

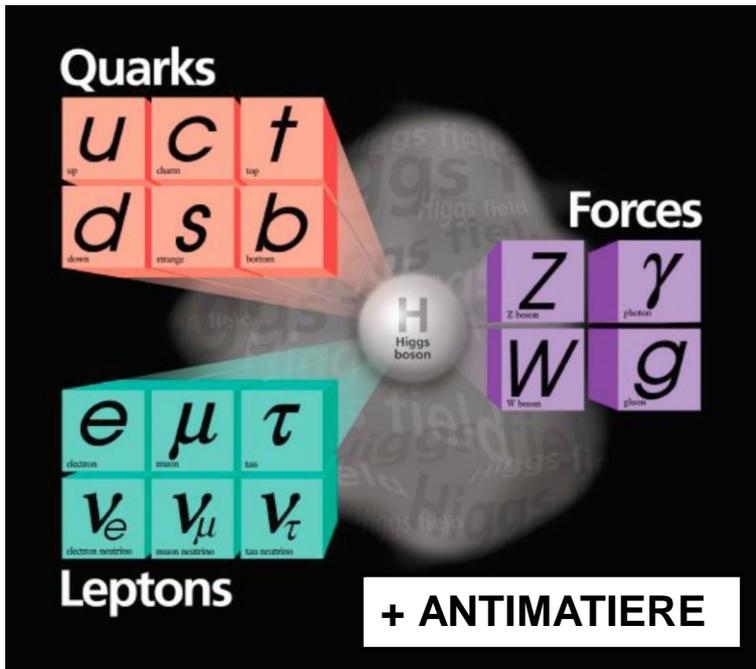
Le boson de Higgs

Thibault Guillemin,

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay
Membre de la collaboration ATLAS

De très nombreux emprunts à
la présentation similaire de
David Rousseau

- 1) Le boson de Higgs dans le Modèle Standard
- 2) Recherche et découverte
- 3) Etude des propriétés
- 4) Perspectives



Particules constitutives de la matière:
fermions

Médiateurs des 3 interactions fondamentales:
bosons de jauge

- interaction électromagnétique: $U(1)_{EM}$
- interaction faible: $SU(2)_L$
- interaction forte: $SU(3)_C$

Modèle électrofaible (proposé initialement par Glashow, 1961)

→ unifie les interactions électromagnétique et faible

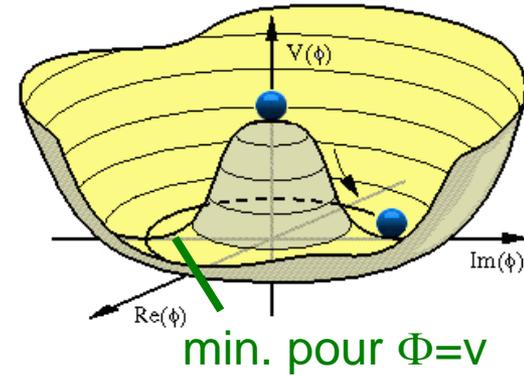
Limite initiale: la masse des bosons de jauge doit être nulle pour préserver la symétrie

→ **brisure spontanée par le mécanisme de Higgs**

▪ Lagrangien électrofaible : $L_{EW} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W^{i,\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$

▪ Doublet d'isospin faible: $\Phi = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi_0 \end{pmatrix}$

$L_{Higgs} = |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$ avec $V(\Phi) = \lambda |\Phi|^4 - \mu^2 |\Phi|^2$



$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}$ bosons de jauge massifs

Introduction d'un champ "physique" de Higgs

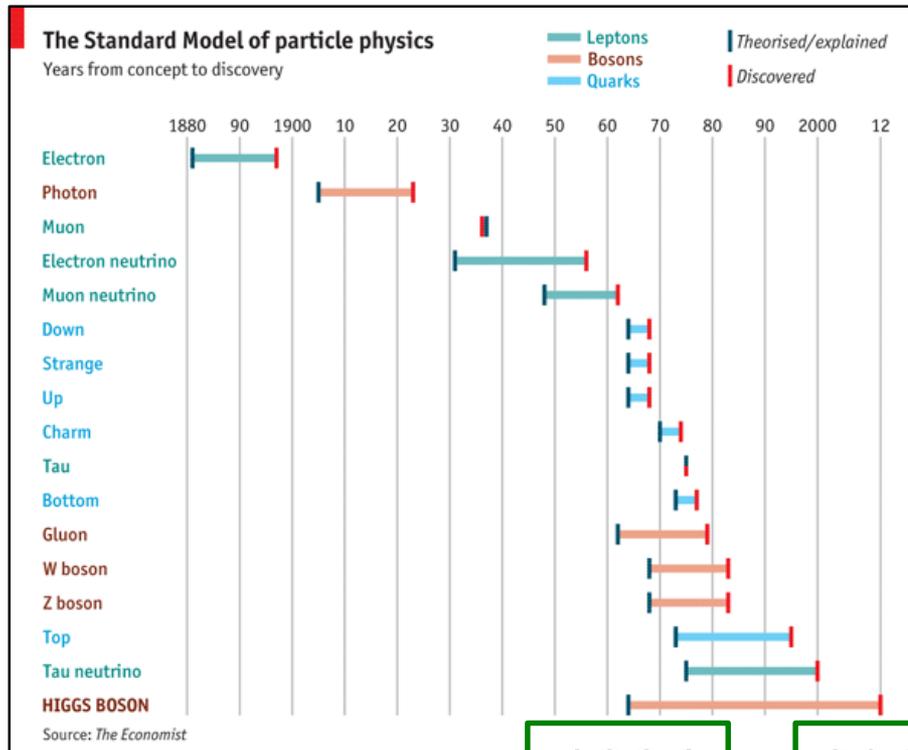
$$\begin{cases} W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_\mu^1 \mp W_\mu^2) \\ Z^\mu = \frac{-g' B_\mu + g W_\mu^3}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \\ A^\mu = \frac{g B_\mu + g' W_\mu^3}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} M_{W^\pm} = \frac{vg}{2} \\ M_{Z^\mu} = \frac{v\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} \\ M_{A^\mu} = 0 \end{cases}$$

Etape clé dans la construction du Modèle Standard

MS = théorie quantique des champs basée sur le groupe de jauge:

$$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{\text{Higgs}} SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$$



- 50 ans entre l'idée théorique et la découverte expérimentale!
 - Six physiciens associés à la découverte théorique: Brout, Englert, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble
 - Peu d'intérêt au début!
- ➔ 1967: introduit dans la théorie électrofaible (Salam et Weinberg)

1964

2012

Références des publications sur la découverte expérimentale

- [1] F. Englert and R. Brout, "Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 321, doi:10.1103/PhysRevLett.13.321.
- [2] P. W. Higgs, "Broken symmetries, massless particles and gauge fields", *Phys. Lett.* **12** (1964) 132, doi:10.1016/0031-9163(64)91136-9.
- [3] P. W. Higgs, "Broken symmetries and the masses of gauge bosons", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 508, doi:10.1103/PhysRevLett.13.508.
- [4] G. S. Guralnik, C. R. Hagen, and T. W. B. Kibble, "Global conservation laws and massless particles", *Phys. Rev. Lett.* **13** (1964) 585, doi:10.1103/PhysRevLett.13.585.

- Champ scalaire imprégnant l'univers
- Valeur non-nulle du champ dans le vide en-dessous d'une température critique (température atteinte quelques instants après le big-bang)
- “Viscosité du vide” donnant la masse à toutes les particules élémentaires

N.B: seuls les neutrinos n'interagissent pas avec ce champ

- Les bosons physiques $W^{+/-}$ et Z acquièrent une masse par le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible.
- Les fermions acquièrent également leur masse par interaction avec le champ de Higgs (mécanisme différent, dit de Yukawa)
- **Un boson de Higgs physique est associé à ce champ (excitation)**

→ Recherche!

- 1) Le boson de Higgs dans le Modèle Standard
- 2) Recherche et découverte**
- 3) Etude des propriétés
- 4) Perspectives

- Simple: il faut le produire, et ensuite le détecter!



- Dans le lagrangien du Modèle Standard, les termes d'interaction entre le boson de Higgs et les autres particules permettent de prédire précisément les taux de production (dans des collisions) et de désintégration.

Mais ces taux sont fonction de la masse, qui n'est pas prédite par le Modèle Standard...Cependant, des contraintes théoriques permettent de connaître son ordre de grandeur: < 1000 GeV (1 GeV est la masse d'un proton)

- Taux de production dans des collisions extrêmement faibles, par rapport à ceux d'autres processus
- Particule très instable (10^{-22} s), se désintégrant immédiatement en paire d'autres particules, de façon imprévisible (sauf en moyenne)

Une collision proton-proton au LHC (1/3)

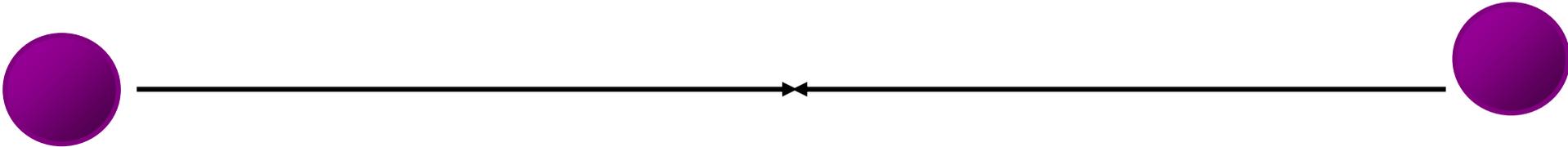
9/36

Thibault
Guillemin



Einstein: $E=mc^2$

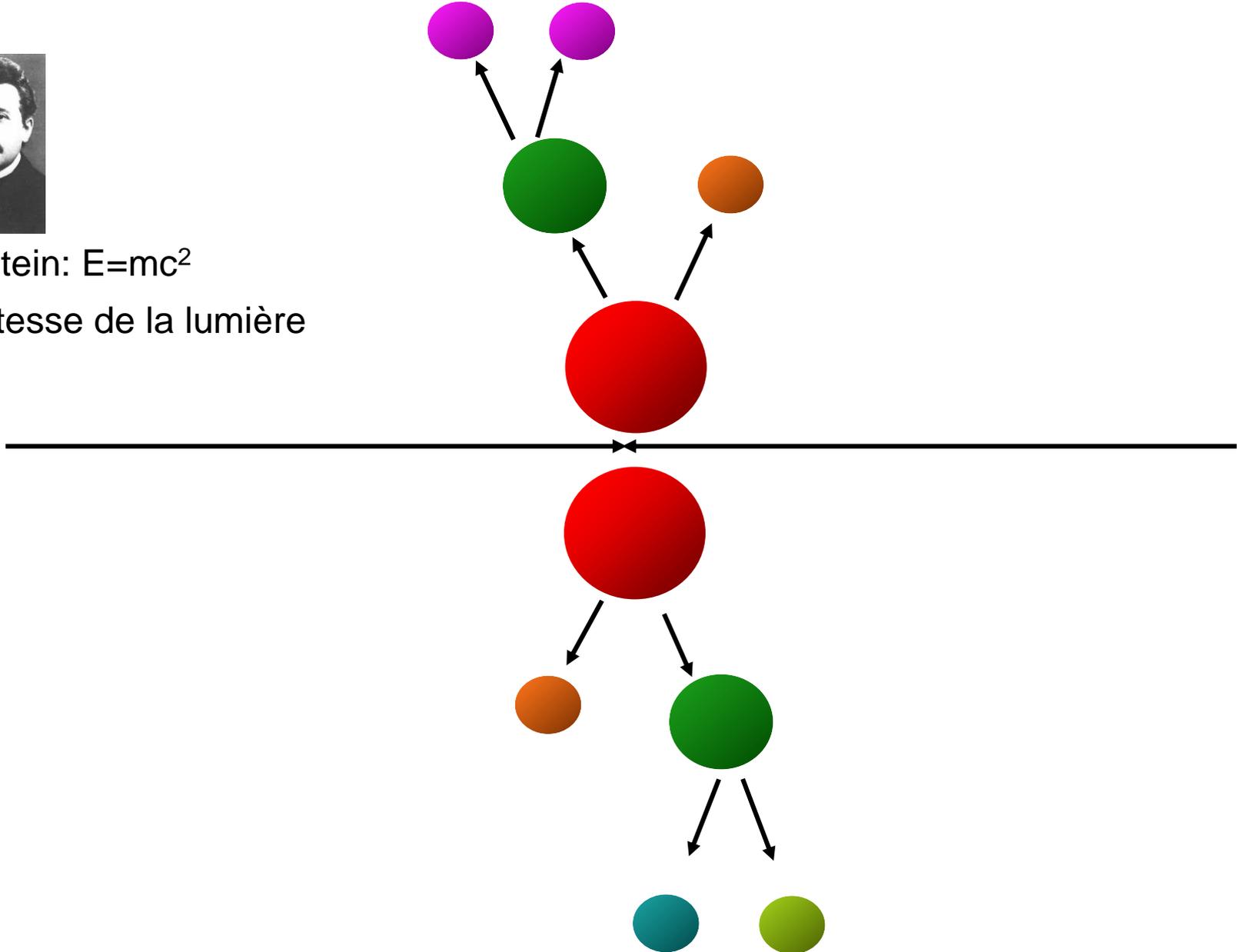
c: vitesse de la lumière



Une collision proton-proton au LHC (1/3)



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



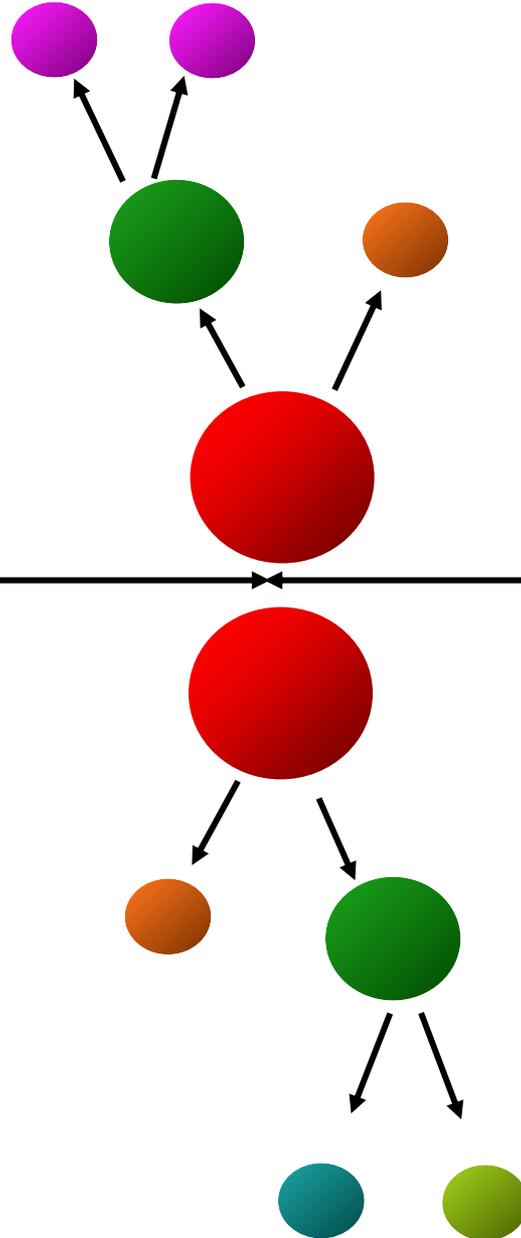
Une collision proton-proton au LHC (1/3)

9/36

Thibault
Guillemin



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



Conversion de l'énergie
cinétique en masse

Création de nouvelles
particules, d'une centaine
de sortes

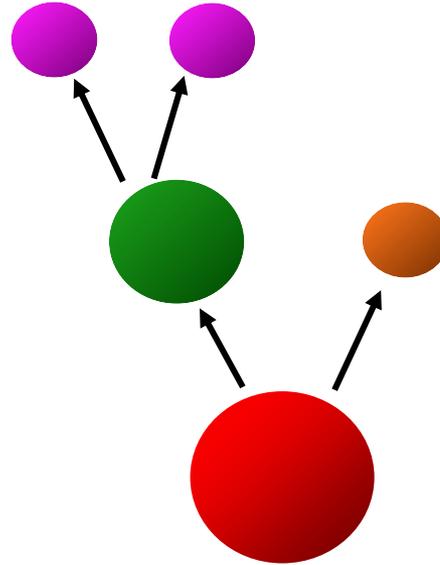
Une collision proton-proton au LHC (1/3)

9/36

Thibault
Guillemin

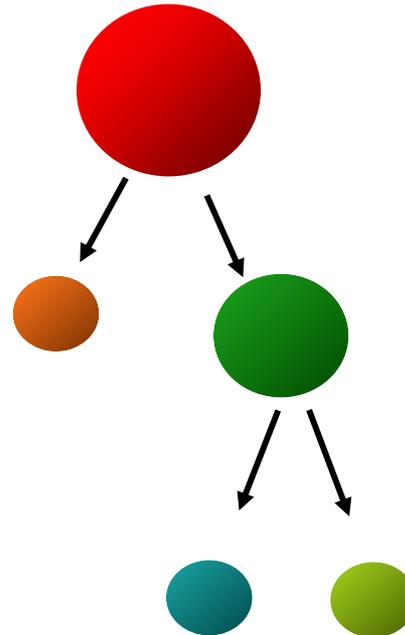


Einstein: $E=mc^2$
 c : vitesse de la lumière



Conversion de l'énergie cinétique en masse

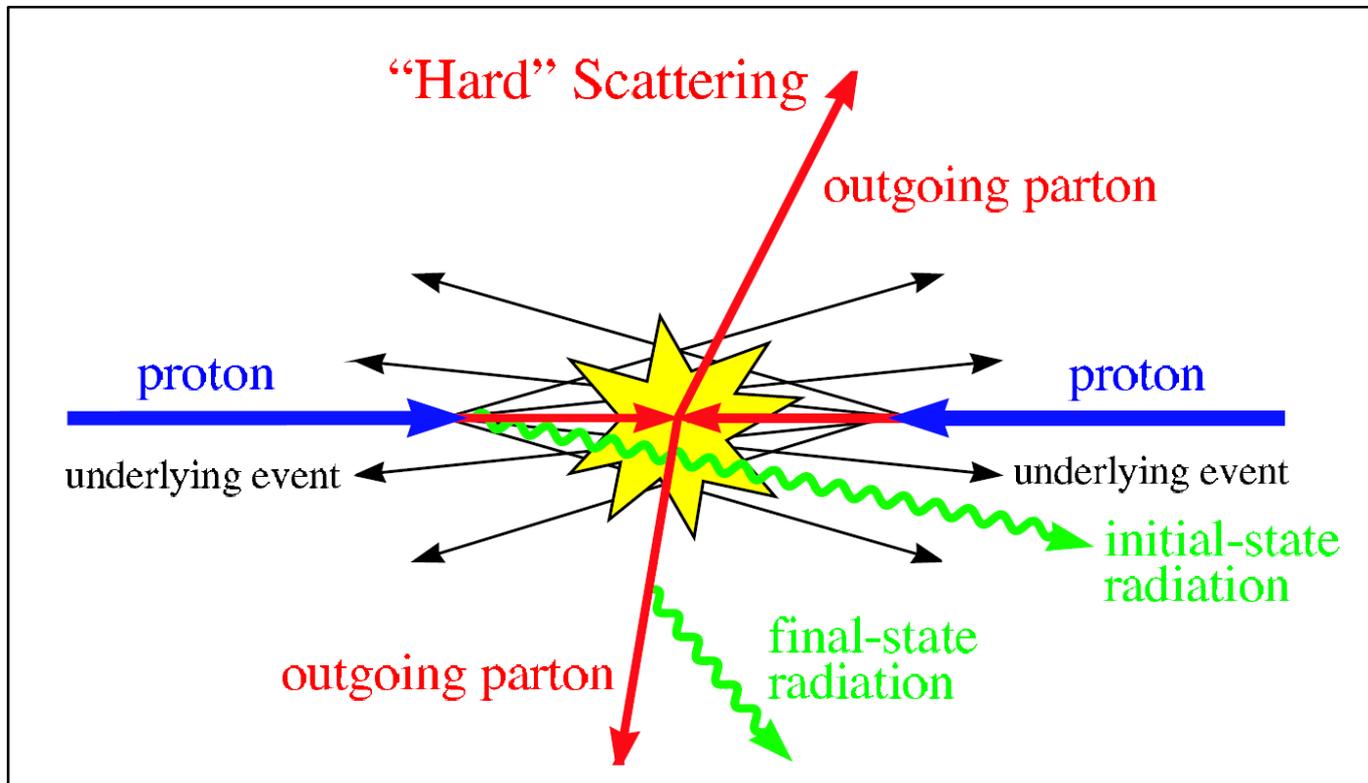
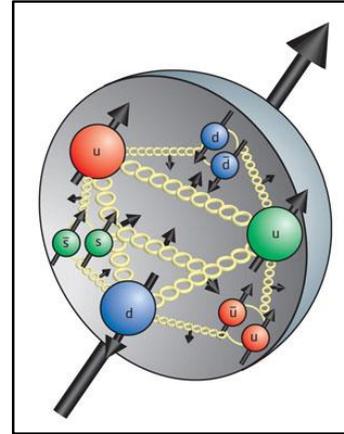
Création de nouvelles particules, d'une centaine de sortes

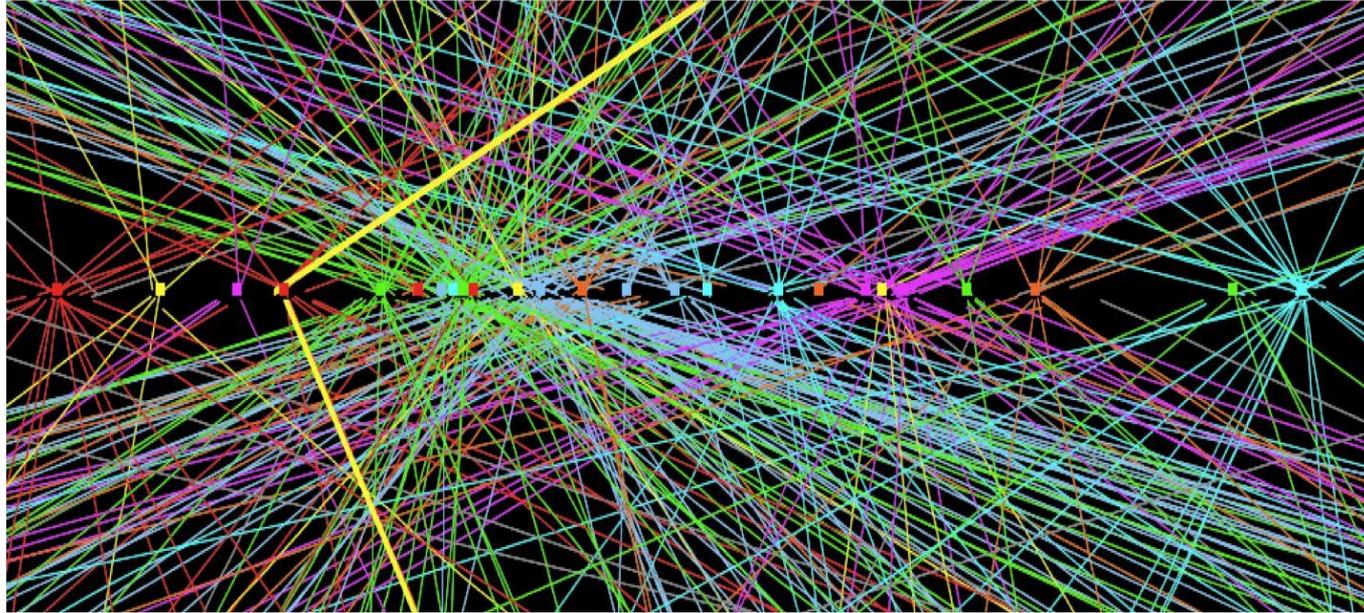


La plupart se désintègrent immédiatement

→ Les particules qui vont traverser le détecteur sont de sept sortes: e , μ , τ , γ , jets, b-jets, ν

- Structure complexe du proton
- ➔ Interaction dure
- ➔ Interaction sous-jacente





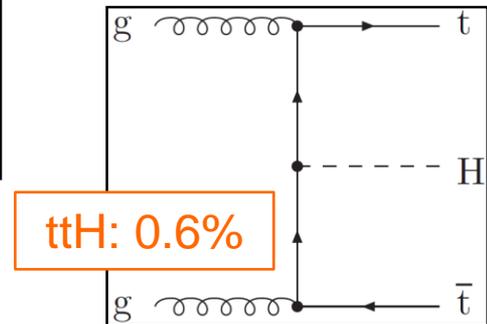
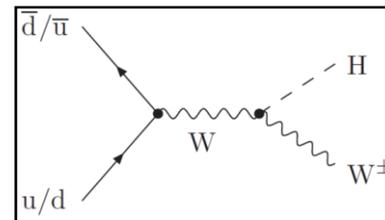
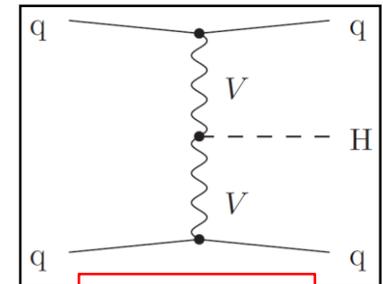
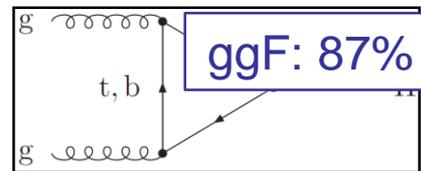
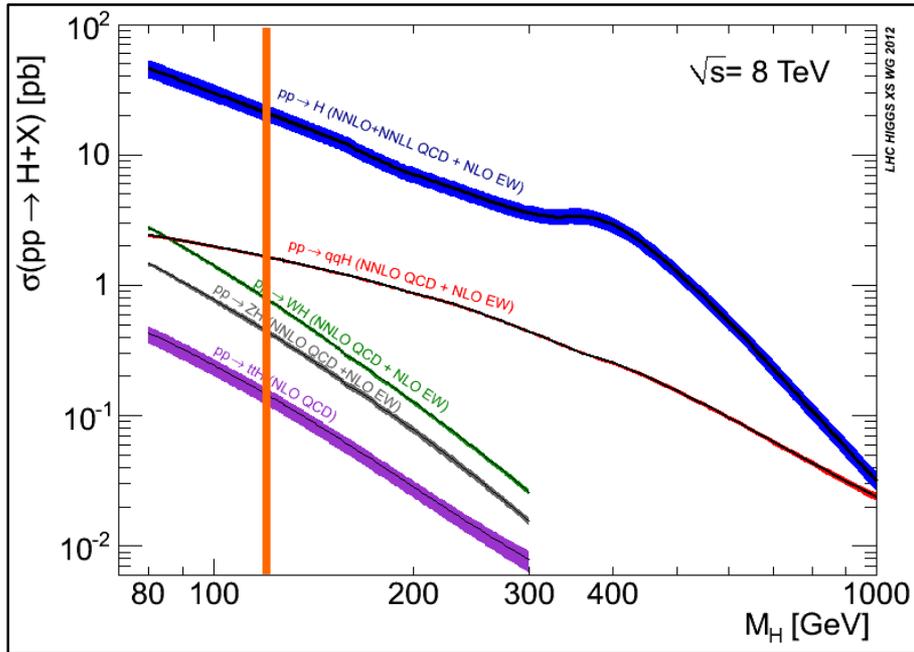
- 1 événement + 20 interactions d'empilement au cours de la collision de deux paquets de protons
- ➔ La précision obtenue permet de distinguer les traces venant de la collision intéressante.
- Quelques chiffres:
 - 20 millions de collision de paquets par seconde
 - 400 événements sélectionnés (1/50.000) au vol par seconde
- ➔ Système de déclenchement à plusieurs niveaux, décision en $1\mu\text{s}$ -1s sur des *signatures*

- Nombre d'événements produits pour un processus donné:

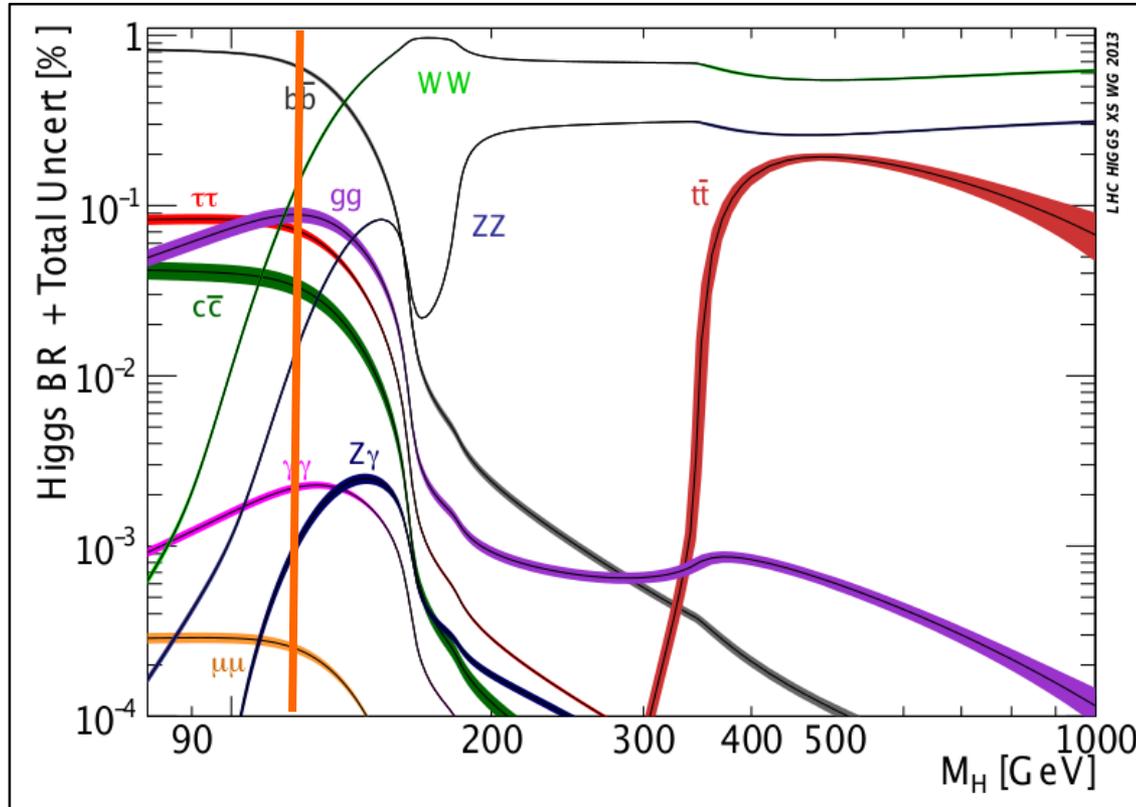
$$N = \sigma \times \int L dt$$

Section efficace

Luminosité intégrée



- Collisions produites au total (par expérience, Run I): $\sim 2 \cdot 10^{15}$
- Higgs produits: $\sim 4 \cdot 10^4$
- Higgs "exploitables": $\sim 4 \cdot 10^3$



A 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%**

- La masse d'un éventuel boson de Higgs n'étant pas connue auparavant, il était nécessaire de concevoir des détecteurs permettant de couvrir la plus grande gamme de masse possible (principalement $\gamma\gamma$ à basse masse et ZZ à haute masse)

$E=mc^2$,
vraiment?

En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:

$$E^2=p^2c^2+m^2c^4$$

p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)

En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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

$E=mc^2$,
vraiment?

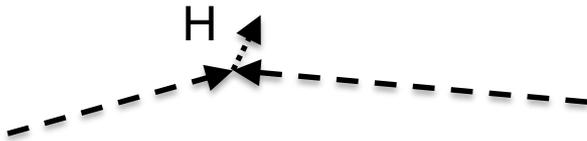
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:

$$E^2=p^2c^2+m^2c^4$$

p est la quantité de mouvement (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

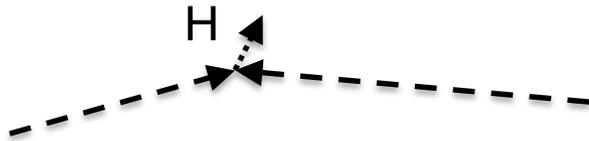
$$m_H^2=E_H^2-p_H^2$$

Exemple de canal de recherche: deux photons (1/2)

$E=mc^2$,
vraiment?

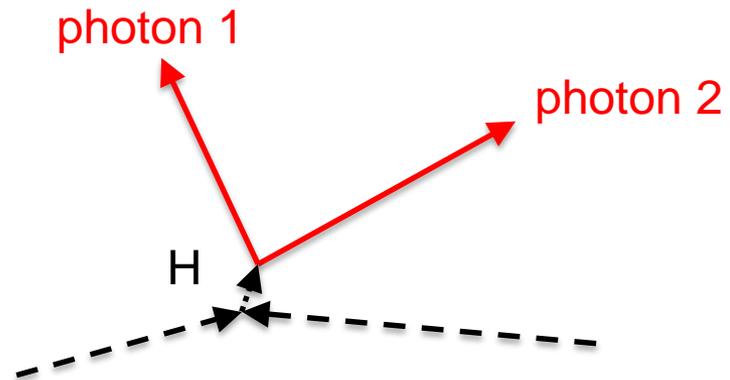
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:
 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)
En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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



H, juste avant sa désintégration

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



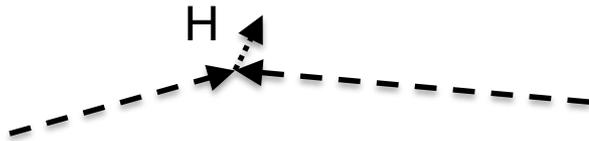
Juste après sa désintégration

Exemple de canal de recherche: deux photons (1/2)

$E=mc^2$,
vraiment?

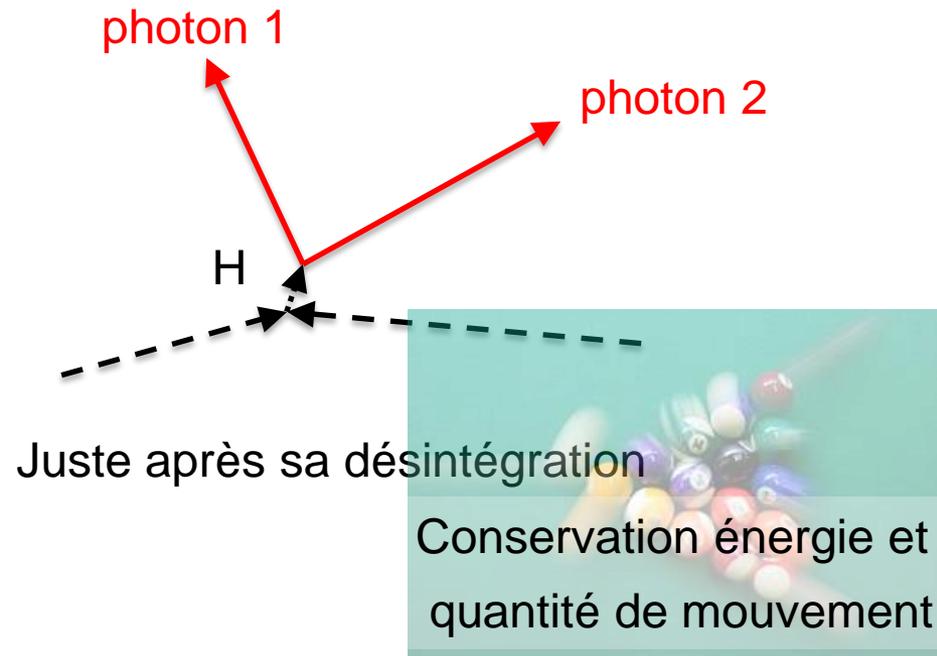
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:
 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)
En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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



H, juste avant sa désintégration

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



Juste après sa désintégration

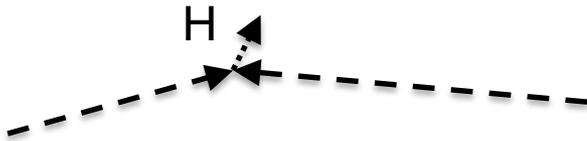
Conservation énergie et
quantité de mouvement

Exemple de canal de recherche: deux photons (1/2)

$E=mc^2$,
vraiment?

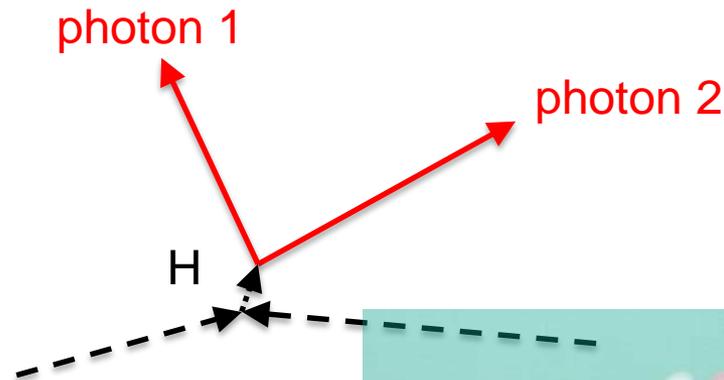
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:
 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)
 En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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



H, juste avant sa désintégration

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



Juste après sa désintégration

Conservation énergie et
quantité de mouvement

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

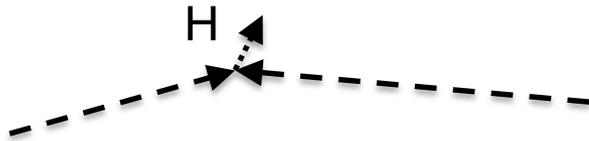
$$\vec{p}_H=\vec{p}_{g1}+\vec{p}_{g2}$$

Exemple de canal de recherche: deux photons (1/2)

$E=mc^2$,
vraiment?

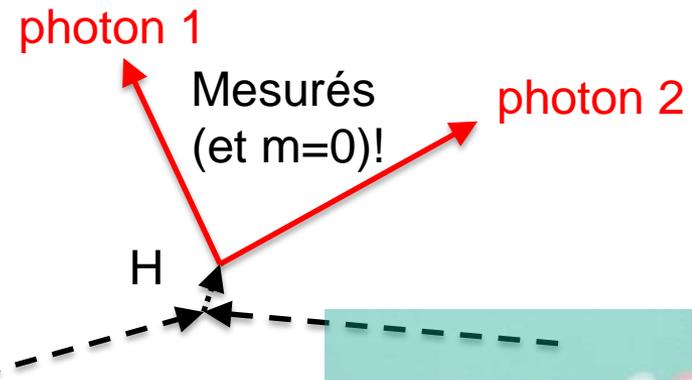
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:
 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)
 En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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



H, juste avant sa désintégration

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



Juste après sa désintégration

Conservation énergie et
quantité de mouvement

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

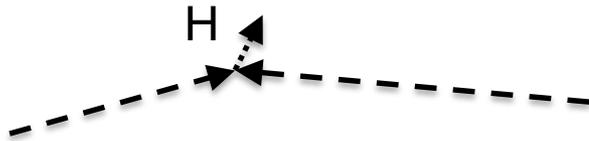
$$\vec{p}_H=\vec{p}_{g1}+\vec{p}_{g2}$$

Exemple de canal de recherche: deux photons (1/2)

$E=mc^2$,
vraiment?

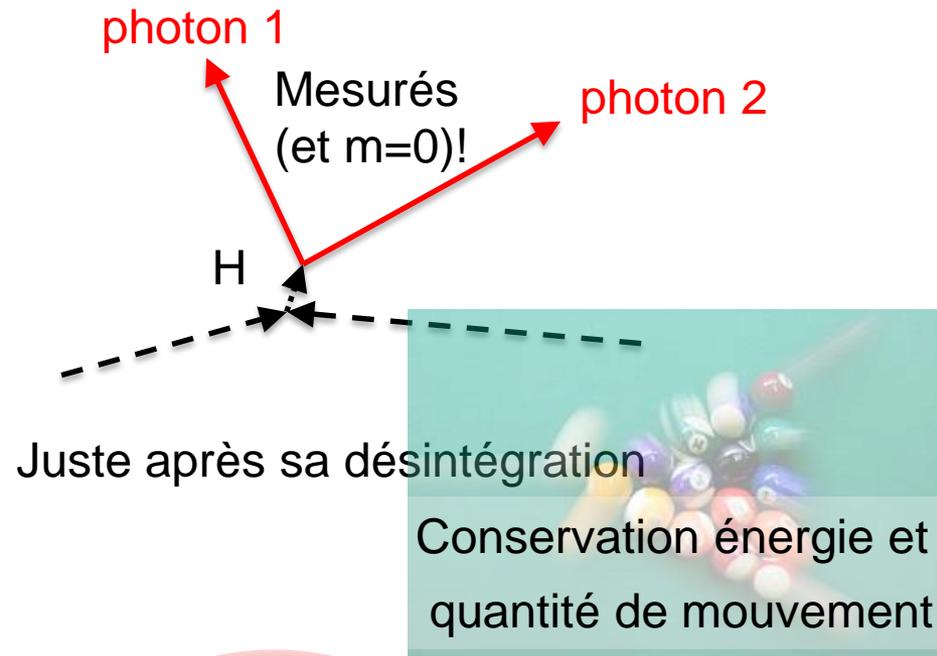
En fait, la formule complète pour une particule relativiste est:
 $E^2=p^2c^2+m^2c^4$
 p est la quantité de mouvement (mv en mécanique classique)
 En choisissant bien les unités, on se débarrasse de c :

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



H, juste avant sa désintégration

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



Juste après sa désintégration

Conservation énergie et
quantité de mouvement

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

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

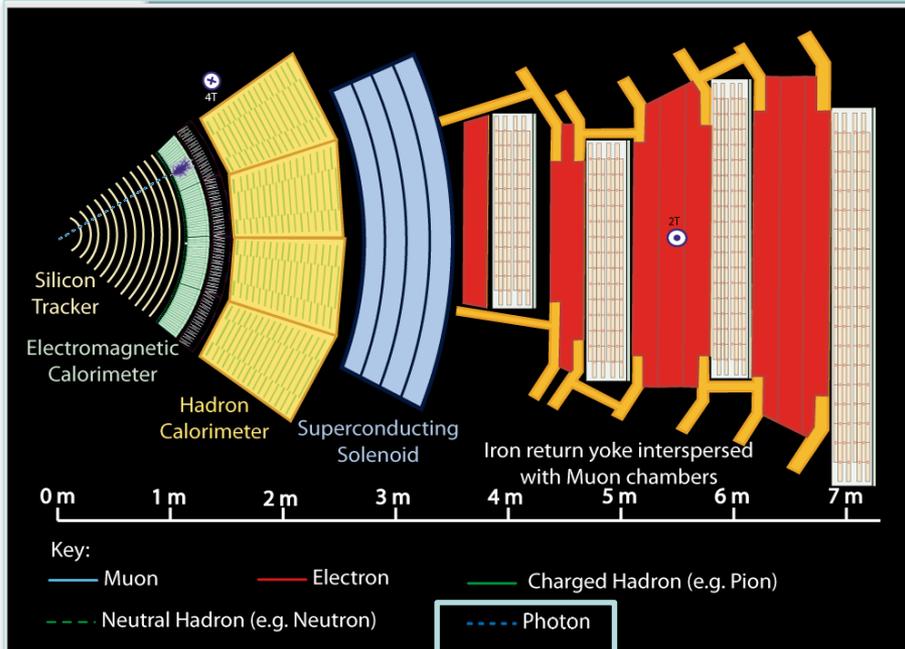
→ On en déduit m_H !

10^{15} collisions

10^{15} collisions

Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque



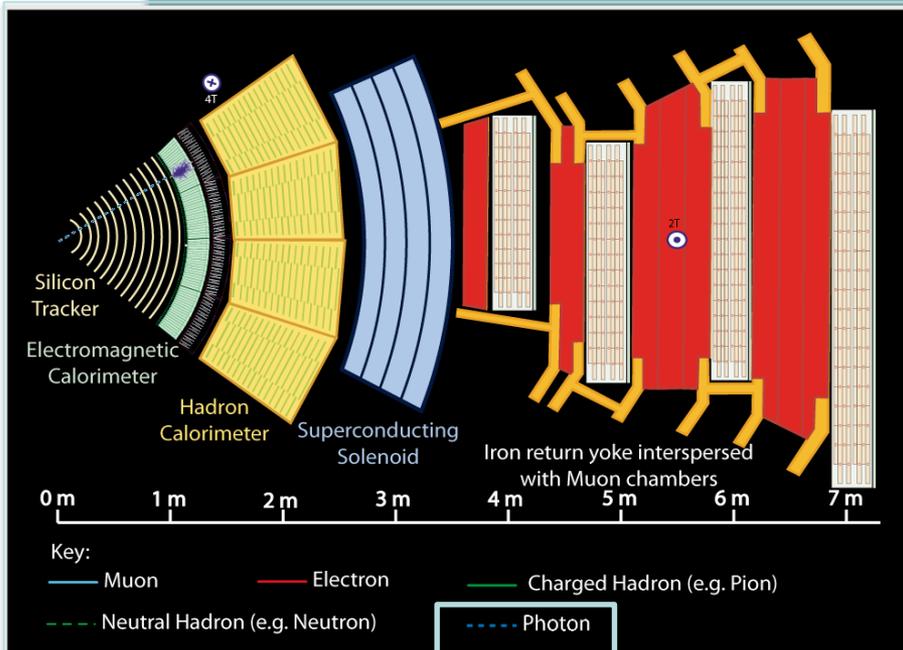
Exemple de canal de recherche: deux photons (2/2)

10^{15} collisions

Tri rapide et grossier

10^9 événements sur disque

5 millions de lignes de code
pour la reconstruction!



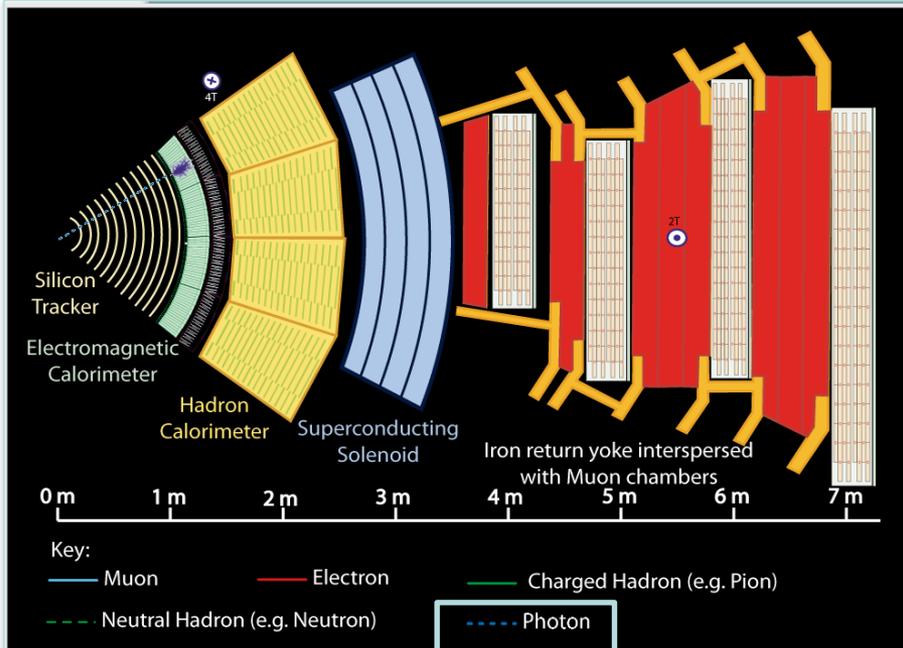
Exemple de canal de recherche: deux photons (2/2)

 10^{15} collisions

Tri rapide et grossier

 10^9 événements sur disque5 millions de lignes de code
pour la reconstruction!

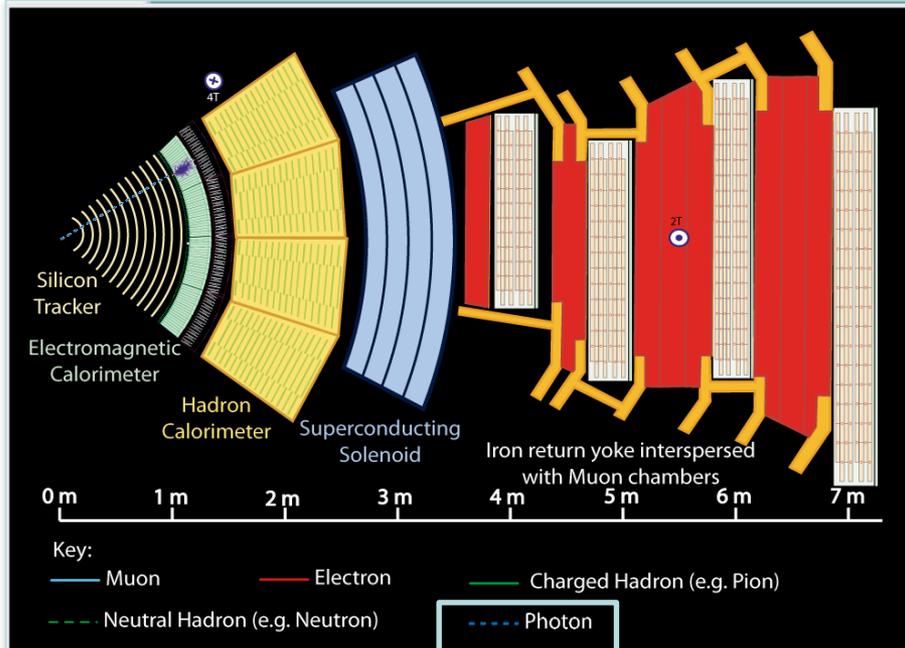
Tri précis

 10^5 événements
à 2 photons

Exemple de canal de recherche: deux photons (2/2)

 10^{15} collisions

Tri rapide et grossier

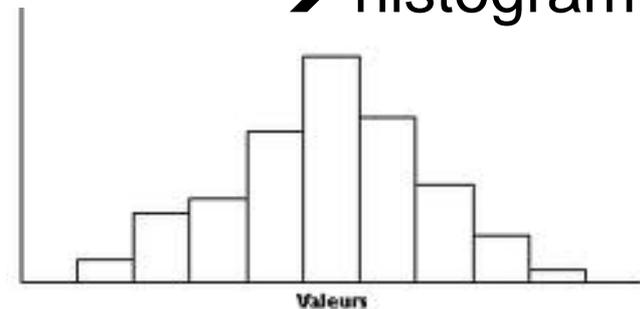
 10^9 événements sur disque5 millions de lignes de code
pour la reconstruction!

Tri précis

 10^5 événements
à 2 photons

Calcul de la masse

→ histogramme



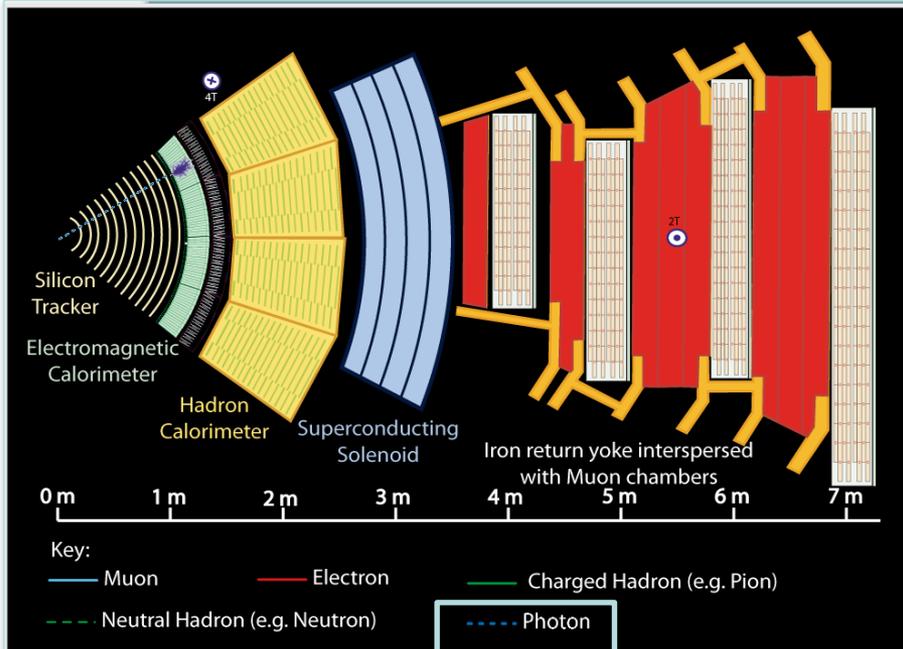
Exemple de canal de recherche: deux photons (2/2)

 10^{15} collisions

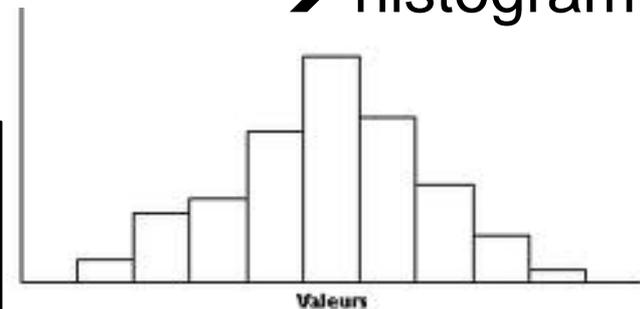
Tri rapide et grossier

 10^9 événements sur disque5 millions de lignes de code
pour la reconstruction!

Tri précis

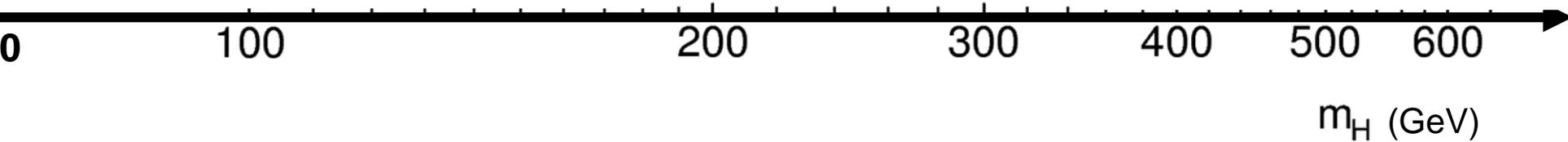
 10^5 événements
à 2 photonsCalcul de la masse
→ histogramme

Faible rapport signal/bruits de fond,
résolution intrinsèque du calorimètre,
effets systématiques du détecteur, etc.



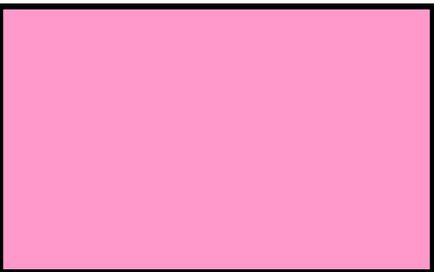


A large black question mark is centered above a horizontal axis representing the Higgs boson mass. The axis is labeled m_H (GeV) and has tick marks at 0, 100, 200, 300, 400, 500, and 600. The question mark is positioned roughly above the 250 GeV mark.

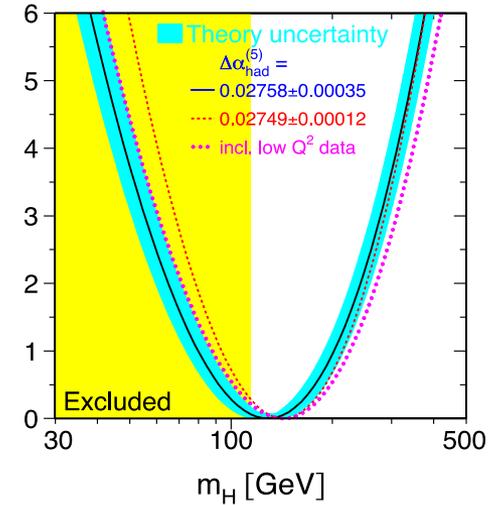


- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse
- Théorie: $m_H < 1000$ GeV

LEP
1989-2000

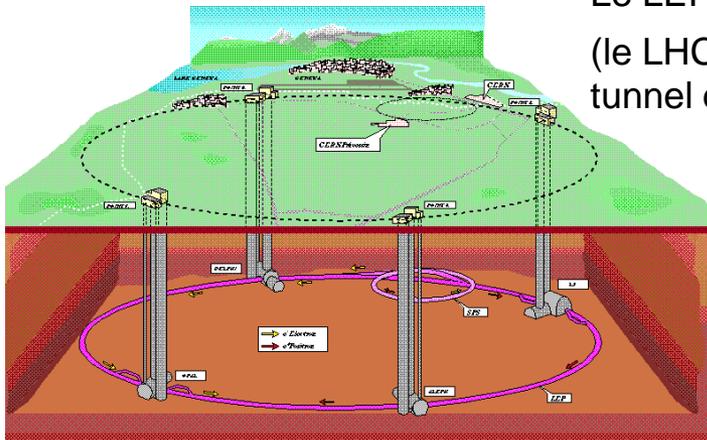


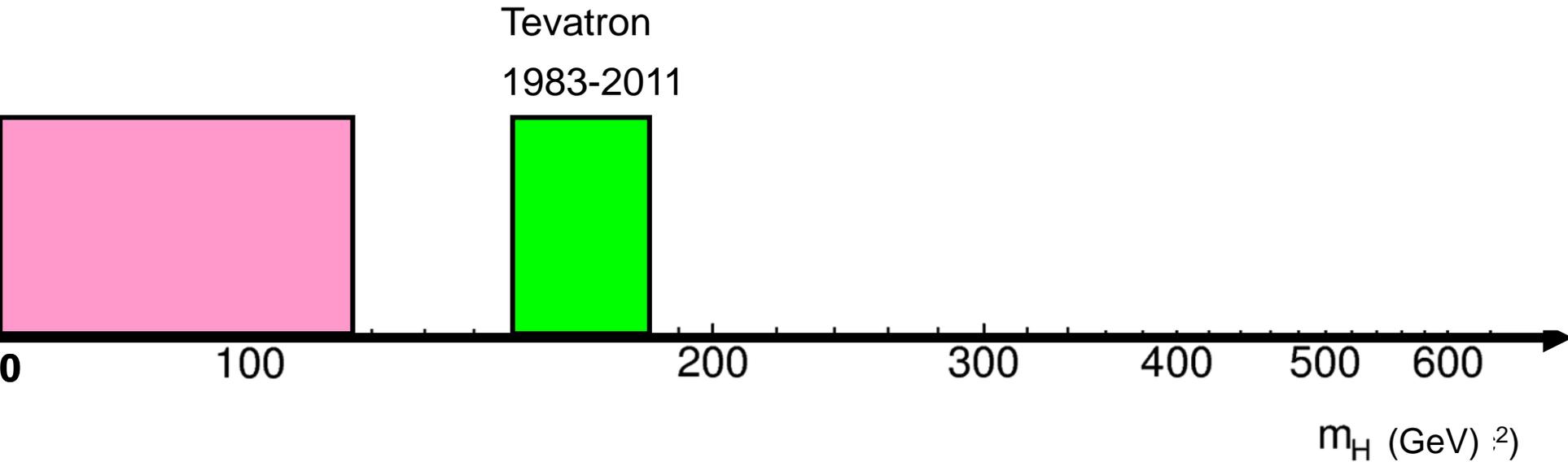
Mesures
indirectes
→ H plutôt léger



m_H (GeV) :²

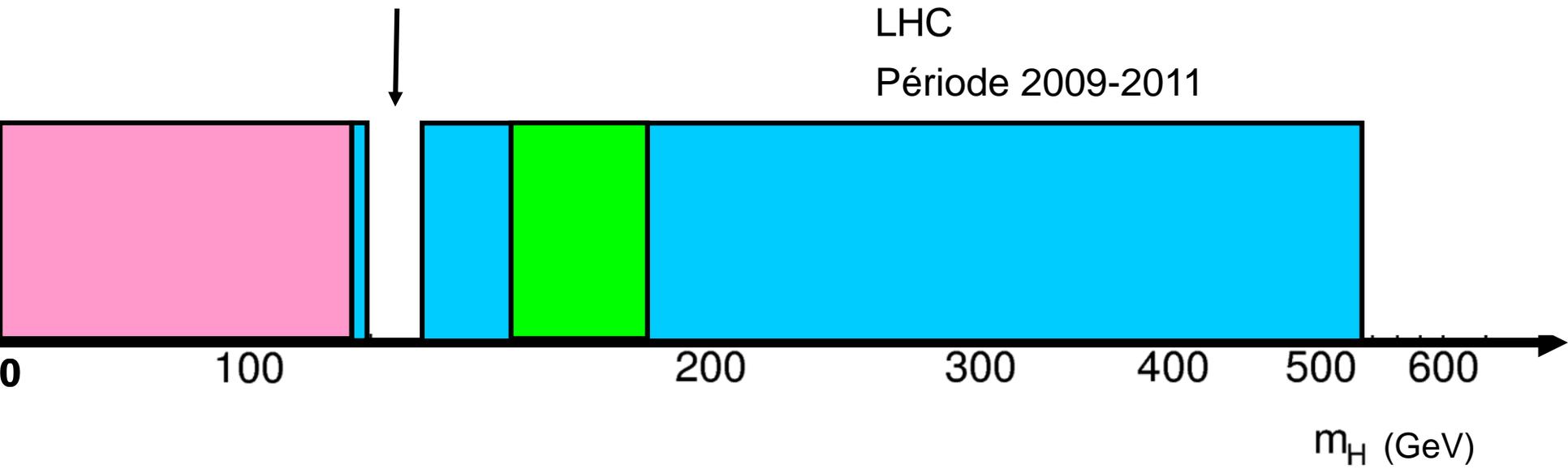
Le LEP au CERN
(le LHC utilise le tunnel du LEP)





Le Tevatron à Fermilab
(près de Chicago)

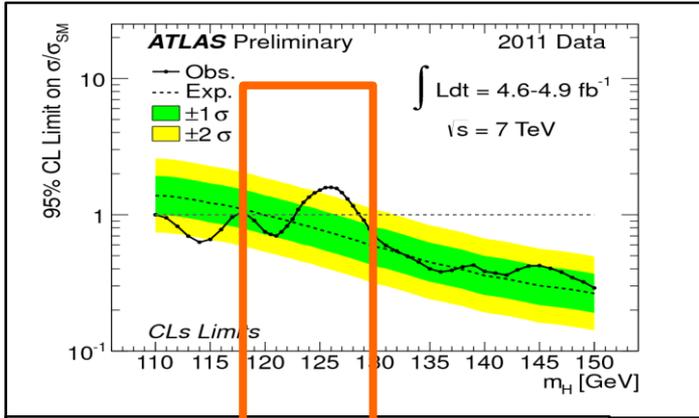




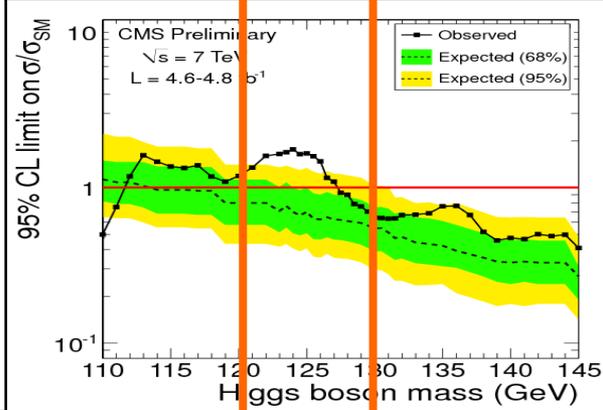
Le LHC au CERN



ATLAS

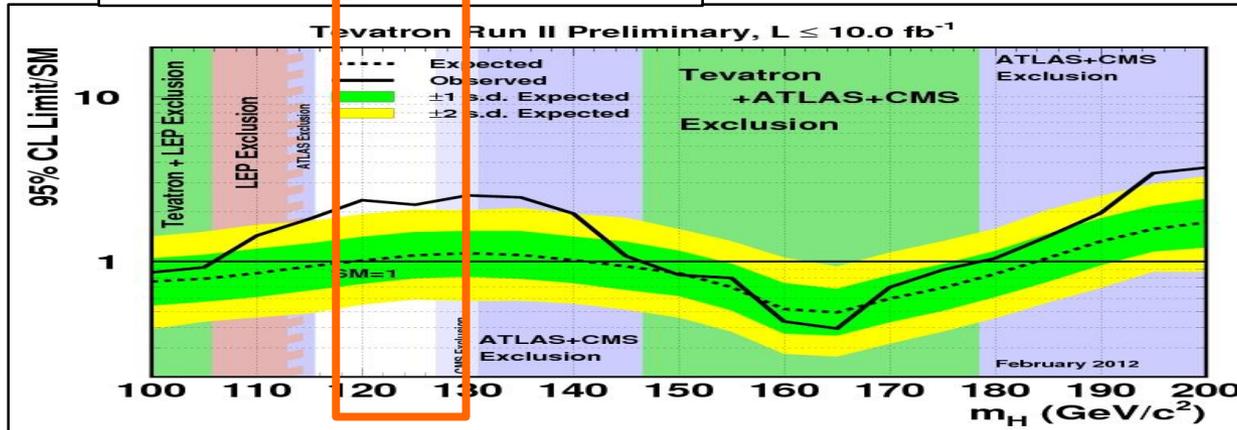


CMS



- 3 expériences indépendantes observent un léger excès d'événements par rapport à la prédiction
- Signification statistique insuffisante: "Plus de données nécessaires!"
- Pas de combinaison des résultats des différentes expériences à ce stade

TEVATRON

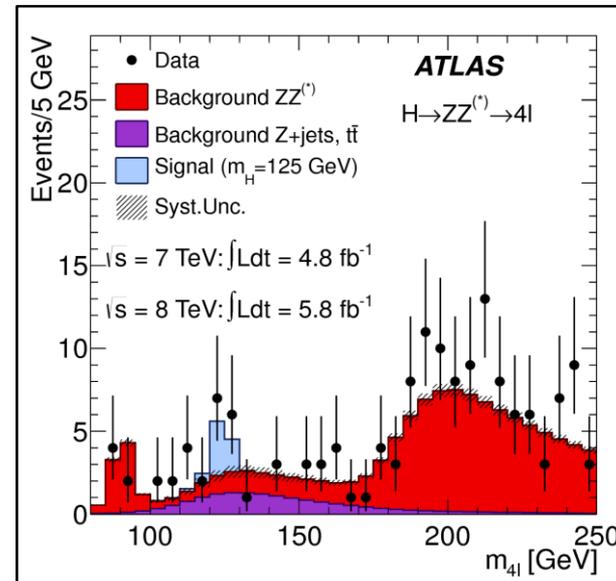
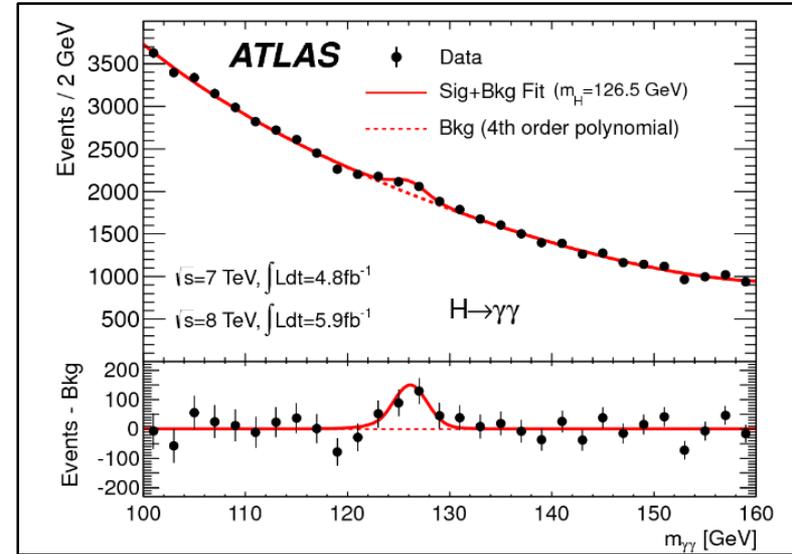
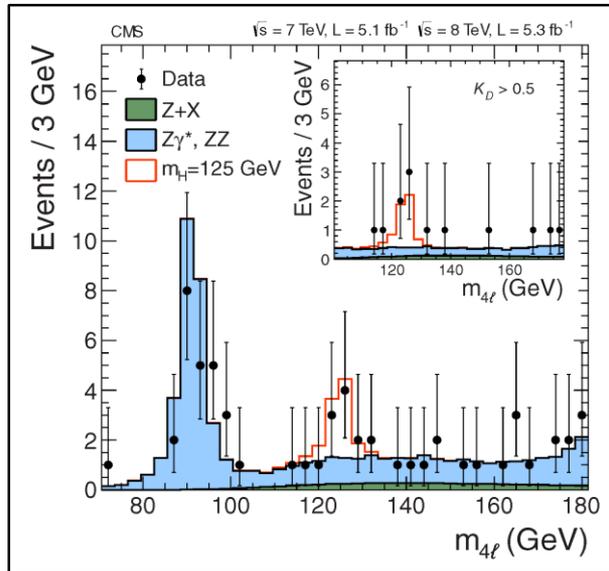
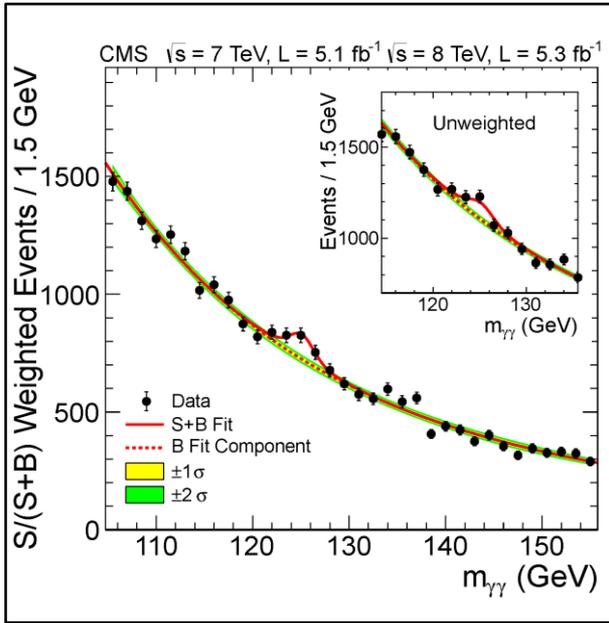




rapt crowd watches as physicists Fabiola Gianotti (standing, left), Rolf Dieter-Heuer (right) and Joe Incandela (far right) unveil evidence for the Higgs boson.

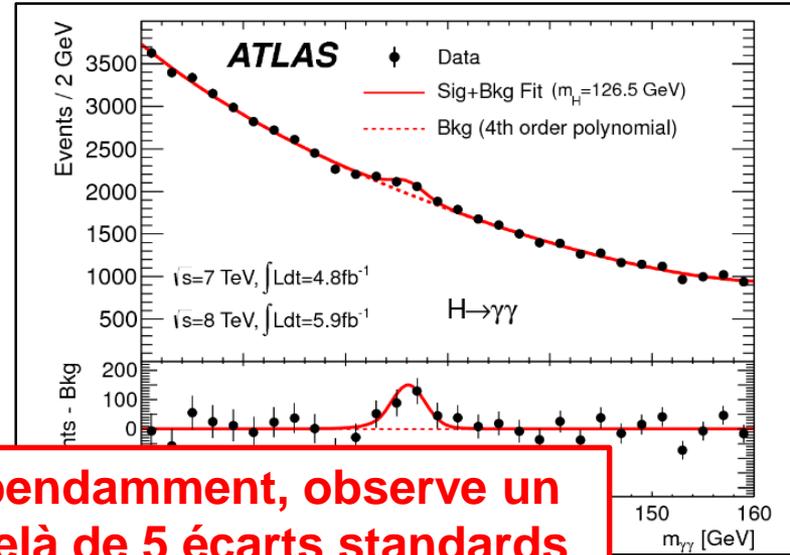
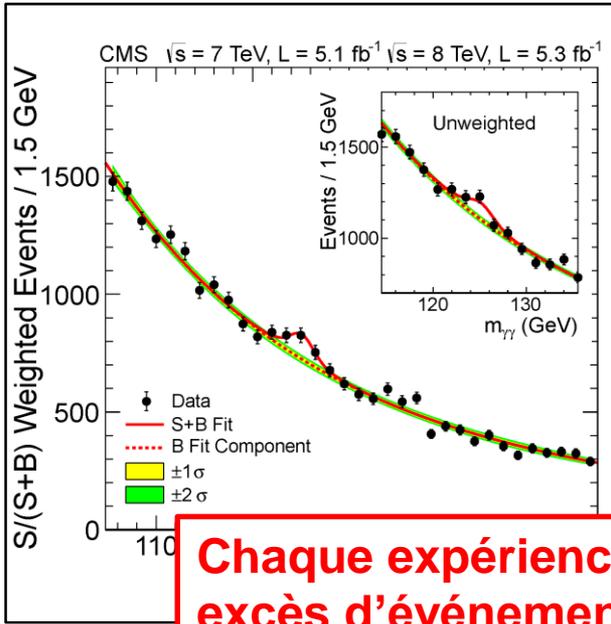
Annance de la découverte

CMS



ATLAS

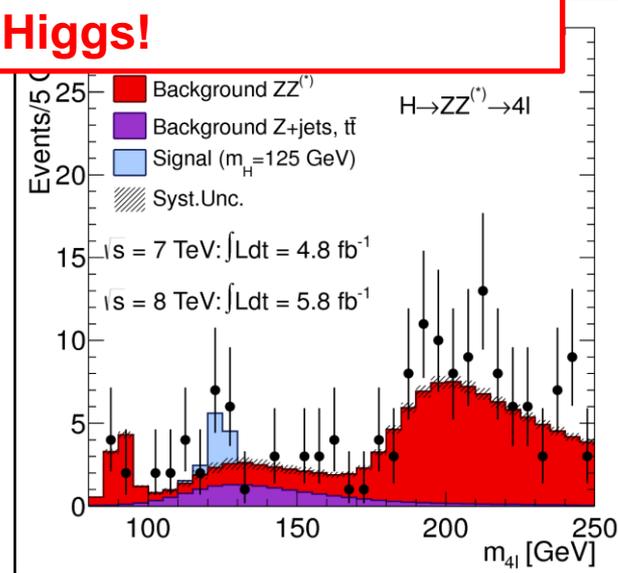
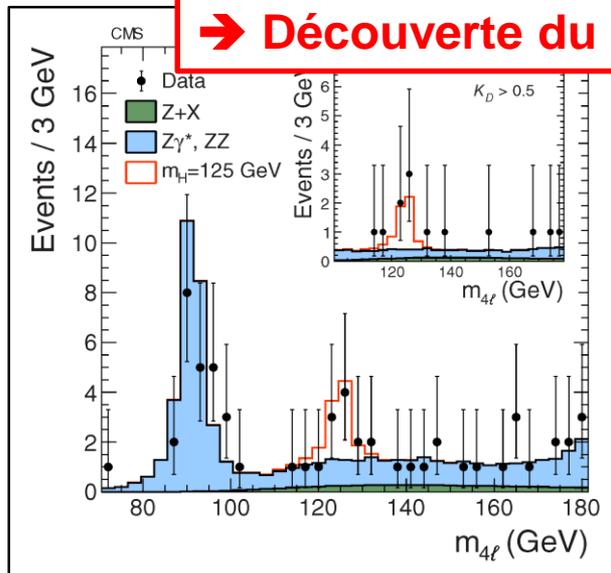
Annonce de la découverte



**Chaque expérience, indépendamment, observe un excès d'événements au-delà de 5 écarts standards
→ Découverte du boson de Higgs!**

CMS

ATLAS



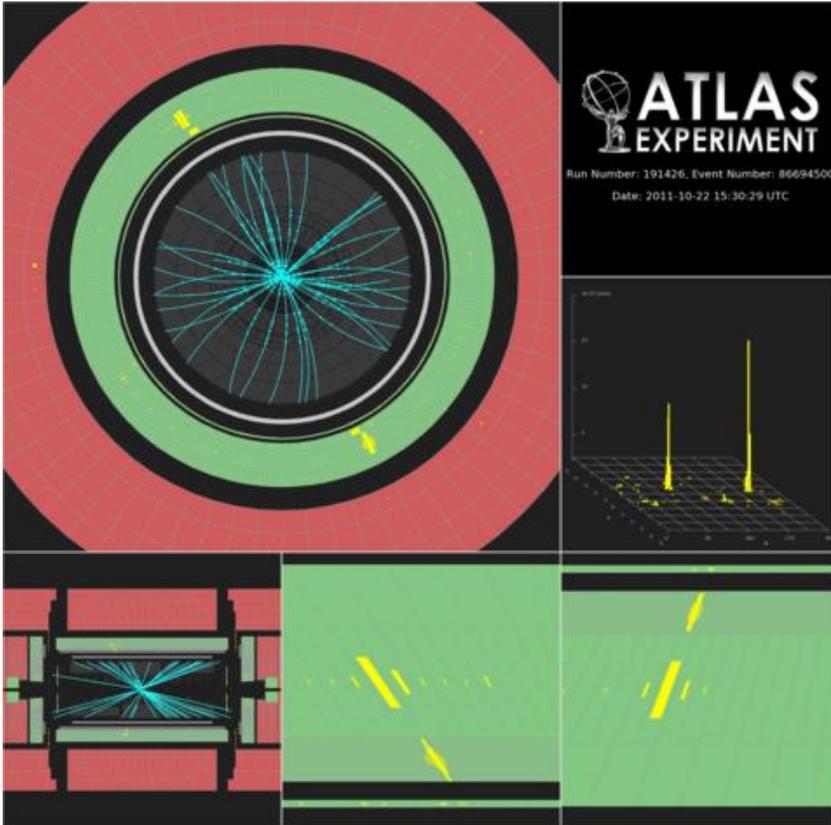


Image d'un événement
candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$
(S/B ~ 0.03)

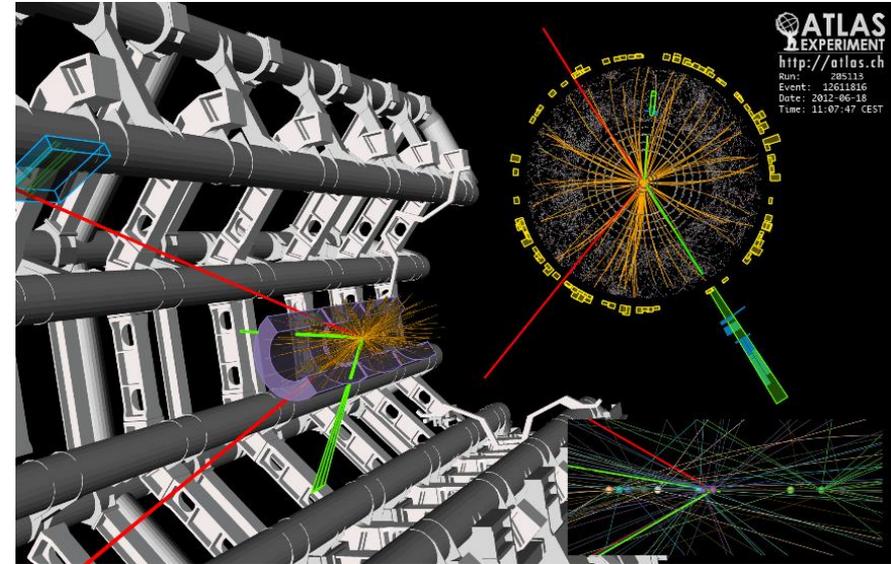
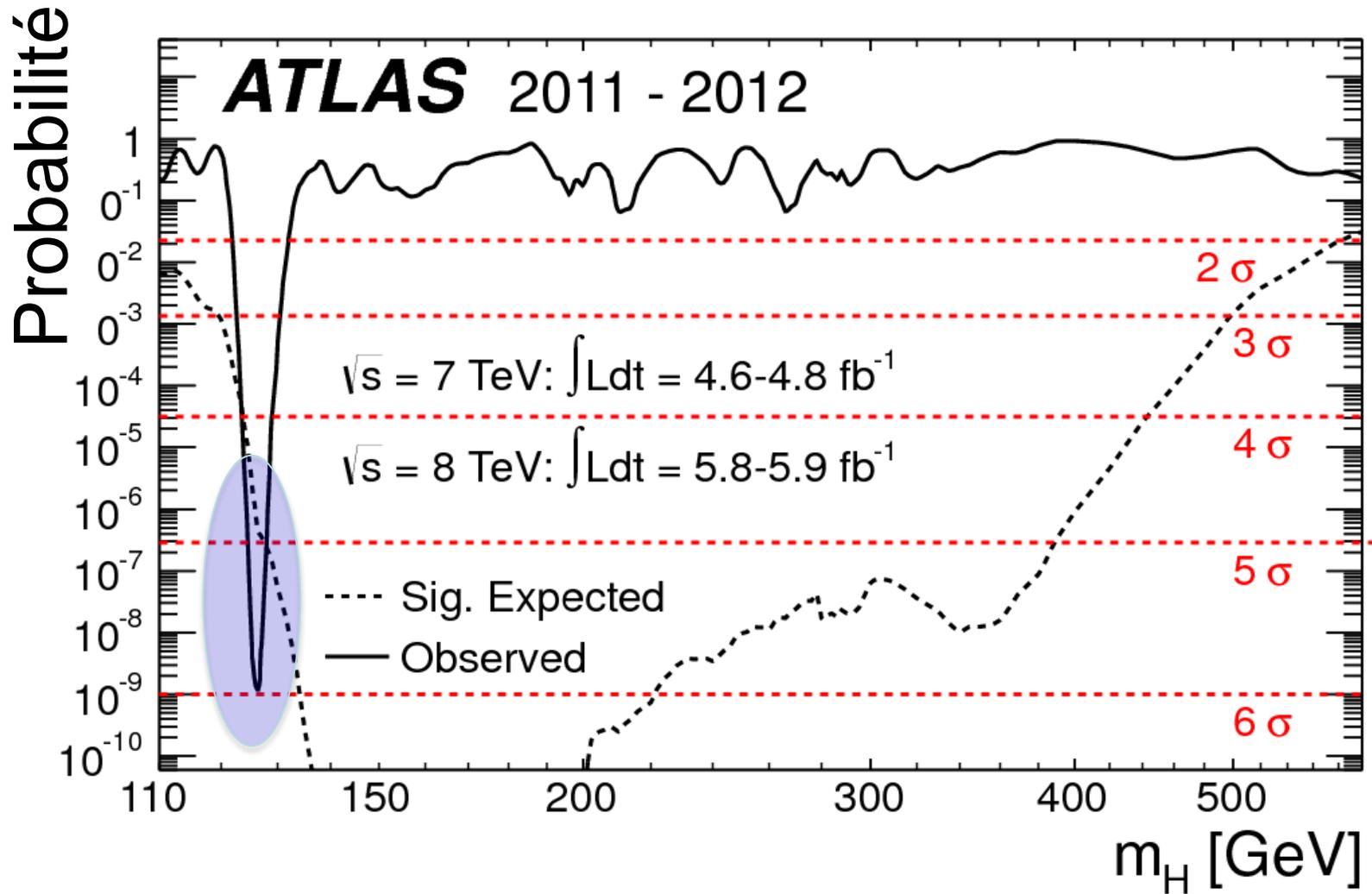
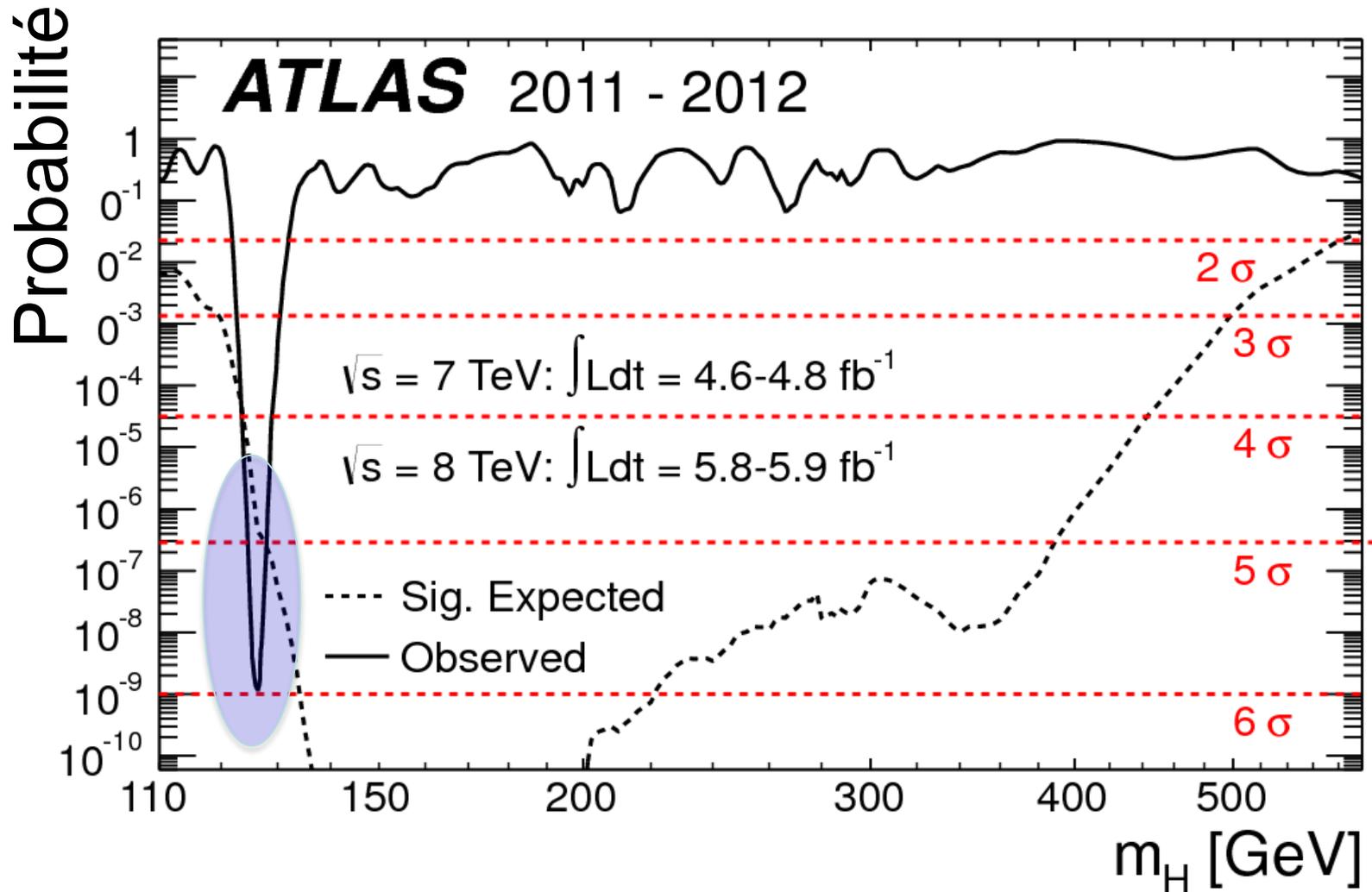


Image d'un événement
candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 2\mu + 2e$
(S/B ~ 1.5)

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

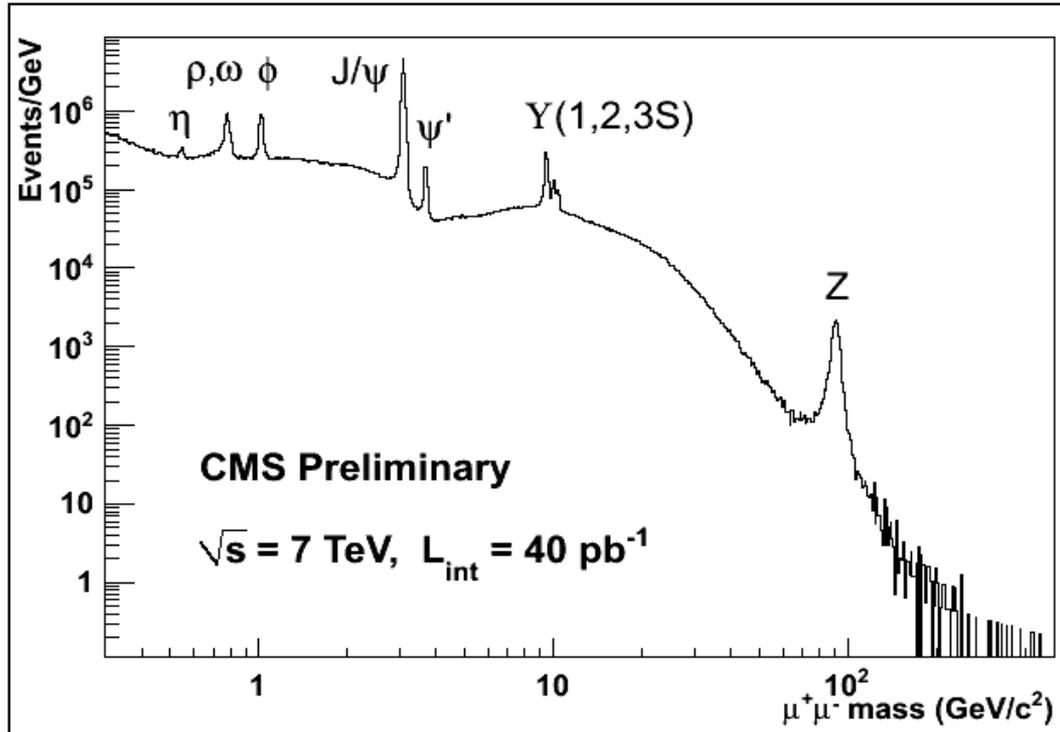






Oui mais : l'observation par Opera des neutrinos allant plus vite que la lumière était à 6 sigmas...pour un câble mal branché...

- Nous avons également (ré)observé des particules connues du Modèle Standard avec leurs propriétés connues.



Spectre en masse
invariante $\mu\mu$

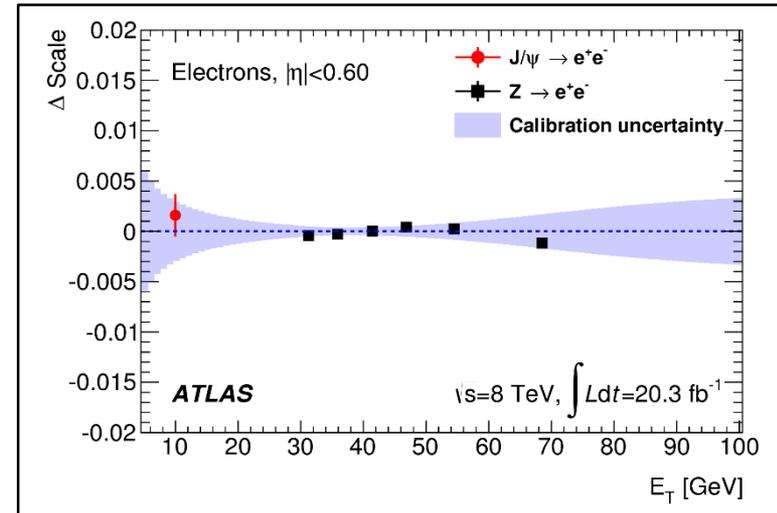
- Excès d'événements dans **plusieurs canaux indépendants**, mettant en jeu des éléments différents du détecteur, **à la même masse**.
- ATLAS et CMS, avec **des détecteurs de technologies complètement différentes**, conçus et exploités par des équipes différentes, ont trouvé sans se concerter les mêmes excès d'événements **à la même masse**.

- 1) Le boson de Higgs dans le Modèle Standard
- 2) Recherche et découverte
- 3) Etude des propriétés**
- 4) Perspectives

- La masse du boson de Higgs est aujourd'hui connue avec **une précision de 0.4%** !

ATLAS: $m_H = 125.4 \pm 0.4$ (stat) ± 0.2 (syst) GeV

- Travail crucial sur l'étalonnage en énergie des détecteurs

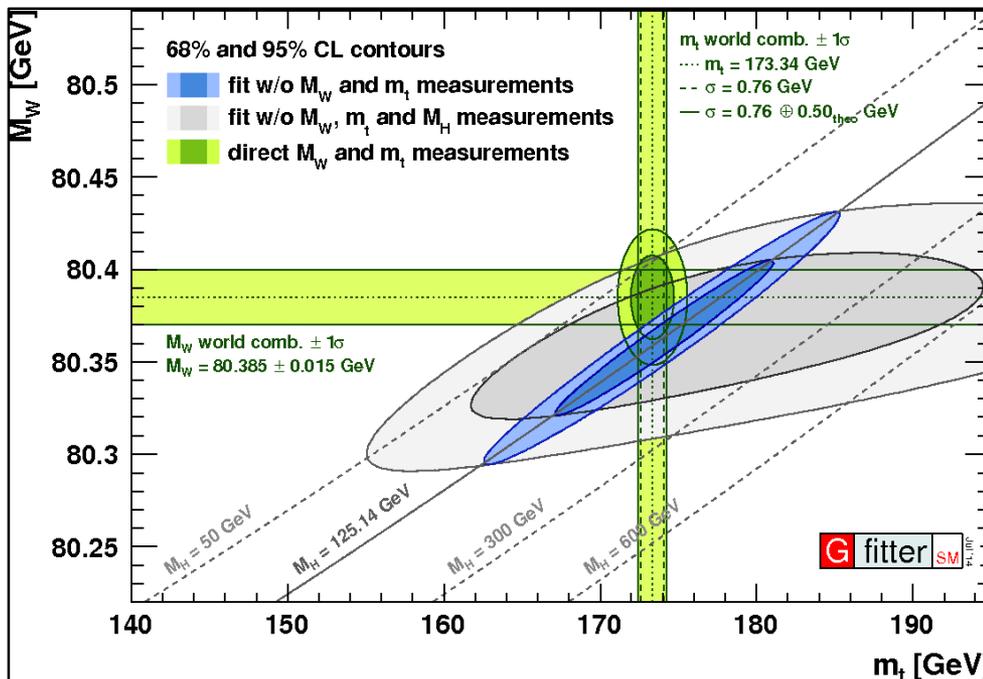
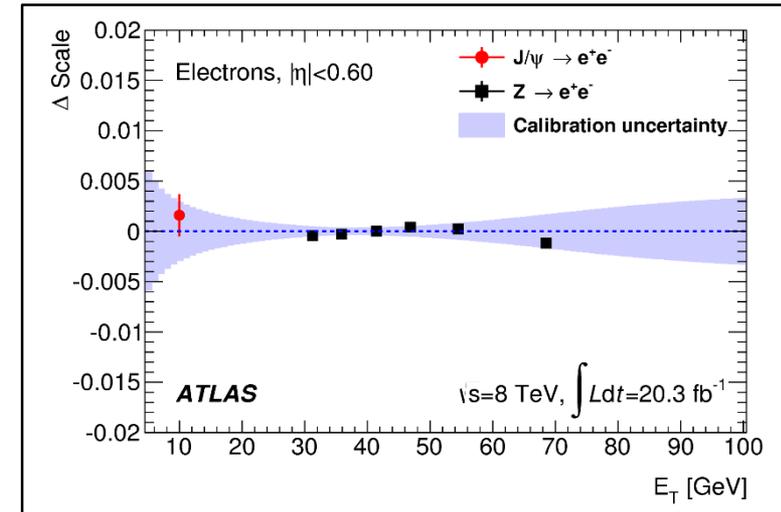


Mesure de la masse

- La masse du boson de Higgs est aujourd'hui connue avec **une précision de 0.4%** !

ATLAS: $m_H = 125.4 \pm 0.4$ (stat) ± 0.2 (syst) GeV

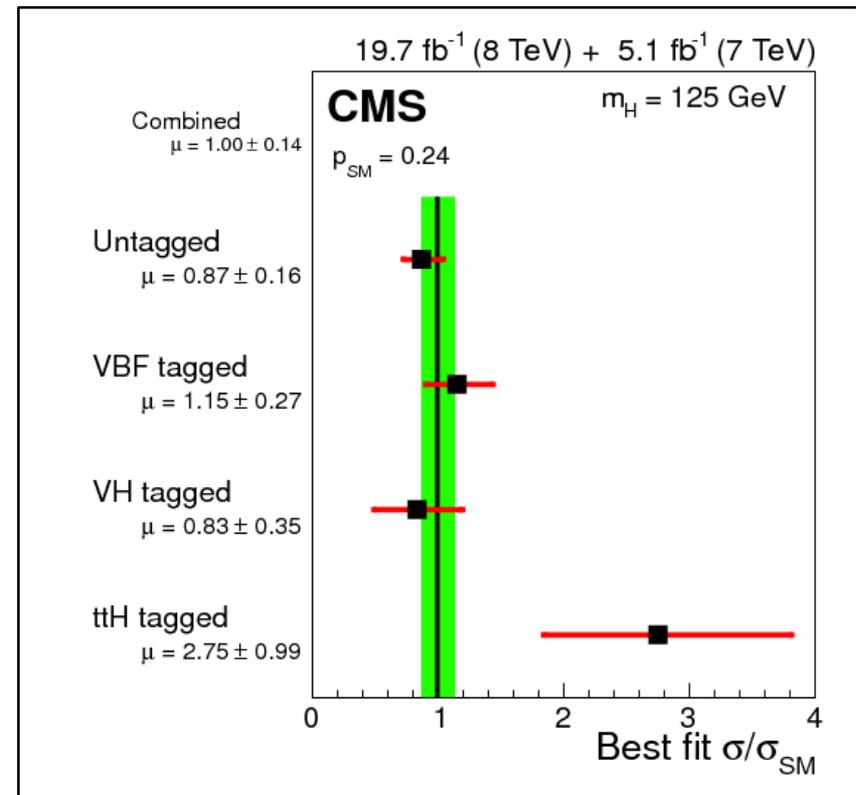
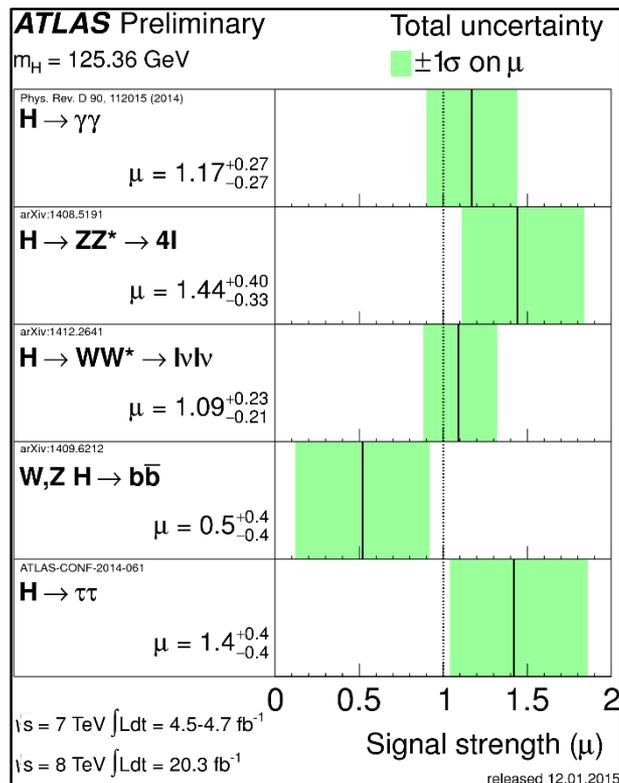
- Travail crucial sur l'étalonnage en énergie des détecteurs



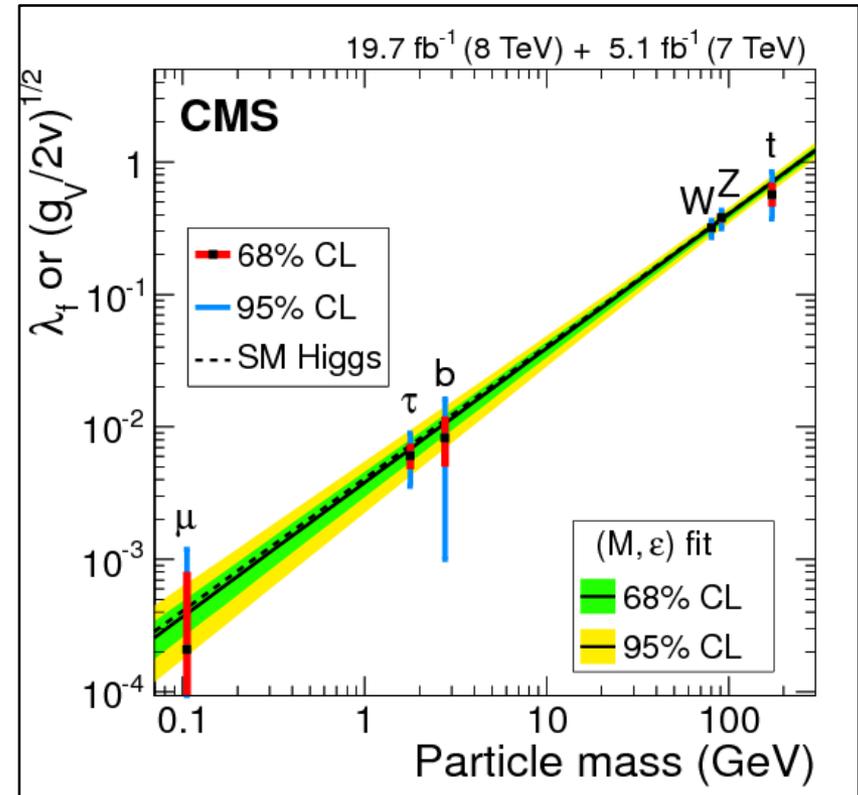
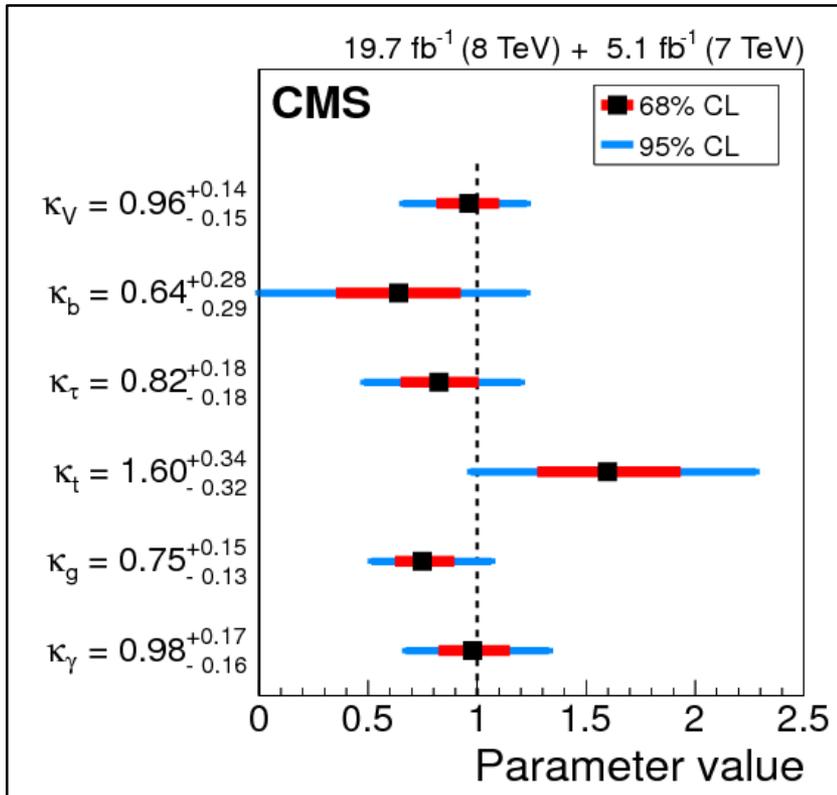
Tests cruciaux de la cohérence
du Modèle Standard

Mesure des modes de désintégration et de production

- D'autres modes de désintégration ont ensuite été observés: WW^* , $\tau\tau$ (mise en évidence du couplage aux fermions).
- Désintégration en bb : résultat pour l'instant non conclusif
- Couplage au quark top: désintégration en tt impossible à cause de la masse du top \rightarrow Mesuré par le mode de production ttH



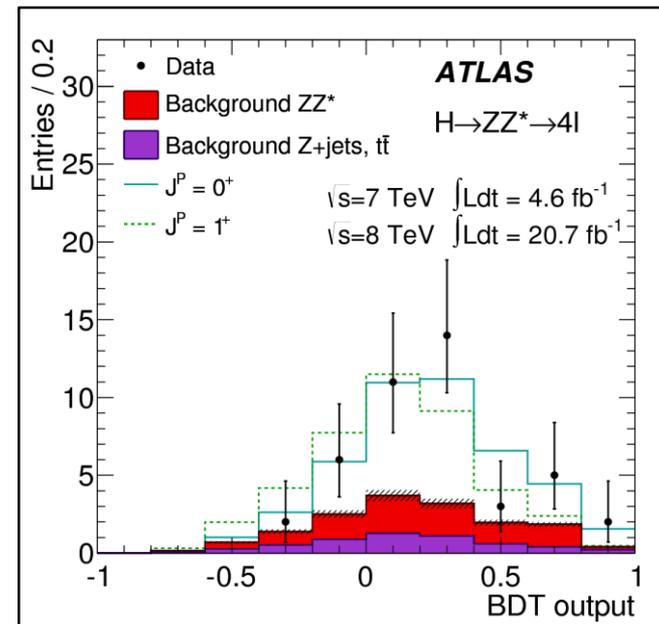
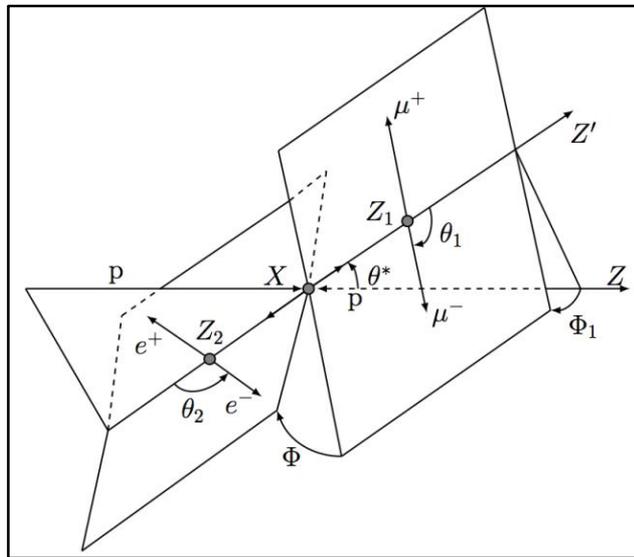
Couplages normalisés à la
prédiction du Modèle Standard



**Accord avec les prédictions sans
défaut (avec la précision actuelle)**

- Spin = moment cinétique intrinsèque d'une particule (pas d'équivalent classique)
- Le Modèle Standard prédit un **spin 0^+** pour le boson de Higgs
- Crucial de mesurer son spin
 - Les distributions angulaires des produits de désintégrations sont différentes en fonction du spin.
 - Différences faibles: utilisation de **techniques multivariées** pour atteindre la sensibilité nécessaire

ZZ*



Combinaison des études dans les canaux $\gamma\gamma$, ZZ^* et WW^*

→ **Evidence pour une particule de spin 0^+**

- Masse: 125.4 GeV
 - ➔ Non prédite par le Modèle Standard, mais basse masse favorisée par l'ajustement électrofaible
- Couplages aux particules en accord avec la prédiction:
 $\sim m_b^4/v^4$ pour les bosons, $\sim m_f^2/v^2$ pour les fermions,
 - ➔ En accord, avec la précision actuelle
 - ➔ Observation cruciale: cela met en évidence son rôle dans la génération des masses des particules élémentaires.
- Spin: 0^+
- Élémentaire? Pas de réponse définitive, mais les possibles effets d'un Higgs composite dans les couplages ne sont pas observés avec la précision actuelle.

- Masse: 125.4 GeV
 - ➔ Non prédite par le Modèle Standard, mais basse masse favorisée par l'ajustement électrofaible
- Couplages aux particules en accord avec la prédiction:
 - $\sim m_b^4/v^4$ pour les bosons, $\sim m_f^2/v^2$ pour les fermions,
 - ➔ En accord, avec la précision actuelle
 - ➔ Observation cruciale: cela met en évidence son rôle dans la génération des masses des particules élémentaires.
- Spin: 0^+
- Élémentaire? Pas de réponse définitive, mais les possibles effets d'un Higgs composite dans les couplages ne sont pas observés avec la précision actuelle.

A ce stade, toutes les observations indiquent un comportement identique à celui prévu dans le Modèle Standard.

- 1) Le boson de Higgs dans le Modèle Standard
- 2) Recherche et découverte
- 3) Etude des propriétés
- 4) **Perspectives**

- L'observation du boson de Higgs vient compléter le Modèle Standard de la physique des particules.

- Cependant, de nombreuses questions fondamentales demeurent...
 - Le nombre de familles de leptons et de quarks
 - La matière noire
 - L'énergie noire: un champ scalaire à l'oeuvre?
 - L'asymétrie matière-antimatière de l'univers
 - La masse des neutrinos
 - L'unification des interactions
 - Problème de hiérarchie entre l'échelle électrofaible et l'échelle de Planck
 - La gravitation
 - Inflation de l'univers primordial

- L'observation du boson de Higgs vient compléter le Modèle Standard de la physique des particules.

- Cependant, de nombreuses questions fondamentales demeurent...
 - Le nombre de familles de leptons et de quarks
 - La matière noire
 - L'énergie noire: un champ scalaire à l'oeuvre?
 - L'asymétrie matière-antimatière de l'univers
 - La masse des neutrinos
 - L'unification des interactions
 - Problème de hiérarchie entre l'échelle électrofaible et l'échelle de Planck
 - La gravitation
 - Inflation de l'univers primordial

Rien dans le Modèle Standard ne permet d'appréhender ces questions
→ Recherche de signes de nouvelle physique (=au-delà du Modèle Standard)

Précision dans le secteur du Higgs

- L'étude approfondie du secteur scalaire est une des sondes pour appréhender ces questions (en plus de la recherche directe de nouveaux phénomènes)
 - Désintégrations rares à observer (Ex: $H \rightarrow \mu\mu$)
 - Désintégrations interdites? (Ex: violation de la charge leptonique, $H \rightarrow e\mu$)
 - Est-il élémentaire ou composite?
 - Est-il un élément d'un secteur scalaire étendu (supersymétrie)?
 - Mesure de l'auto-couplage du boson de Higgs

Précision nécessaire pour être sensible à divers modèles

Model	κ_V	κ_b	κ_γ
Singlet Mixing	$\sim 6\%$	$\sim 6\%$	$\sim 6\%$
2HDM	$\sim 1\%$	$\sim 10\%$	$\sim 1\%$
Decoupling MSSM	$\sim -0.0013\%$	$\sim 1.6\%$	$\sim -0.4\%$
Composite	$\sim -3\%$	$\sim -(3 - 9)\%$	$\sim -9\%$
Top Partner	$\sim -2\%$	$\sim -2\%$	$\sim +1\%$

Amélioration d'un facteur ~ 10 nécessaire!

- LHC
 - 2015-2020: fonctionnement à l'énergie de design (14 TeV)
 - ➔ Premières collisions attendues en mai
 - 2022-2030: Phase à très haute luminosité
 - ➔ Objectif: accumuler 1000 fois plus de données qu'aujourd'hui!

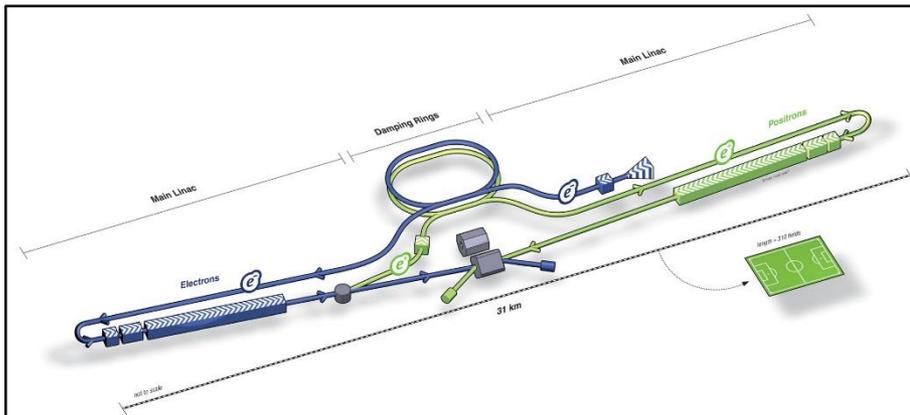
- LHC
 - 2015-2020: fonctionnement à l'énergie de design (14 TeV)
→ Premières collisions attendues en mai
 - 2022-2030: Phase à très haute luminosité
→ Objectif: accumuler 1000 fois plus de données qu'aujourd'hui!

Pour un démarrage vers 2030?

ILC: collisionneur linéaire e^+e^- ,

de 30 à 50 km

Probablement au Japon



Le futur...

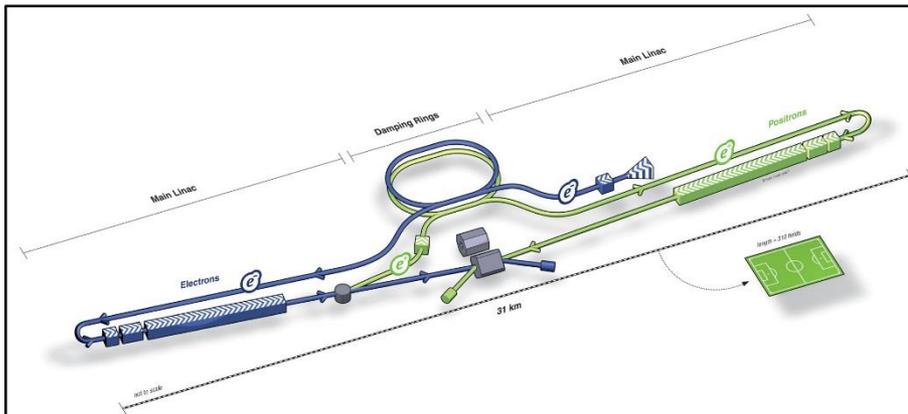
■ LHC

- 2015-2020: fonctionnement à l'énergie de design (14 TeV)
- ➔ Premières collisions attendues en mai
- 2022-2030: Phase à très haute luminosité
- ➔ Objectif: accumuler 1000 fois plus de données qu'aujourd'hui!

Pour un démarrage vers 2030?

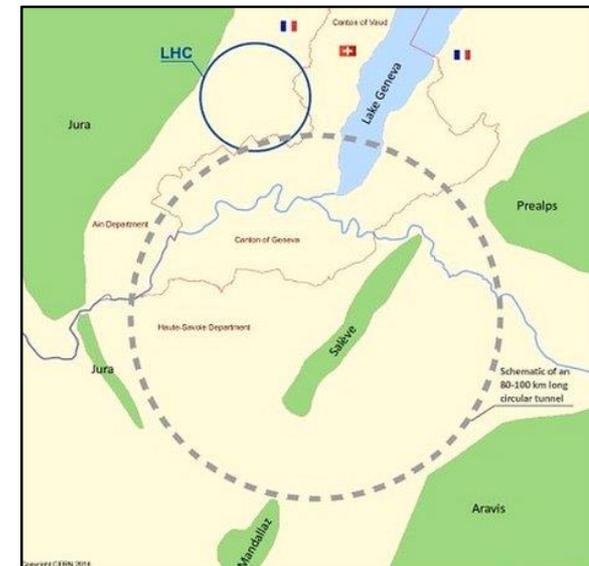
ILC: collisionneur linéaire e^+e^- ,
de 30 à 50 km

Probablement au Japon



Pour un démarrage vers 2040?

FCC: collisionneur circulaire pp,
de 100 km, à 10 fois l'énergie du LHC
Peut-être au CERN



- Plusieurs emprunts ont été effectués aux présentations suivantes:

- David Rousseau

“La recherche du boson de Higgs”

Plan Académique de formation, LAL, 26/01/15

- Jim Virdee

“The Higgs search”

High School Teachers 2013, CERN, 04/07/13

- Yves Sirois

“Le boson H et le futur au LHC”

Congrès de la SFP, LPNHE, 23/01/15