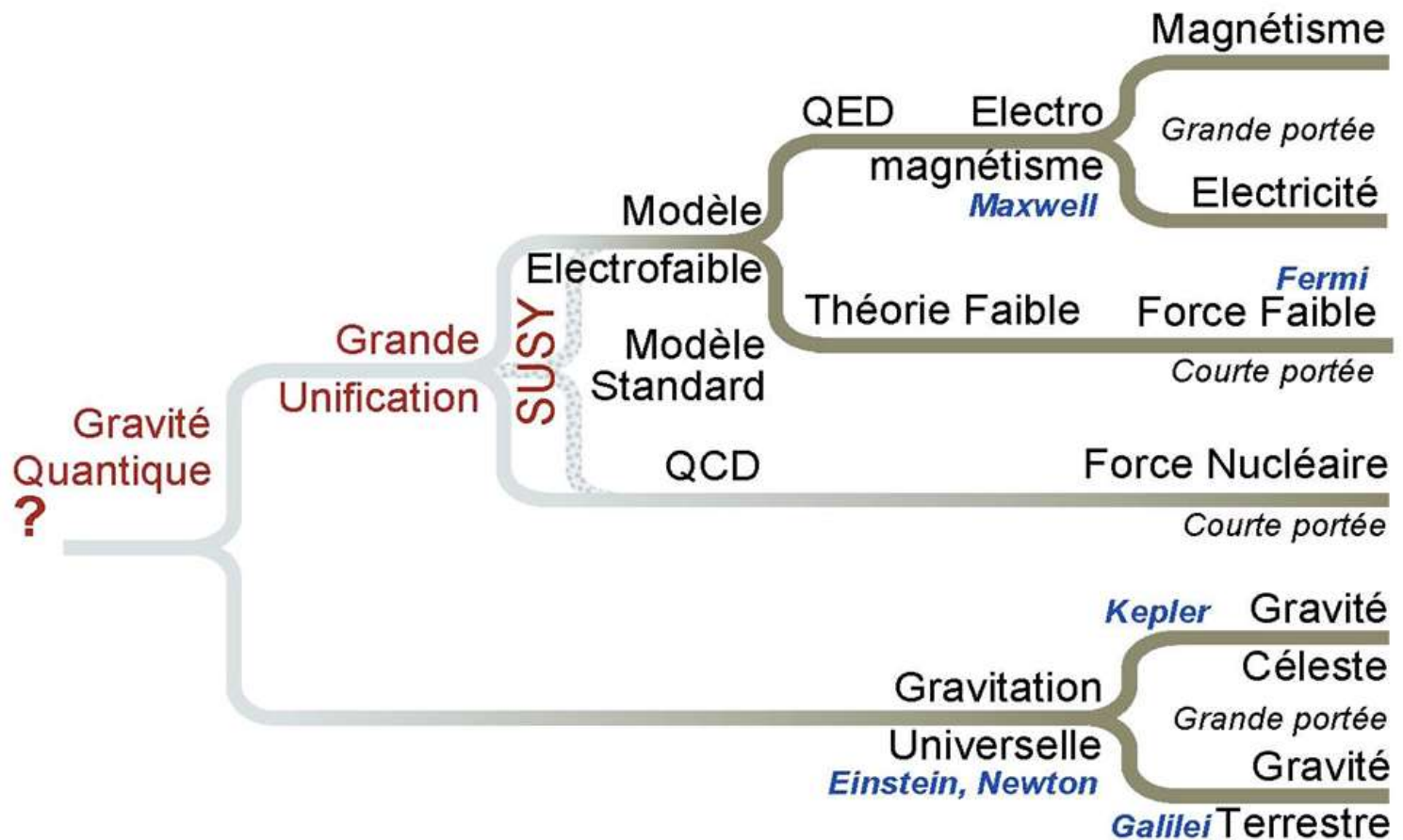
© NewScientist



$\tilde{\chi}^0$ neutralino: particule supersymétrique la plus légère $\rightarrow$ stable (candidat matière noire)

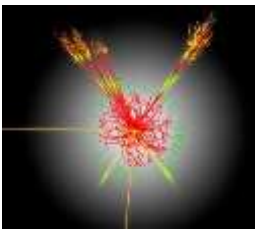


La nouvelle physique?



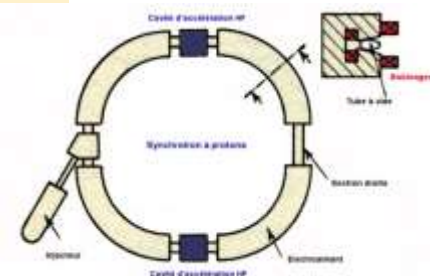
Theories:

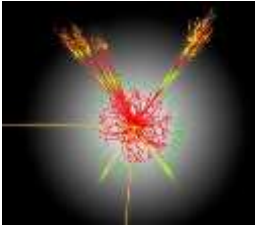
CORDES? RELATIVISTIQUE/QUANTIQUE CLASSIQUE



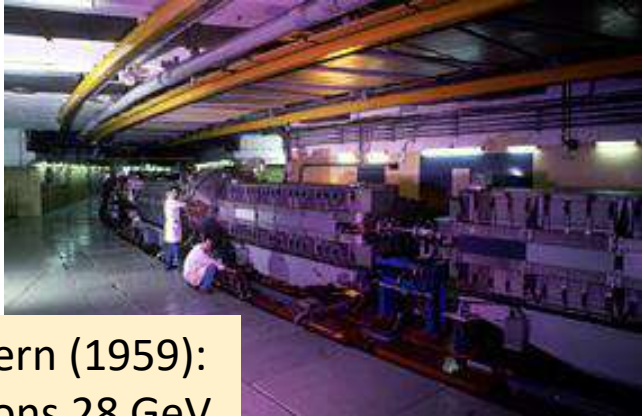
Les expériences en physiques des particules

- ❑ Comment « sonder » la matière à toute petite échelle?
 - Avec des particules connues de grande énergie.
- ❑ Microscope optique
 - photons de 0,5 eV => résolution ~ 1 micron: cellule
- ❑ Microscope électronique
 - électrons de ~10 keV => 0,02 nanomètre: atome
- ❑ Au-delà (noyau atomique, quarks): *rayons cosmiques*, accélérateurs
 - 1 GeV => 10^{-16}m < taille du proton
- ❑ 2^e moitié du 20^e siècle: succession d'accélérateurs de plus en plus grands (puissants)





Quelques accélérateurs du CERN



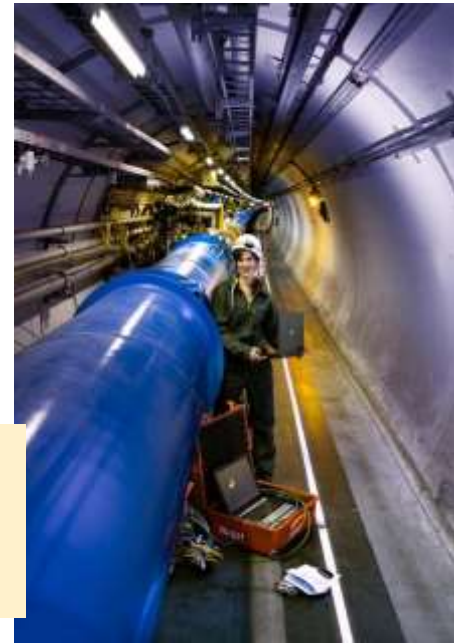
PS Cern (1959):
protons 28 GeV
Cibles fixes
Diamètre 72 m

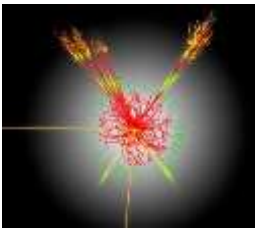
SPS(1976-...):
Protons 400 GeV
Cibles fixes.
Collisions
protons-antiprotons
270+270GeV (1981-84).
Diamètre 2,3 km



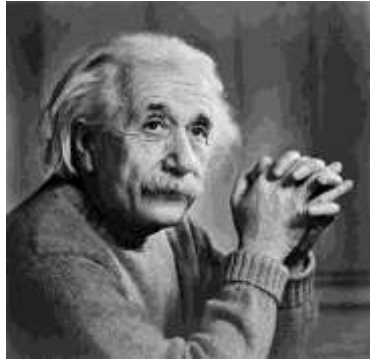
LEP : collisions $e^+ e^-$
100 + 100 GeV
Diamètre 9 km
Tunnel à 100m sous
terre
1989- 2000

LHC: collisions
 $p + p$, 7 + 7 TeV Tunnel du LEP
2008





Comment produire le boson de Higgs

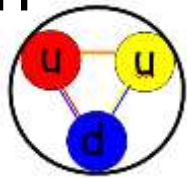


$$E = mc^2$$

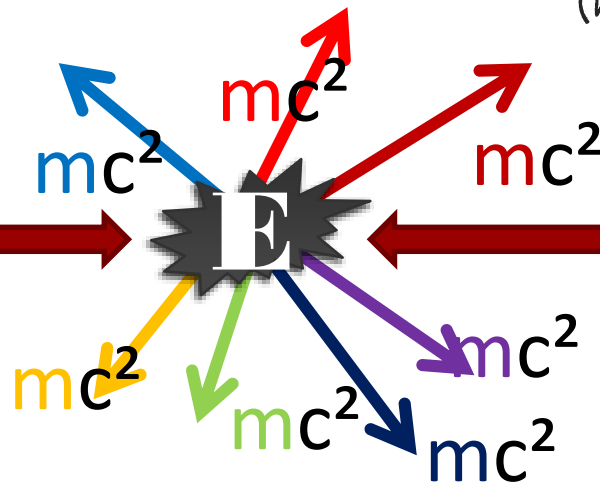
Energie $\Leftrightarrow$ Masse

(masse = matière)

proton



γmc^2



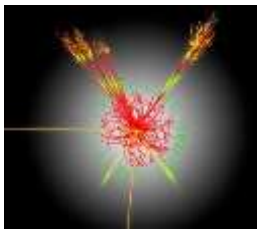
γmc^2

proton

Au LHC: production du boson de Higgs principalement par collision de 2 gluons

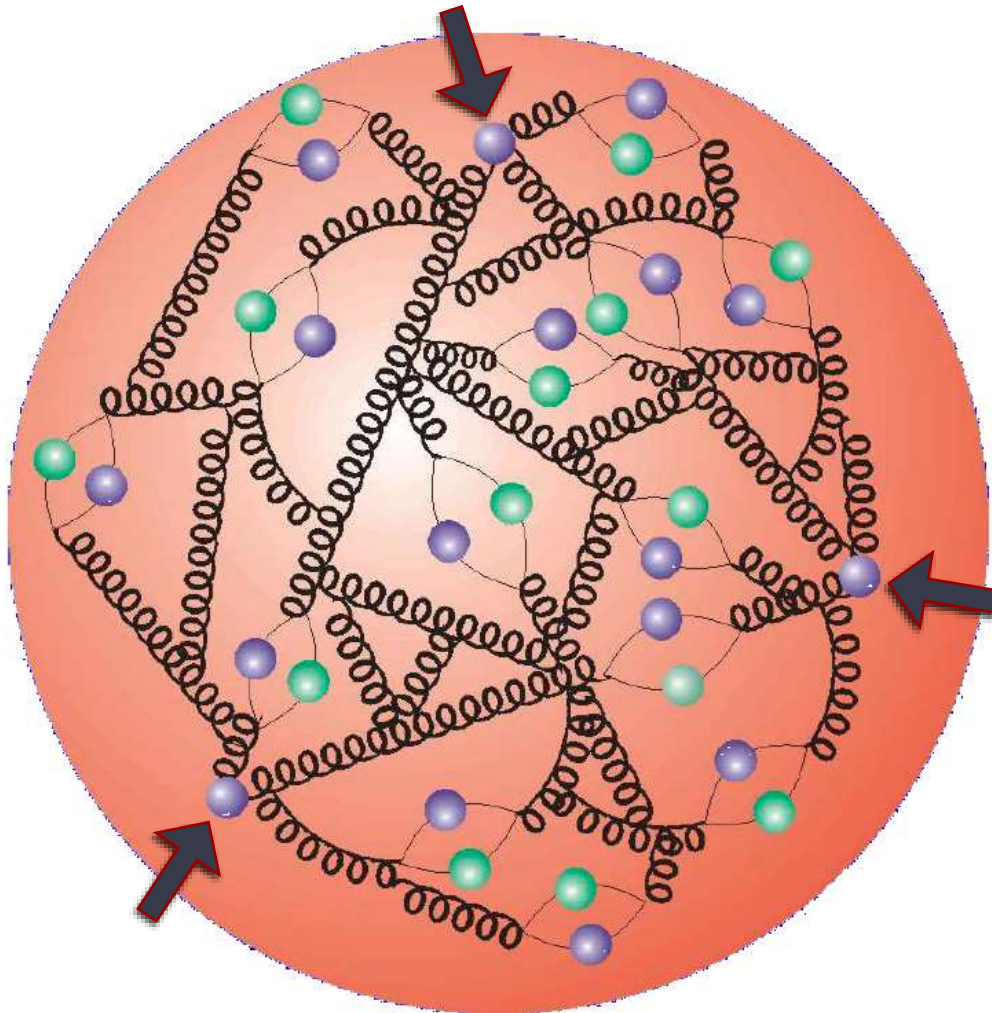
NB: electron-Volt (eV) = unité de mesure des énergies et masses dans cette présentation (1 eV $\approx$ 1,6 10⁻¹⁹ J)

- 1 GeV = 10⁹ eV $\approx$ masse du proton
- 1 TeV = 1000 GeV



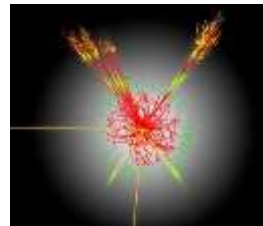
La masse des nucleons

le proton
masse d'
masse de

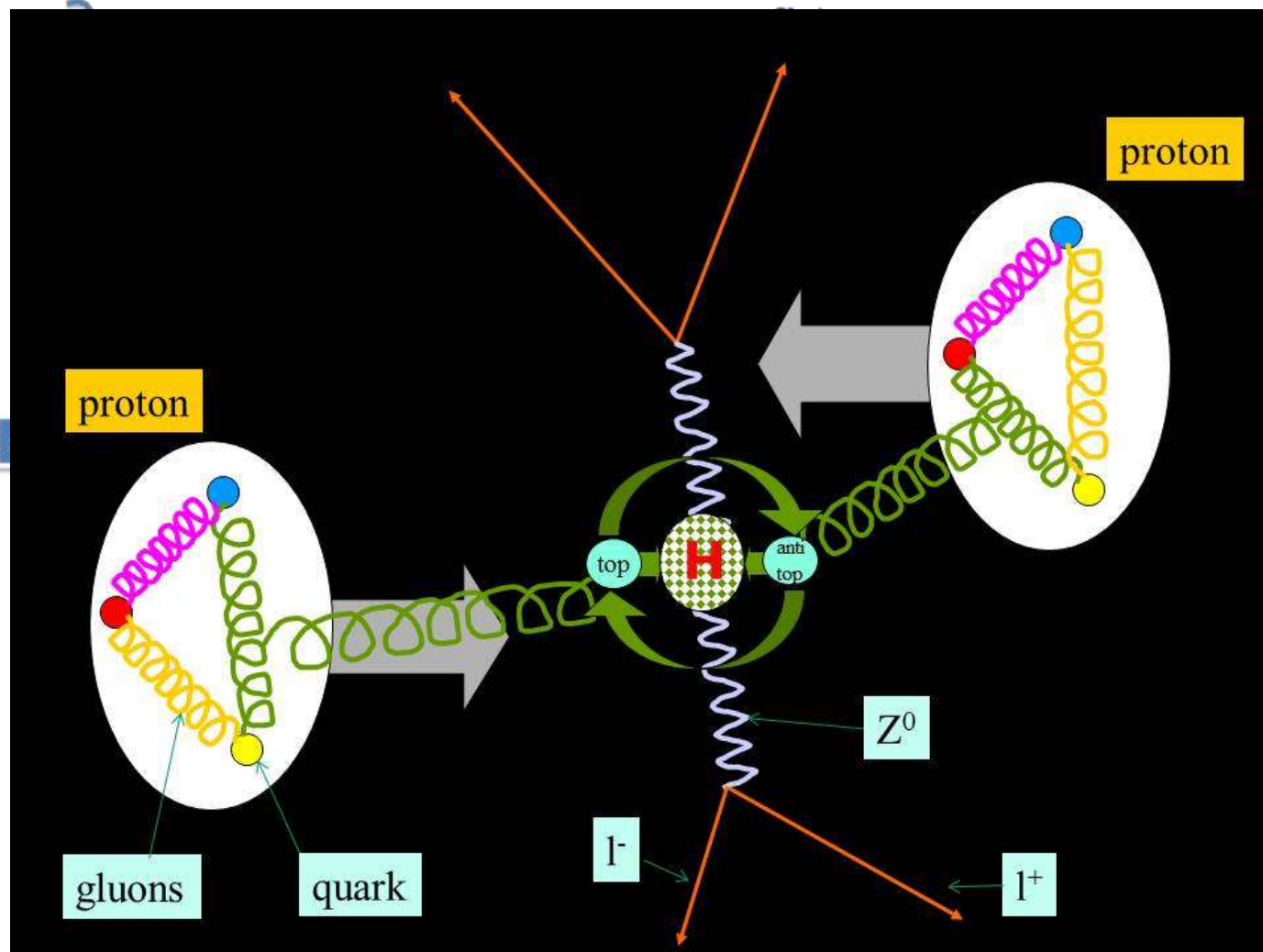


la n
du |
ince

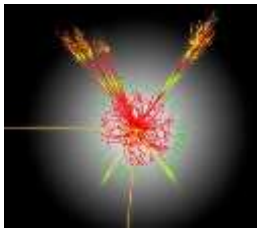
%)
ons
!



Comment produire le boson de Higgs



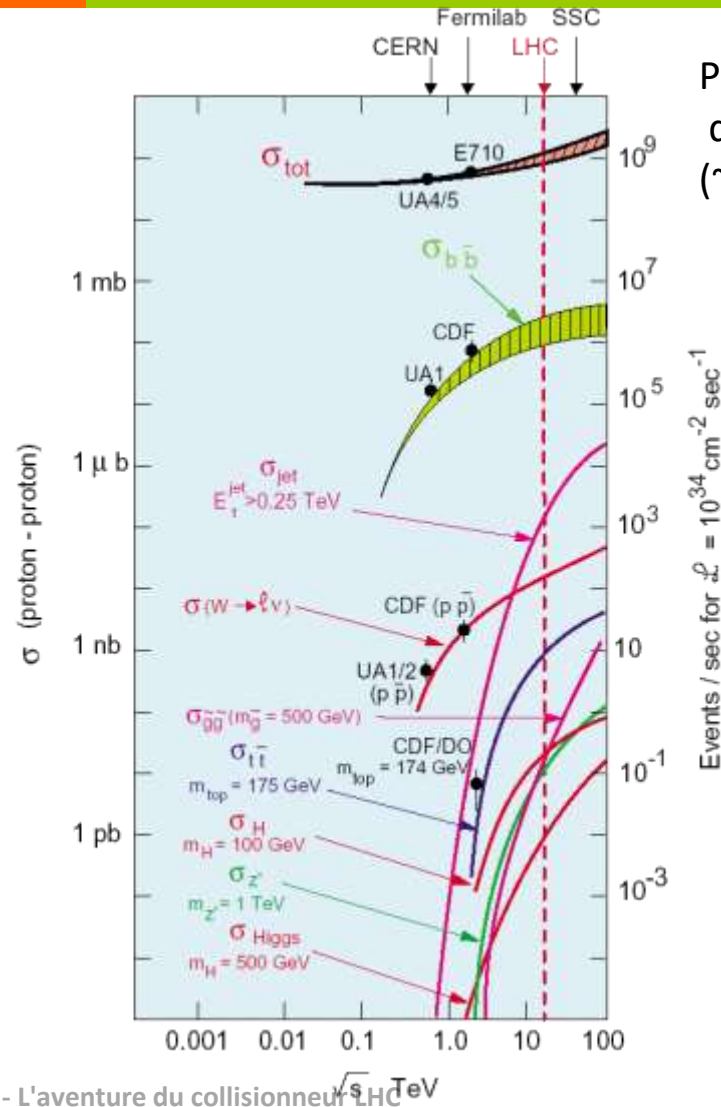
Comment produire le boson de Higgs



Le boson de Higgs

- ❑ Pas vu au LEP, car l'énergie du LEP est trop faible pour produire une si grande masse ($E=mc^2$)
- ❑ Pas vu au Tevatron (Fermilab), car s'il est produit, il ne l'est pas en quantité suffisante pour conclure

Il faut donc un collisionneur avec une énergie plus grande, et un très grand nombre de collisions: le LHC!

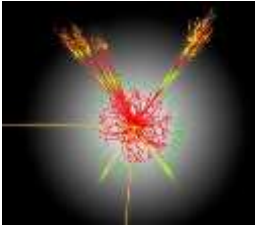


Pour 10 milliards d'événements (~10s au LHC!)

≈ 100 millions de quarks b

≈ 200 000 bosons W

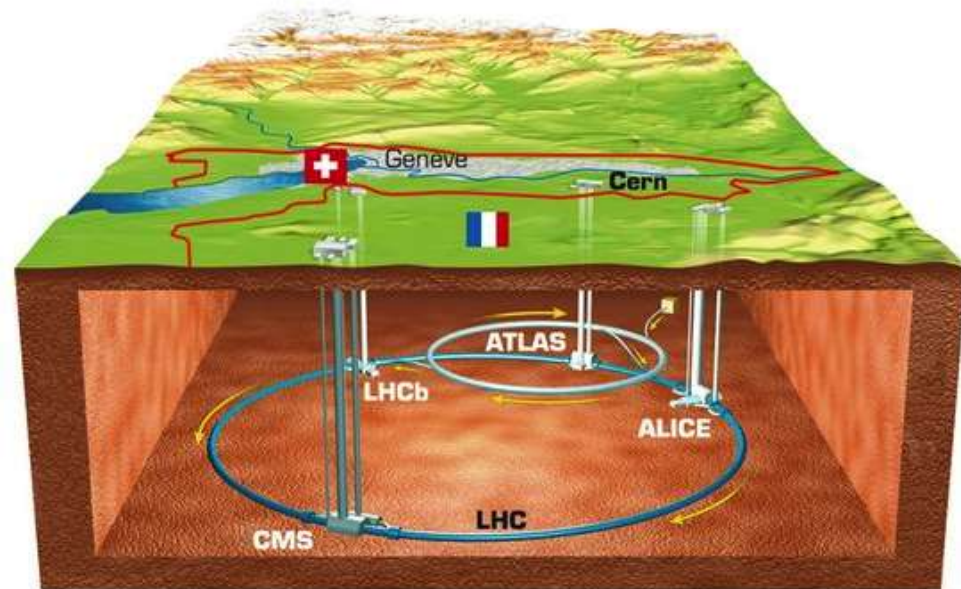
≈ 3 bosons de Higgs ($m_H \sim 100 \text{ GeV}$)

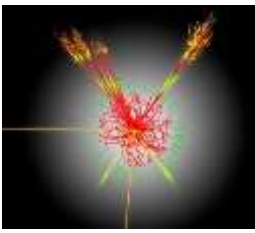


Comment produire le boson de Higgs

Le LHC:

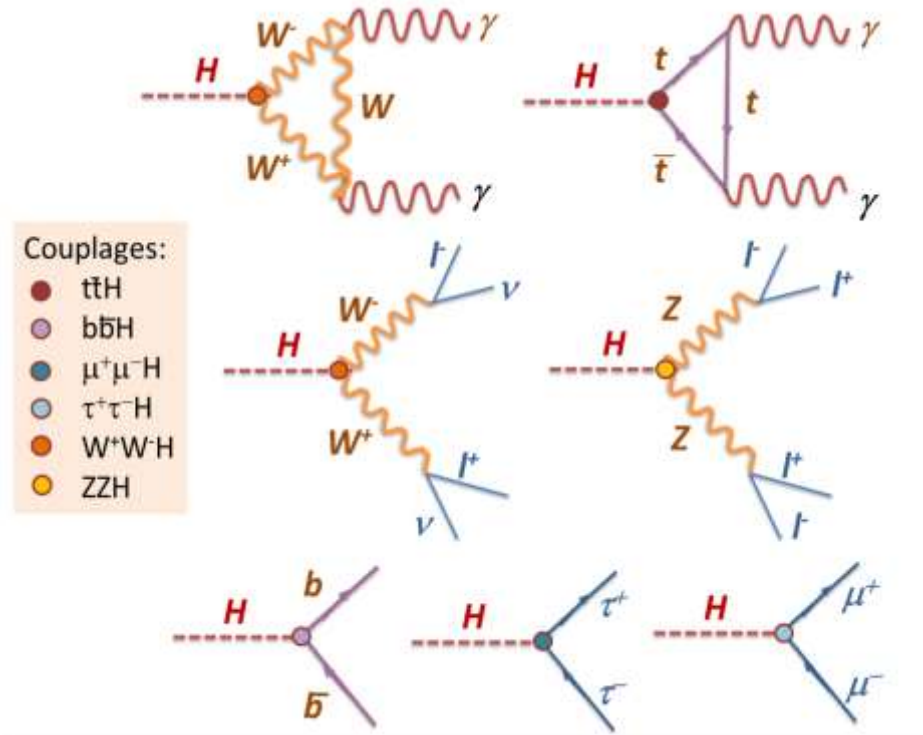
- ❑ Collisionneur proton-proton au CERN à Genève dans l'anneau du LEP (27 km de circonference)
- ❑ Énergie:
 - Nominale: 7 TeV par faisceau soit 14 TeV dans le centre de masse, près de 7 fois l'énergie du Tevatron!
 - la première phase de prise de donnée a eu lieu à 7 TeV en 2011 et 8 TeV en 2012
 - 13 TeV de 2015 à 2018
 - 14 TeV à partir de 2021
- ❑ Luminosité (proportionnelle au nombre d'interactions par seconde):
 - Nominale: $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (= 25 x Tevatron)
 - Actuelle: $2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



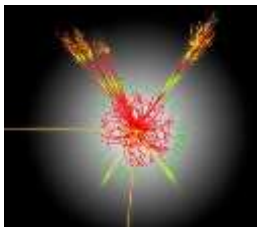


Comment le détecter?

- ❑ Le boson de Higgs se désintègre instantanément en d'autres particules
- ❑ On l'observe en détectant ses produits de désintégration
- ❑ Le modèle ne prédit pas la masse du boson de Higgs
- ❑ Pour une masse donnée, le modèle prédit ses probabilités de désintégration en différentes particules



Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions



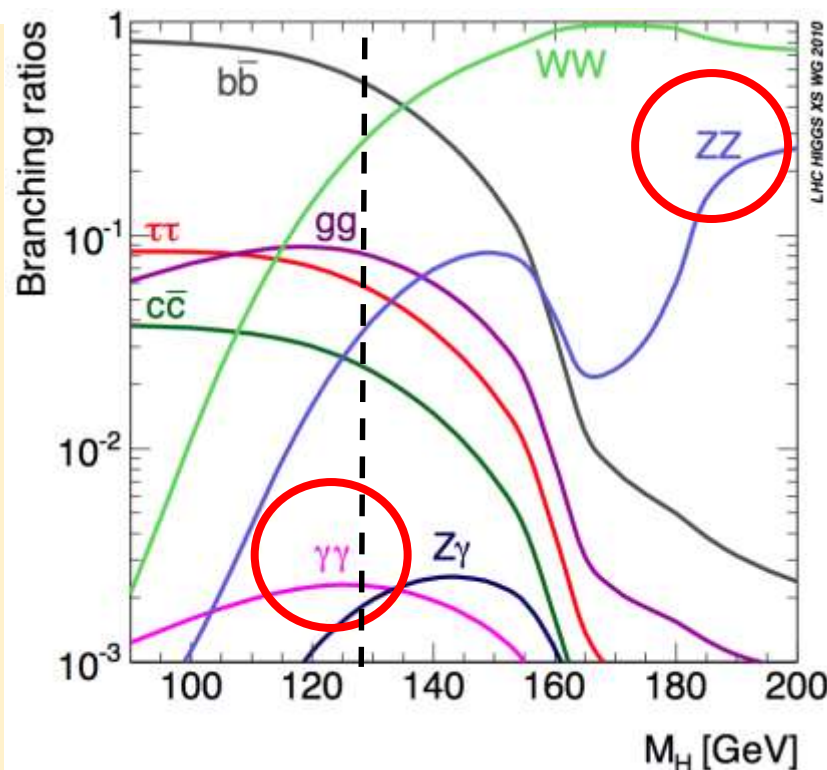
Comment le détecter?

Les « modes » d'observation privilégiés sont:

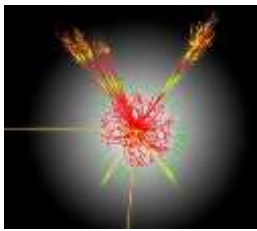
- ☐ $H \rightarrow \gamma\gamma$ (deux photons)
- ☐ $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$ ou 4μ ou $2e2\mu$ (électrons et muons)

Les bruits de fond sont limités (au contraire pour $b\bar{b}$, le bruit de fond est 10 millions de fois plus important!)

Nous savons détecter tous les produits de désintégrations (électrons, muons et photons) et mesurer leur énergie avec une grande précision pour calculer la masse du boson de Higgs



Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions



Comment le détecter?

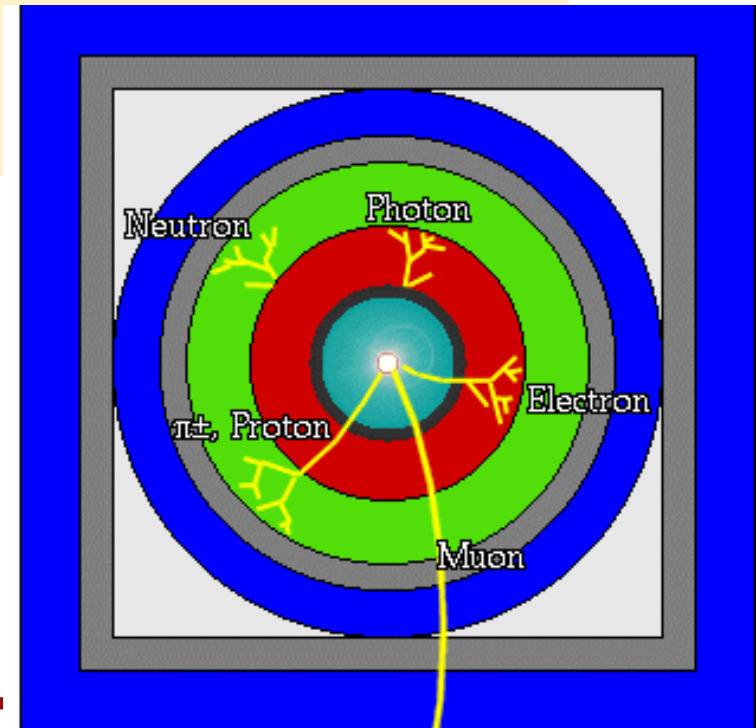
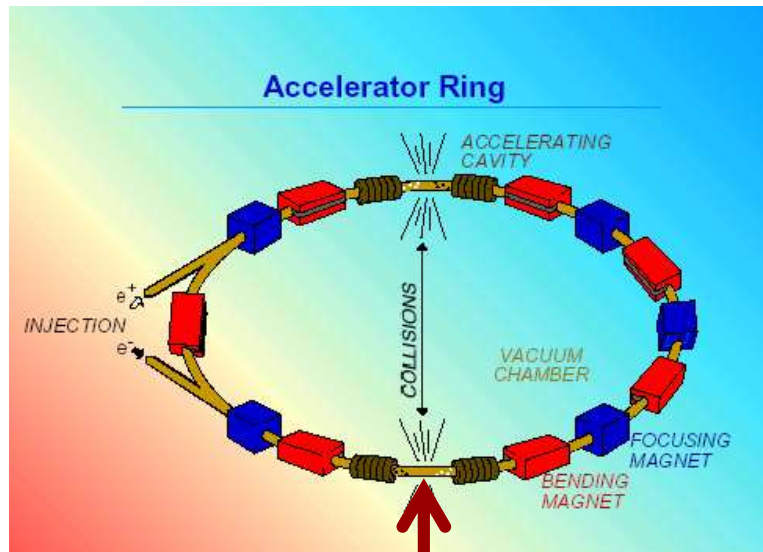
❑ Expérience sur collisionneur: principe

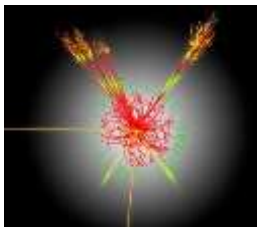
Expérience autour du point de collision: détection des particules “stables”

Chaque détecteur élémentaire (spectromètres, calorimètres...):

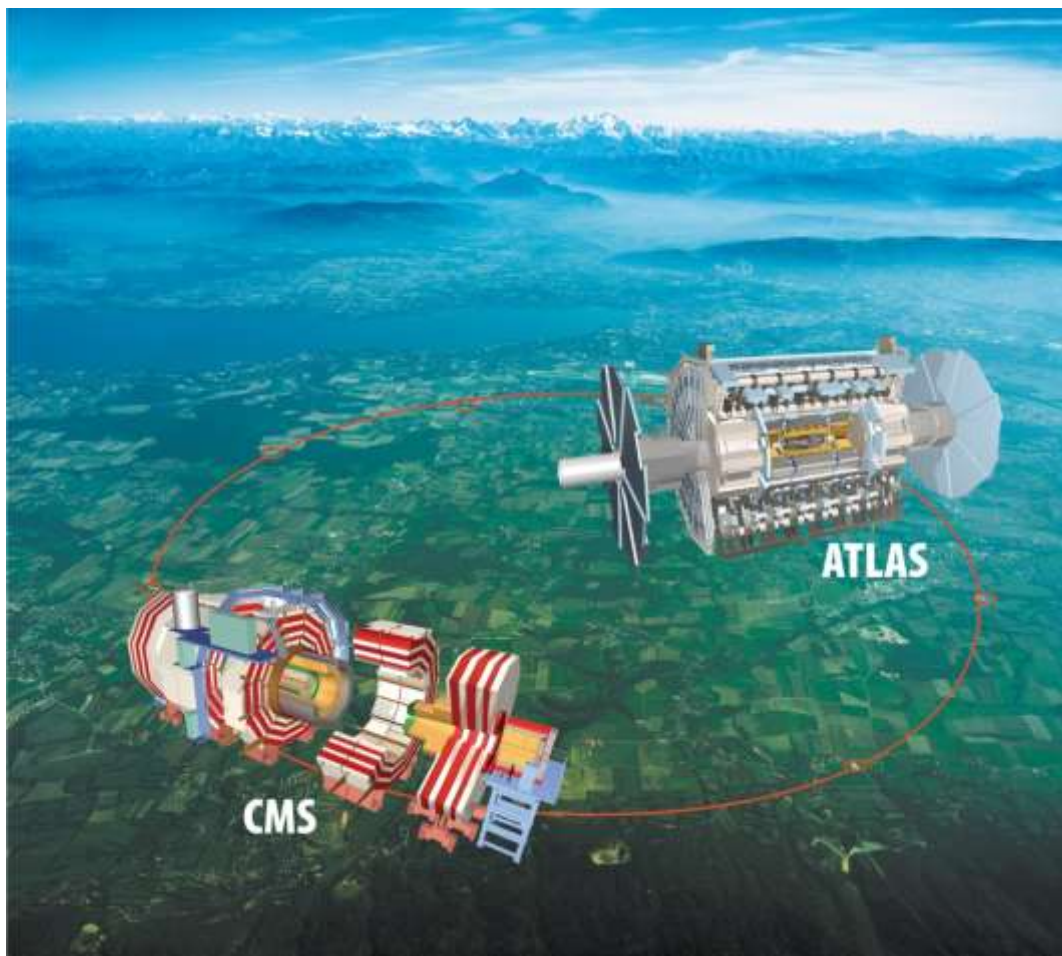
si une particule le touche, on mesure:

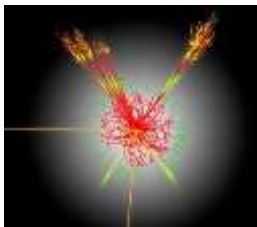
- Position
- Energie (ou /et) impulsion de la particule
- Type (electron, muon, pion...)



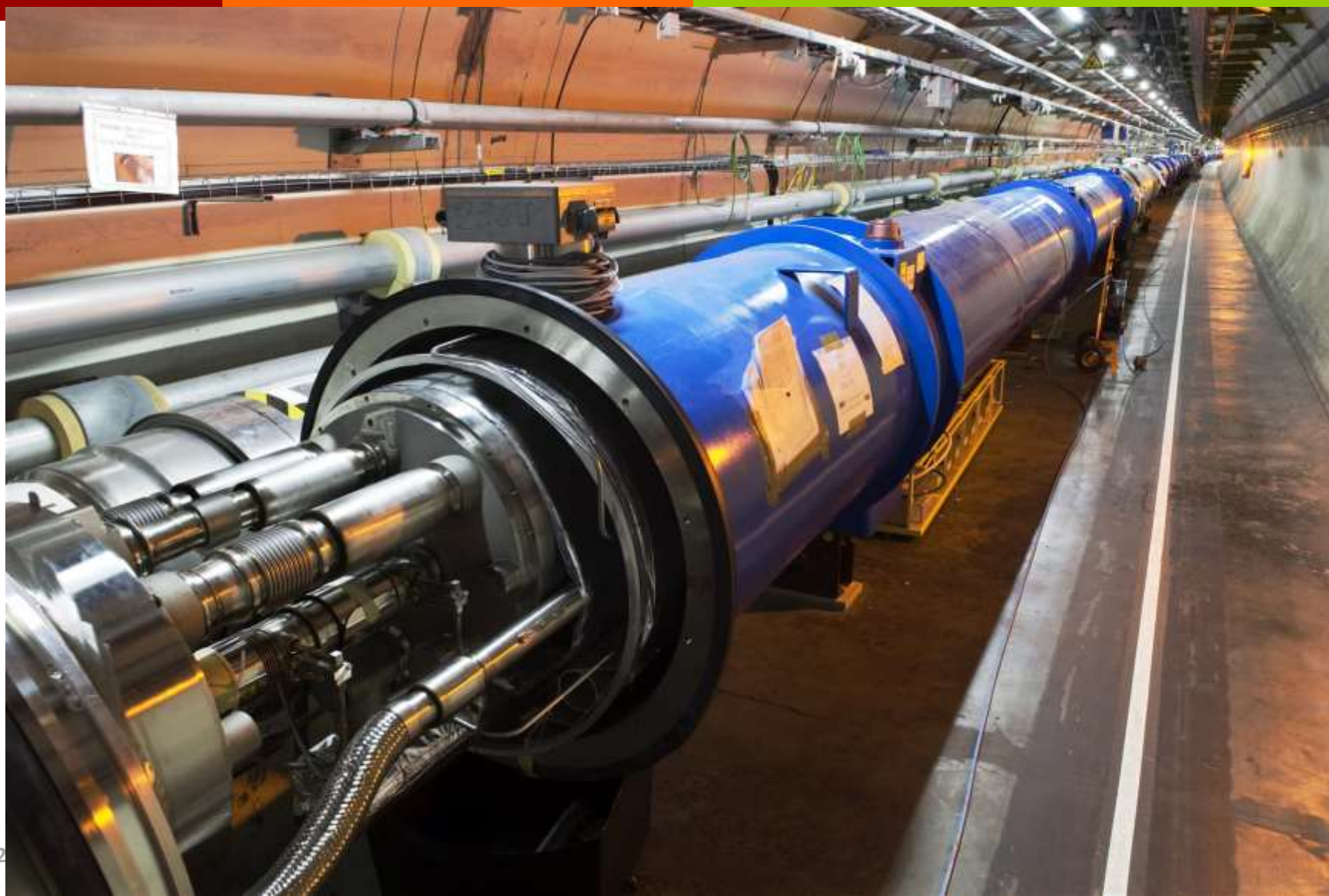


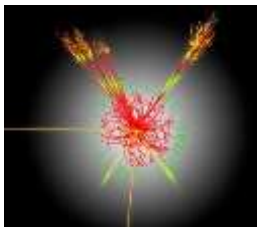
Comment le détecter?



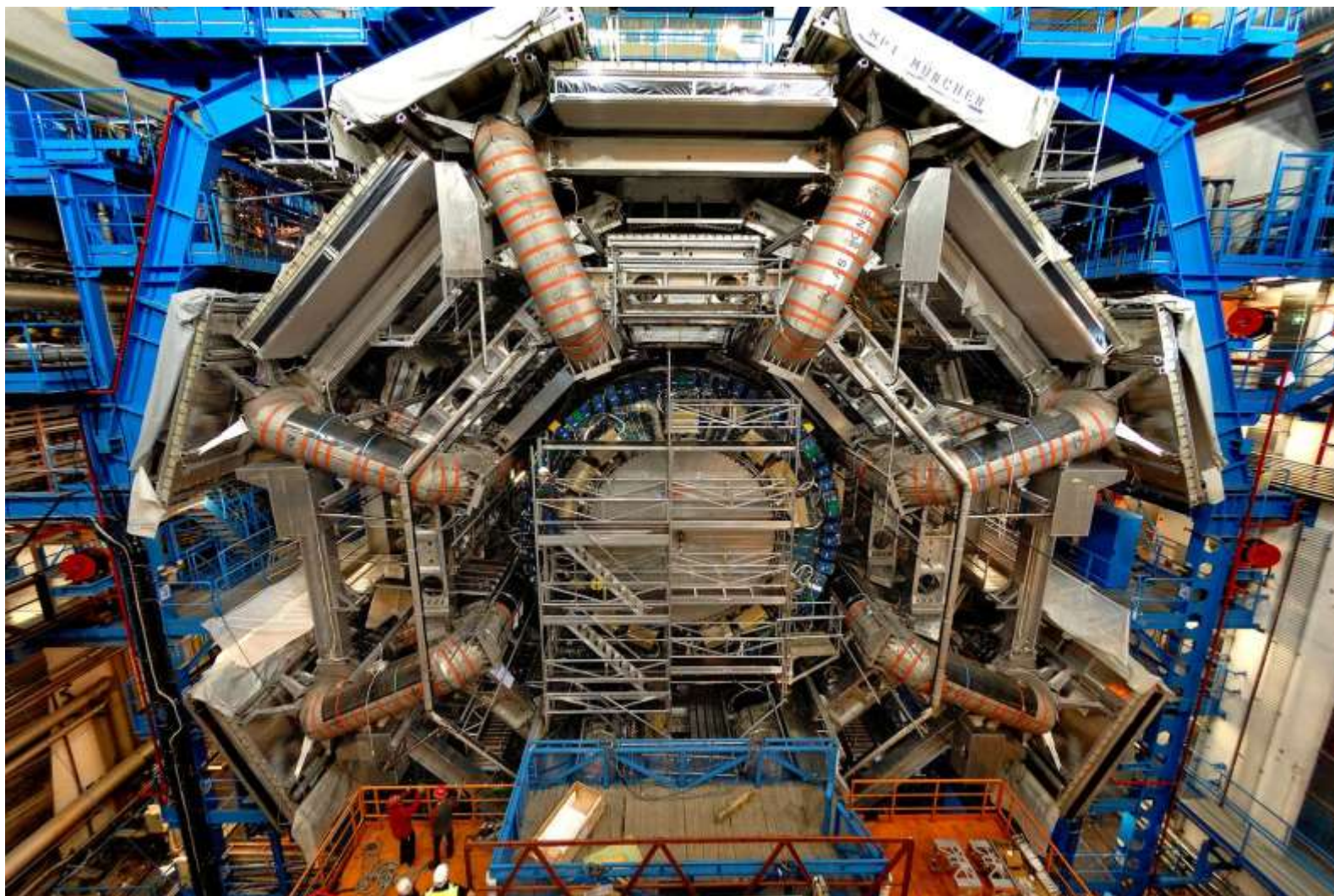


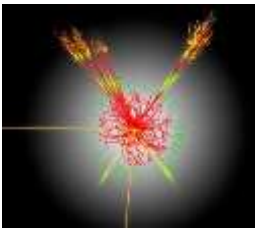
Le LHC



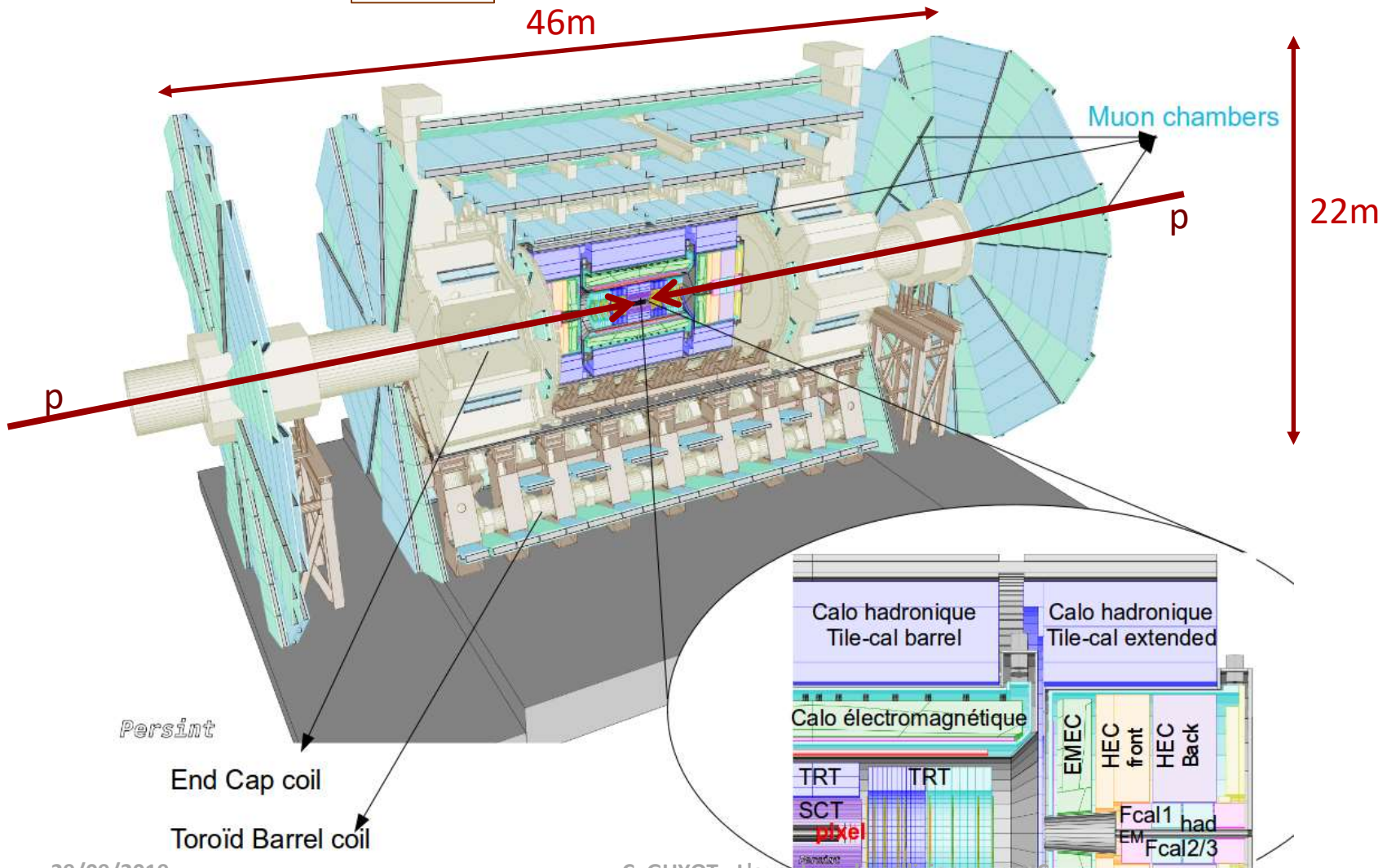


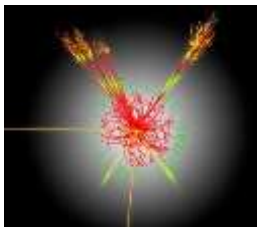
L'expérience ATLAS





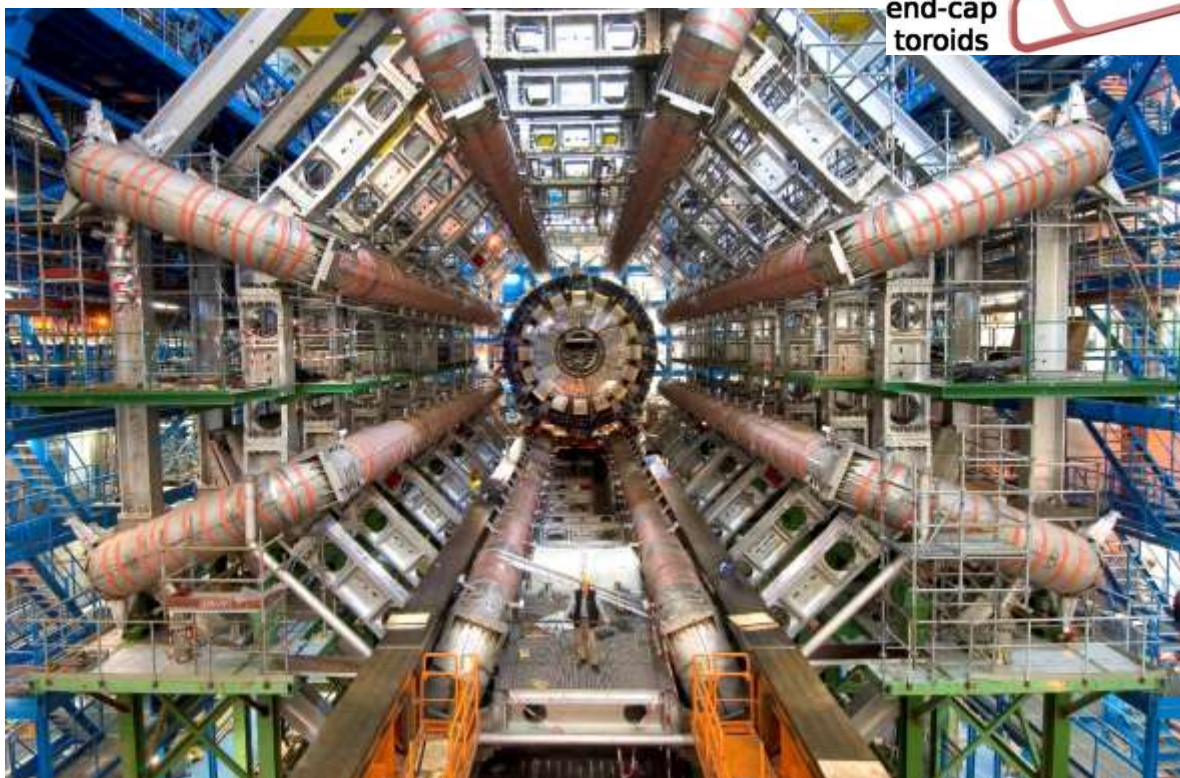
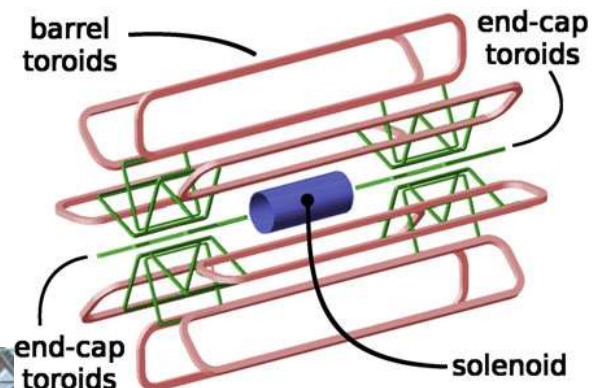
Le détecteur ATLAS

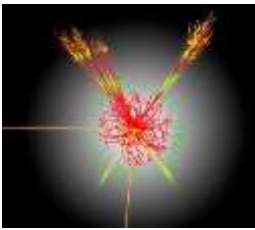




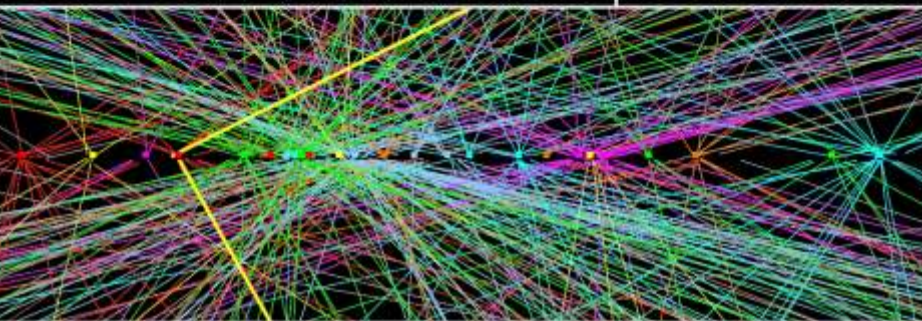
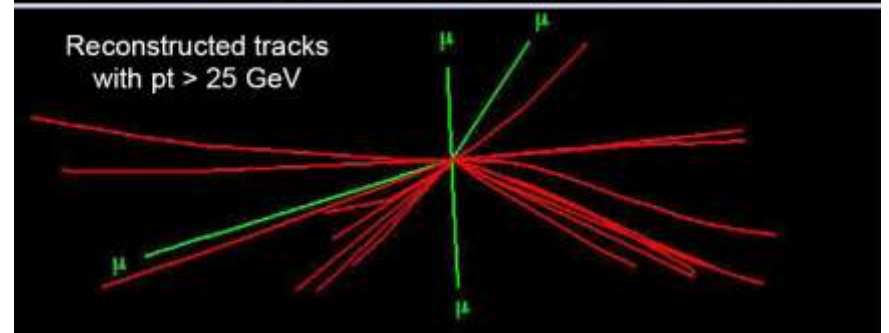
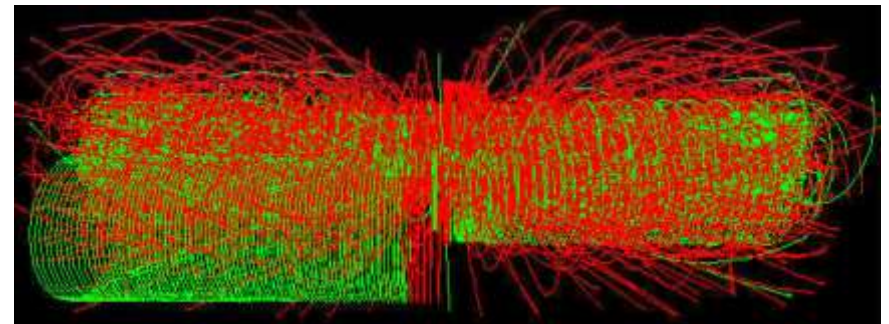
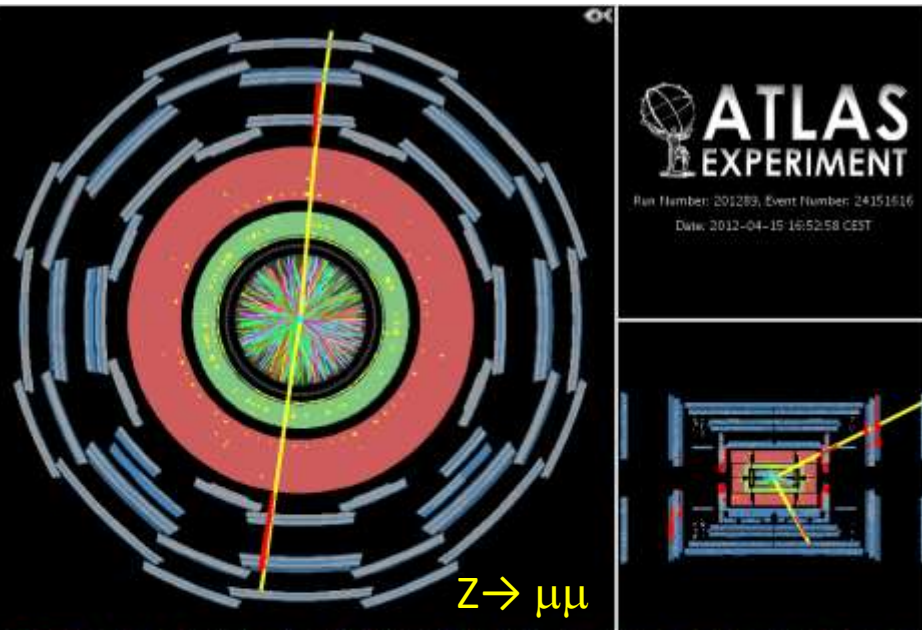
Le détecteur ATLAS

Grand aimant toroidal du détecteur ATLAS dont le design a été réalisé au CEA Saclay

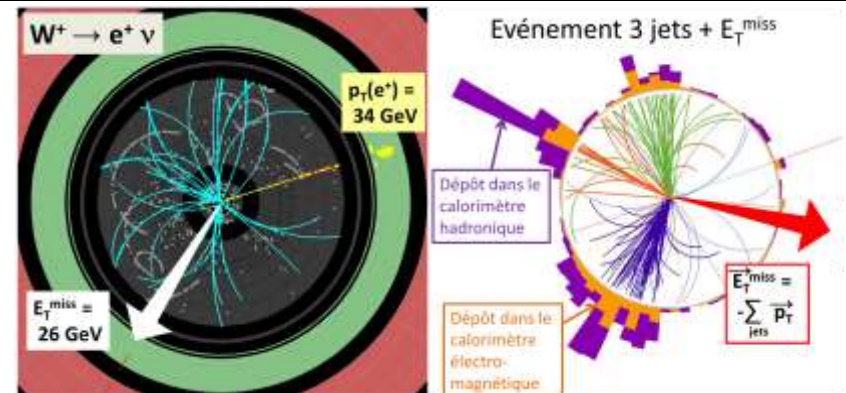


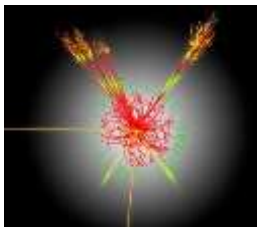


Evénement dans le détecteur ATLAS



$\sim 10\text{cm}$



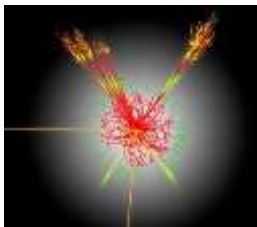


La collaboration ATLAS

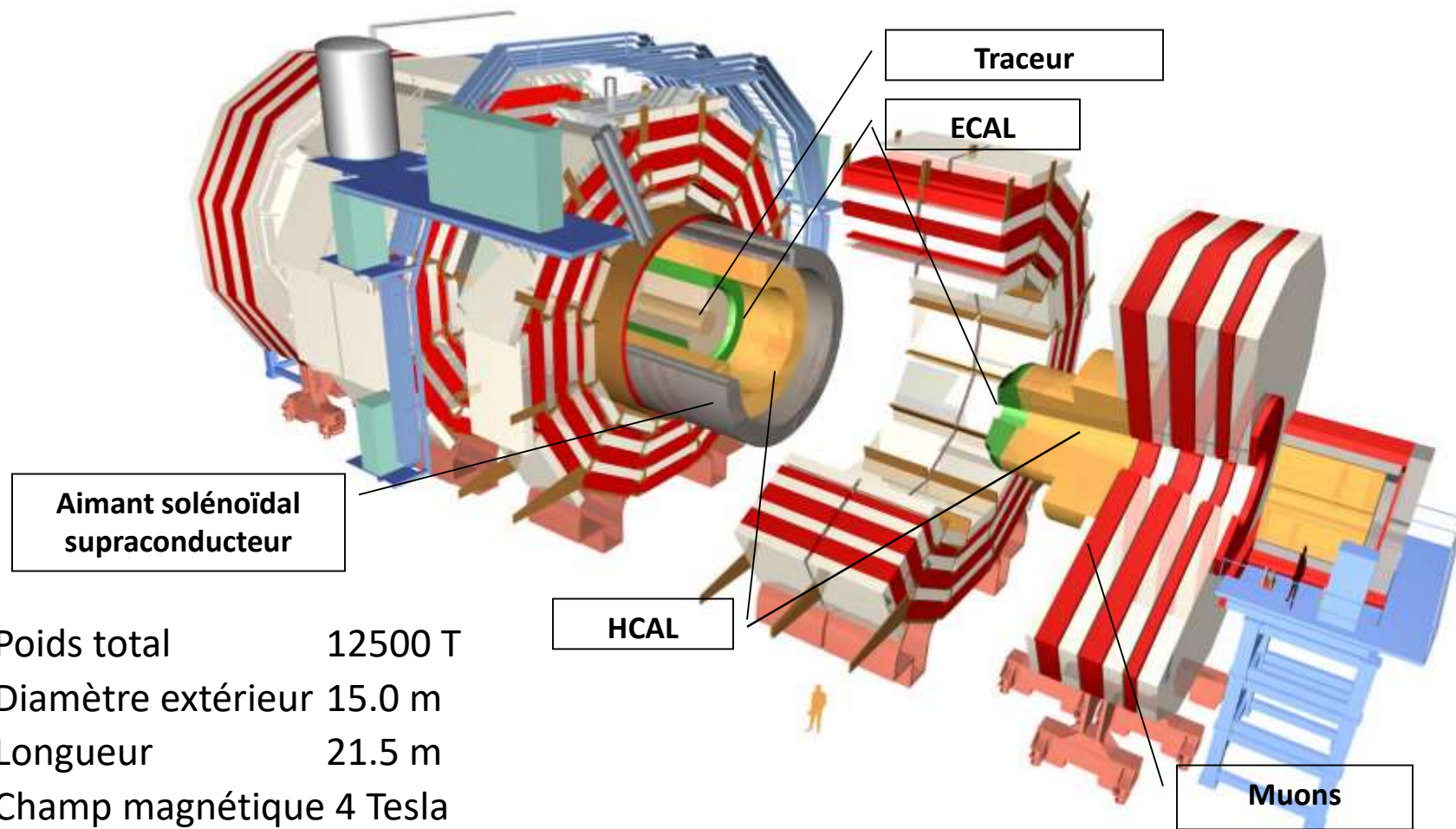


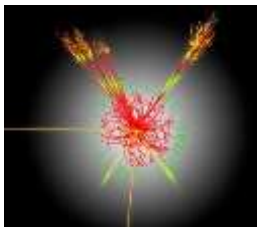
38 pays
175 instituts
>3000 physiciens et ingénieurs
~2900 auteurs
~1000 étudiants



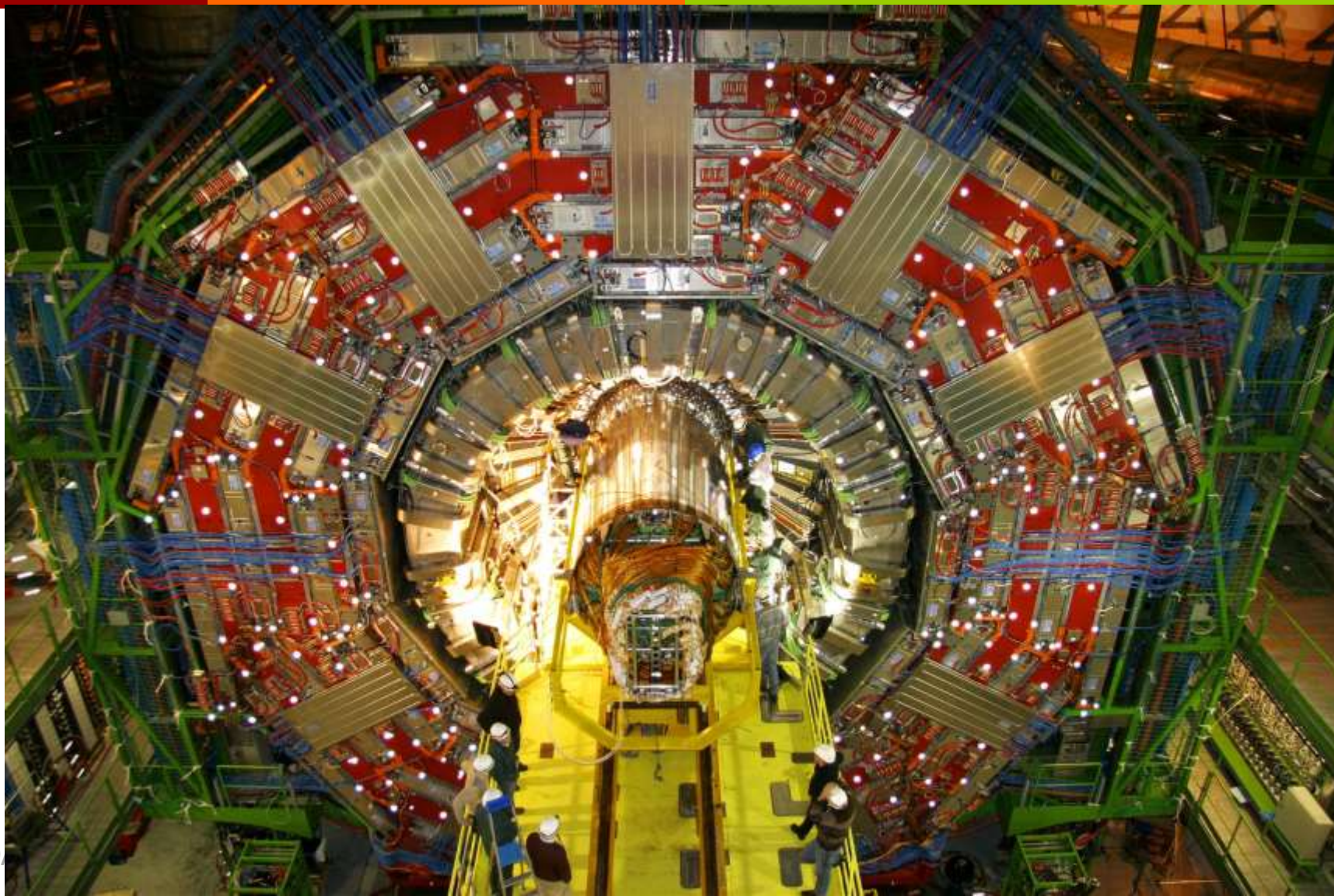


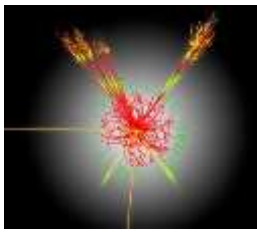
Le détecteur CMS





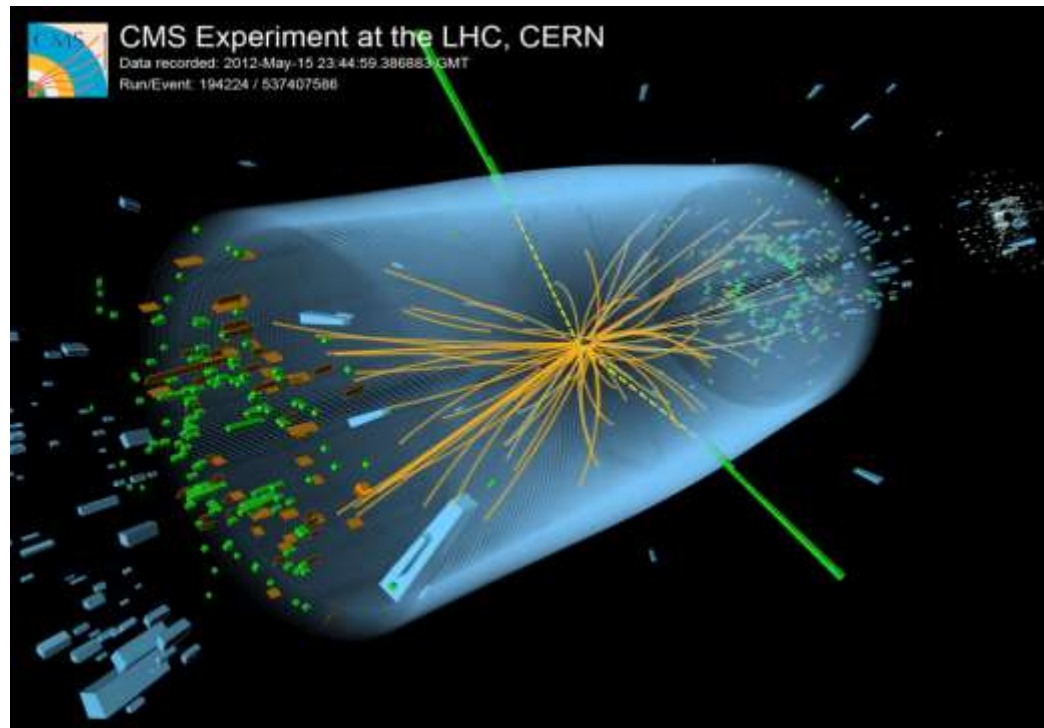
Le détecteur CMS





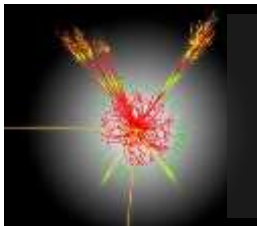
H en $\gamma\gamma$

On cherche tous les événements avec 2 photons dans le détecteur:



Après cette sélection, il reste beaucoup de bruit de fond!

D'autres processus connus peuvent produire deux photons isolés

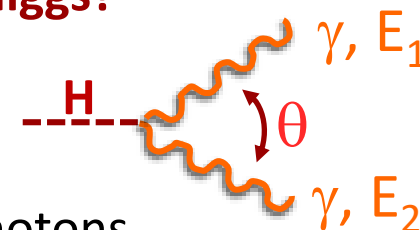


H en $\gamma\gamma$

Comment séparer les bruits de fonds restants du boson de Higgs?

Avec la masse diphoton:

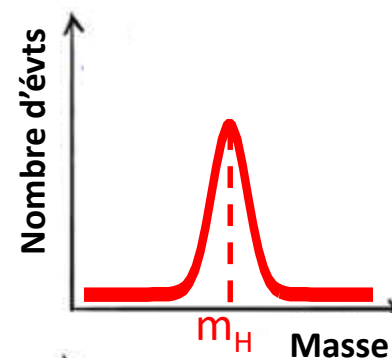
$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 E_1 E_2 [1 - \cos(\theta)]}$$



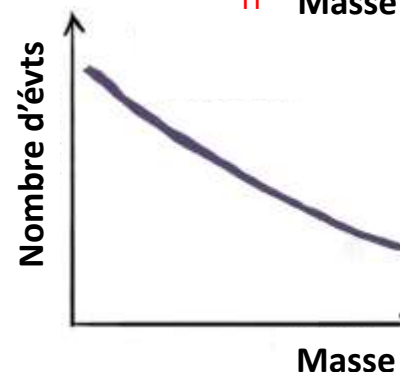
Avec E_1 et E_2 les énergies des photons et θ l'angle entre les photons

➤ Si les deux photons proviennent de la désintégration d'un boson de Higgs, cette masse sera égale à la masse du Higgs

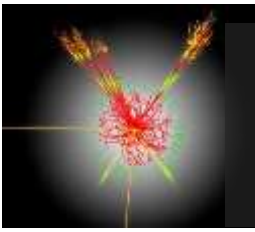
➤ Sinon, cette masse peut prendre des valeurs variées. Et une multitude d'autres événements sans intérêt peuvent simuler 2 photons (bruit de fond, en particulier les $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$).



environ 200 événements

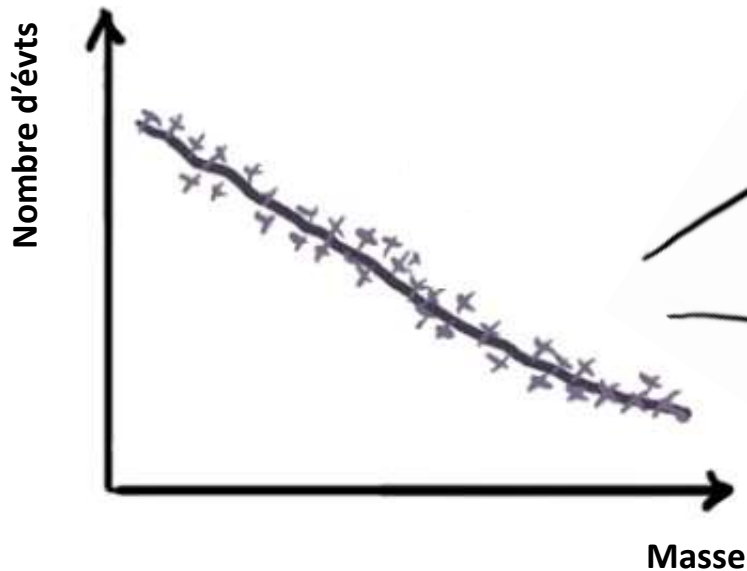


des milliers d'événements

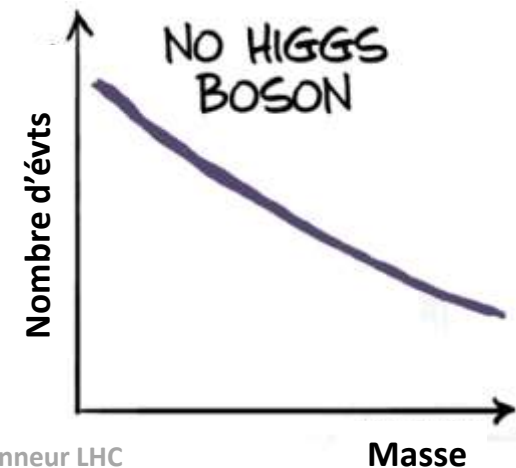
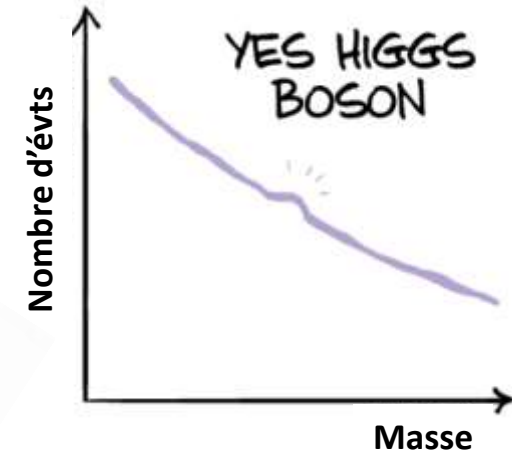


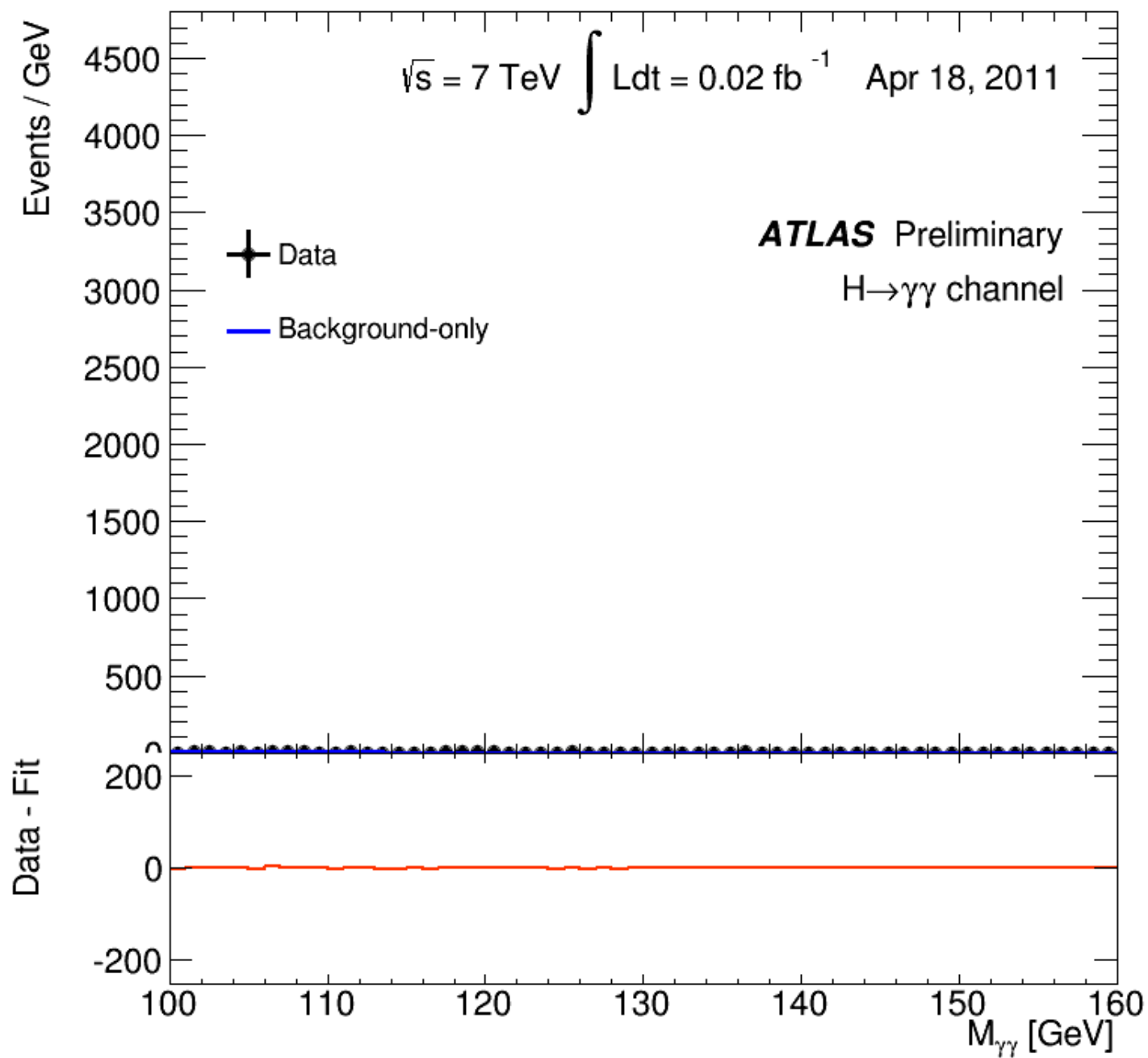
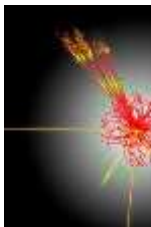
H en $\gamma\gamma$

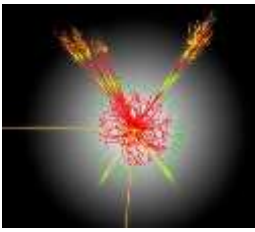
Les données vont ressembler à ça:



Plus on a de données, plus ce petit pic se voit clairement, car moins grandes sont les fluctuations statistiques du bruit de fond

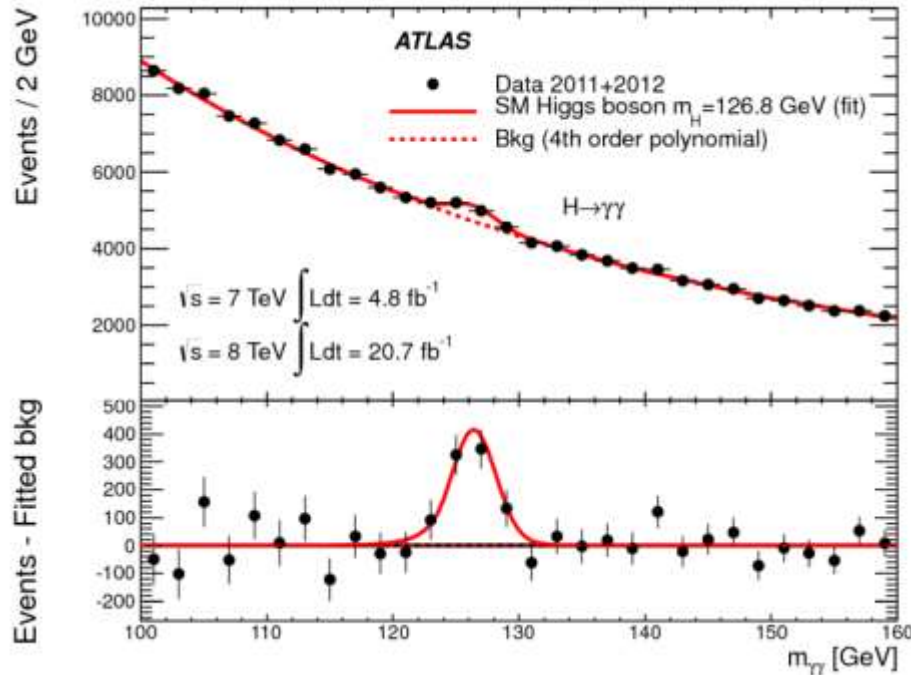






H en $\gamma\gamma$

Les données en 2012 et 2013:

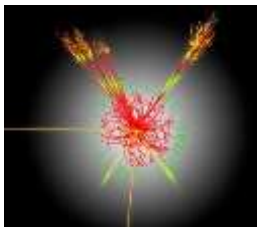


Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 2 sur un million
 $= 0.000002$

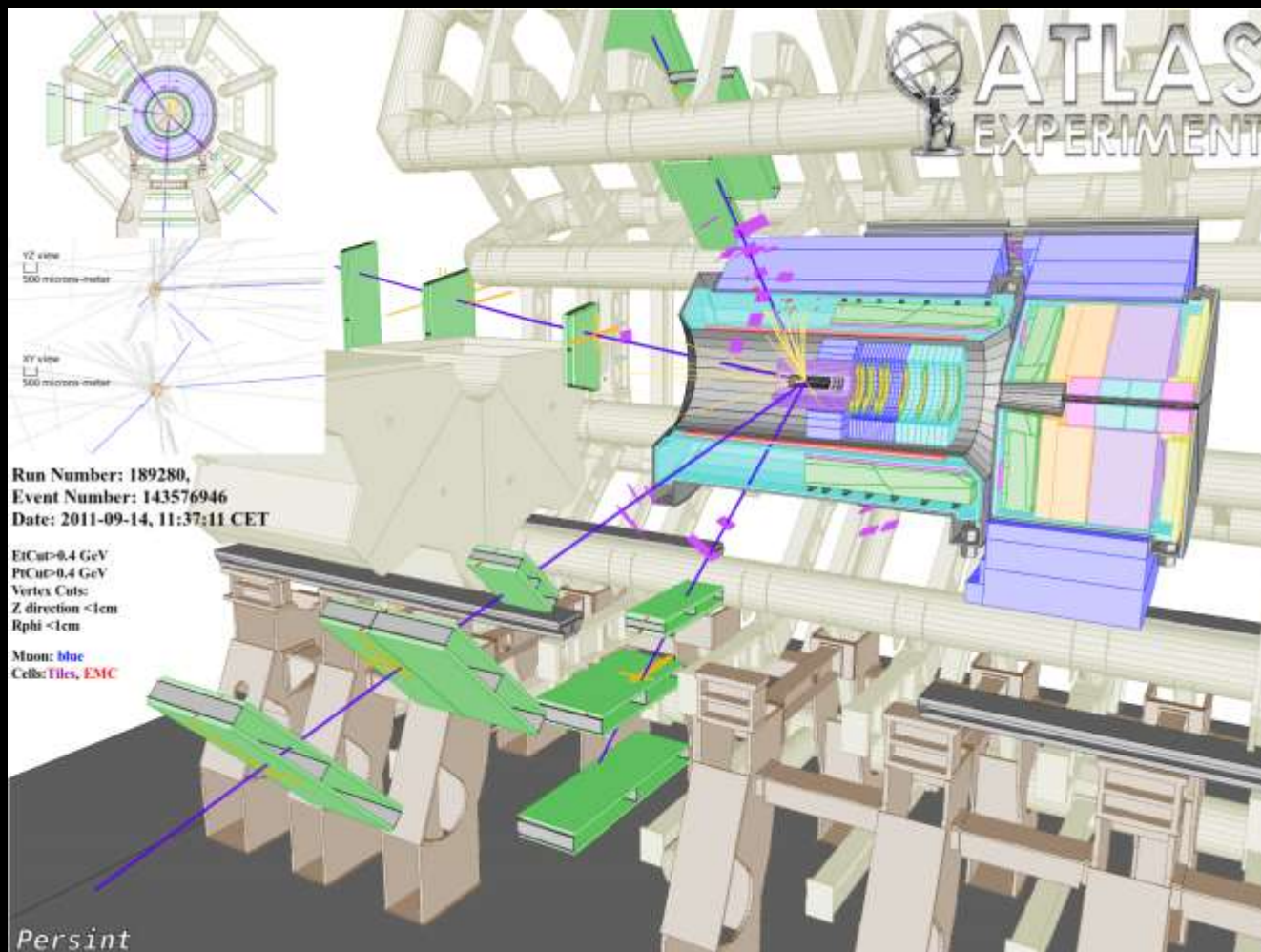
(~ 4.5 écarts standard ou
 4.5σ)

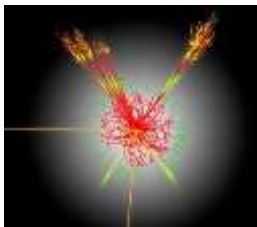
NB: par convention, on
déclare une découverte à
partir de 5σ soit environ
une probabilité 0.0000003



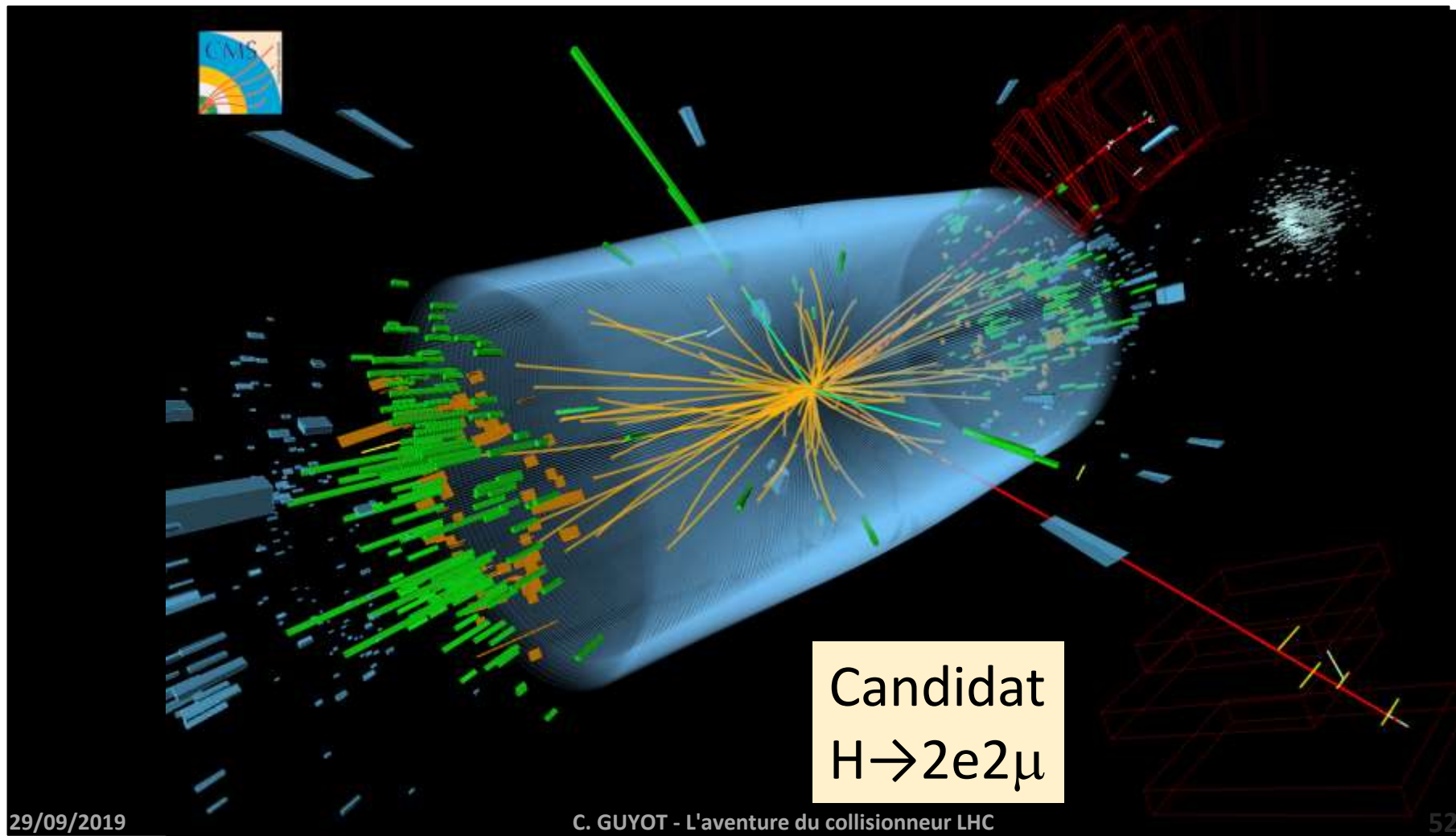
$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

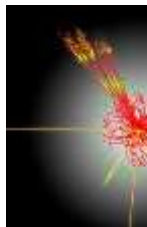
Candidat
 $H \rightarrow 4\mu$





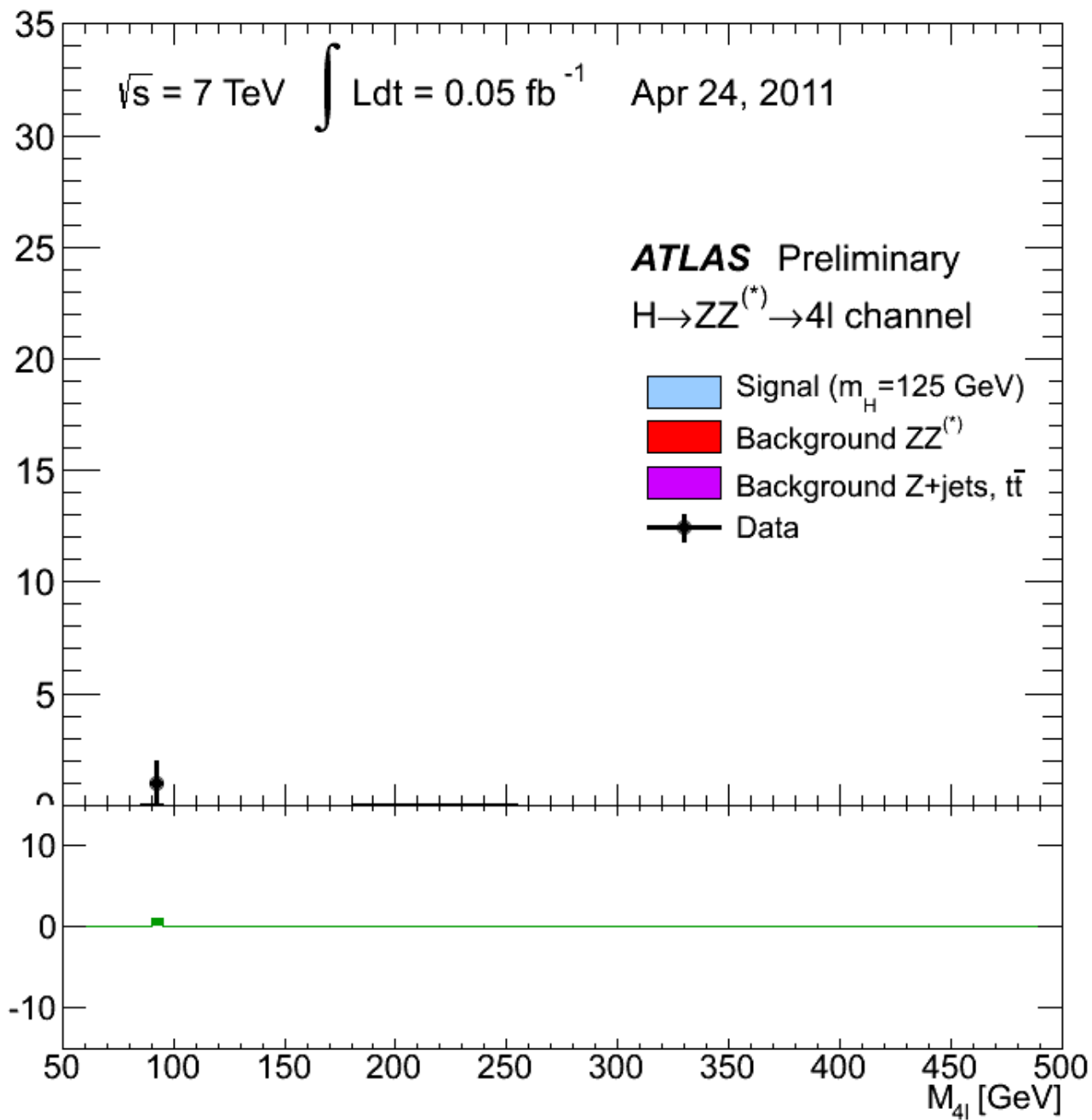
$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$



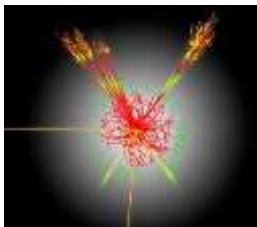


Events / 5 GeV

Data - Background

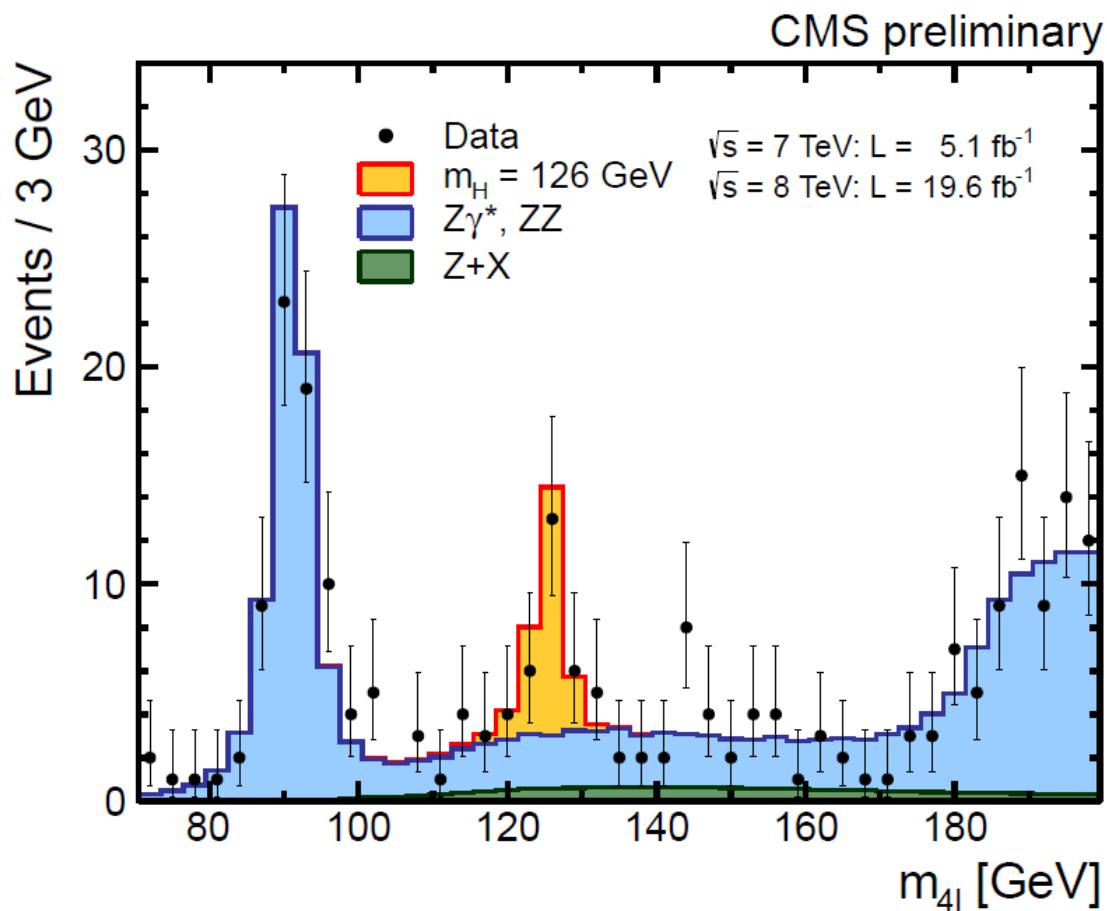


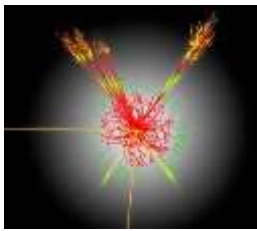
ions



$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Spectre de masse invariante des 4 leptons





Et en combinant les canaux!



Prix Nobel 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



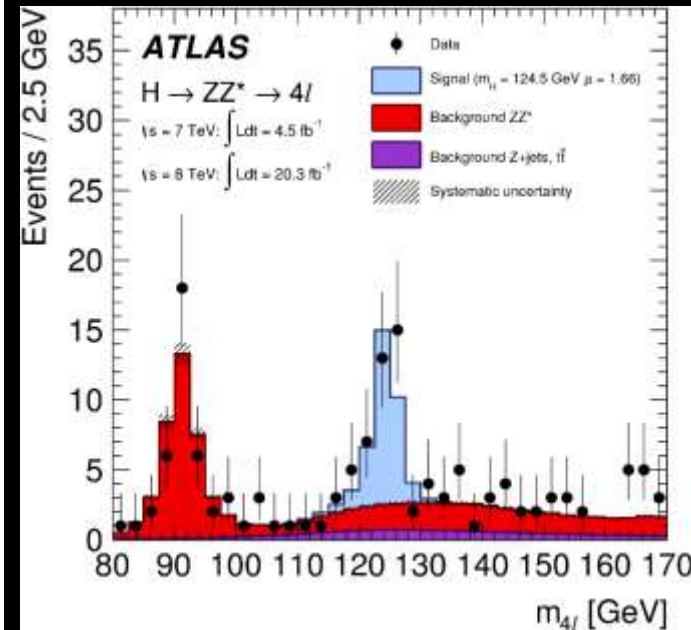
© © The Nobel Foundation. Photo: Lantini, Engelen

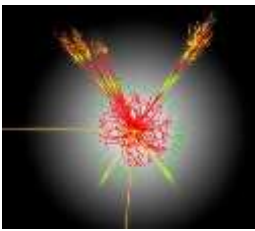


F. Englert and P. Higgs
Photo: Wikimedia Commons

2013 Nobel Prize in Physics

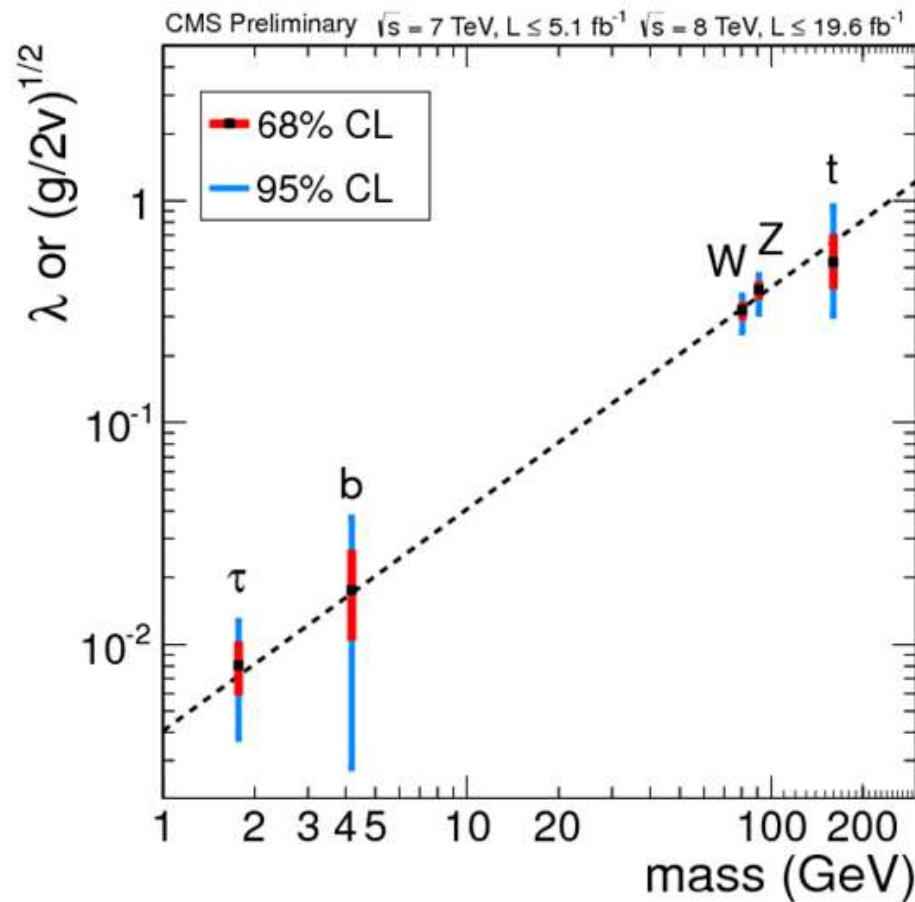
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

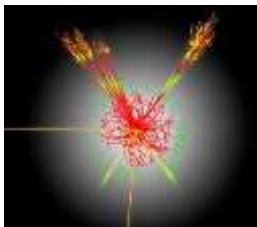




Est-ce un Higgs « Standard »?

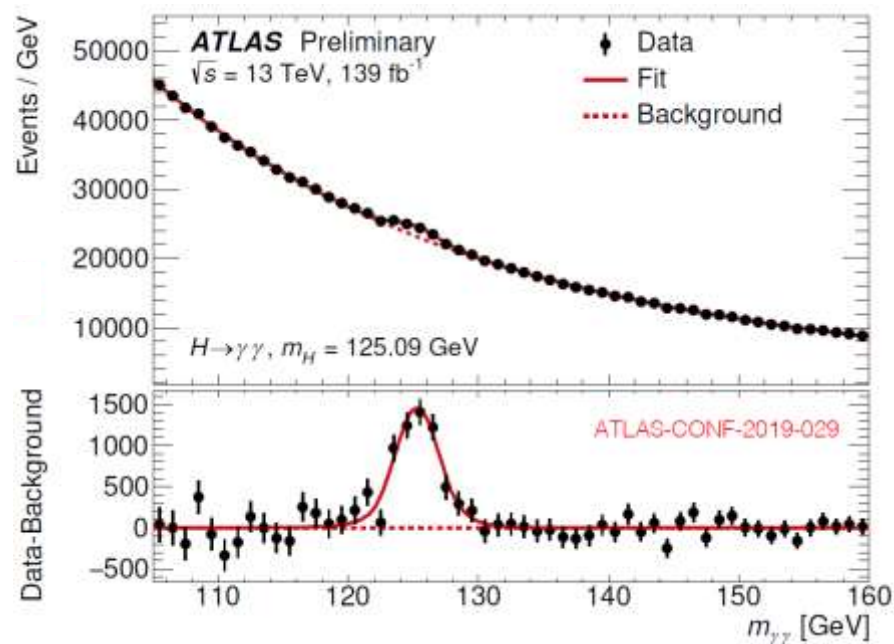
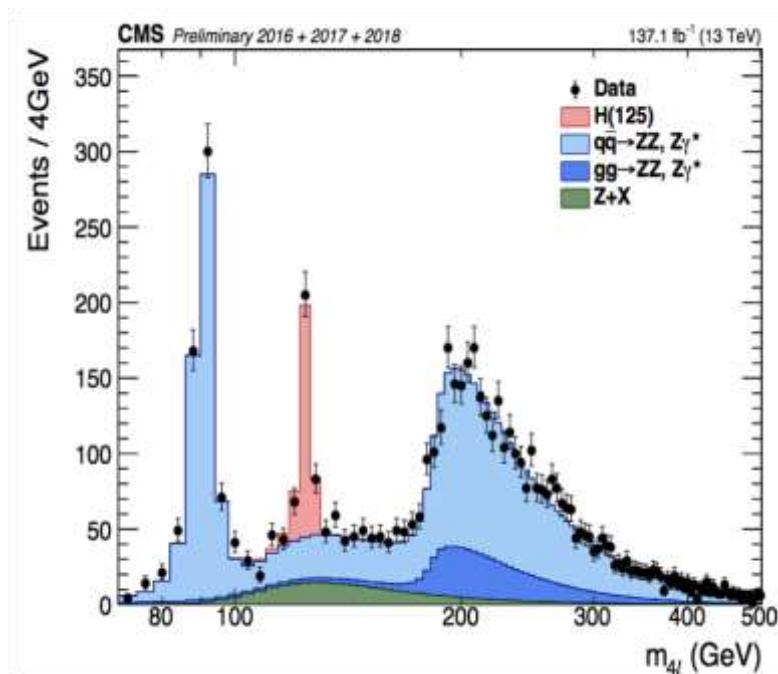
Le couplage du boson de Higgs est-il proportionnel a la masse des particules?

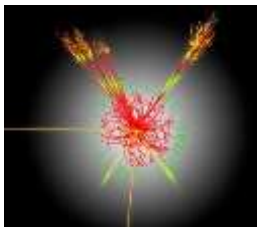




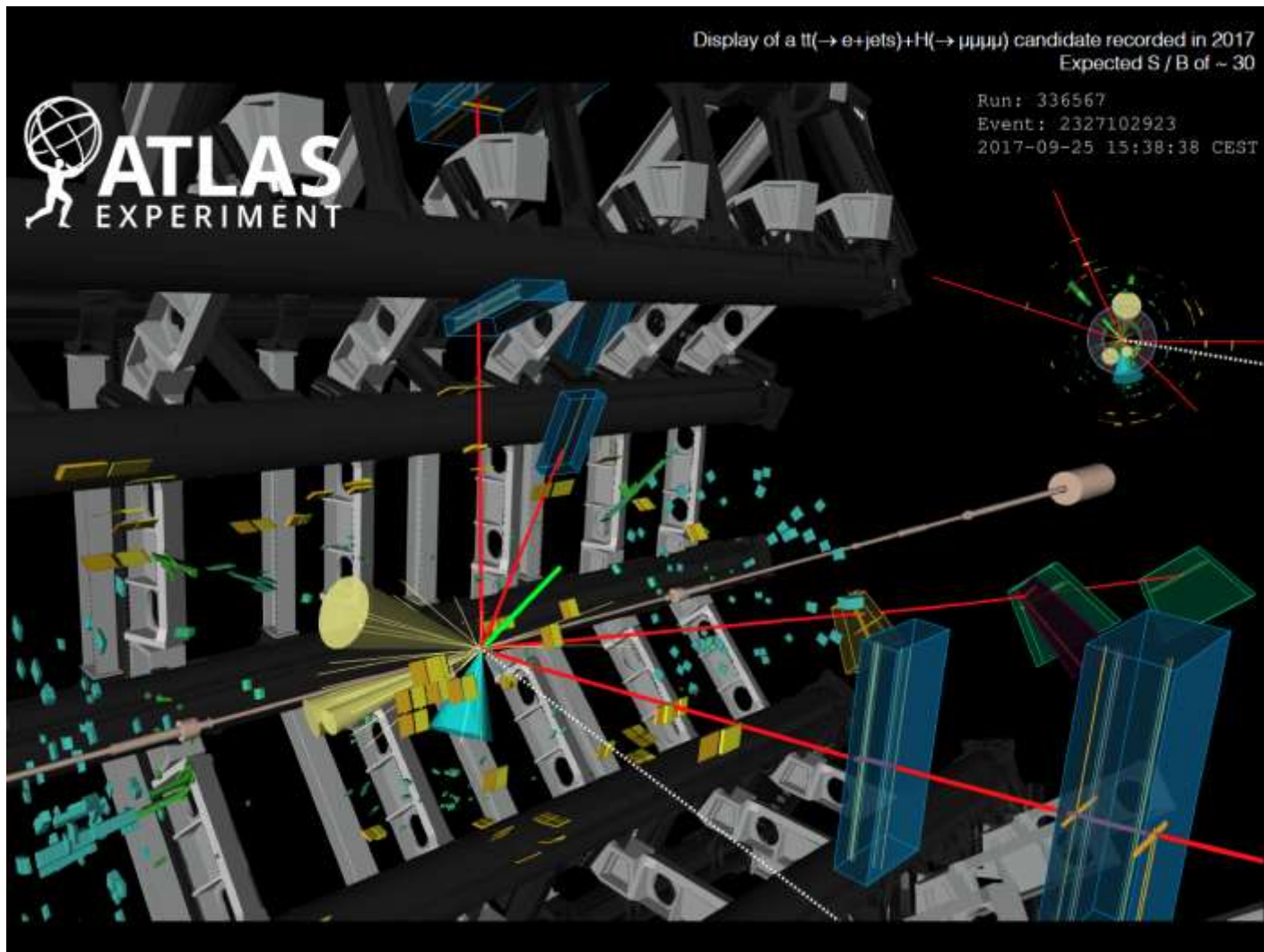
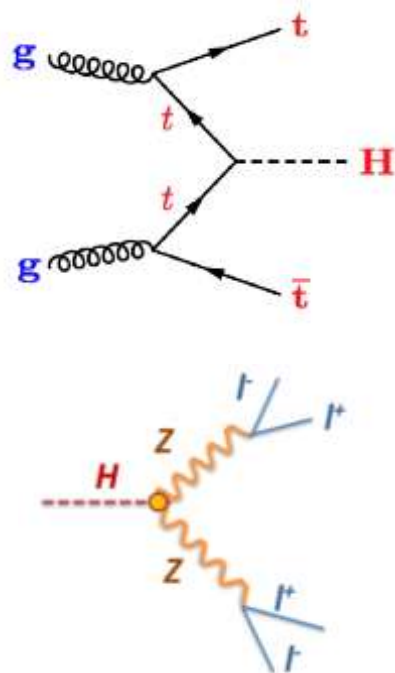
La situation en 2019

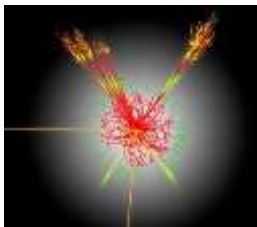
- ❑ Runs à une énergie de 13 TeV dans le centre masse proton-proton de 2015 à 2018.
 - Nombre d'interactions x 10 et nombre de bosons de Higgs produits x 20 par rapport à 2013.





La situation en 2019



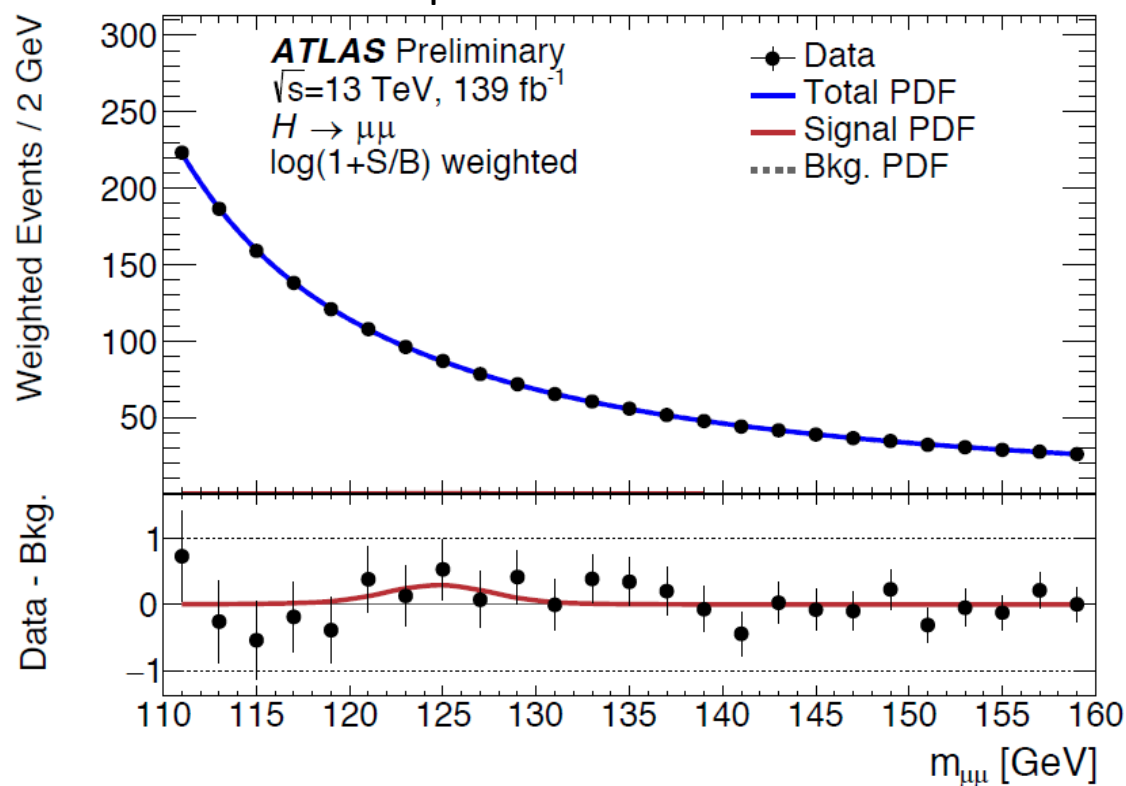


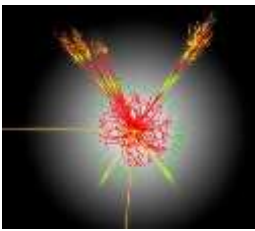
La situation en 2019

- ❑ Confirmation des propriétés du boson découvert comme étant le boson de Higgs du modèle standard

Couplage au lepton μ (seconde génération)
pas encore observé

Proportionnalité du couplage à la masse de la particule du modèle standard





Le boson de Higgs et les grandes questions de la physique des particules

❑ Réalisation de la brisure de la symétrie électrofaible

❑ Unitarité du modèle standard à l'échelle du TeV

❑ Stabilité de l'échelle électrofaible et naturalité ?

- $m_H = 125 \text{ GeV} \Rightarrow$ indice de Supersymétrie?
- extra dimensions?

Limites actuelles au LHC:
Masse (gluino, squark) $> 2 \text{ TeV}$

❑ Hiérarchie des masses des particules connues ($m_{\text{top}}/m_e \sim 300000$): ???

- Masse des neutrinos ($< 0,1 \text{ eV}$) encore 10^7 fois plus petite que celle de l'électron !

❑ Nature de la matière noire ?

- Supersymétrie? → Pas de signe expérimental de supersymétrie

❑ Nature de l'énergie noire

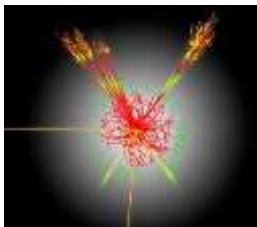
- Le boson de Higgs contribue à l'énergie du vide
 - La théorie quantique des champs appliquée au modèle standard échoue à expliquer la petitesse de la constante cosmologique associée à la quantité d'énergie noire observée

❑ Origine de l'inflation cosmologique

- Evolution du potentiel de Higgs dans les premiers instants de l'Univers $\rightarrow \text{Higgs} \sim \text{Inflaton?}$

❑ Unification des interactions, y compris la gravitation ??

oui



❑ Arrêt en 2019-2020

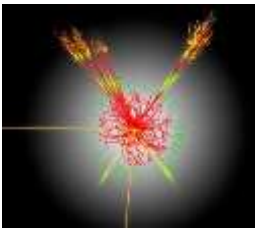
- Modifications pour augmenter l'énergie à 7 TeV/faisceau
- Doublement de la luminosité
- Runs de 2021 jusqu'à la fin 2023 pour tripler le nombre de Higgs produits
 - Observation de $H \rightarrow \mu\mu$

❑ Arrêt en 2024-2025 et redémarrage en 2026 jusqu'en ~2035 (HL-LHC)

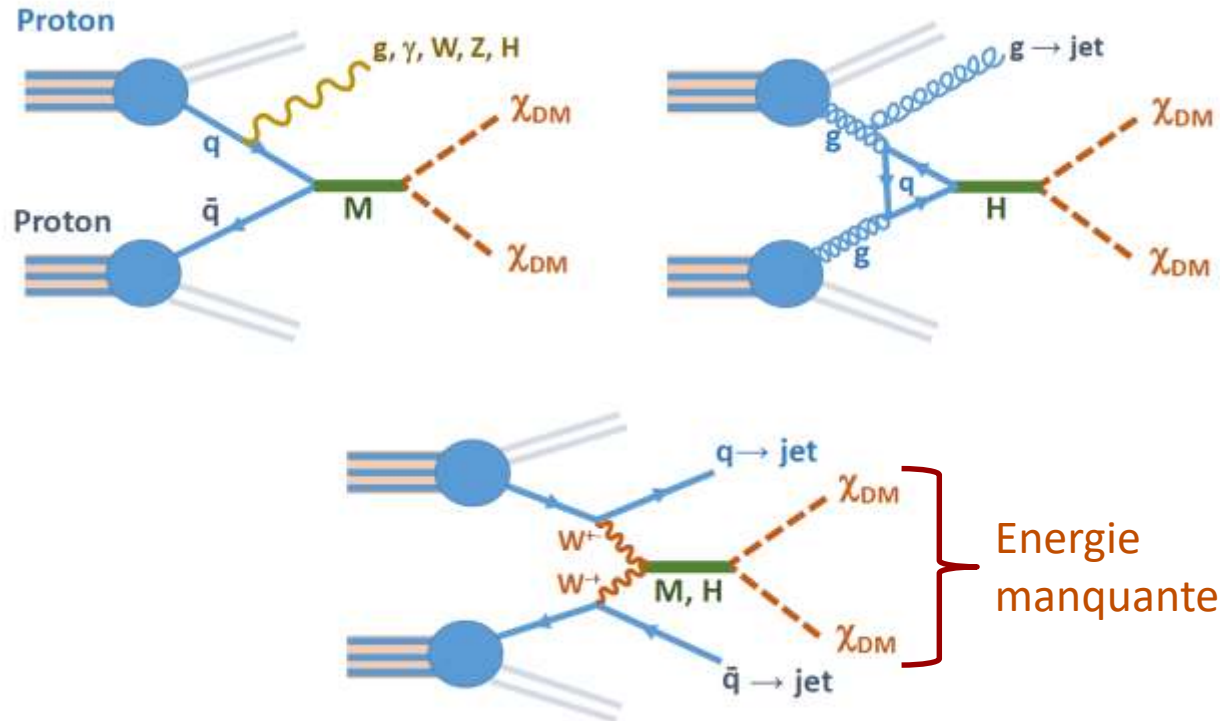
- Luminosité instantanée multipliée par 4
- Programme d'améliorations des expériences pour accompagner l'augmentation de luminosité et du nombre d'interactions par croisement de paquets de protons (~200)
- 100 fois plus d'événements en 2035 à la fin du programme HL-LHC ($\sim 3000 \text{ fb}^{-1}$) ?

❑ Phase exploratoire: au-delà du Higgs du MS!

- Est-ce une particule composite?
- Est-ce un Higgs supersymétrique?
- Existe-t-il plusieurs bosons de Higgs?
- Dimensions supplémentaires?
- Surprises?



Quelle physique au HL-LHC?

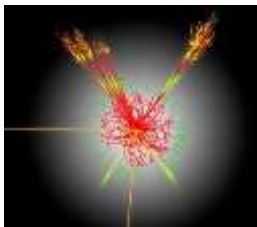


- Recherche de désintégration en particules invisibles

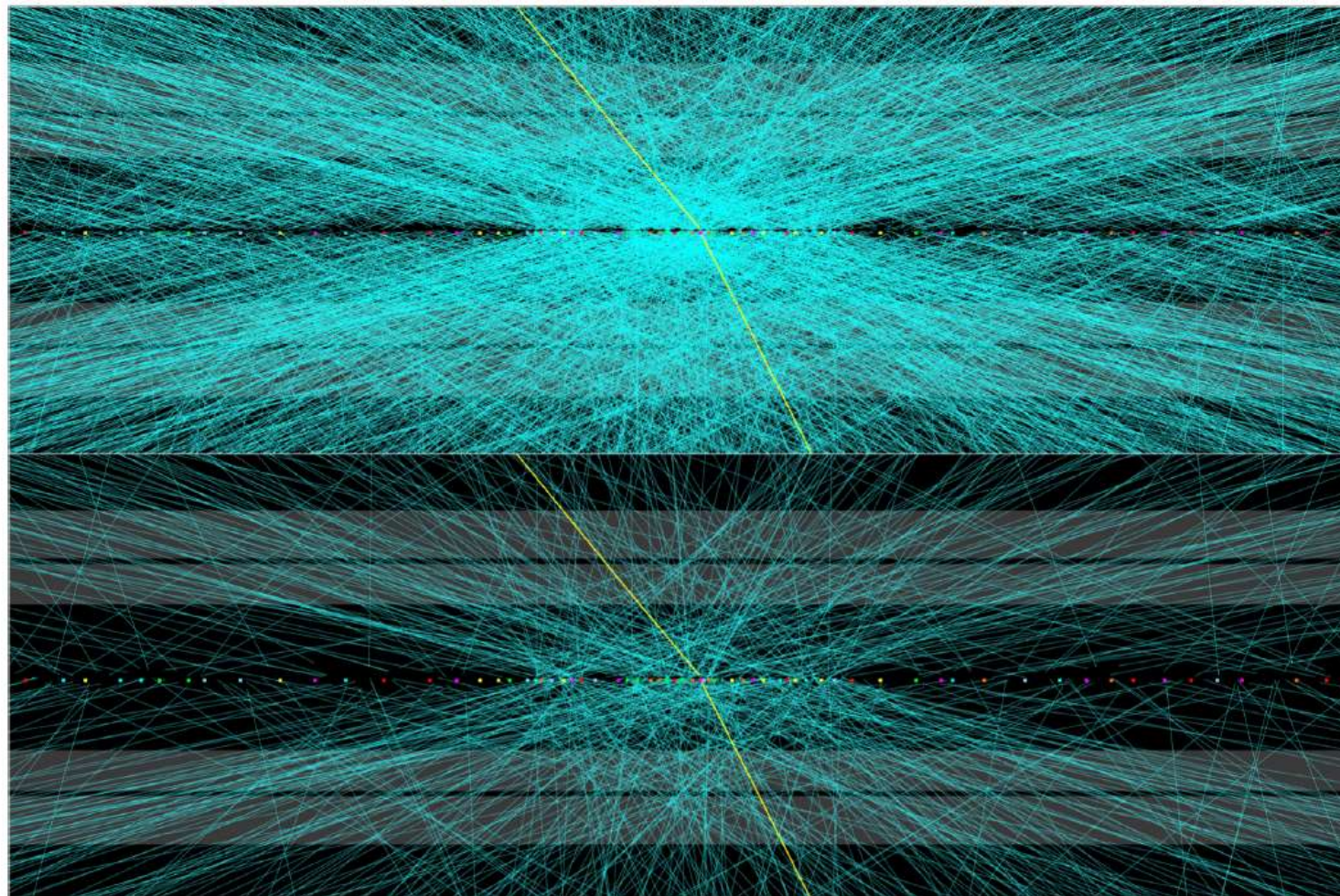
Simple
plus TeV.

-symétrique
Standard ?
chargés?
S?

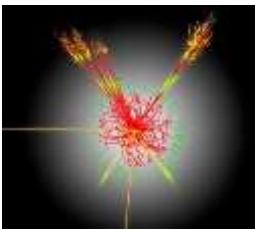
portail vers un



La suite



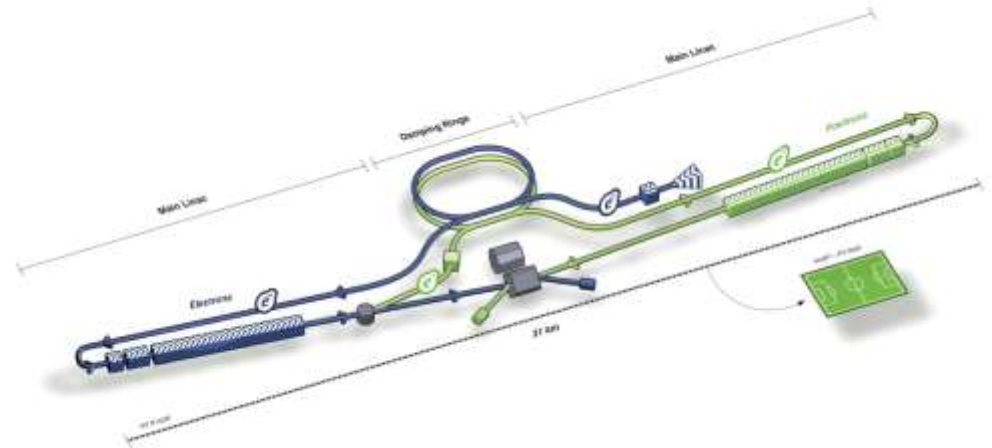
29/09/201 Event displays showing a $Z \rightarrow \ell\ell$ candidate produced with 65 reconstructed proton-proton collisions (top: 100 MeV tracks, bottom 1 GeV tracks)



Les prochains collisionneurs

□ ILC

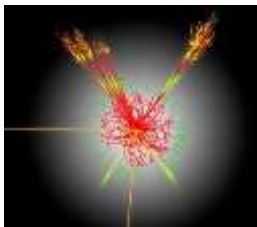
- e^+e^- de 250 à 800 GeV dans le c.m.
- ~10000 à 20000 Higgs détectés
- Décision en 2020?
- Démarrage vers 2030?



□ FCC-ee et FCC-hh

- e^+e^- de 250 à 350 GeV dans le c.m.
- Tunnel de 100 km autour de Genève
- ~50000 à 200000 Higgs détectés
- Démarrage possible vers 2035-2040?
- Possibilité d'installer plus tard un collisionneur p-p de ~100 TeV (~2060)





Conclusions et perspectives

- ❑ **Une nouvelle particule d'une masse proche de 125 GeV a été découverte**, dont les propriétés sont compatibles avec celles du boson de Higgs prédit par le Modèle Standard.

- ❑ Pas de signe de physique au delà du Modèle Standard pour le moment

➤ En particulier pas de signe de désintégration du boson de Higgs en particules invisibles

- ❑ Cette découverte ouvre tout un champ de physique au delà du Modèle Standard tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique

➤ Statistique x 3 en 2023, x 20 en 2035

- ❑ Nouvelles pistes ouvertes vers la physique au-delà du MS s'il s'avère que ce boson n'est pas un Higgs « standard »

➤ Il est possible que d'autres bosons de Higgs existent dans d'autres domaines de masse comme prédit par d'autres théories au-delà du MS (ex: la supersymétrie)

Merci pour votre attention

Merci aux organisateurs pour cette
invitation



INTRODUCTION

UNE
INTRODUCTION
À

L'AVENTURE DU GRAND COLLISIONNEUR LHC

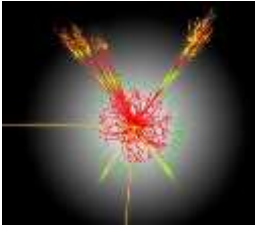
Du big bang au boson de Higgs

Daniel Denegri, Claude Guyot,
Andreas Hoecker et Lydia Roos

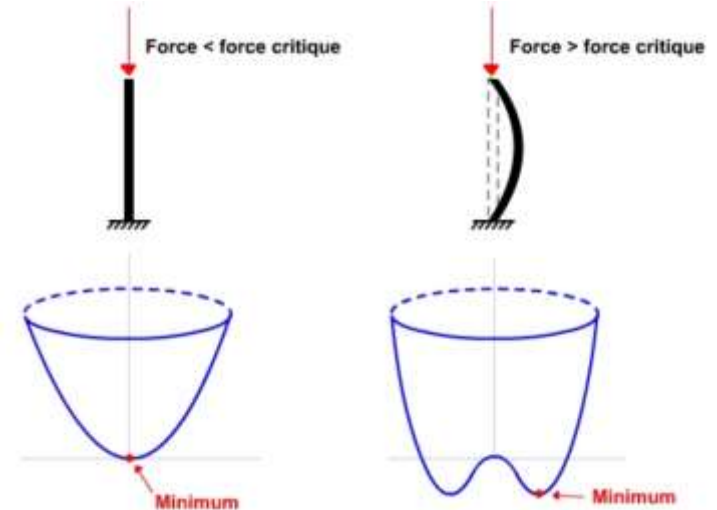
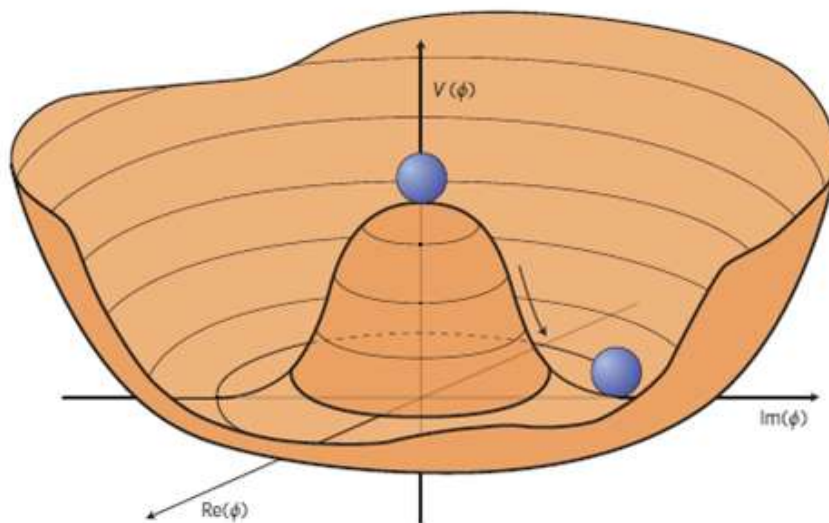
Préface de Carlo Rubbia, Prix Nobel

edp sciences

EXTRAS

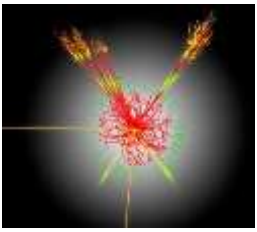


Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs



Brisure spontanée de symétrie

Le potentiel de Higgs peut s'écrire simplement en fonction des deux composantes du champ de Higgs décrit par un nombre complexe ϕ : $V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$ où μ^2 et λ sont les paramètres de masse et de couplage quartique du champ de Higgs. Lorsque la température de l'Univers descend en dessous d'une certaine valeur, μ^2 devient négatif et le potentiel prend la forme du chapeau mexicain représenté sur cette figure. À l'état fondamental, c'est-à-dire à l'énergie la plus basse de l'Univers, correspond alors une valeur non nulle du champ de Higgs $v = 246 \text{ GeV}$



Le lagrangien du Modèle Standard

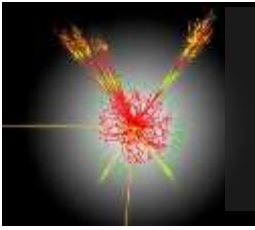
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$
$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.}$$
$$+ \sum_i \bar{\psi}_i \gamma_5 \psi_i \phi + \text{h.c.}$$
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Dynamique des champs de boson de jauge

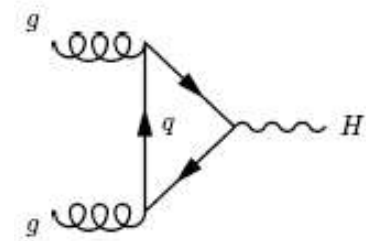
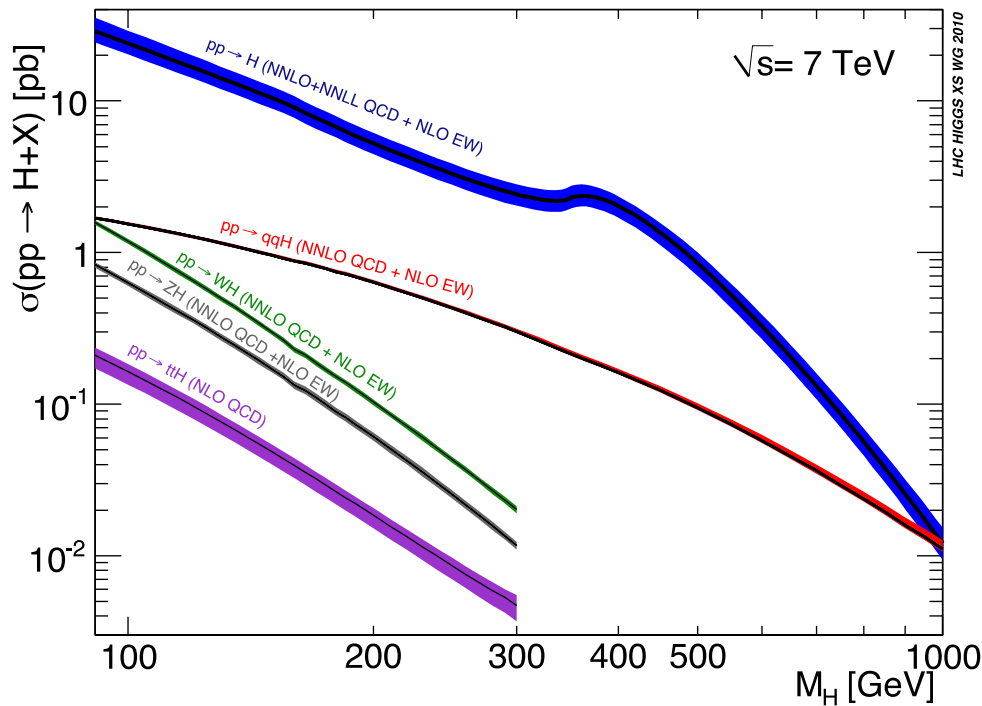
Dynamique des champs de fermions

Interaction des champs de fermion avec le champ de Higgs -> masse des fermions

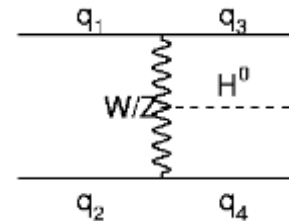
Propagation du champ de Higgs (-> masse des bosons de jauge) et potentiel de Higgs (-> brisure spontanée de symétrie)



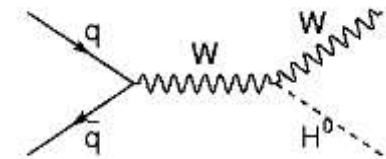
Production au LHC



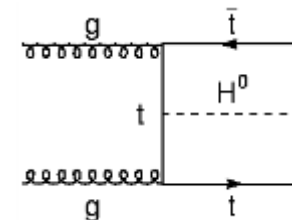
Fusion de gluons



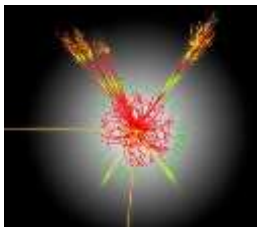
Fusion de bosons vecteurs



Production en association avec un boson W ou Z



Production en association avec une paire tt



Connaissances avant le LHC

Recherches directes avant le LHC:

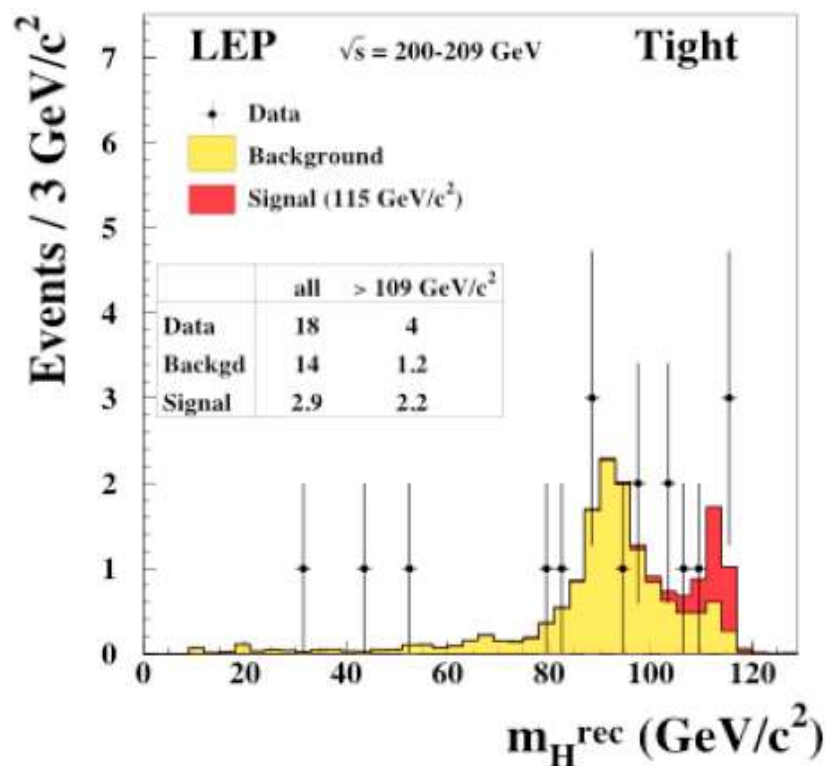
- ❑ **Le LEP au CERN** (Genève) de 1989 à 2000 (collisions électron-positon à la masse du Z, puis à 130 GeV et 209 GeV)

Gamme de masse en dessous de 115 GeV exclue à 95% de niveau de confiance

- ❑ **Le Tevatron au Fermilab** (Chicago) de 1992-2011 (collisions proton-antiproton à 1.96 TeV)

Première exclusion d'une zone autour de 160 GeV en 2010 ($m_H \notin [158-173] \text{ GeV}$)

Gamme de masse entre 147 et 179 GeV exclue à 95% de niveau de confiance à l'hiver 2012

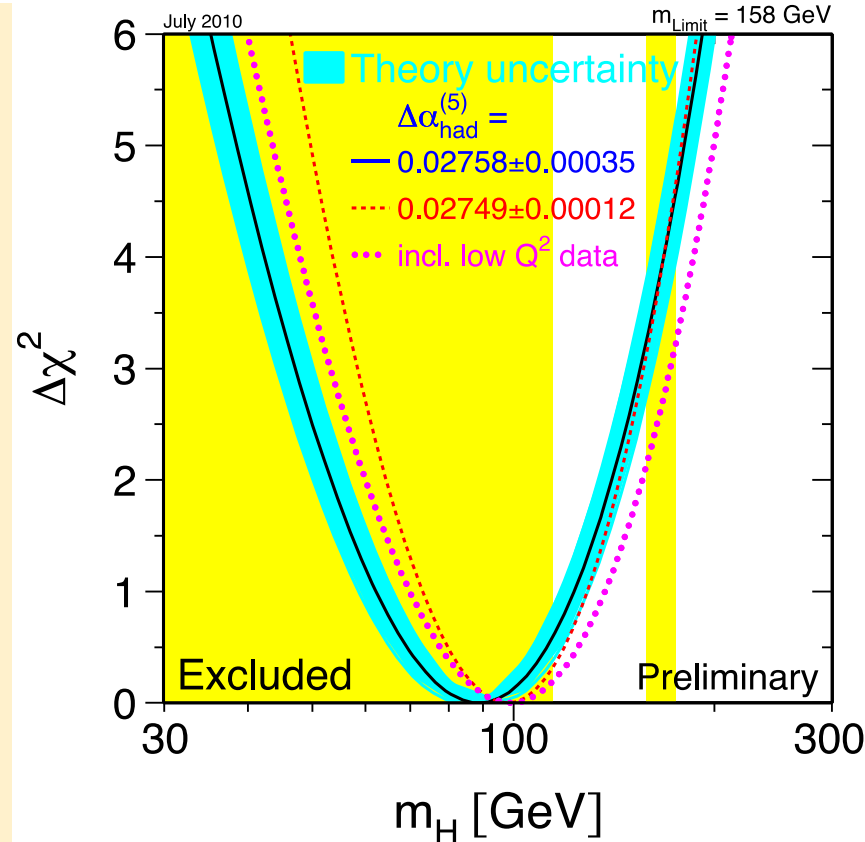


$m_H > 114.4 \text{ GeV}$ à 95% de niveau de confiance

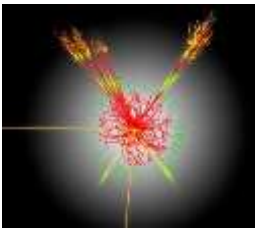
Connaissances avant le LHC

Le Modèle Standard ne prédit pas la **masse du boson de Higgs**.

- ❑ En revanche, **pour une masse donnée, le modèle prédit ses propriétés**
- ❑ **Le LEP au CERN** (Genève, 1989-2000) collisions électron-positon jusqu'à 209 GeV
 - Mesures de la masse du W et des paramètres du Z
 - Recherches directes: $m_H > 115$ GeV
- ❑ **Le Tevatron au Fermilab** (Chicago, 1992-2011) collisions proton-antiproton à 1.96 TeV
 - Découverte du quark top et mesure de sa masse
 - Recherches directes: $m_H \notin [158-173]$ GeV

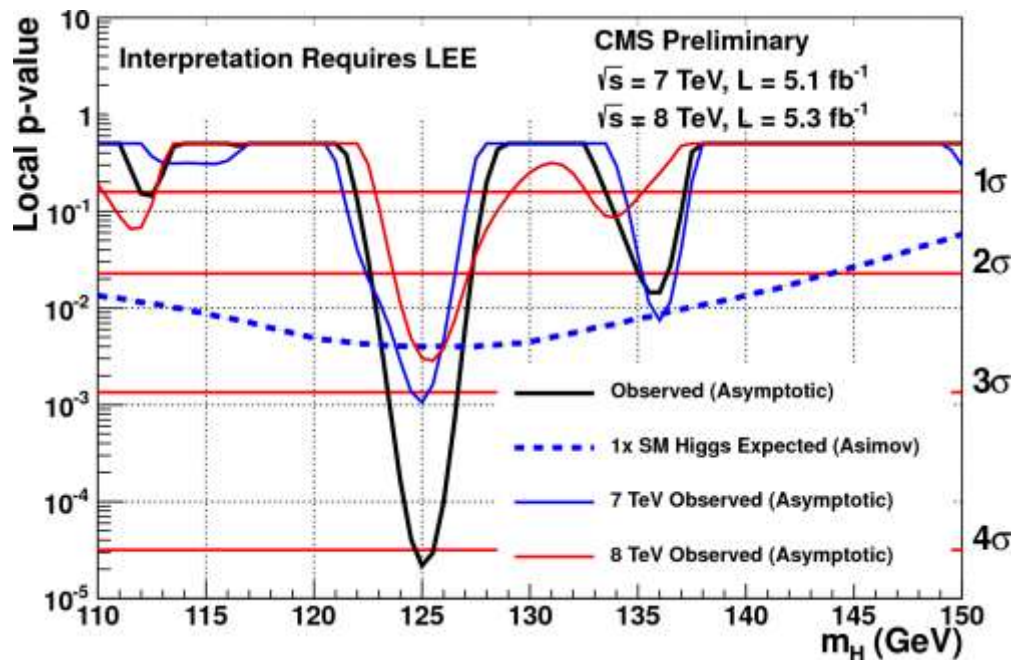


La gamme de masse la plus probable d'après ces mesures:
 $115 \text{ GeV} < m_H < 160 \text{ GeV}$



H en $\gamma\gamma$: CMS

Les données en 2011 et 2012:

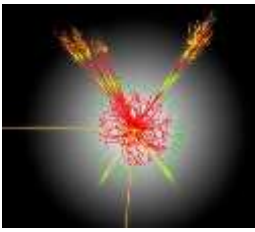


Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 30 sur un million
= 0.00003

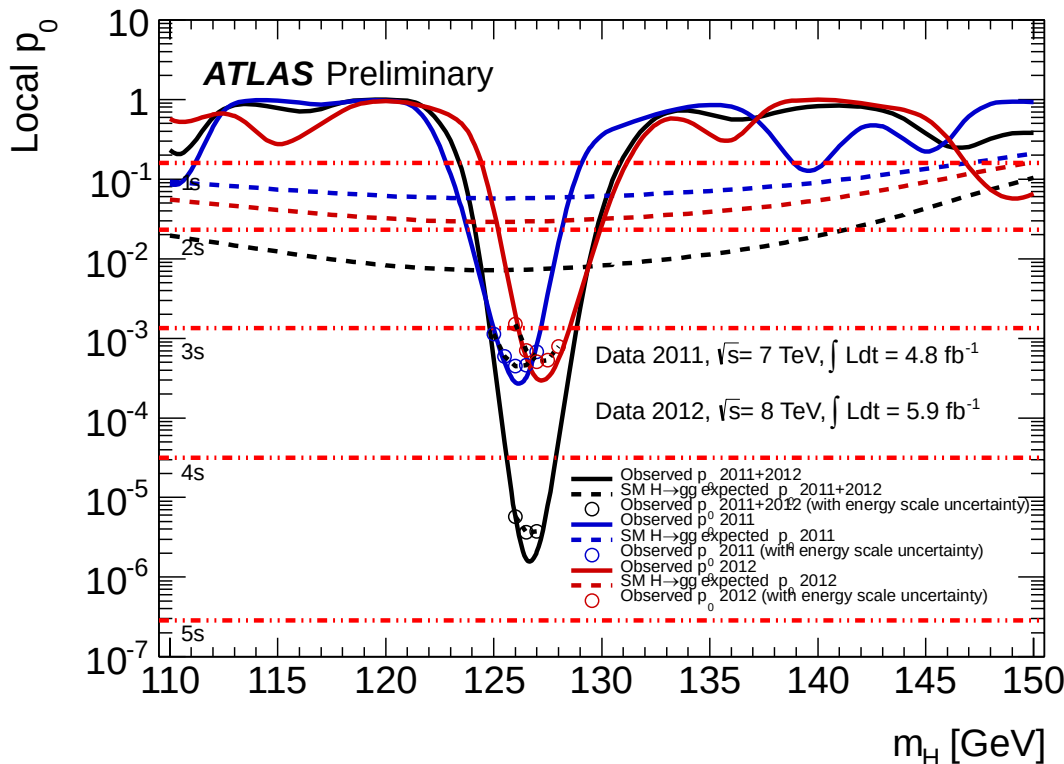
(~ 4.1 écarts standard ou
4.1 σ)

NB: par convention, on
déclare une découverte à
partir de 5 σ soit environ
une probabilité 0.0000003



H en $\gamma\gamma$: ATLAS

Les données en 2011 et 2012:



Excès autour de 125 GeV!

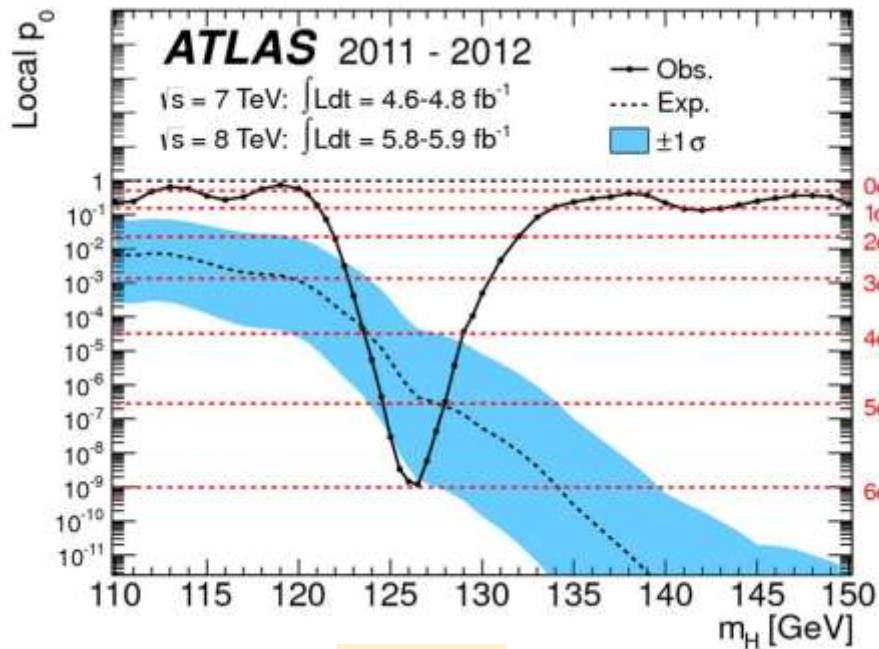
Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 2 sur un million
= 0.000002

(~ 4.5 écarts standard ou
 4.5σ)

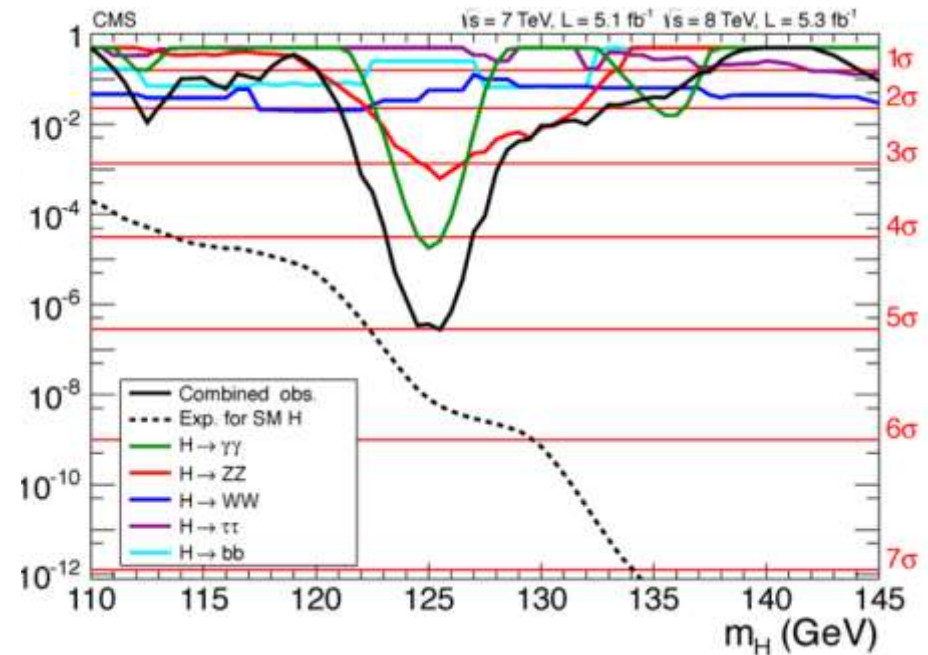
NB: par convention, on
déclare une découverte à
partir de 5σ soit environ
une probabilité 0.0000003

Et en combinant les canaux!

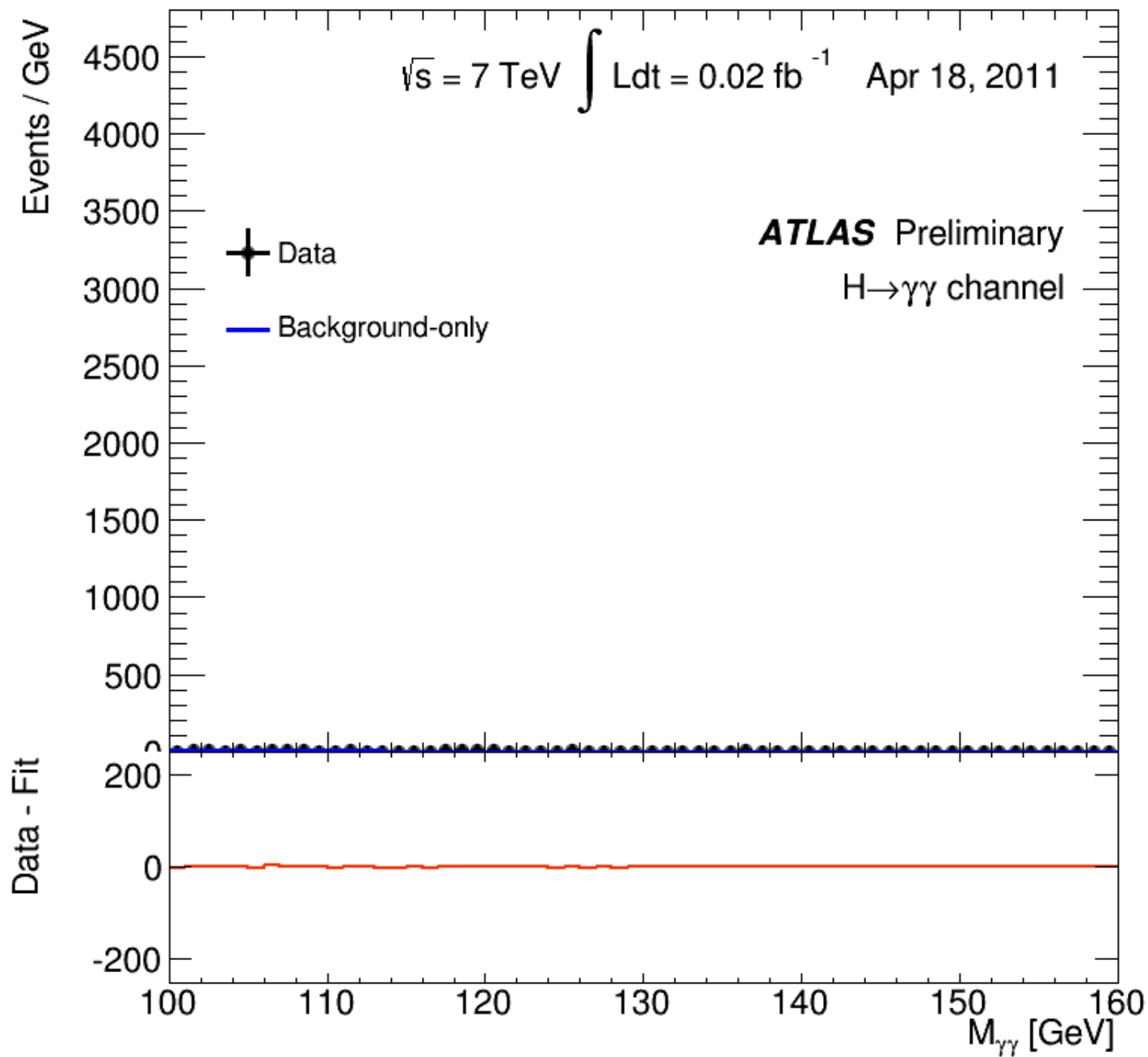
Probabilité que les données soient compatibles avec une fluctuation du bruit de fond

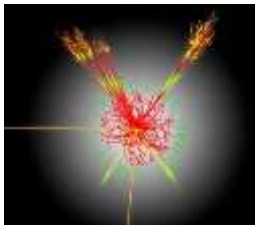


6 σ

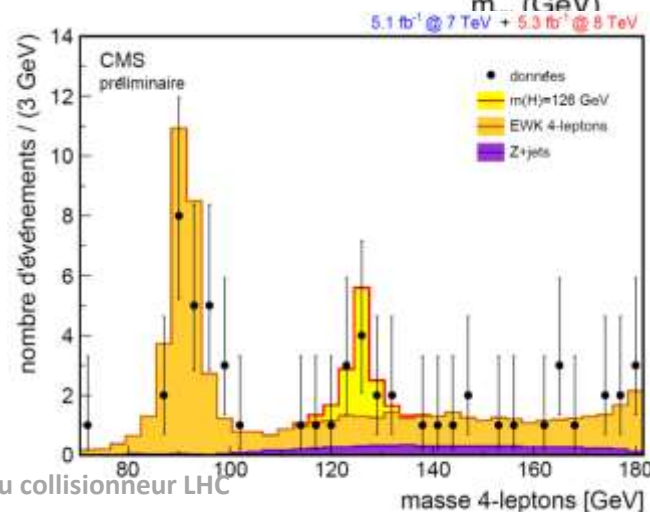
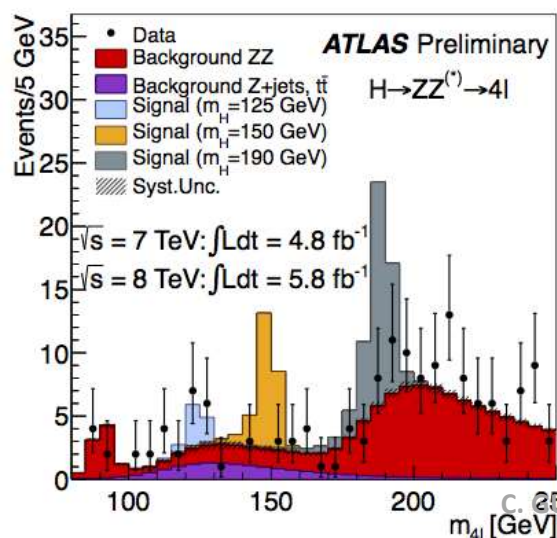
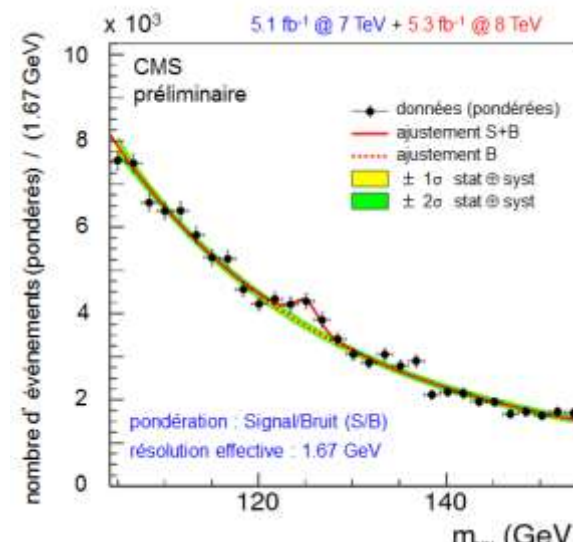
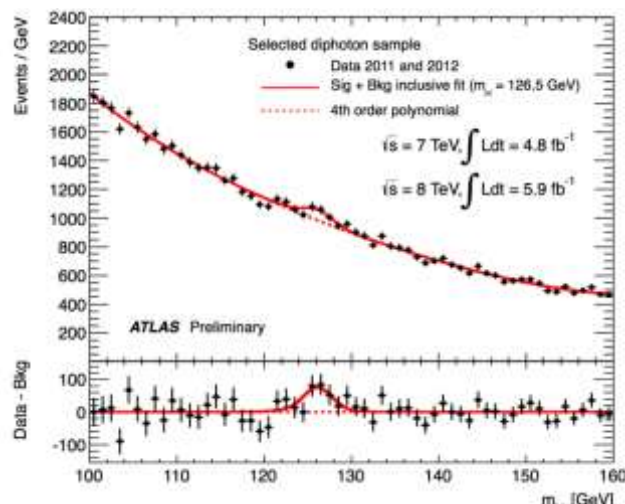


5 σ

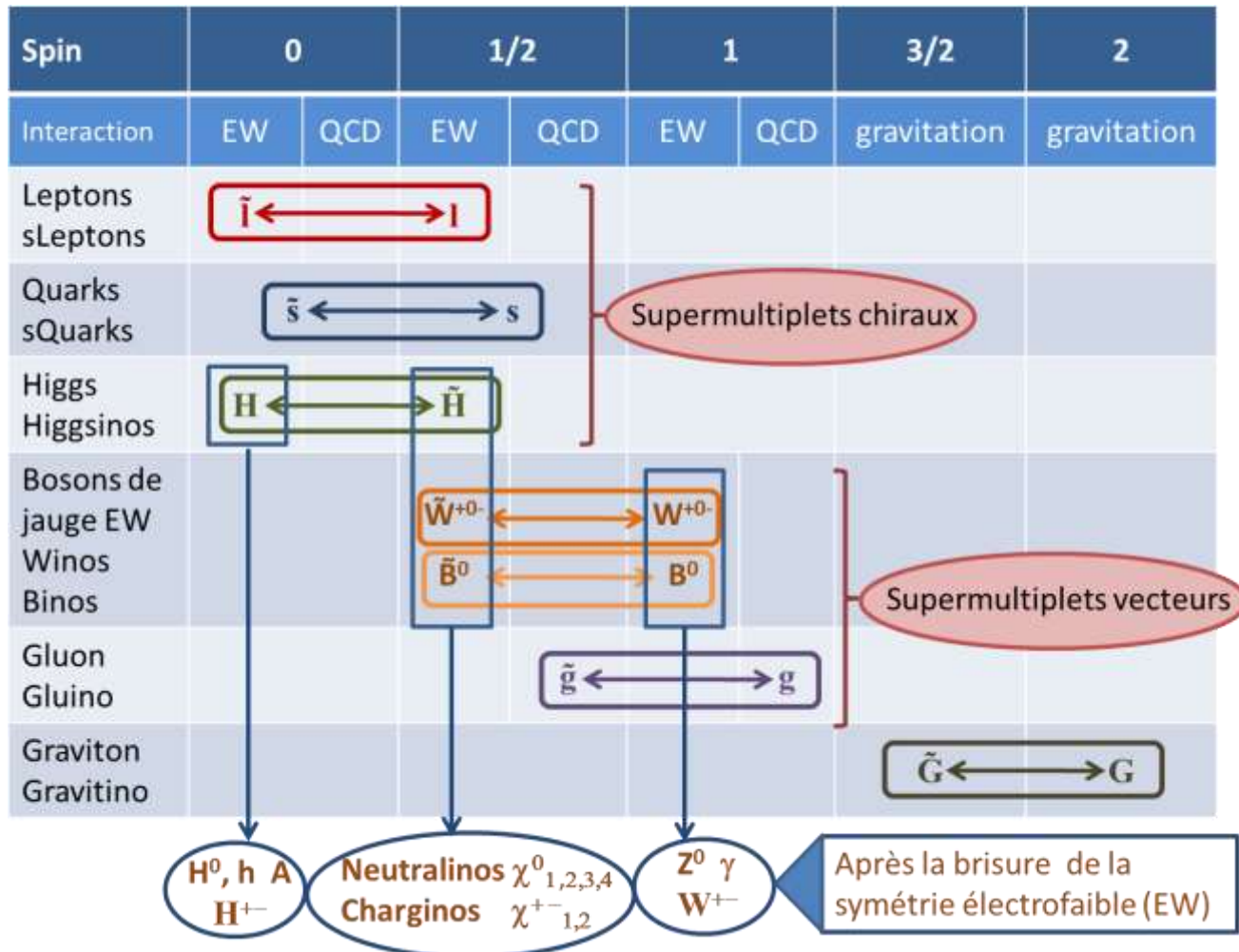


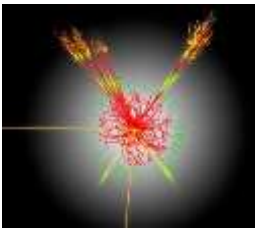


La masse est dite!



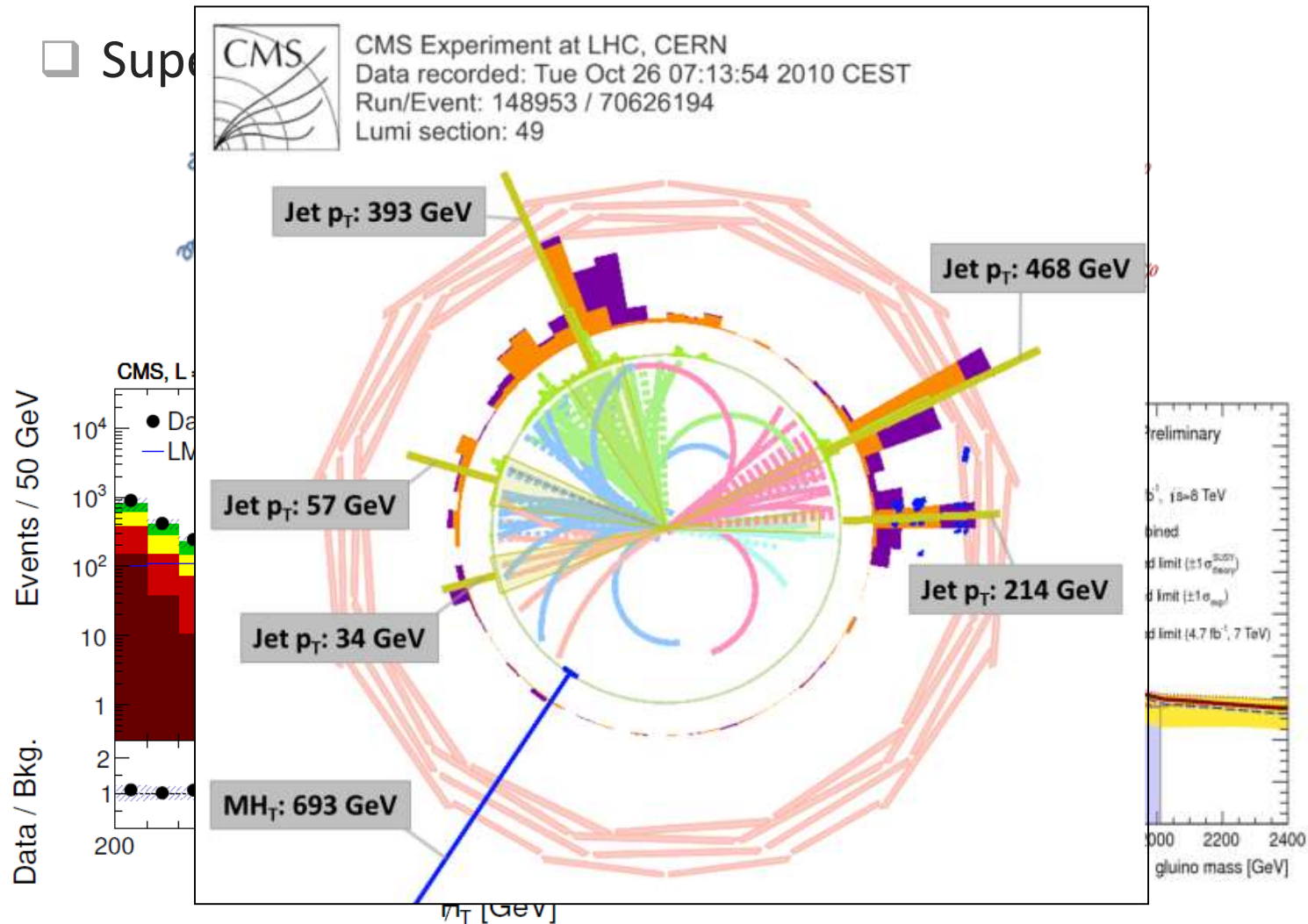
Le Modele Super Symétrique Minimal

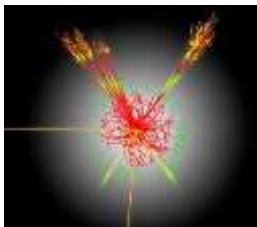




Recherche de la nouvelle physique(1)

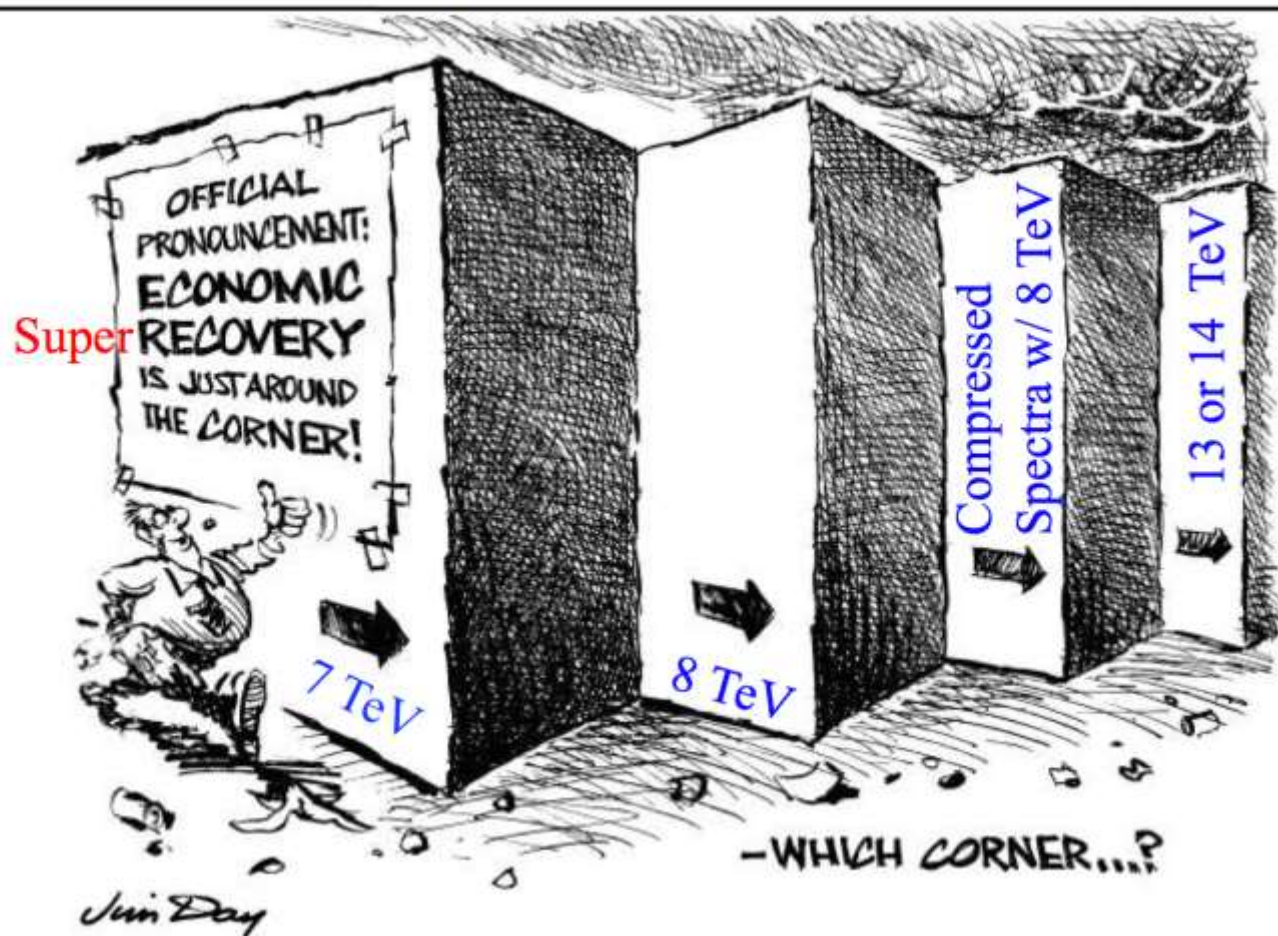
■ Super



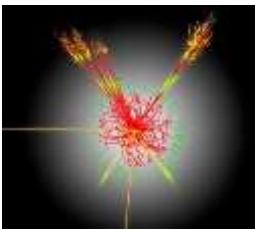


Recherche de la nouvelle physique(2)

SUSY around the corner or in a corner?

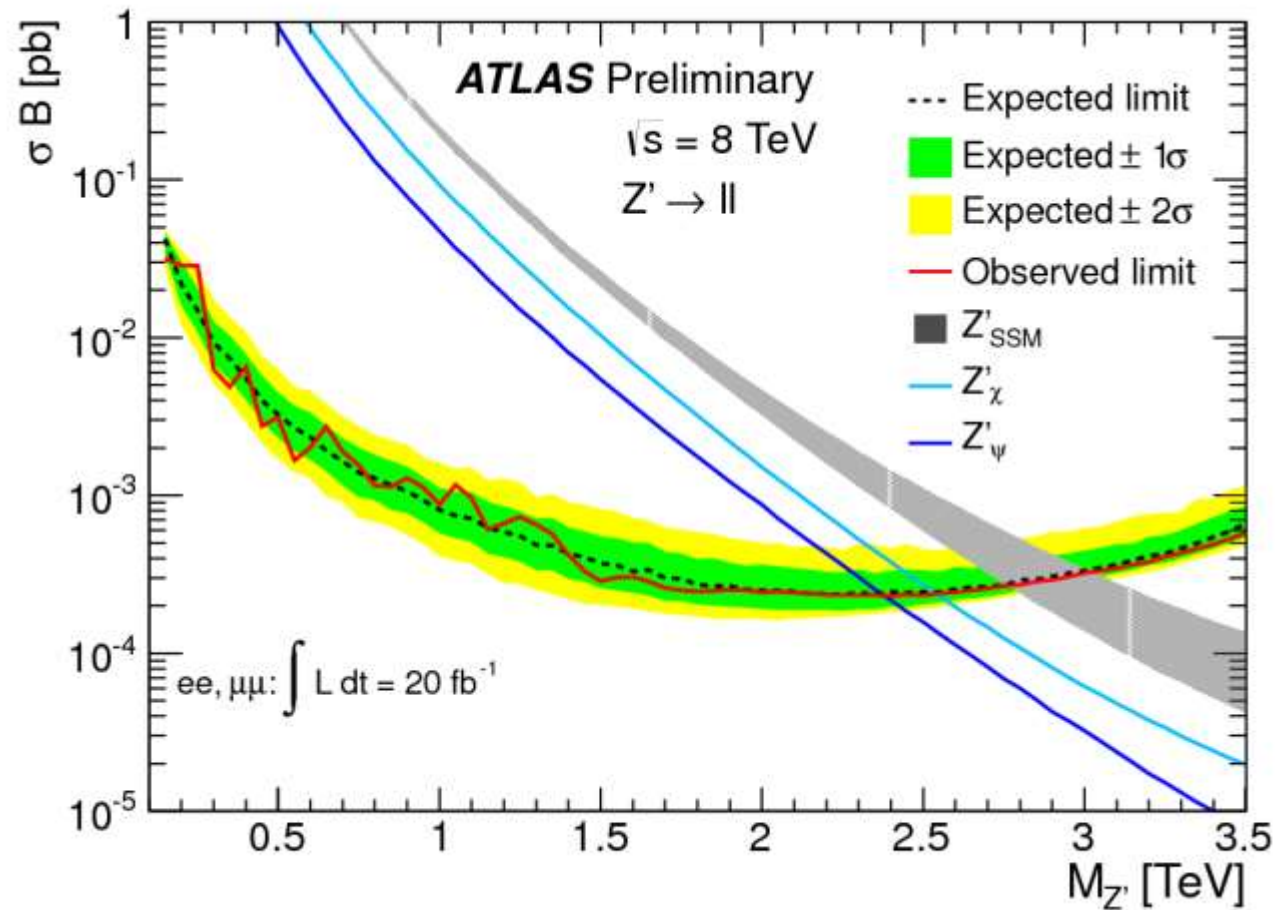
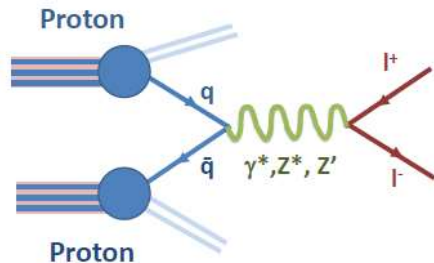


SUSY searches, David Stuart, UCSB



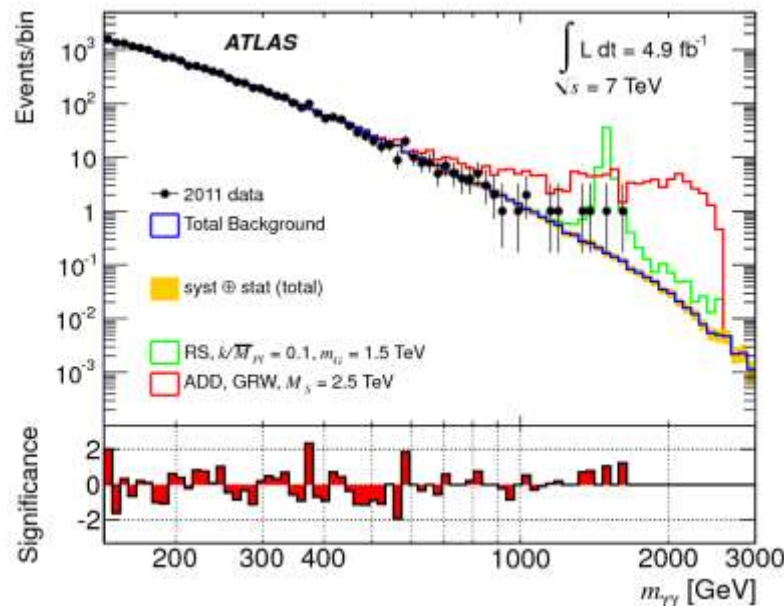
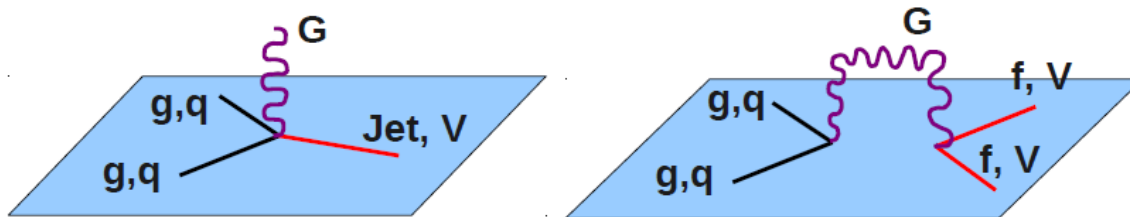
Recherche de la nouvelle physique(3)

□ Des signes de grande Unification?

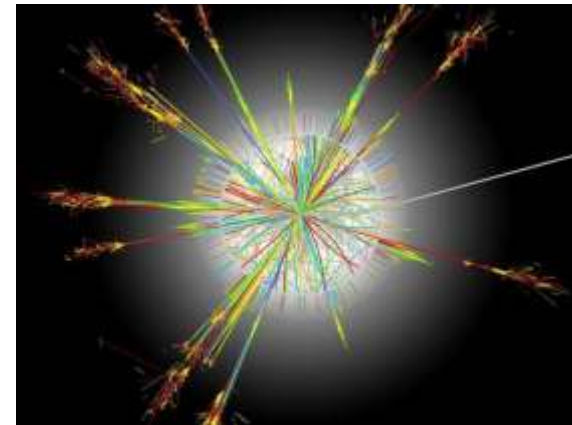


Recherche de la nouvelle physique(4)

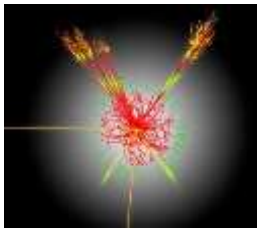
□ Dimensions supplémentaires



Micro trou noir (simulation)



Recherche de la nouvelle physique(5)



Supersymmetry

illustrationsOf.com/439307



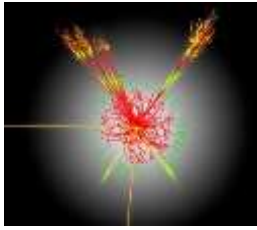
Composite
Higgs

©Ron Leishman * illustrationsOf.com/437971

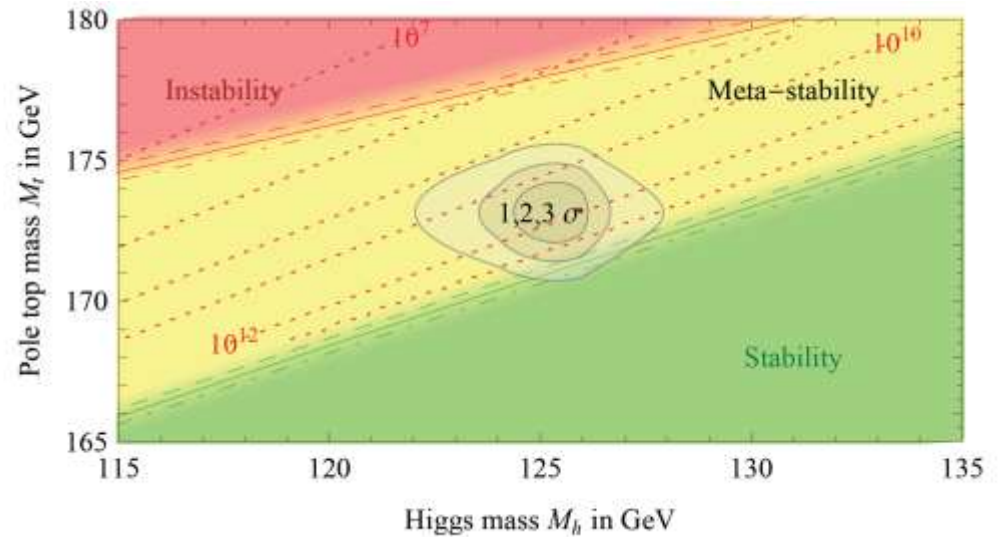
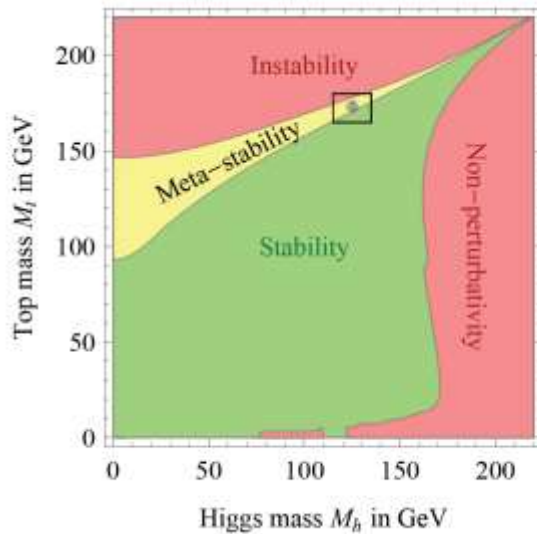
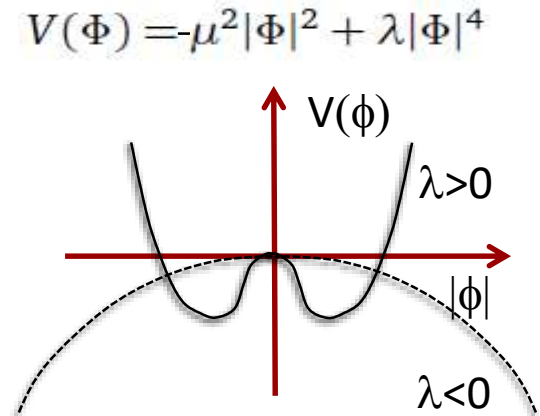
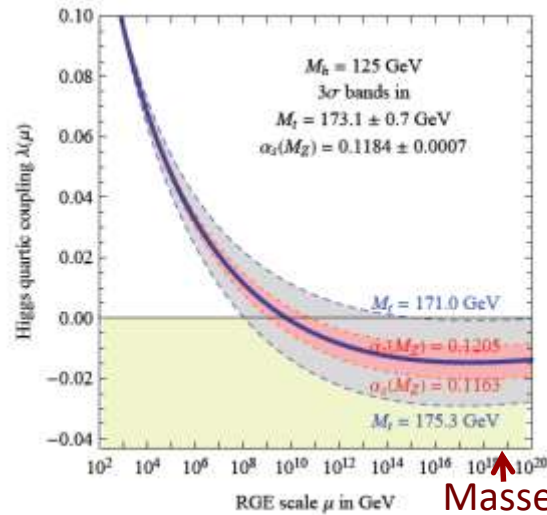
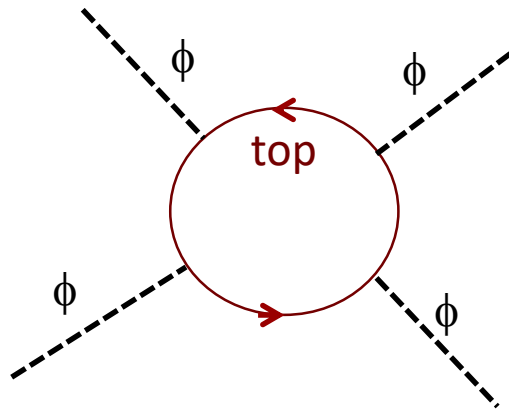


Extra
dimensions

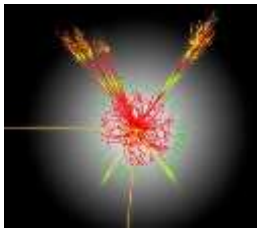
Copyright © Ron Leishman * illustrationsOf.com/437971



La stabilité du vide du modèle standard



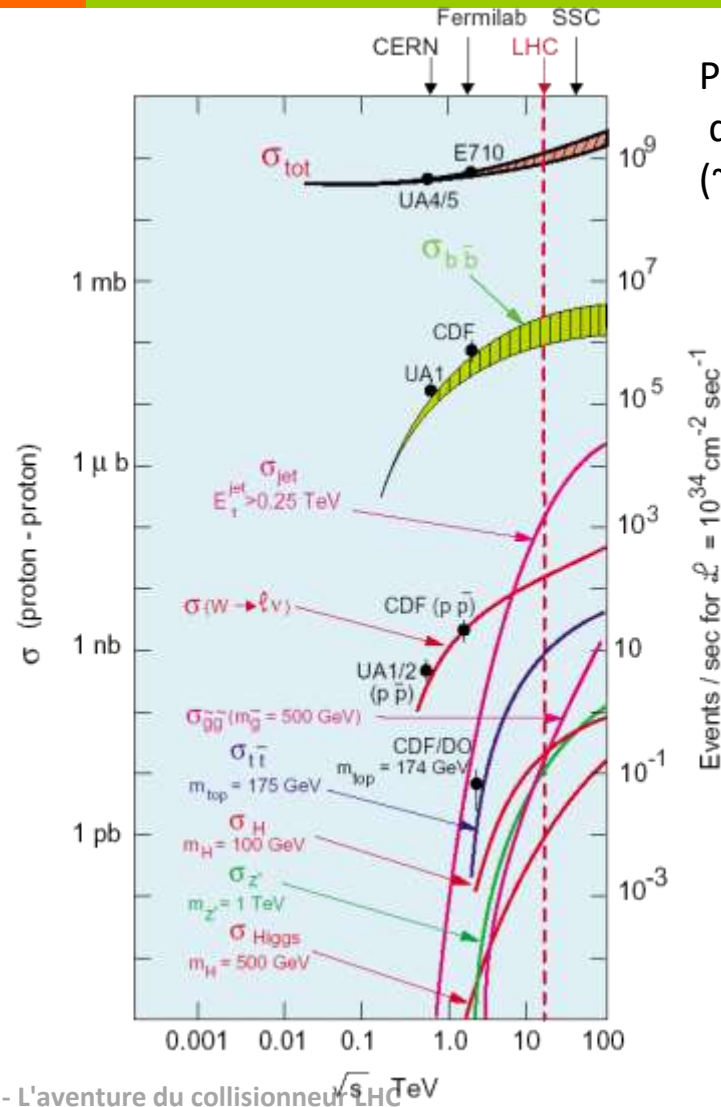
Comment produire le boson de Higgs



Le boson de Higgs

- ❑ Pas vu au LEP, car l'énergie du LEP est trop faible pour produire une si grande masse ($E=mc^2$)
- ❑ Pas vu au Tevatron, car s'il est produit, il ne l'est pas en quantité suffisante pour conclure

Il faut donc un collisionneur avec une énergie plus grande, et un très grand nombre de collisions: le LHC!

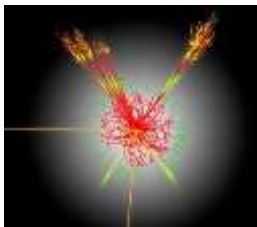


Pour 10 milliards d'événements (~10s au LHC!)

≈ 100 millions de quarks b

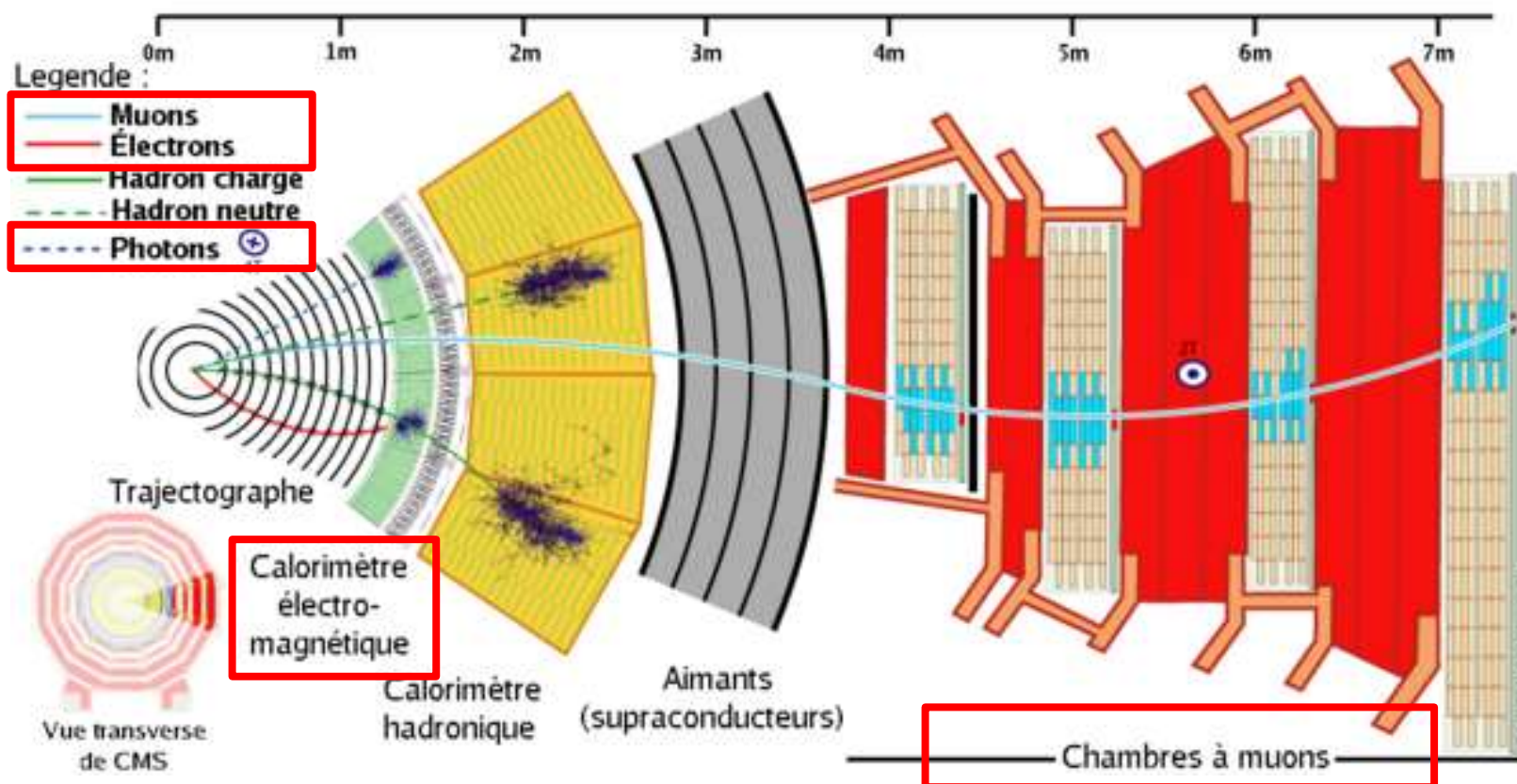
≈ 200 000 bosons W

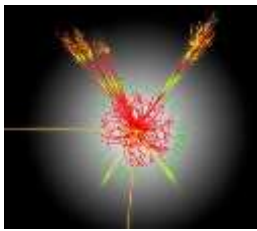
≈ 3 bosons de Higgs



Comment le détecter?

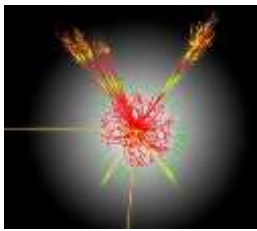
- On utilise les interactions entre les particules et la matière pour détecter les particules
- Chaque type de particule interagit différemment et a un sous-détecteur dédié





La naissance du projet LHC

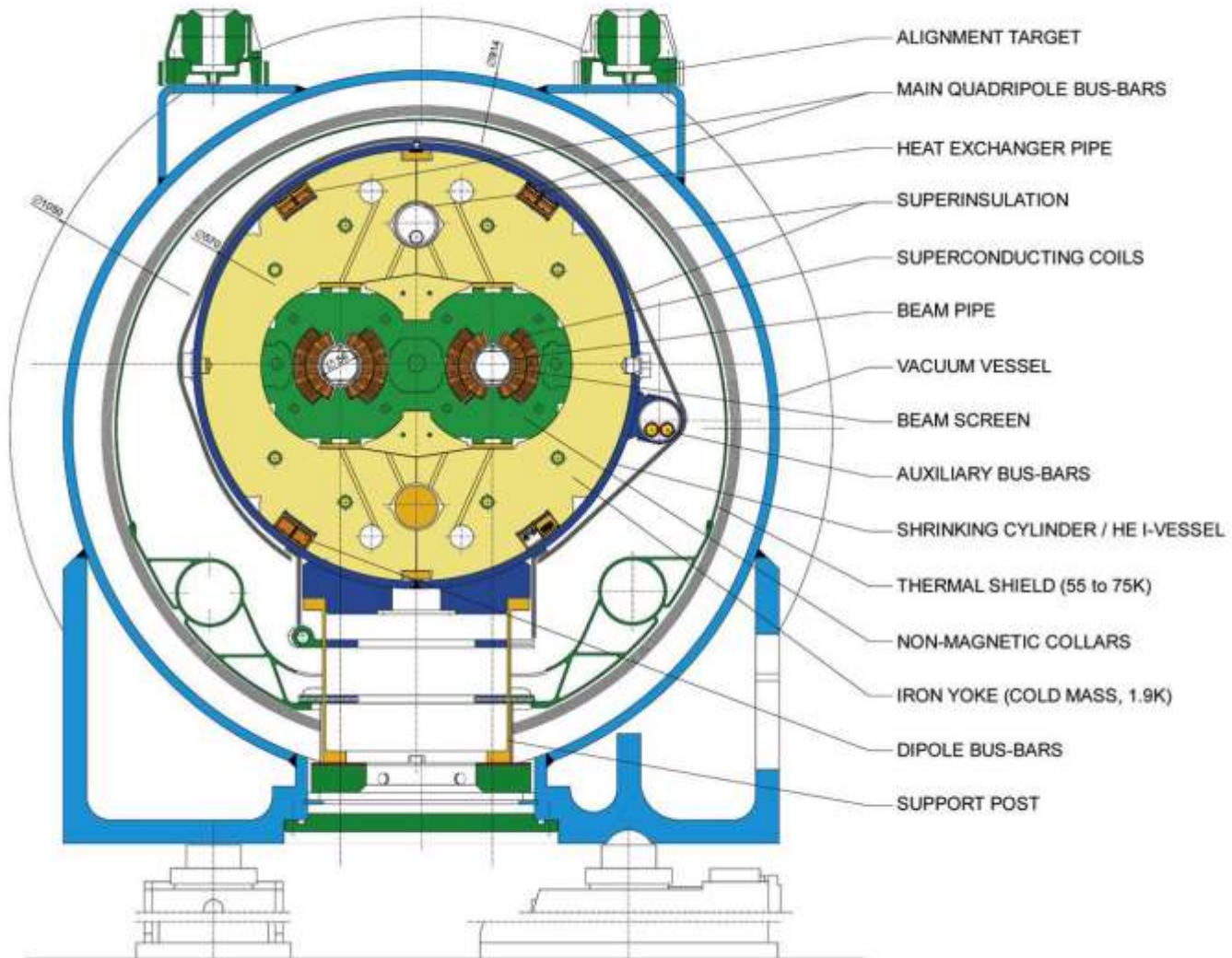
- ❑ **1981-1984:** le collisionneur proton-antiproton du CERN a fonctionné à merveille
 - Les particules W et Z ont été découvertes par les expériences UA1 et UA2 en 1983
- ❑ Le LEP n'est pas encore terminé, mais son tunnel est creusé (27 km)
 - Sous l'impulsion de Carlo Rubbia, quelques dizaines de physiciens imaginent un collisionneur à protons pour l'après-LEP avec comme objectif principal la découverte du boson de Higgs
- ❑ **Mars 1984:** Workshop de Lausanne => LHC
- ❑ Le principe du projet LHC est approuvé par le conseil du CERN en décembre **1991**
- ❑ Les (proto)-collaborations pour les détecteurs se forment (CMS, EAGLE, ASCOT....)
 - Phase de conception, de discussions, du partage des tâches au niveau mondial.
- ❑ Formation des collaborations en **1992** (workshop d'Evian): **CMS, ATLAS**, ALICE, LHCb
 - Décisions sur les participations du DAPNIA(=IRFU) a ATLAS, puis a CMS
- ❑ Le SSC, concurrent US géant, sera abandonné en **1993**.
 - Les premières collisions au LHC sont promises pour l'année 2000! Elles ne viendront qu'en 2009.

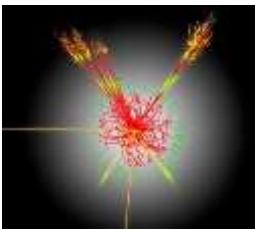


Le LHC

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/EN/MM - HE107 - 30 04 1999

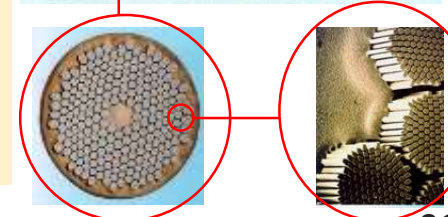
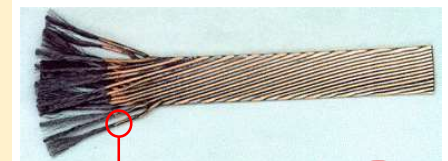


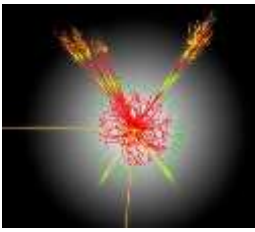


Le LHC en quelques chiffres

La machine contient 9300 aimants:

- 392 quadripôles supraconducteurs (focalisation)
- 2464 sextupôles, 1232 octupôles, plus de 1200 autres petits aimants de correction
- 1232 dipôles, le plus gros défi à relever (14.3m et 35t par dipôle = 18 km de dipôles sur les 27 km de LHC)
- **Supraconducteurs:**
 - NbTi température de transition 10K utilisé à 1.9K $\Rightarrow$ champ de 8.33T
 - Energie stockée > 10 GJ ($\approx$ un A380 à 700 km/h) (200 x les précédents accélérateurs)
- **Bobinage**
 - 1 câble ($\varnothing 1,5\text{cm}$) = 36 brins torsadés ($\varnothing 1,5\text{mm}$)
 - 1 brin = 6400 filaments ($\varnothing 7\mu\text{m}$)
 - 7600km de câbles = en brins 5 AR Terre-Soleil plus un aller sur la Lune!
- **Cryogénie:**
 - Le plus gros frigo du monde: 40000t de matériel à 1.9K (120t d'He superfluide). 1,9K = -271,25°C.
 - L'endroit le plus froid de l'univers (le fond diffus est à 2.7K)
 - Avec des températures générées par les collisions plus de 100 000 fois supérieures à celles qui règnent au centre du Soleil.

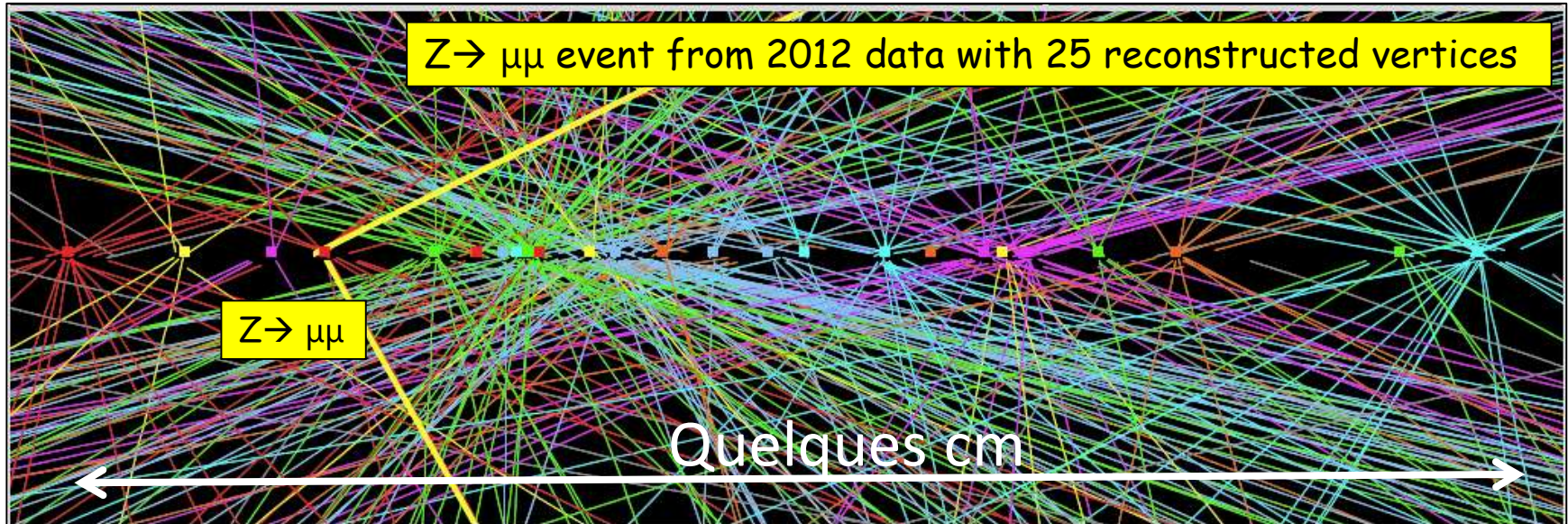


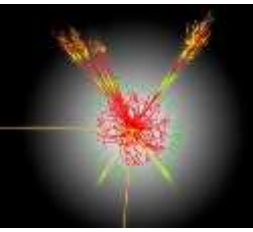


Les prises de données en 2011 et 2012

Principale difficulté: le taux de collisions

- Croisement de paquets de protons ($>1,5 \cdot 10^{11}p$) chaque 50 ns $\Rightarrow 40 \cdot 10^6$ par seconde
- Plus de 25 interactions proton-protons en moyenne par croisement
 - ✓ Beaucoup de travail nécessaire pour maintenir les performances des détecteurs
- Seulement 400 évènements enregistrés par seconde $\Rightarrow \sim 10^9$ évènements/an
 - ✓ ~ 25 bosons de Higgs ($m_H=125$ GeV) attendus dans le canal $H \rightarrow 4$ leptons sur 2011+2012 (avant analyse)

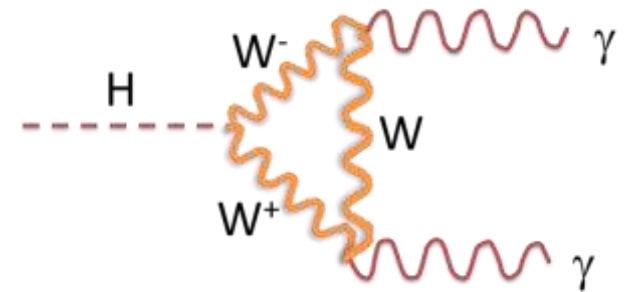




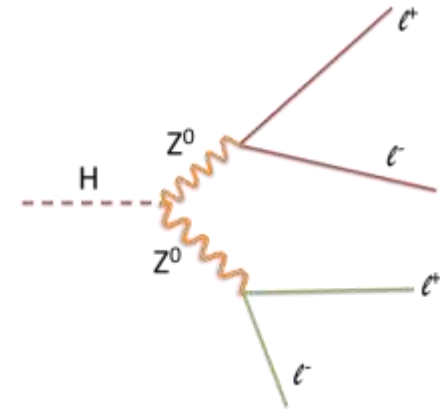
Recherche du boson de Higgs

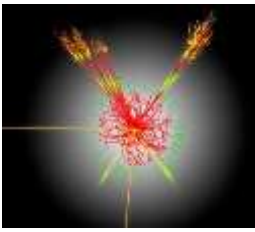
Les derniers résultats d'ATLAS et CMS:

❑ Recherche du Higgs se désintégrant en deux photons γ



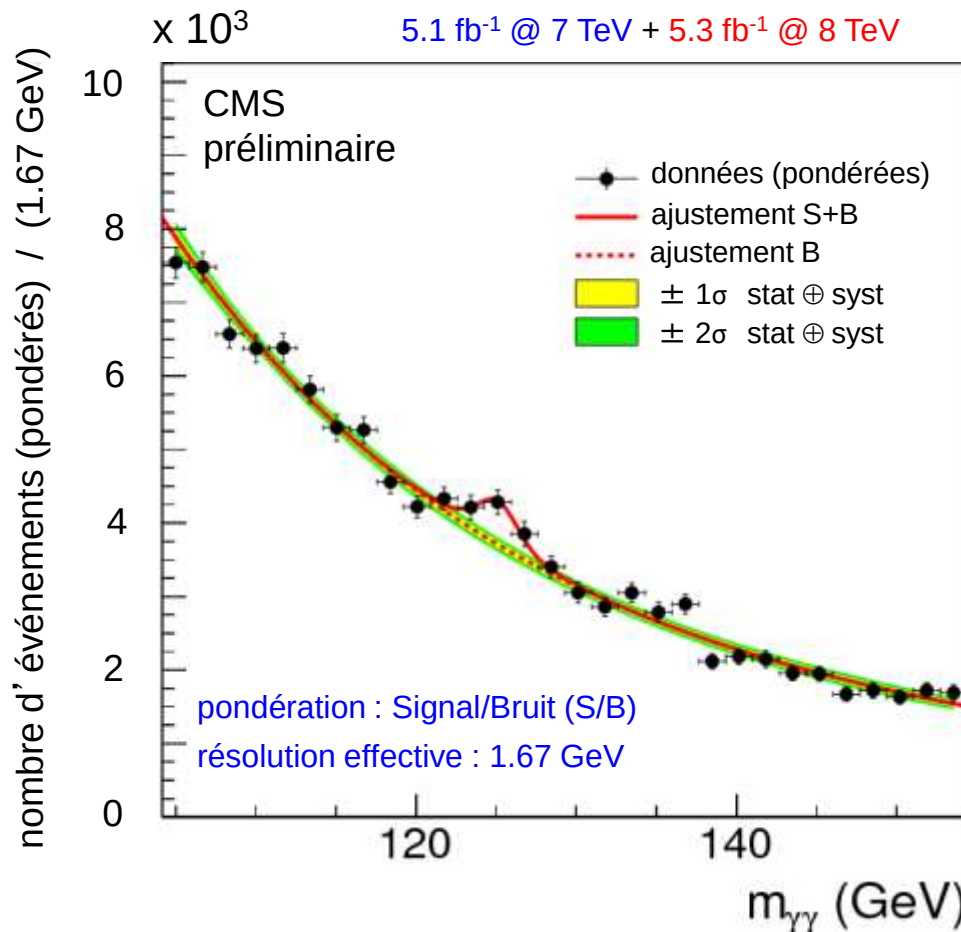
❑ Recherche du Higgs se désintégrant en deux bosons Z





H en $\gamma\gamma$: CMS

Les données en 2011 et 2012:

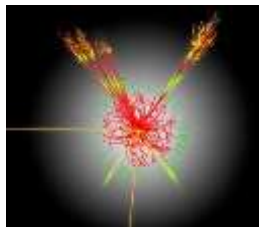


Excès autour de 125 GeV!

Probabilité d'une
fluctuation du bruit de
fond: 30 sur un million
= 0.00003

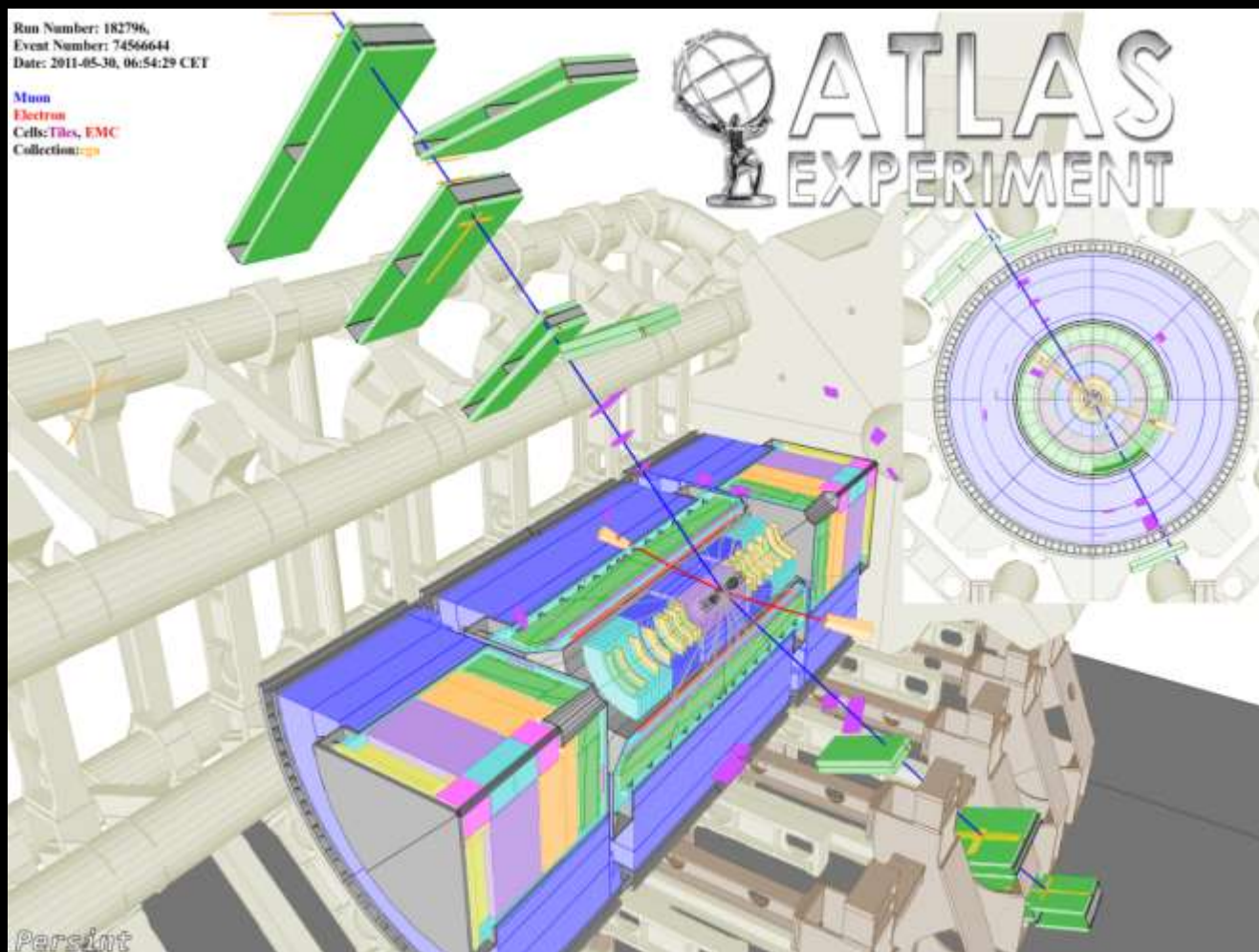
(~ 4.1 écarts standard ou
4.1σ)

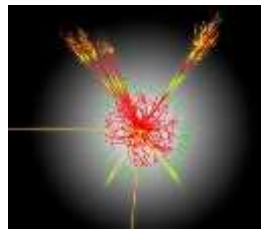
NB: par convention, on
déclare une découverte à
partir de 5σ soit environ
une probabilité 0.0000003



$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons} (4e, 2e2\mu, 4\mu)$

Candidat
 $H \rightarrow 2e2\mu$

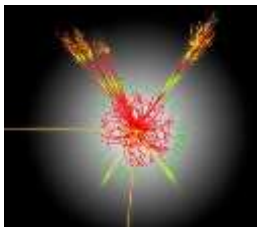




$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons } (4e, 2e2\mu, 4\mu)$

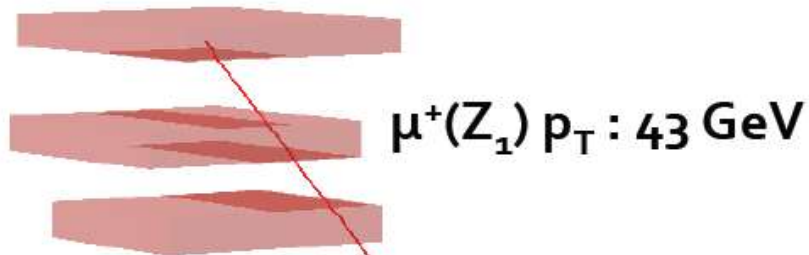
- ❑ Canal utilisable pour $120\text{GeV} < m_H < 600 \text{ GeV}$
- ❑ A l'oppose du canal en 2γ , faible nombre d'évènement attendus (~ 5 evts pour $m_H = 125 \text{ GeV}$ après coupures d'analyse dans mais avec un très faible bruit de fond (~ 5 evts entre 120 et 130 GeV):
 - **ZZ** (dit irréductible: état final a 4 leptons isoless)
 - **Z+b $\bar{b}$** (désintégration semi-leptonique des hadrons B)
 - **Z+jets** (jets simulant des leptons)
 - **t $\bar{t}$** : top-antitop $\rightarrow 2 \text{ leptons} + b\bar{b} \rightarrow 4 \text{ leptons} + \dots$

} Fond dit reductible



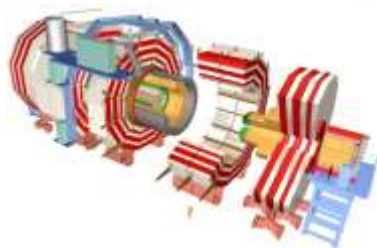
$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Candidate
 $H \rightarrow 2e2\mu$

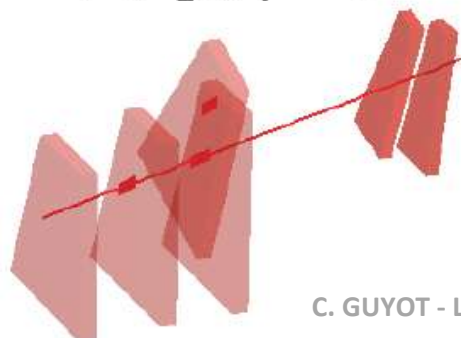


8 TeV DATA

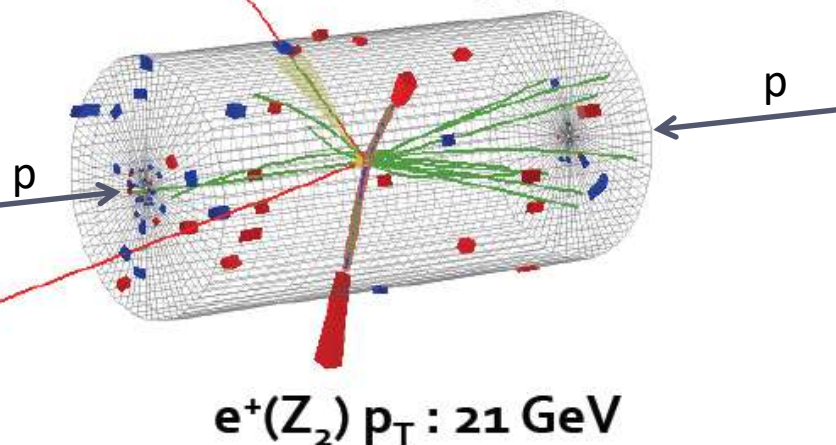
4-lepton Mass : 126.9 GeV



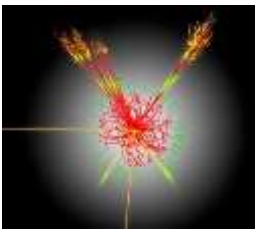
$\mu^-(Z_1) p_T : 24 \text{ GeV}$



$e^-(Z_2) p_T : 10 \text{ GeV}$

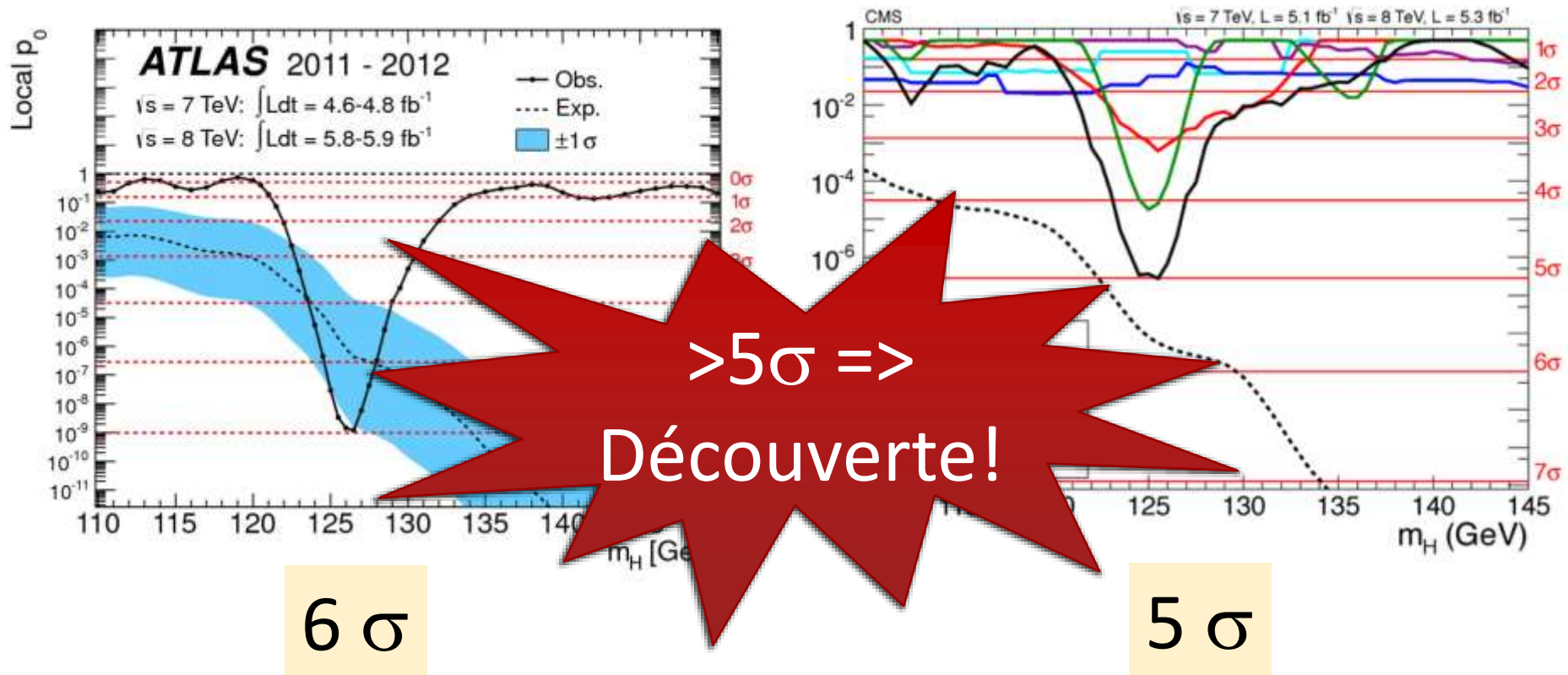


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 137440354
Lumi section: 115



Et en combinant les canaux!

Probabilité que les données soient compatibles avec une fluctuation du bruit de fond



Auditorium du Cern, 4 juillet 2012, 9h

**Dans chaque expérience,
on ignore ce que va dire l'autre!
(sauf les 2 porte-parole...)**

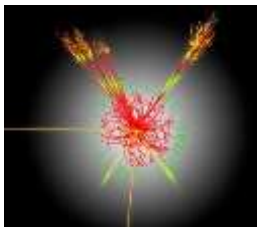


Auditorium du Cern, 4 juillet 2012, 9h

5σ !

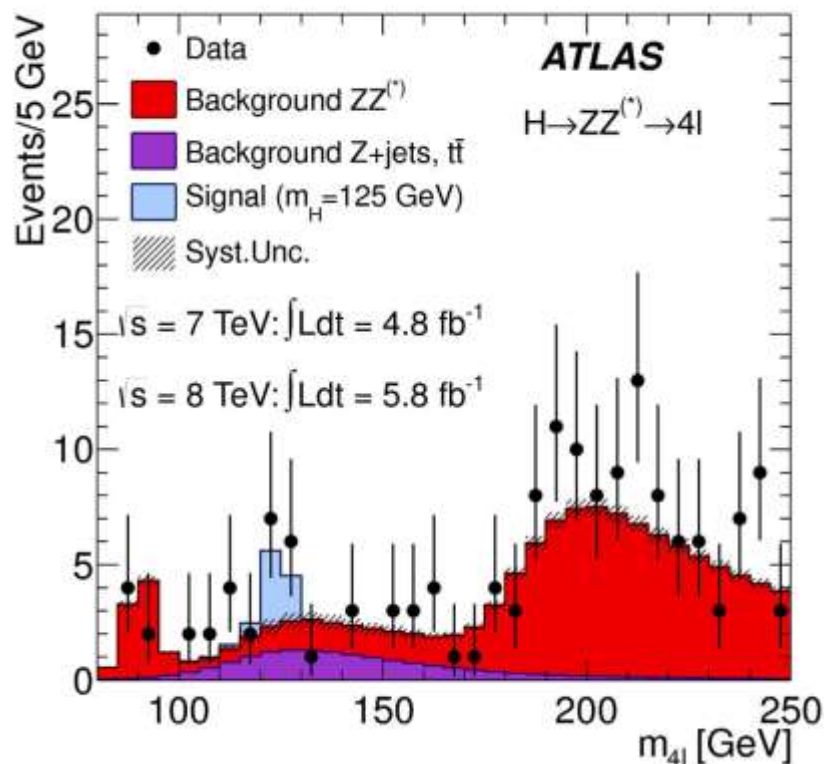


Heuer (DG Cern), Englert, Higgs

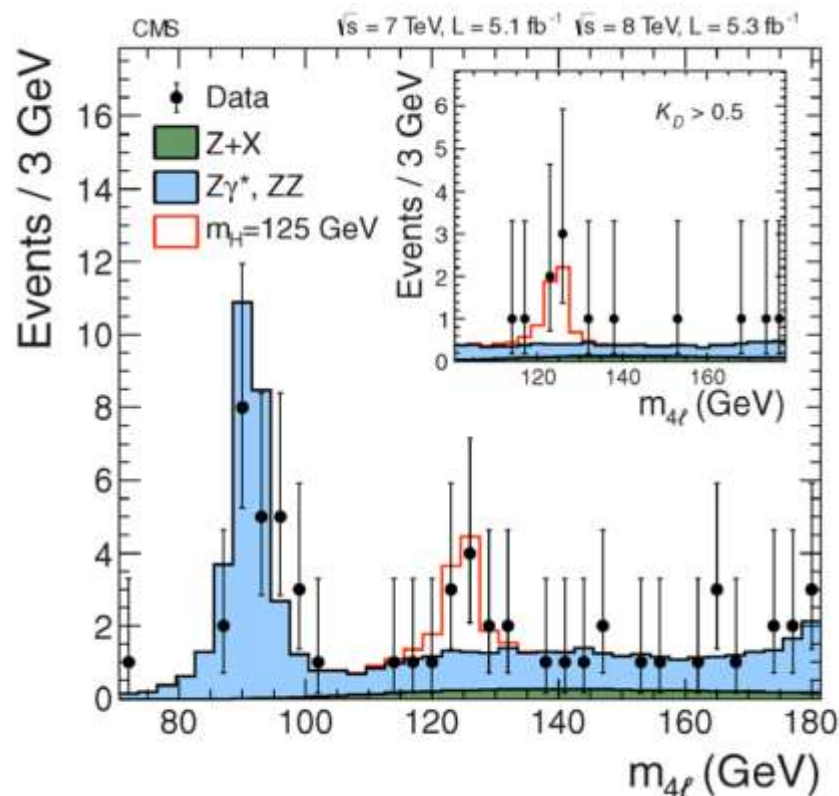


$H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

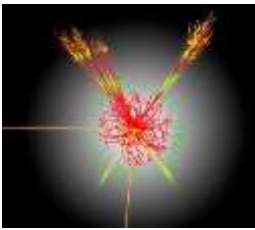
Spectre de masse invariante des 4 leptons (zone a basse masse)



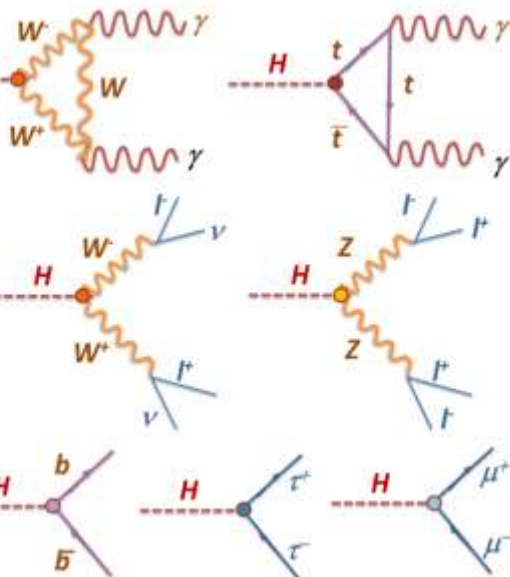
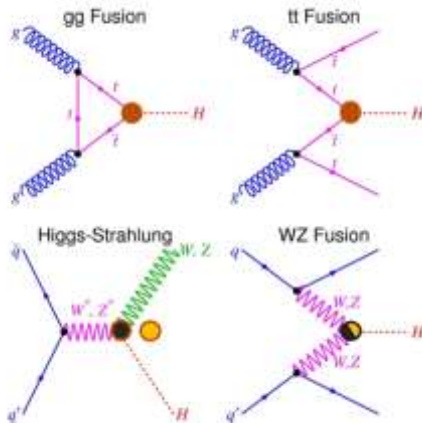
Significativité statistique: $3,4\sigma$



Significativité statistique: $3,2\sigma$



Est-ce un boson de Higgs du MS?



- Couplages:
- $t\bar{t}H$
 - $b\bar{b}H$
 - $\mu^+\mu^-H$
 - $\tau^+\tau^-H$
 - W^+W^-H
 - ZZH

19.7 fb⁻¹ (8 TeV) + 5.1 fb⁻¹ (7 TeV)

Combined
 $\mu = 1.00 \pm 0.13$

CMS
Preliminary

$m_H = 125$ GeV

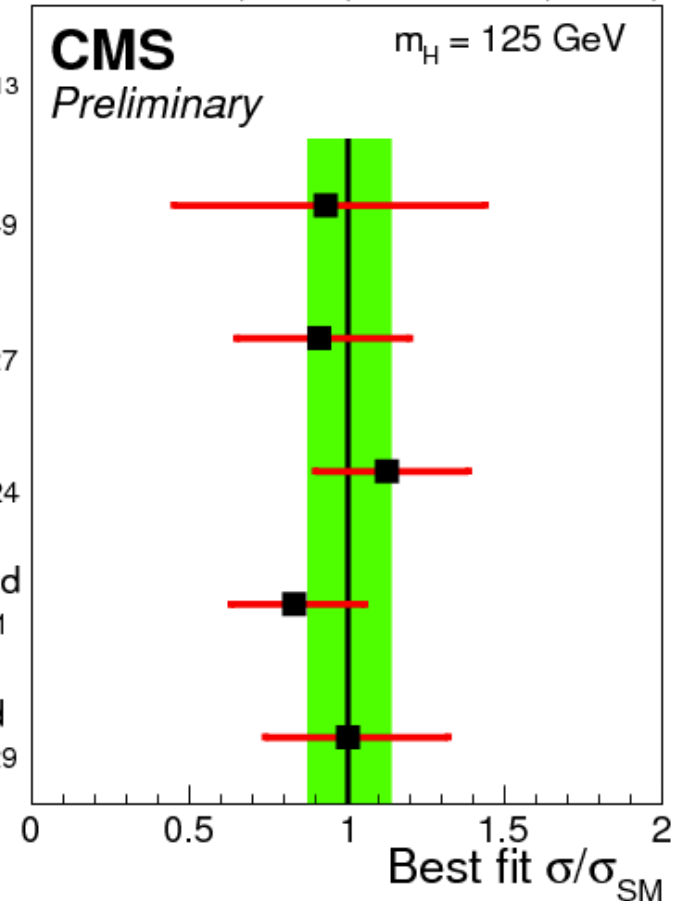
$H \rightarrow b\bar{b}$ tagged
 $\mu = 0.93 \pm 0.49$

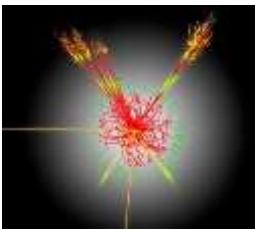
$H \rightarrow \tau\tau$ tagged
 $\mu = 0.91 \pm 0.27$

$H \rightarrow \gamma\gamma$ tagged
 $\mu = 1.13 \pm 0.24$

$H \rightarrow WW$ tagged
 $\mu = 0.83 \pm 0.21$

$H \rightarrow ZZ$ tagged
 $\mu = 1.00 \pm 0.29$





Est-ce un boson de Higgs du MS?

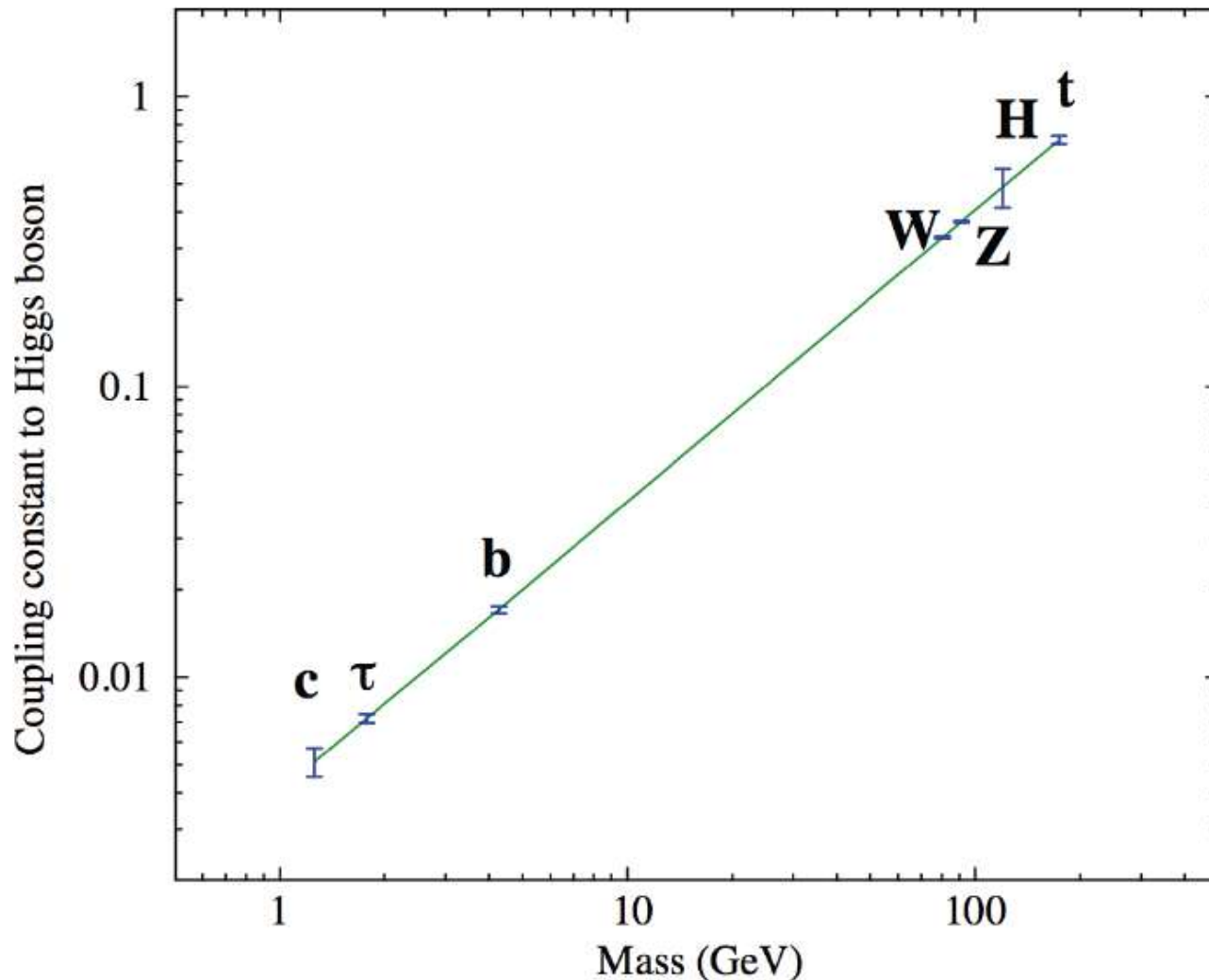
Les questions auxquelles on souhaite (et devrait pouvoir) répondre dans années à venir avec plus de données au LHC:

- ☐ Quelle est sa structure d'espace-temps? Spin, Parité, CP.
 - Dans le MS: spin 0, CP=++
- ☐ Quels sont les couplages de ce nouveau boson aux particules du Modèle Standard?
 - Proportionnels à la masse comme dans le Modèle Standard?
 - Les couplages interviennent à la fois dans les processus de production et de désintégration du Higgs
- ☐ Est-ce une particule composite? Par exemple composée de fermions issus d'un secteur fort situé à plusieurs TeV.
- ☐ Est-ce un Higgs super-symétrique?
 - $m_H = 125$ GeV dans la zone de masse privilégiée pour un Higgs super-symétrique
 - Couplages aux particules MS légèrement différents de ceux d'un Higgs Standard
 - Y-a-t-il d'autre Higgs à plus basse ou plus haute masse? Des Higgs chargés?
 - Trouvera-t-on des partenaires super-symétriques de particules du MS?

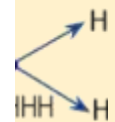
} 0^+ déjà prouvé à plus
99,5% de confiance avec
les données 2012

Ce qu'il reste à faire sur le Higgs

Coupling Mass Relation



s %)



(?)

es »