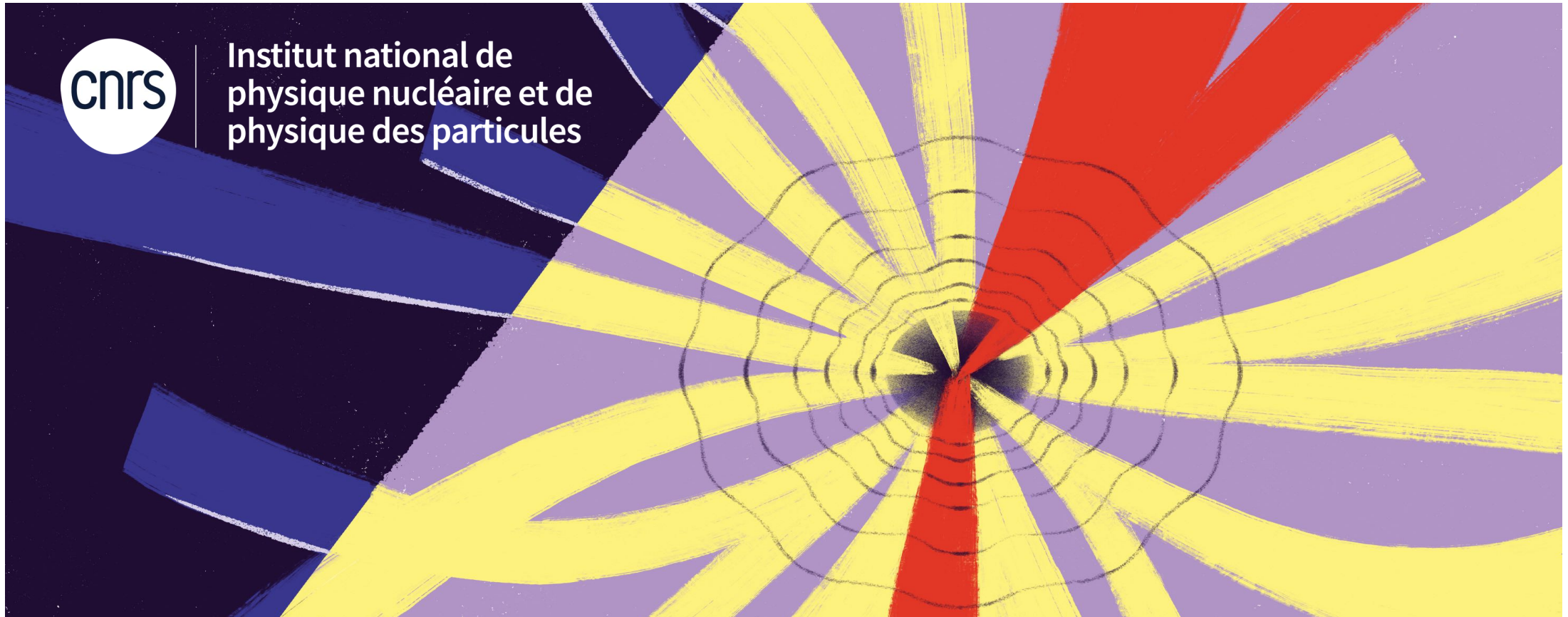




Institut national de
physique nucléaire et de
physique des particules



COLLOQUE
BOSON
DE HIGGS
10 ans après, l'aventure continue



10 ans de découvertes au LHC

Yves Sirois



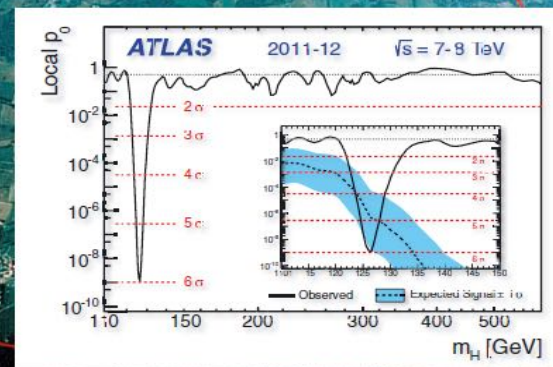
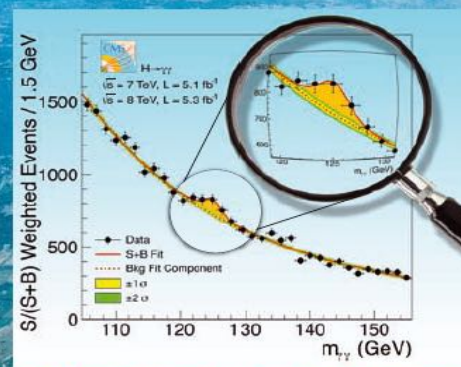
Fabiola Gianotti et Joe Incandela,
 porte-paroles d'ATLAS et CMS en 2012



PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com

SciVerse ScienceDirect



RUN I

Données
2011-2012

$\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$
 $\sim 10 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$

- Observation d'un boson à 125 GeV
- Détermination du spin et de la parité
- Observation de $H \rightarrow \gamma\gamma$, ZZ et WW
- Évidence pour $H \rightarrow \tau\tau$

ATLAS + CMS

- Observation de la production ggH et VBF
- Evidence pour les productions VH et $t\bar{t}H$
- Mesure des propriétés du boson H

RUN II

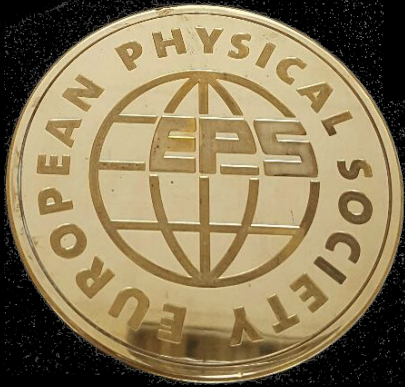
Données
2016-2018

$\sim 140 \text{ fb}^{-1}$ à $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

- Observation de $H \rightarrow \tau\tau$ et $H \rightarrow b\bar{b}$
- Observation des productions VH et $t\bar{t}H$
- Évidence pour $H \rightarrow \mu\mu$
- Évidence pour $H \rightarrow Z\gamma$, $H \rightarrow l\bar{l}\gamma$
- Mesures de la largeur intrinsèque
- Recherche de production de paires HH



Ici : emphase sur le sens physique illustré par quelques résultats



Juillet 2013

Prix HEPP de la Société Européenne de Physique

ATLAS et CMS pour la **découverte d'un boson de Higgs**, tel que prédit par le **mécanisme BEH ...**



Octobre 2013

Prix Nobel

Découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l' **origine de la masse des particules ...** confirmée par la découverte de ATLAS et CMS



Une question de masse

La question de la nature et de l'origine de la masse :

- Traverse toute l'histoire de la physique moderne
- Prend toute son ampleur avec l'interaction faible
- Est reliée à l'origine de la matière et des interactions
- Bouleverse le récit de la naissance de l'Univers

Newton



$$F = m a$$

Cinématique : masse inertielle

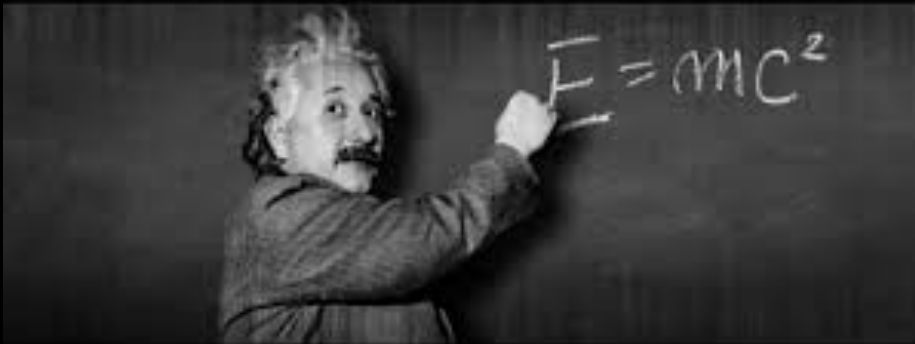


$$F = \frac{G M m}{r^2}$$

Dynamique : masse gravitationnelle

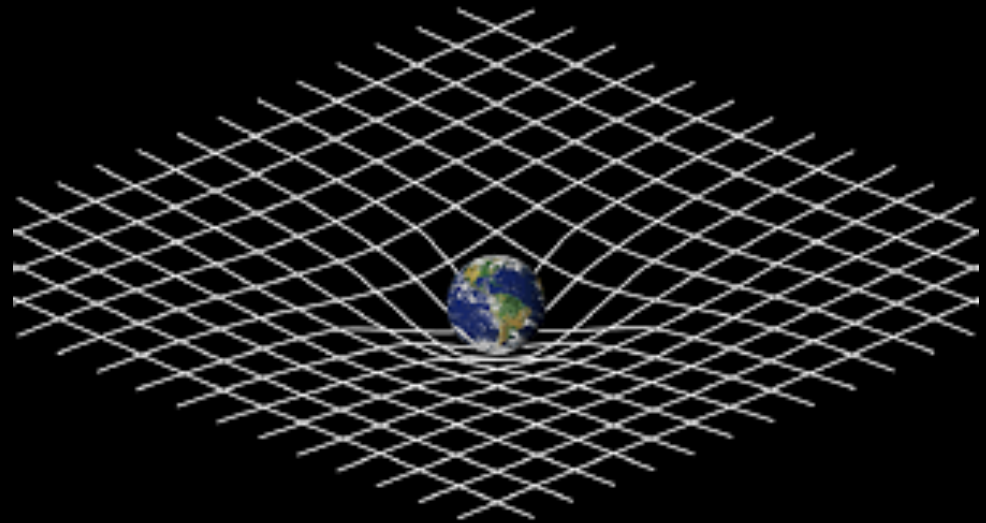
Einstein

Relativité restreinte



Espace-temps $\leftrightarrow E = mc^2$

Relativité générale

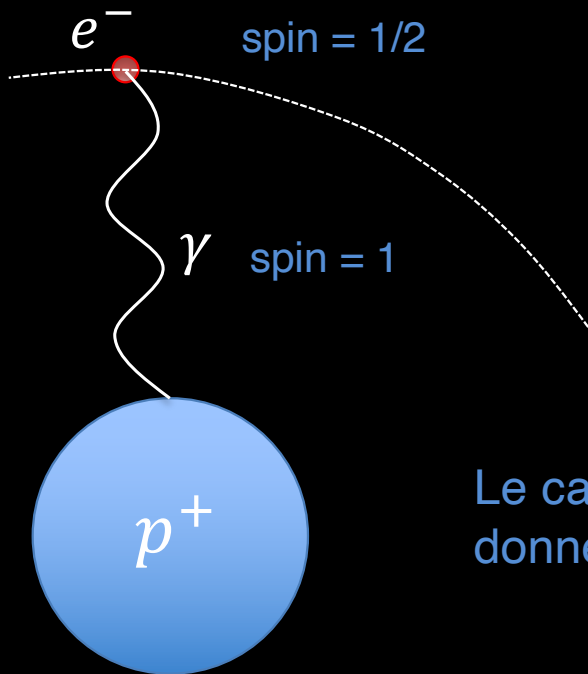


La masse-énergie courbe l'espace-temps

Seule subsiste la masse inertielle dans le théâtre de l'espace-temps !

La matière ordinaire

Atome

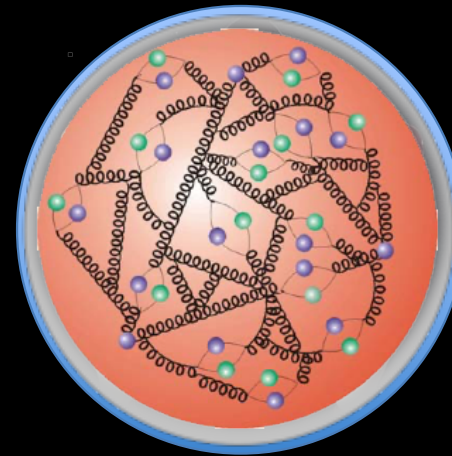


Le calcul de m_e
donne l'infini !

Électrodynamique quantique

On injecte m_e et m_p dans la théorie

Noyau Atomique



g = gluon
spin = 1

$$p \Leftrightarrow u \ u \ d$$
$$\quad \quad \quad \frac{2}{3} \ \frac{2}{3} \ -\frac{1}{3}$$

Chromodynamique quantique

- Le proton est constitué de quarks spin = $1/2$
- $m_p \gg \Sigma m_q \Leftrightarrow$ masse d'origine dynamique !

Toute la simplicité du monde



Un vieux rêve réductionniste
Empédocle - V^e siècle av. J.C.

Fermions de matière (spin 1/2)

u
up

d
down

e
electron

ν_e
electron neutrino

Bosons vecteurs d'interaction (spin 1)

g
gluon

γ
photon

Force nucléaire forte

Force électromagnétique



- Il existe aussi une interaction faible
- Le neutrino n'interagit que par cette interaction faible

L'interaction faible

- **Responsable d'une instabilité intrinsèque des particules de matière**

p libre : stable n libre : instable noyaux lourds : radioactif (p ou n instable)

- Radioactivité

- Traitement du cancer

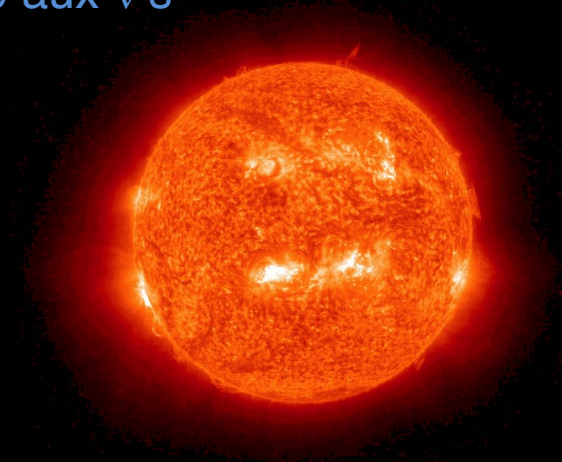
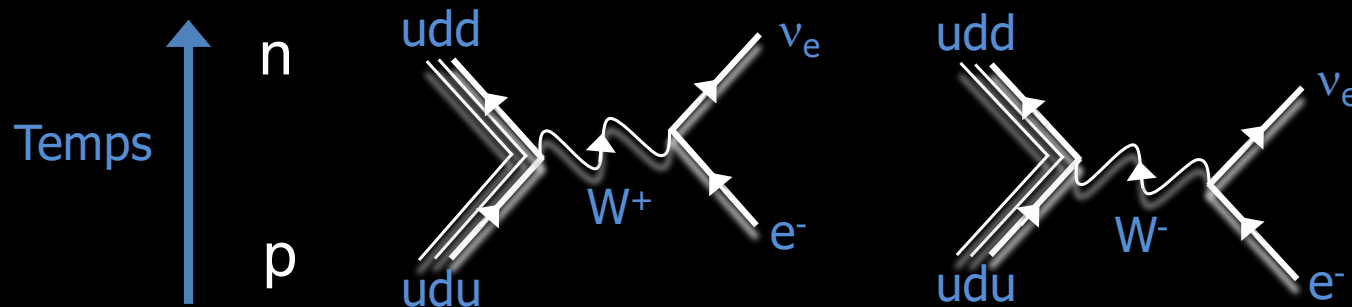


Marie Skłodowska-Curie

- 50% de la production de chaleur de la Terre !

Équivalent de ~ 50 000 réacteurs nucléaire \leftrightarrow mesuré grâce aux ν 's

- Régulation de l'énergie produite par le Soleil !





Fondations en péril

- L'interaction faible est de très courte portée (boson Z^0 et W^\pm massifs)
- Impossible de préserver les fondements théoriques (les symétries) pour une interaction véhiculée par des bosons vecteurs massifs

Toutes les particules doivent être de masses nulles !





Préserver l'essentiel

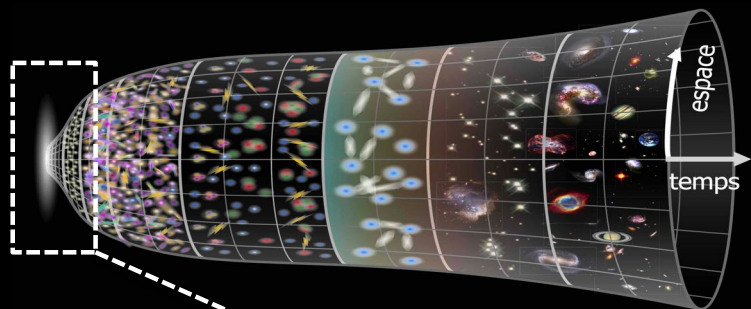
- Il faut préserver les fondements de la théorie et donc préserver les symétries (i.e. les principes d'invariance)

On conserve le contenu !

- Il faut pouvoir admettre l'existence de particules massives compte tenu de l'interaction faible

On change le contenant !

La masse des particules apparaît lorsque les champs d'interaction et de matière sont plongés dans le « vide » physique !



"Vrai" Vide \Leftrightarrow
particules massives

Espace

$$\langle H \rangle \sim 0$$

Temps

$$\langle H \rangle \neq 0$$

Champ de l' INFLATON

Champ de HIGGS



Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Avant la brisure de symétrie :

Deux doublets complexes
4 composantes de champ H

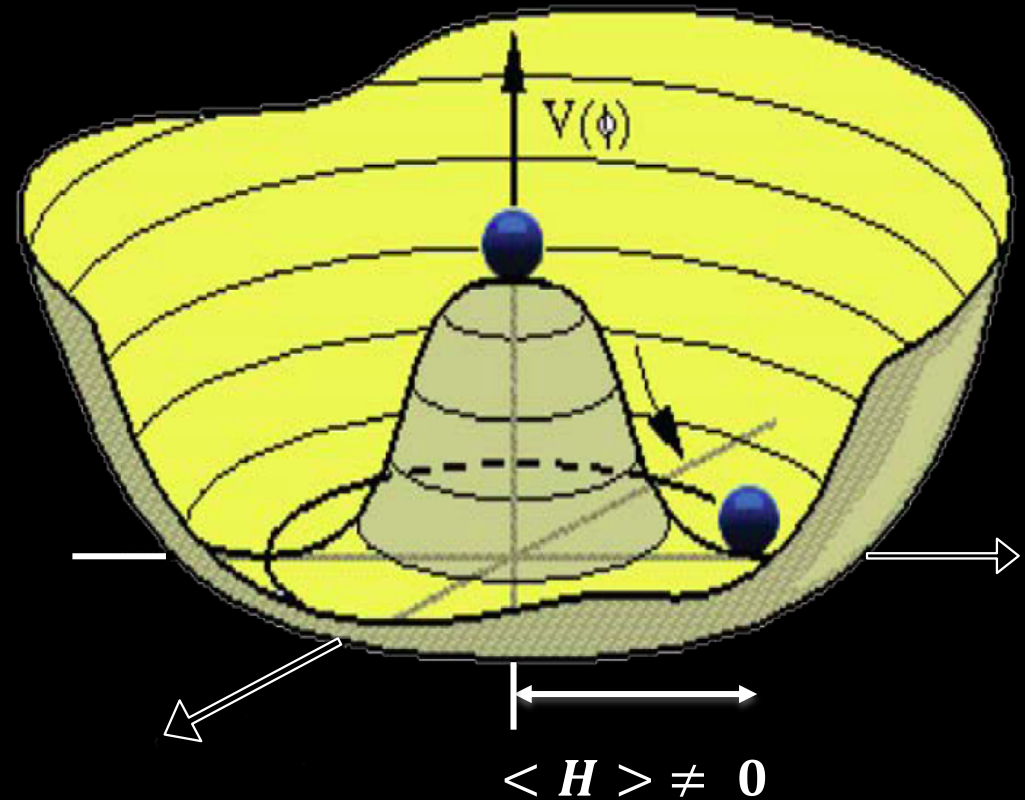
La brisure de symétrie :

10^{-12} s, 10^{17} °K

Masse du photon = 0

Masse des bosons Z^0 et $W^\pm \neq 0$

Un champ scalaire H subsiste

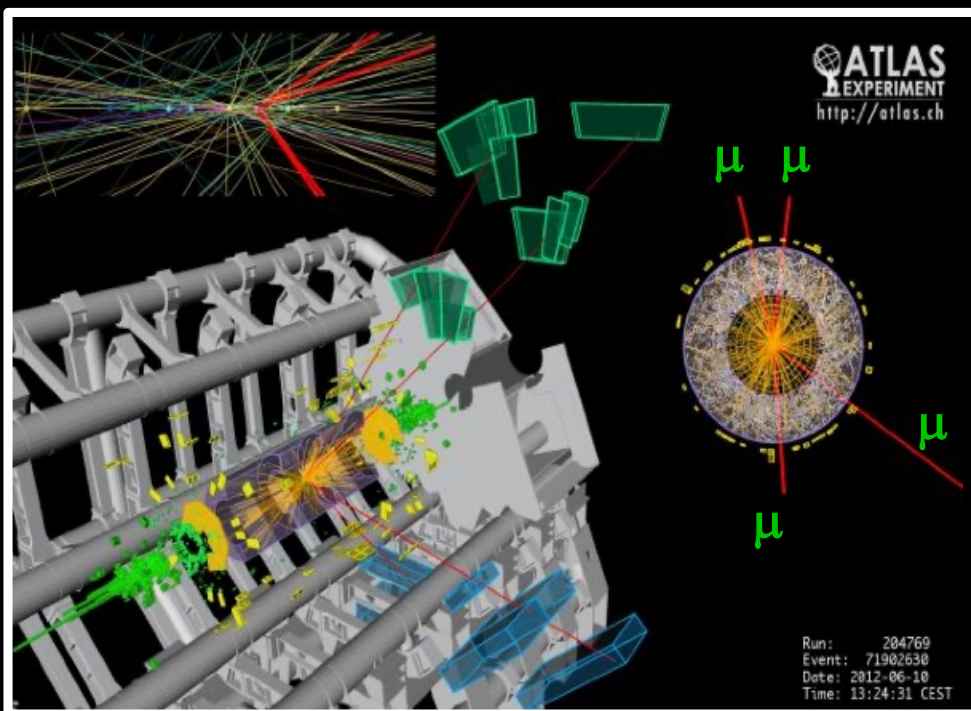


Prédiction de l'existence d'un boson scalaire H

2011-2012

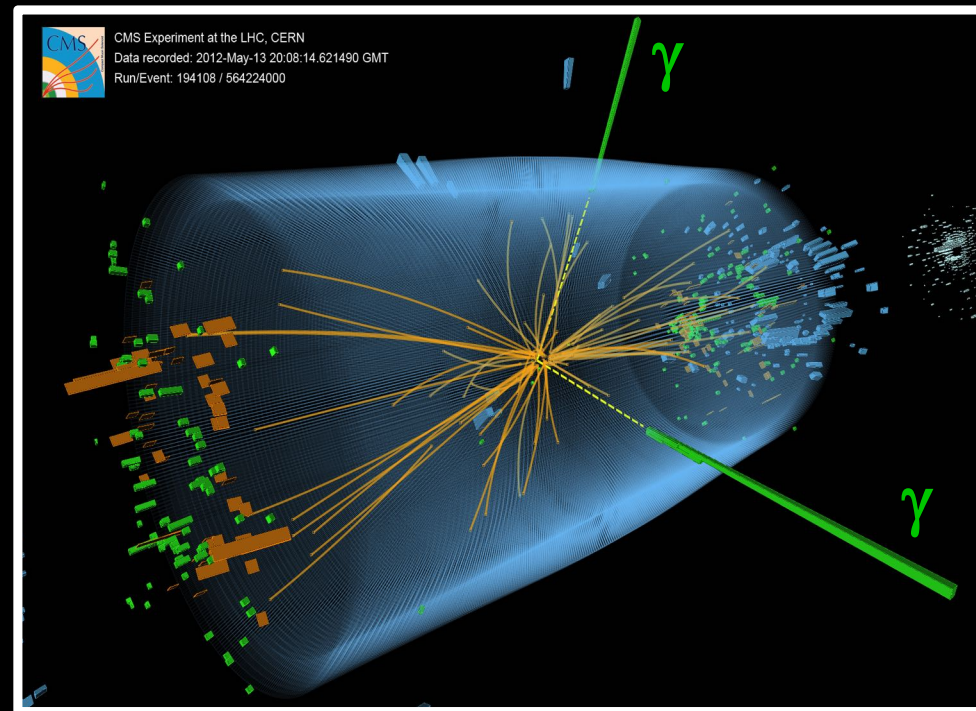
Recherche de signatures caractéristiques du boson de Higgs

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \mu$



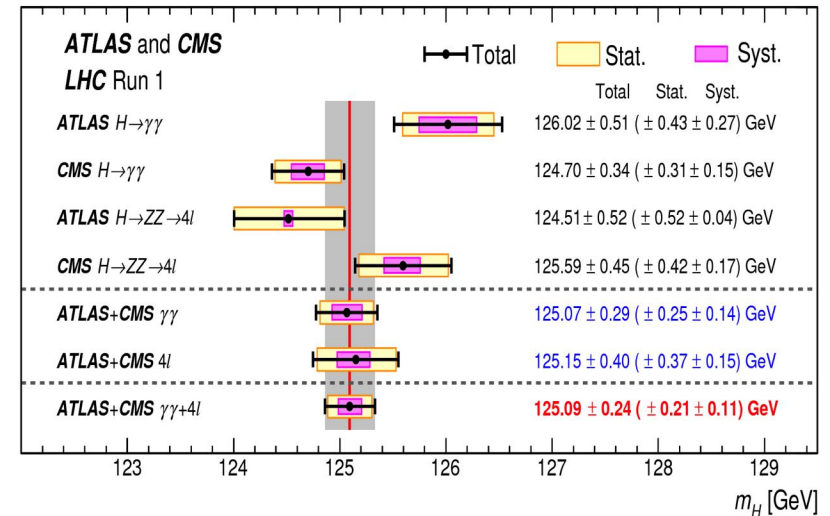
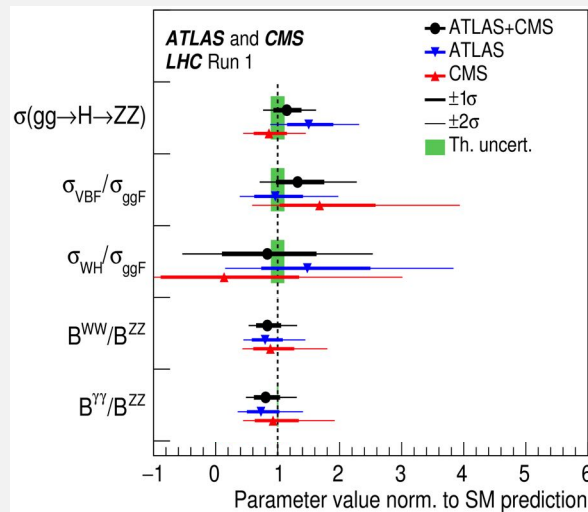
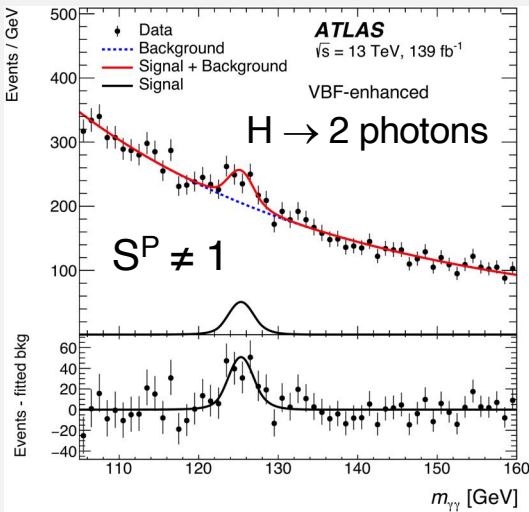
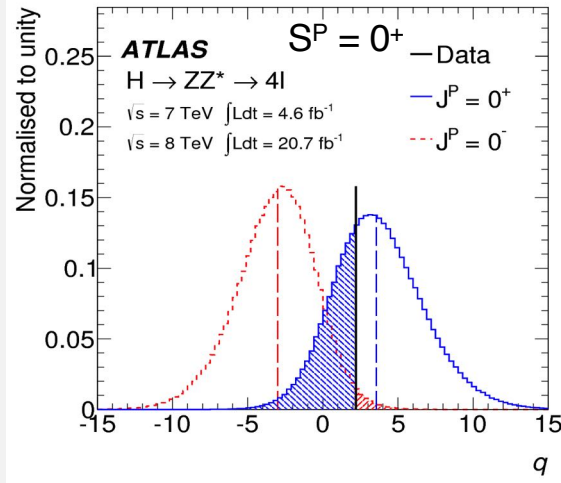
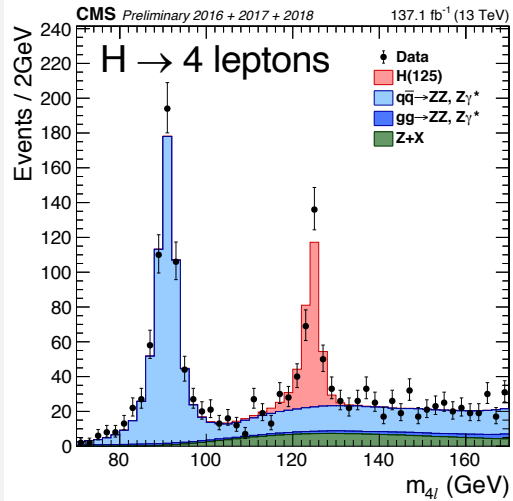
ATLAS

$H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS

Découverte du boson H \Leftrightarrow mécanisme BEH

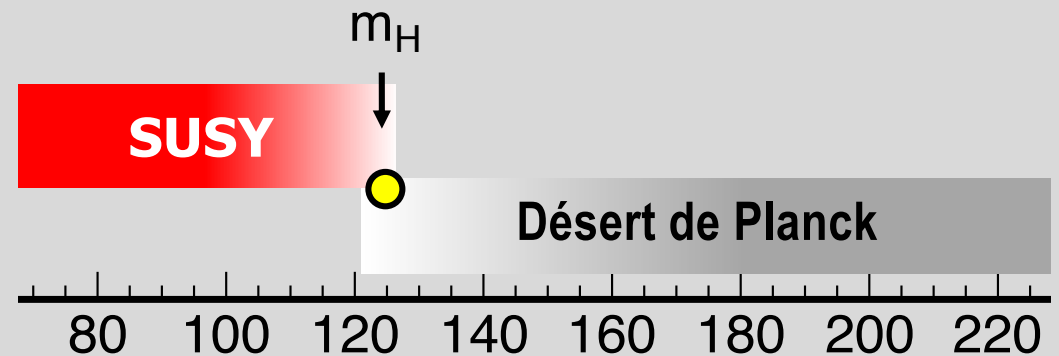
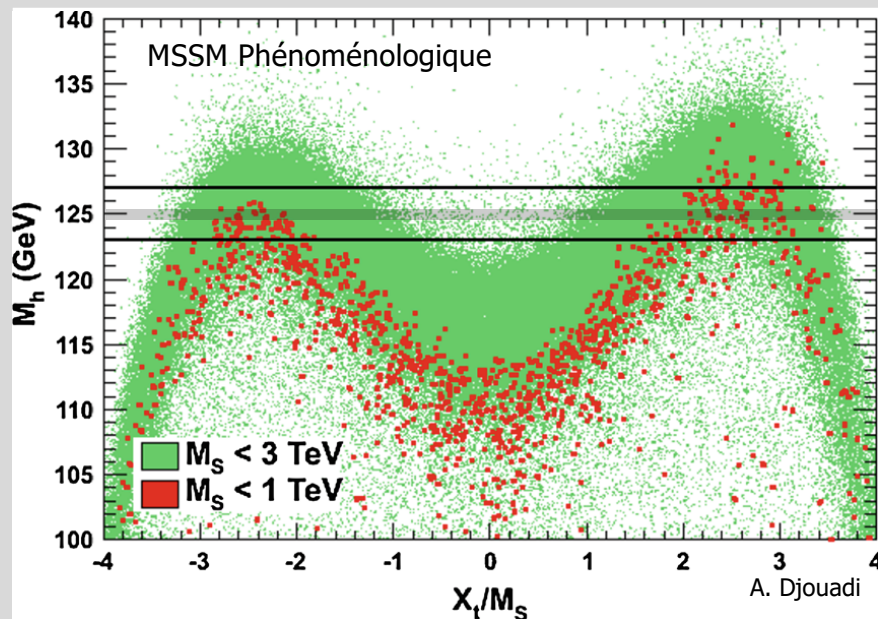


Mass = 125.09 \pm 0.24

Il existe un boson scalaire comme conséquence du mécanisme BEH de brisure spontanée de la symétrie électrofaible \Leftrightarrow Prix Nobel !

La possibilité d'un île

- « *La nature est généreuse* » avec ce choix de masse pour le boson H
Accès à de très nombreux modes de production \times désintégration ! *Fabiola Gianotti, 4 juillet 2012*
- ... *mais sournoise* !



- Toutes les pistes sont brouillées !
- Triomphe du découplage ?

La fragilité du vide

- ... *et malicieuse !*

Les particules lourdes au LHC :

$$m_{\text{top}} = 173,29 \pm 0,95 \text{ GeV}$$

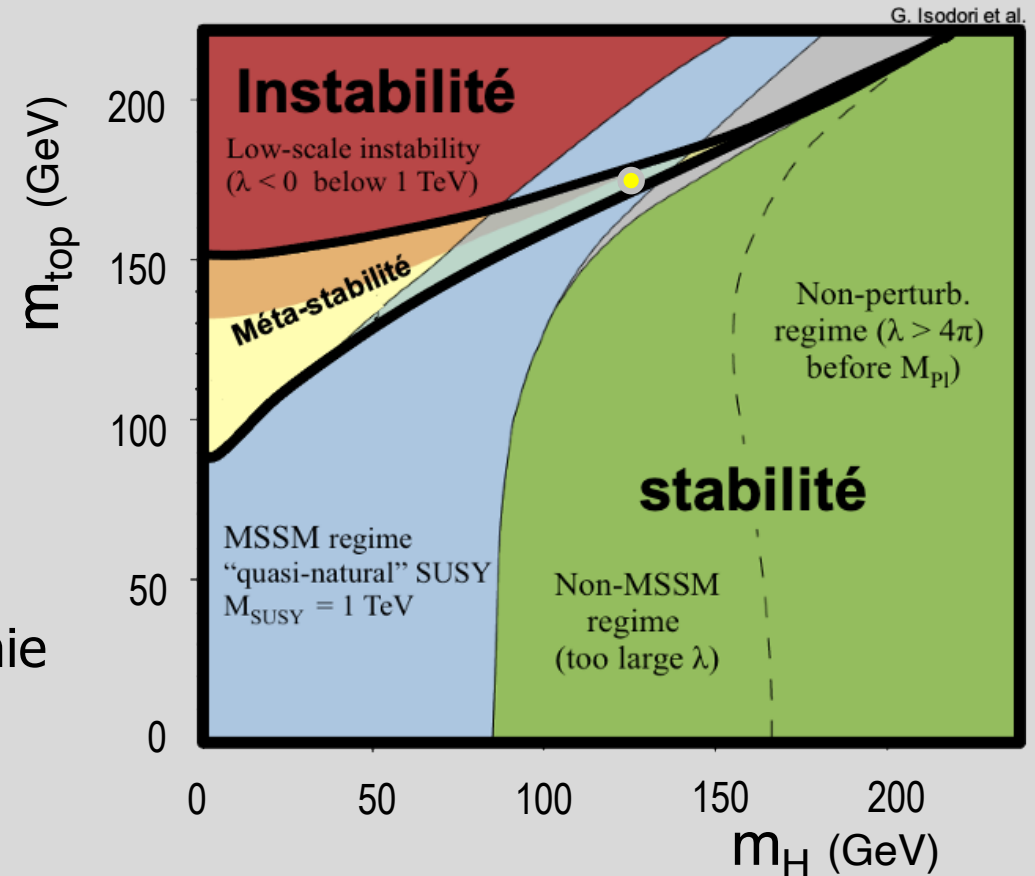
$$m_{\text{H}} = 125,09 \pm 0,24 \text{ GeV}$$

⇔ métastabilité du vide !

- Le fait que m_{H} soit arbitraire et non protégée dans la théorie introduit des problèmes de naturalité et de hiérarchie

SUSY : m_{H} calculable

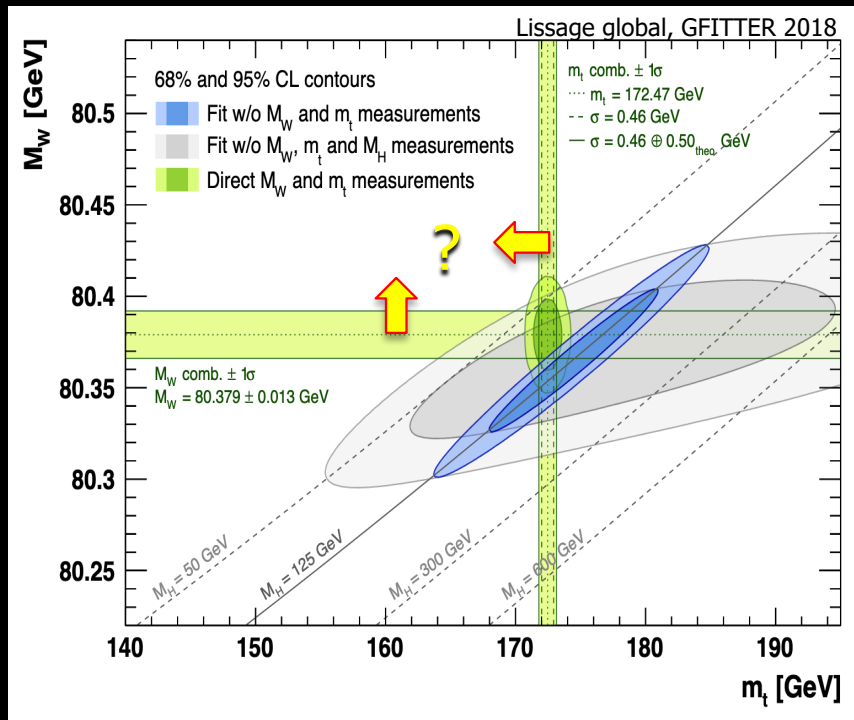
5 bosons : h, H, A, H^{\pm}



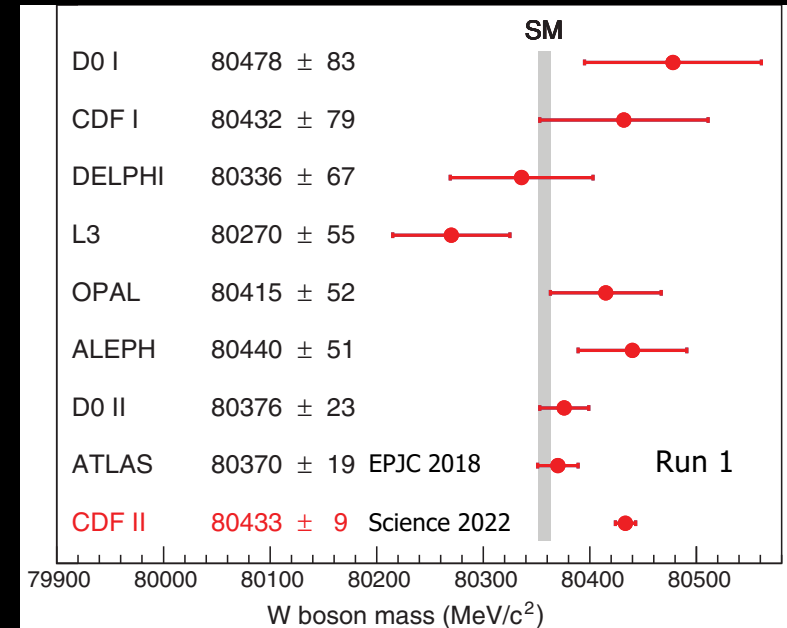
Un Univers improbable ? De la nouvelle physique ?

De la cohérence de la théorie

- Rôle privilégié du quark top ($y_t \sim 1$)
- Modèle standard sur contraint
- Prédiction théorique précise de m_W (m_H, m_{top})



m_W



m_{top}

174.30 ± 0.64 Tevatron Combined (CDF, D0)
 172.69 ± 0.48 ATLAS Run 1 Legacy
 172.44 ± 0.48 CMS Run 1 Legacy
 171.77 ± 0.38 CMS Run 2

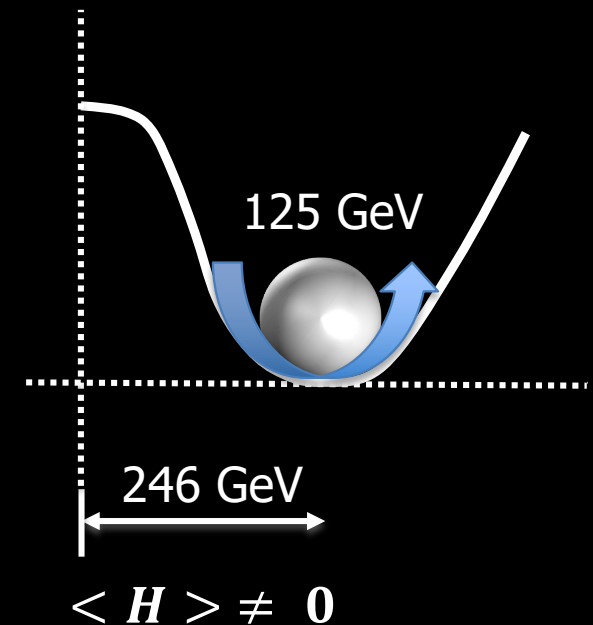
- Juste une légère tension persistante ou la nouvelle « périhélie de mercure » ?
 Vector-like quarks ? Nouveaux bosons ? Supersymétrie ? Matière noire ?

Action du champs de Higgs

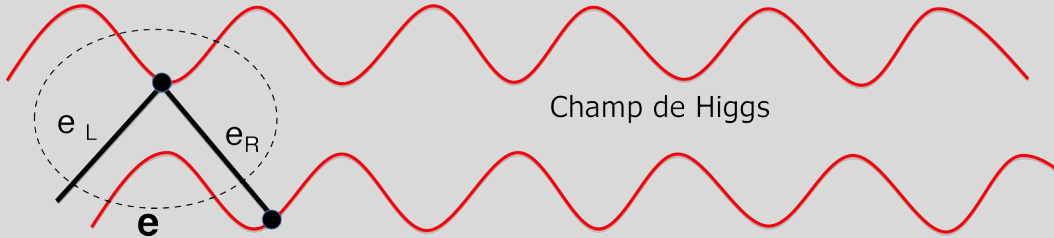
- Propriété unique du champ scalaire de Higgs :

$$\langle H \rangle \neq 0$$

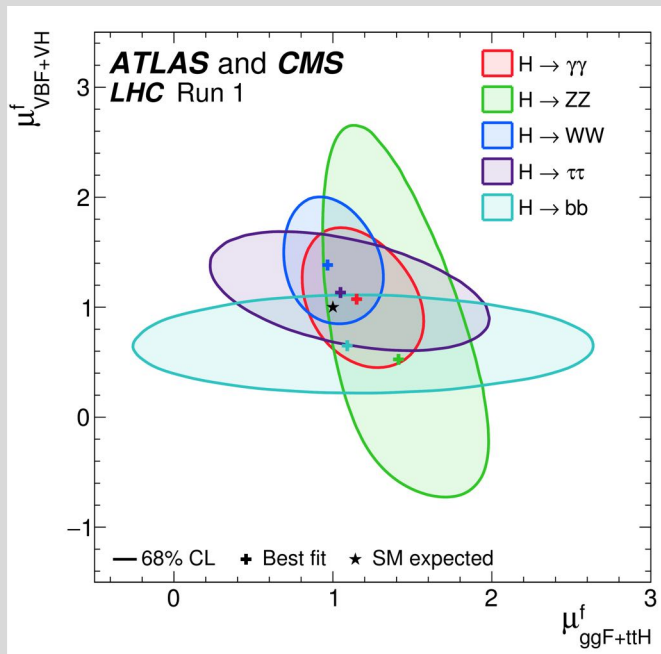
- Le champ de Higgs imprègne tout l'Univers, en permanence !
- Les particules de matière acquièrent une masse en interagissant sans cesse avec le champ de Higgs !



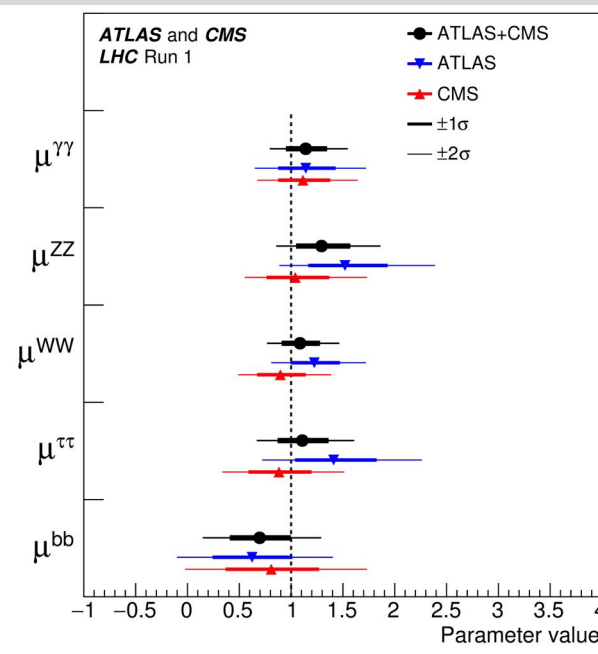
Découverte de l'origine de la masse des fermions



La masse d'une particule de matière est la conséquence d'un mélange quantique induit par le champ de Higgs !



$$\mu = \sigma / \sigma_{MS}$$



$$MS \Leftrightarrow \mu = 1$$

Run 1 : 1^{ère} évidence

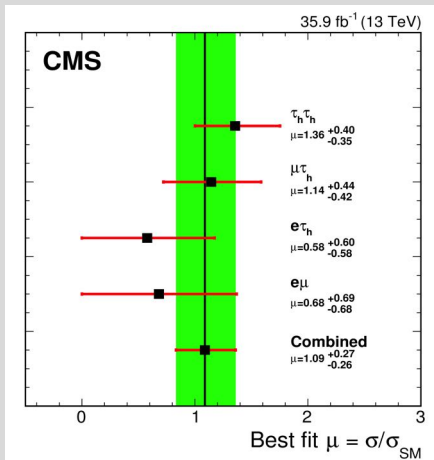
Seuil d'observation atteint en combinant les canaux $H \rightarrow bb$ et $H \rightarrow \tau\tau$

L'existence d'une 4^e famille de fermions chiraux est exclue !

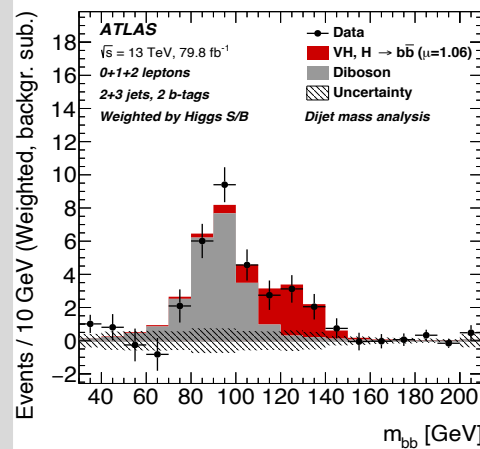
Découverte de l'origine de la masse des fermions

Run 2 : Observation des désintégrations $H \rightarrow \tau\tau$, $H \rightarrow bb$ et de la production ttH , $H \rightarrow \gamma\gamma$

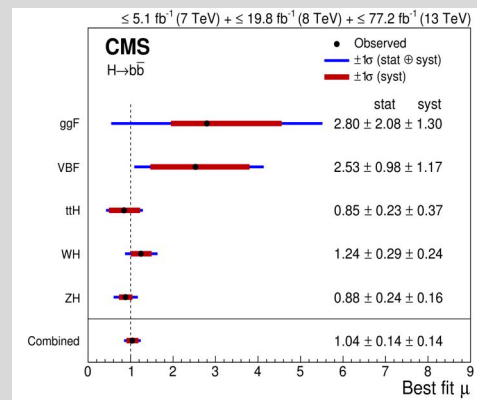
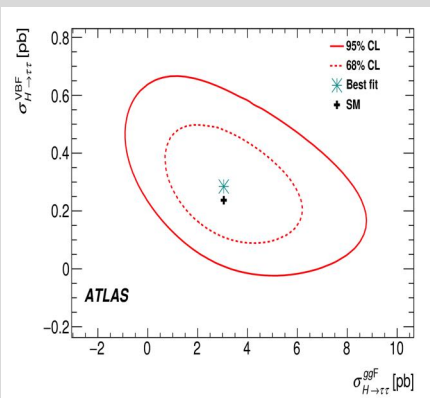
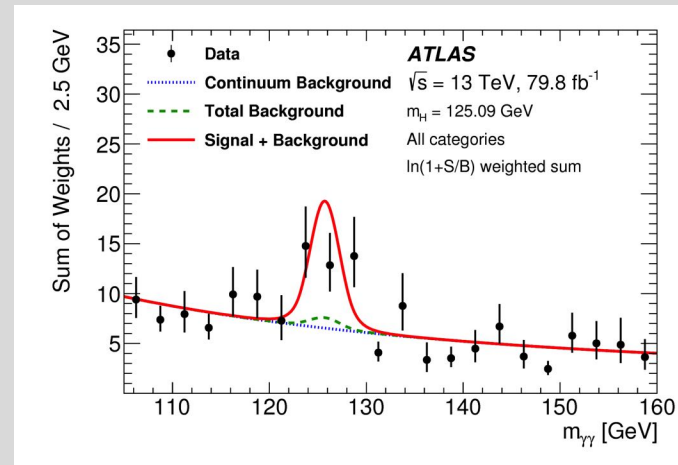
$H \rightarrow \tau\tau$



$H \rightarrow bb$



$ttH, H \rightarrow \gamma\gamma$



L'interaction avec le champ de Higgs est bien à l'origine de la masse des fermions de matière au moins pour la 3^e famille !

Toute la richesse du monde

- Mécanisme BEH (m_Z , m_W) + interactions de Yukawa (m_l , m_q)
- La structure du vide (champ de Higgs) à l'origine de complexité de la matière ?

Quarks

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

e electron	μ muon	τ tau
ν_e	ν_μ	ν_τ

Leptons

Spin $\frac{1}{2}$

Spin 0

Spin 1

Interactions

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

γ , Z^0 , W^\pm

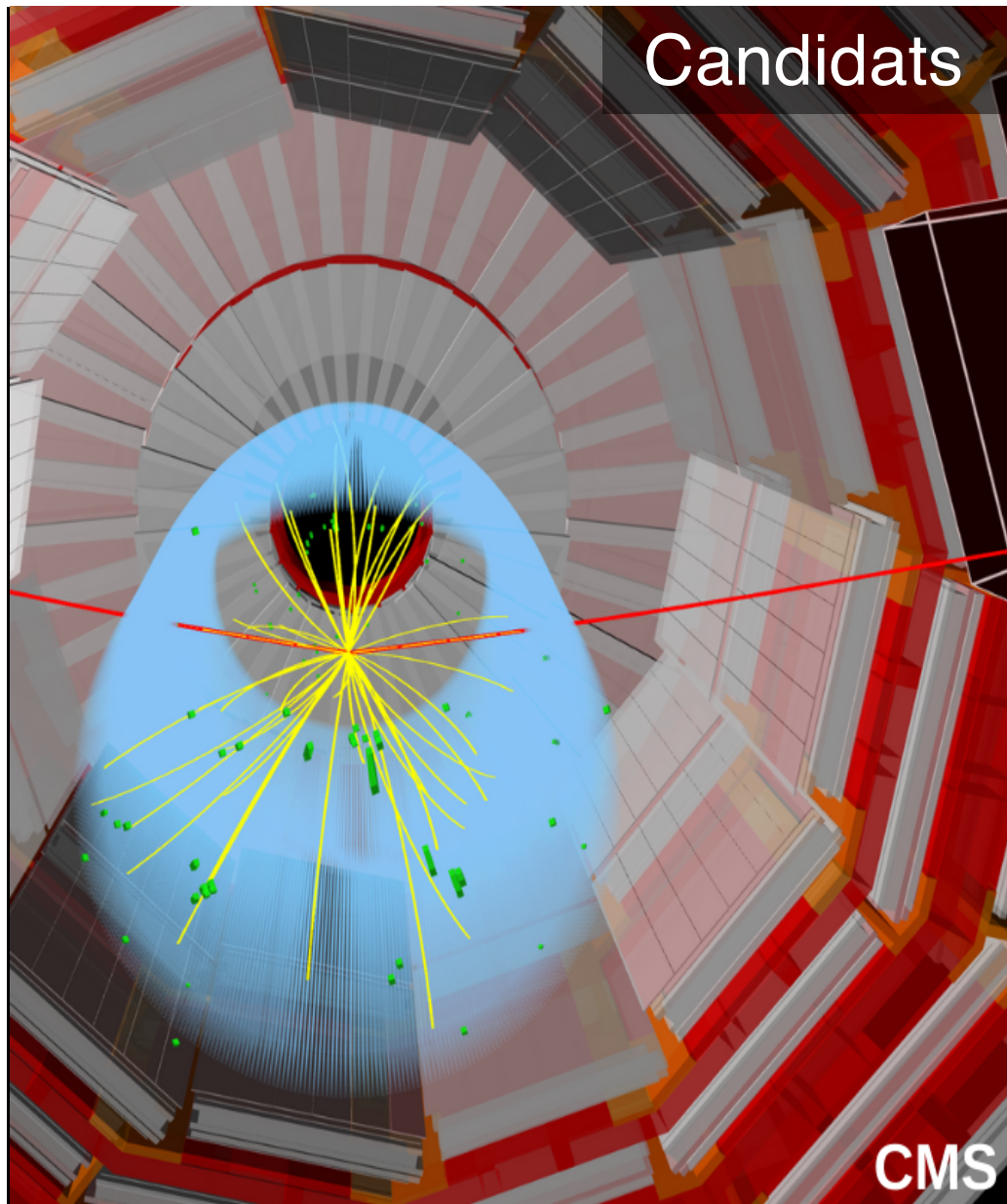
Mécanisme BEH

Fermions

Interaction avec le champ de Higgs

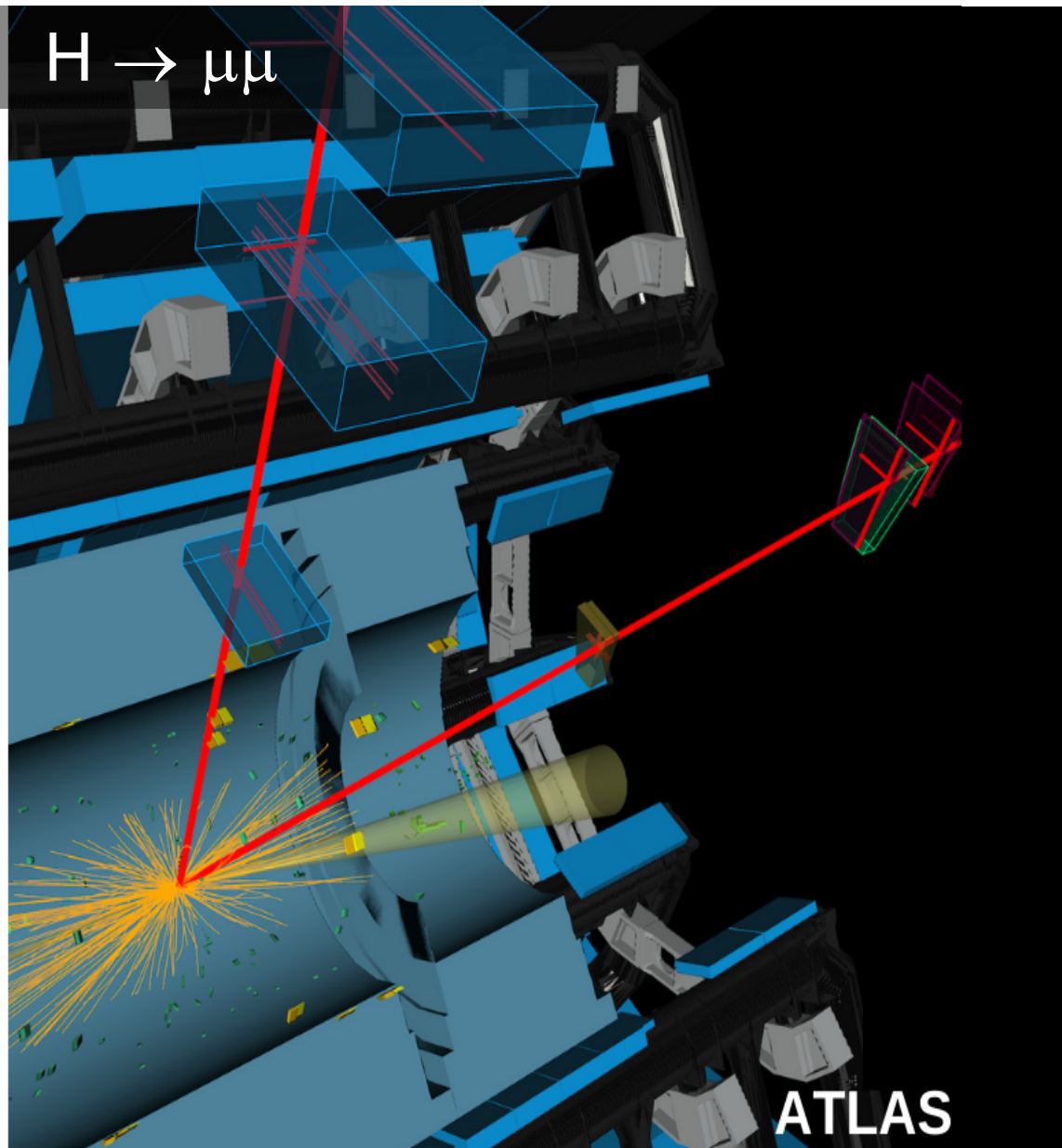
- Les interactions quantiques (spin 1) ne distinguent pas les 3 familles !
 e , μ et τ identiques à la masse près
- La propagation dans le vide révèle l'existence des familles

Candidats



CMS

$H \rightarrow \mu\mu$

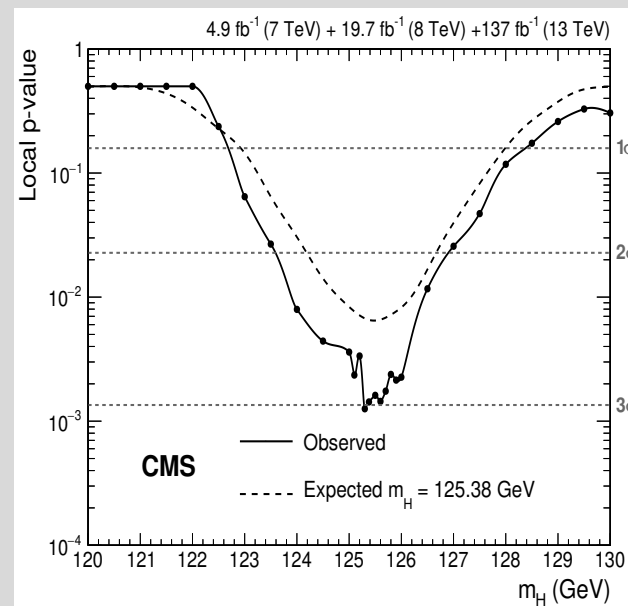
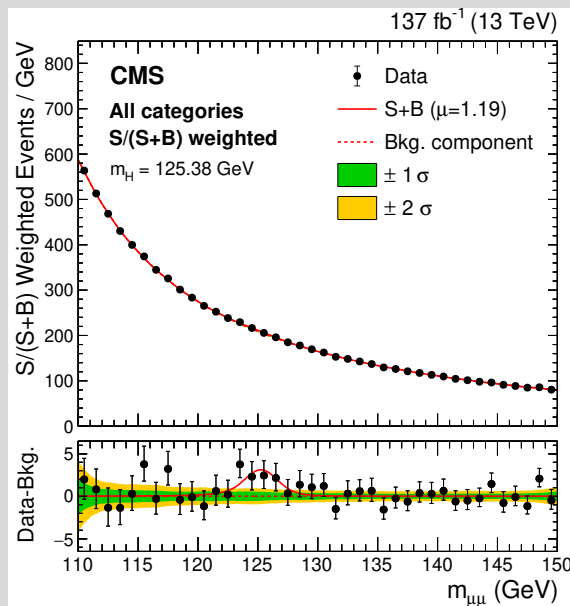


ATLAS

Familles et test de (non-)universalité

- Il existe 3 familles identiques (à la masse près) de leptons et de quarks
- Les 3 familles de fermions de même charge se mélangent (quarks ou neutrinos)
- La saveur paraît strictement conservée dans la désintégration des leptons chargés (μ^\pm , τ^\pm)
- Le champ de Higgs n'explique pas la structure en masse des fermions de matière
- Des « anomalies » sont observées par ailleurs ($g-2$ dans CDF, $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ dans LHCb ...)

Run 2 : 1^{ère} évidence pour $H \rightarrow \mu\mu$



ATLAS : 2.0 σ

CMS : 3.0 σ

Prochaine étape (Run 3) :

Observation de $H \rightarrow \mu\mu$

Objectif à terme (HL-LHC) :

Mesure précise du rapport
 $H \rightarrow \mu\mu$ / $H \rightarrow \tau\tau$

La masse est dite

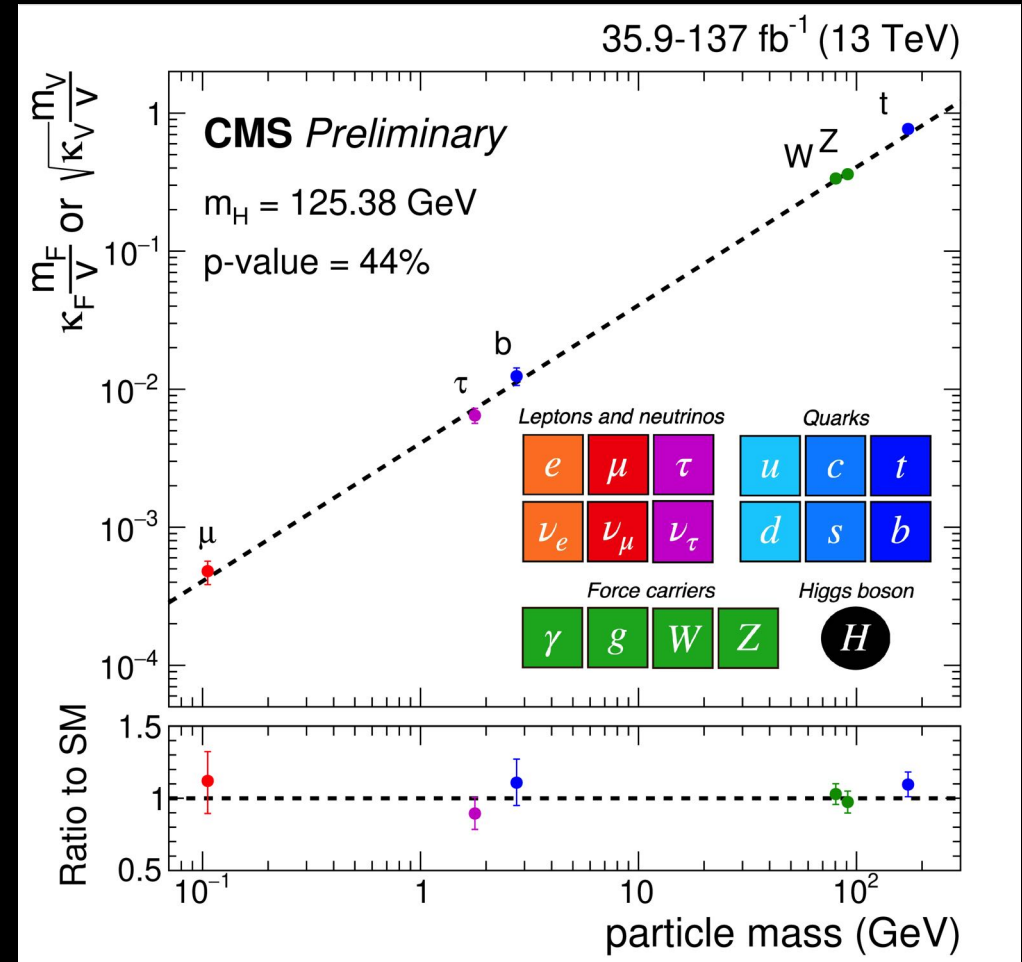
Runs 1 + 2

L'intensité de l'interactions entre le boson H et chaque particule du modèle standard doit être **proportionnel à la masse**

Les observations sont en accord avec la prédiction du modèle standard pour un seul boson H associé au champ de Higgs



On comprend l'origine (quantique) de la masse inertielle des particules de matière et d'interaction !

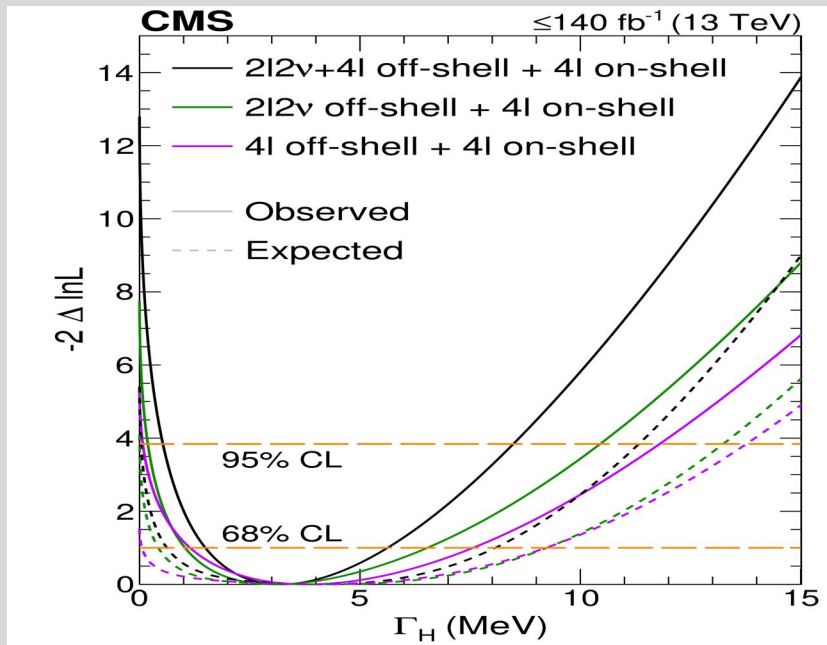


Traquer l'invisible

Largeur intrinsèque ($\Gamma = \hbar/\tau$)

- Mesuré indirectement pour la 1^{ère} fois !

$$\Gamma_H = 3.2^{+2.4}_{-1.7} \text{ MeV} \quad \Gamma_H^{SM} = 4.1 \text{ MeV}$$



Compatible avec la théorie standard

$$7.7 \times 10^{-23} < \tau_H < 1.3 \times 10^{-21} \quad 95\% \text{ C.L.}$$

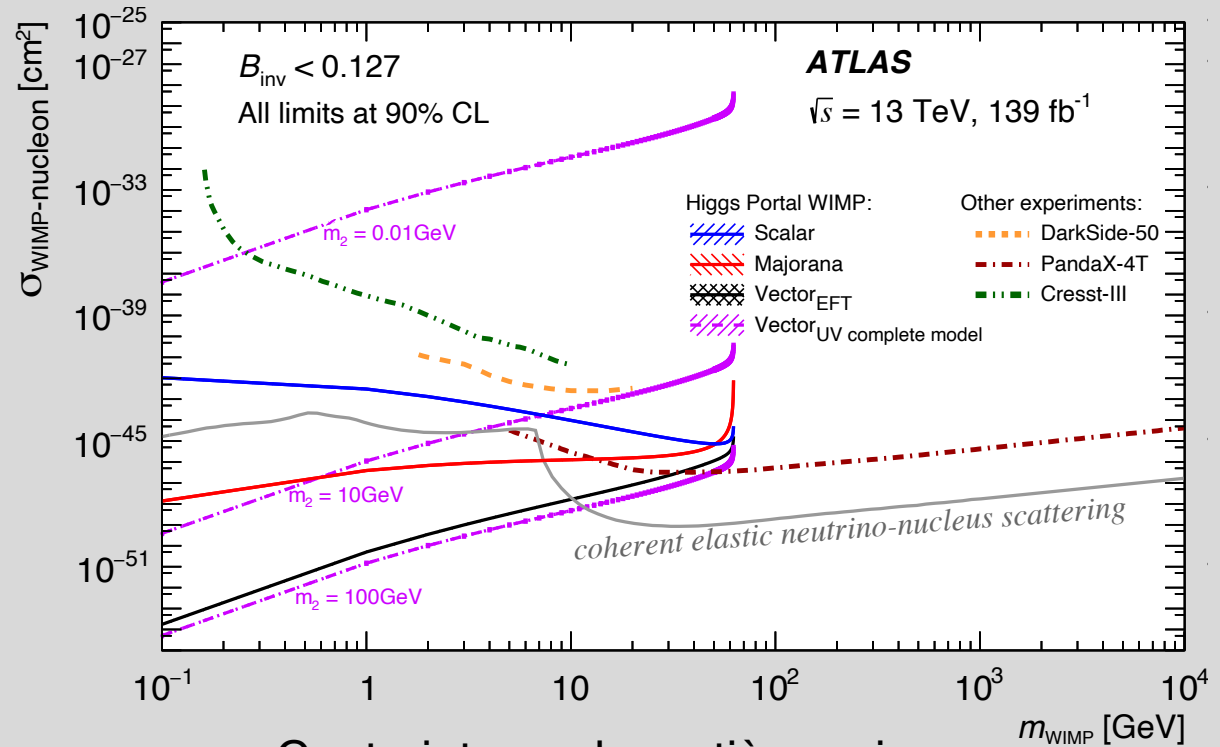
Run 2

Désintégrations fantômes

$H \rightarrow \text{invisible}$

$$\beta_{inv.} < 14,5\%$$

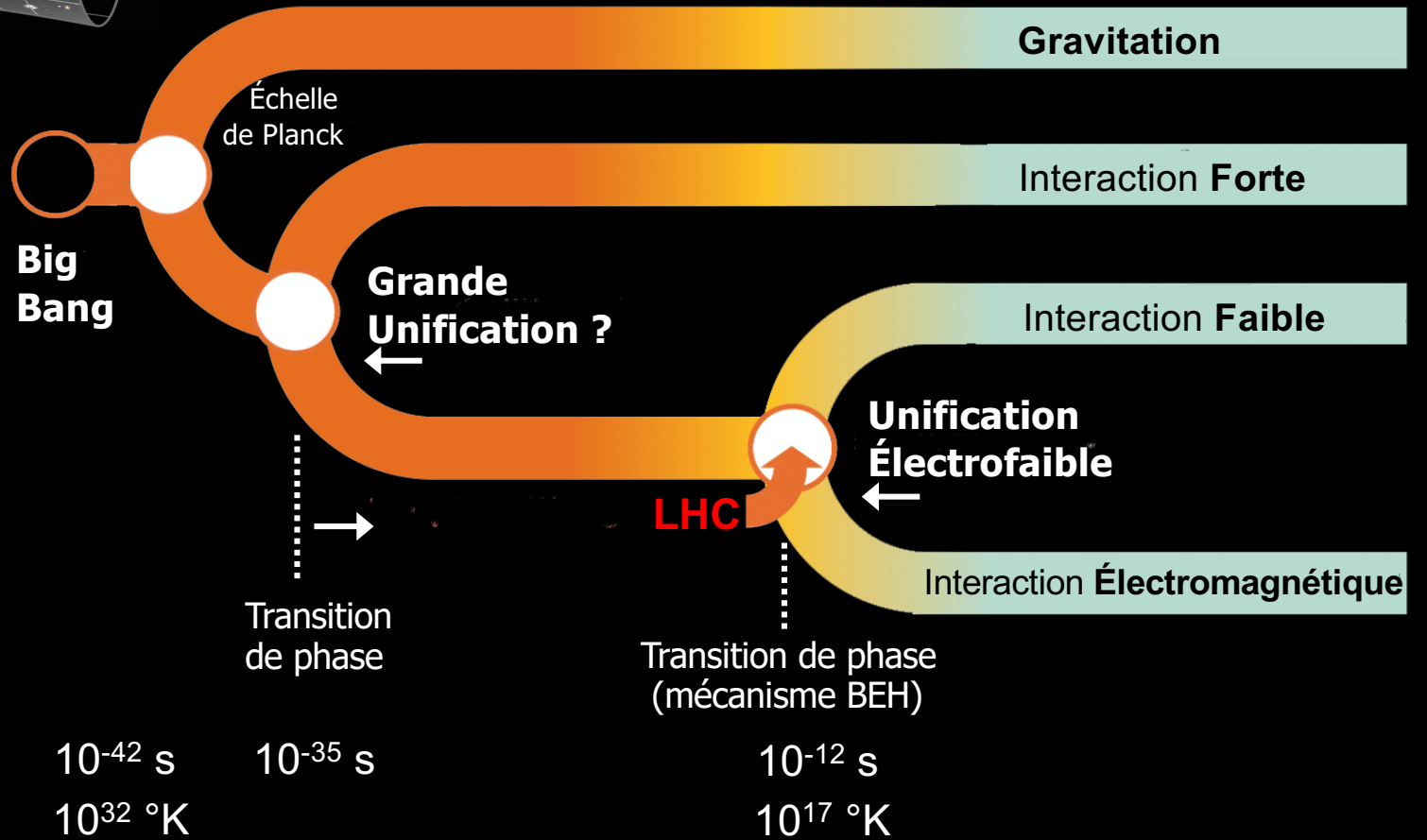
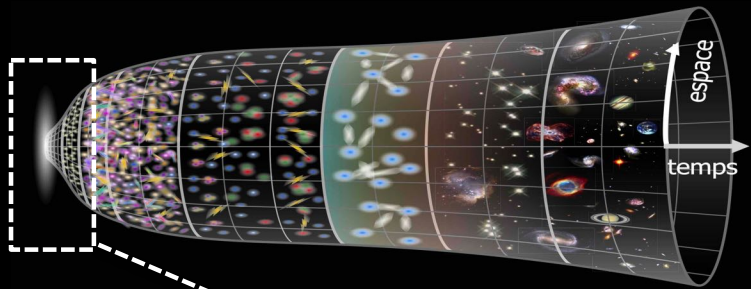
$$\beta_{inv.} < 18,0\%$$



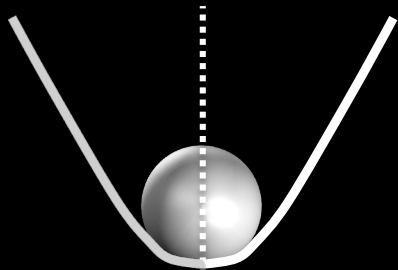
Contrainte sur la matière noire
(WIMPs)

Le vide n'est pas le néant

ou le récit des premiers instants de notre Univers



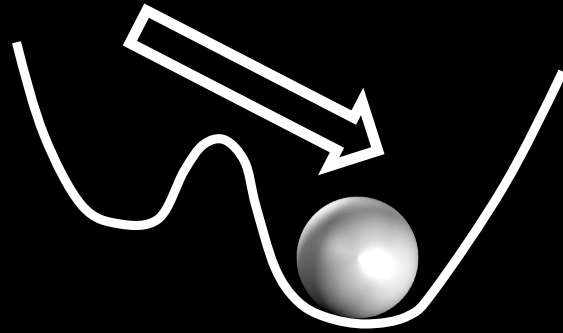
10^{-35} s



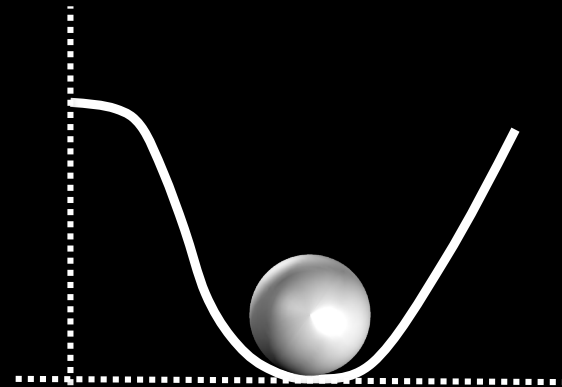
$$\langle H \rangle = 0$$

$> 10^{-12}$ s

Aujourd'hui



?



$$\langle H \rangle \neq 0$$



Bulles de « vrai » vide dans un océan de « faux » vide !

Faux vide
Transition de premier ordre* ?

Asymétrie-antimatière à l'échelle faible ?

Génération d'ondes gravitationnelles observables ?

$v \neq 0$

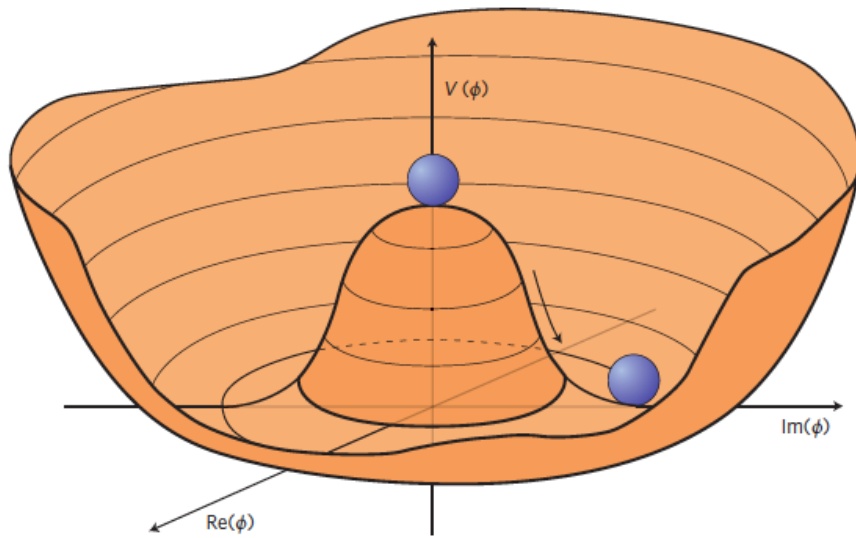
* Implique de la nouvelle physique

Vrai vide
 $v = 0$

La structure du vide dans l'Univers

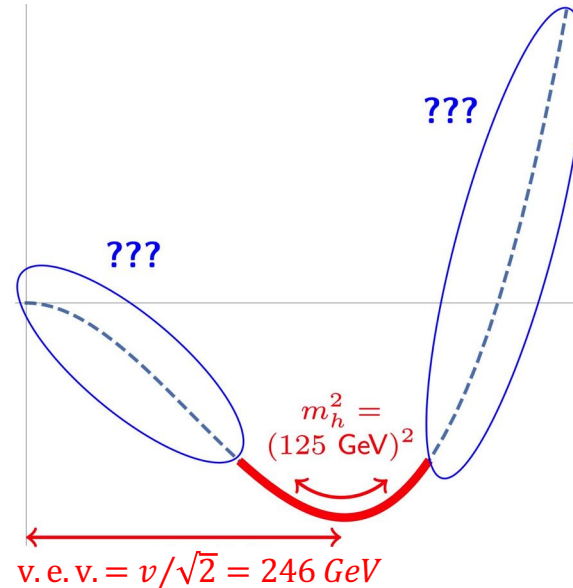
L'auto-couplage du boson de H est lié à la forme du potentiel dans le vide !

$$V(\Phi^\dagger\Phi) = -\mu^2\Phi^\dagger\Phi + \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

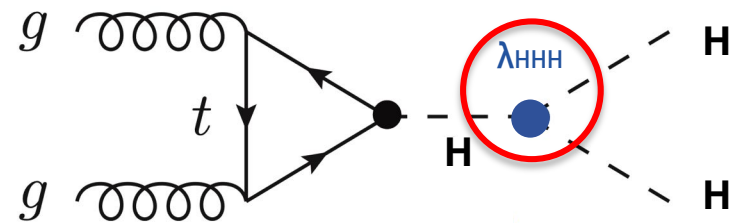


$$V(H) = \frac{1}{2}m_H^2 H^2 + \lambda_{HHH} v H^3 + \frac{1}{4}\lambda_{HHHH} H^4 - \frac{\lambda}{4}v^4$$

Modèle Standard : $\lambda_{HHH} = \lambda_{HHHH} = \lambda = \frac{m_H^2}{2v^2} \approx 0.13$



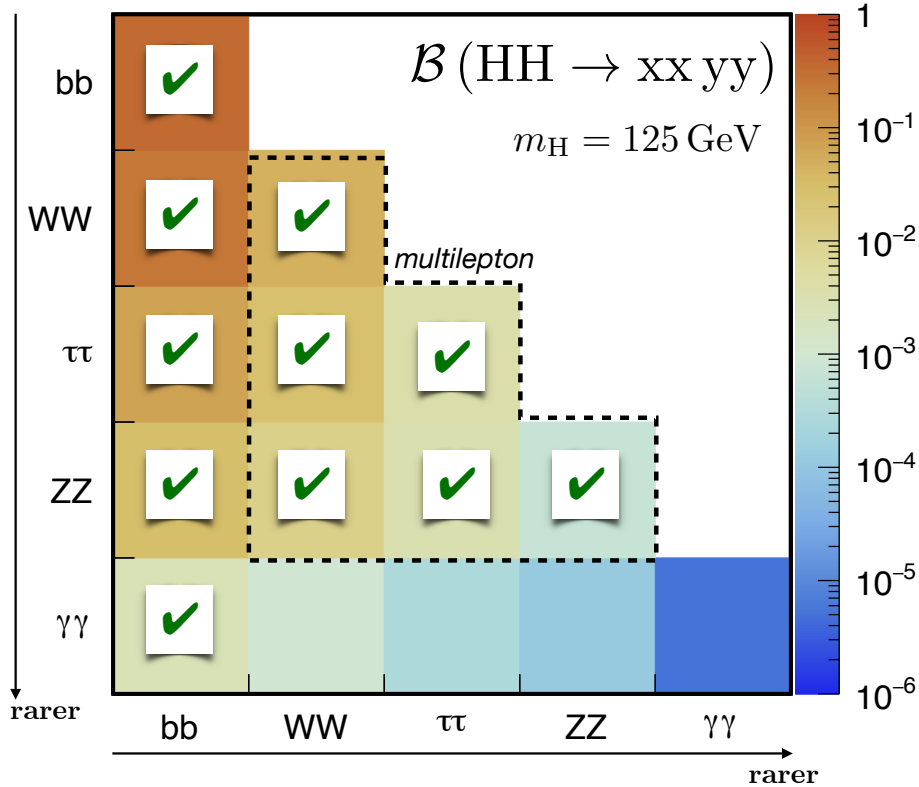
λ_{HHH} lié à la nature + ou - forte de la transition de phase !



La production de paires HH

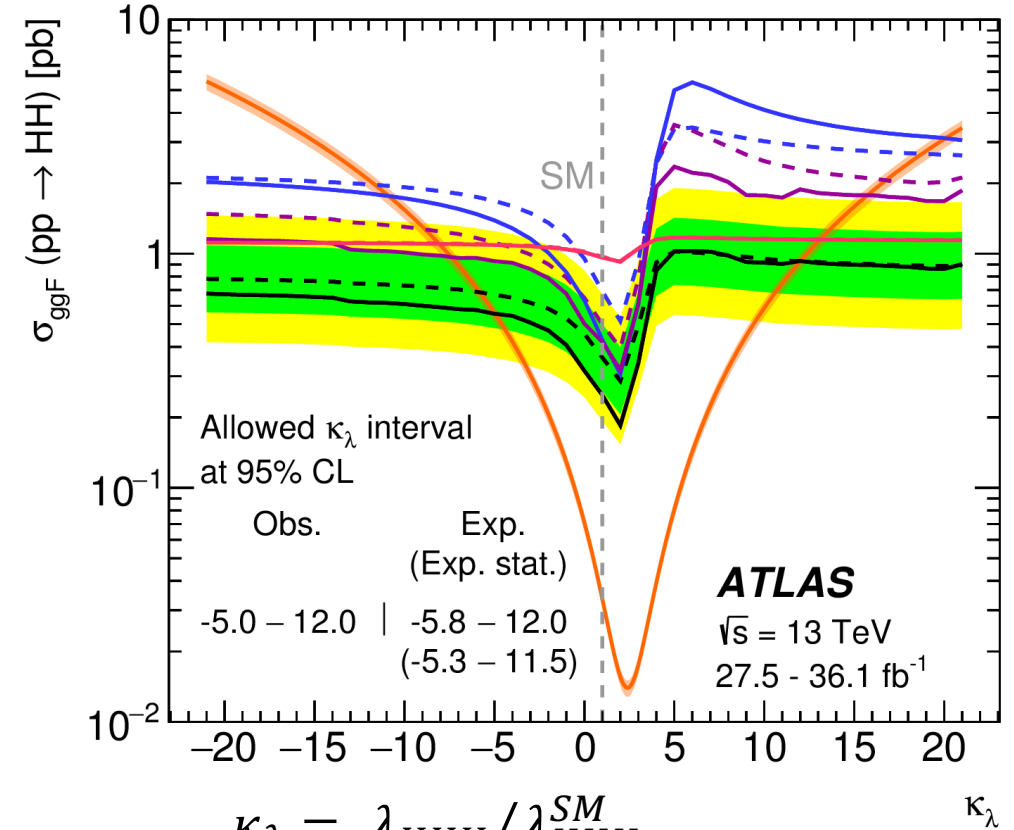
Production de paire HH

✓ = résultats du Run 2 disponibles



Rare ! : moins de 5000 événements collectés par expérience au Run 2

Combinaison $b\bar{b}b\bar{b}$, $b\bar{b}\tau^+\tau^-$, $b\bar{b}\gamma\gamma$

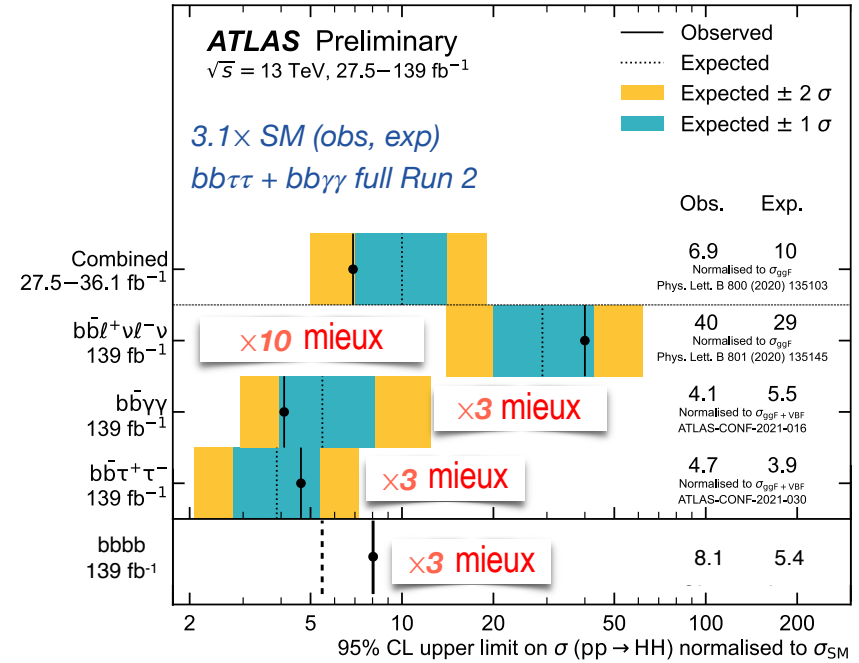
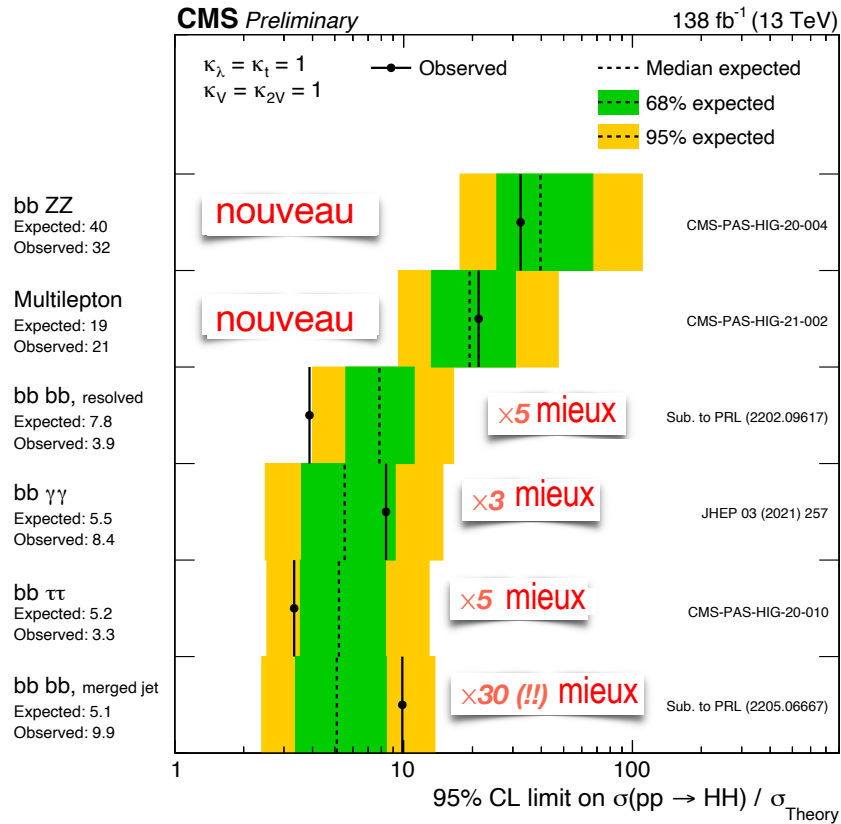


$$\kappa_\lambda = \lambda_{HHH} / \lambda_{HHH}^{SM}$$

$$-5 < \kappa_\lambda < 12 \quad 95\% \text{ C.L.}$$

Production de paire HH

HH Workshop – Dubrovnik 30 mai – 3 juin 2022
 Améliorations par rapport au workshop de 2018 au FNAL (données de 2016)



Prochaine étape (Run 3) :
 Evidence pour la production HH

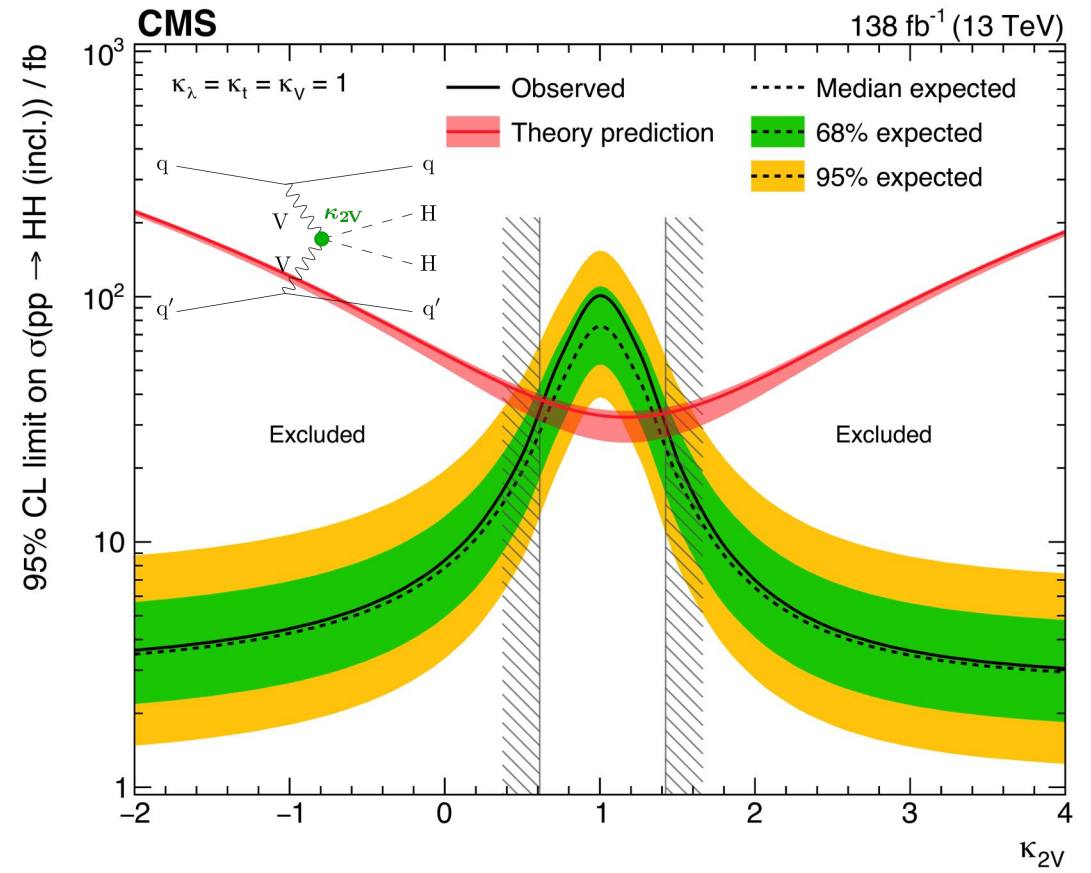
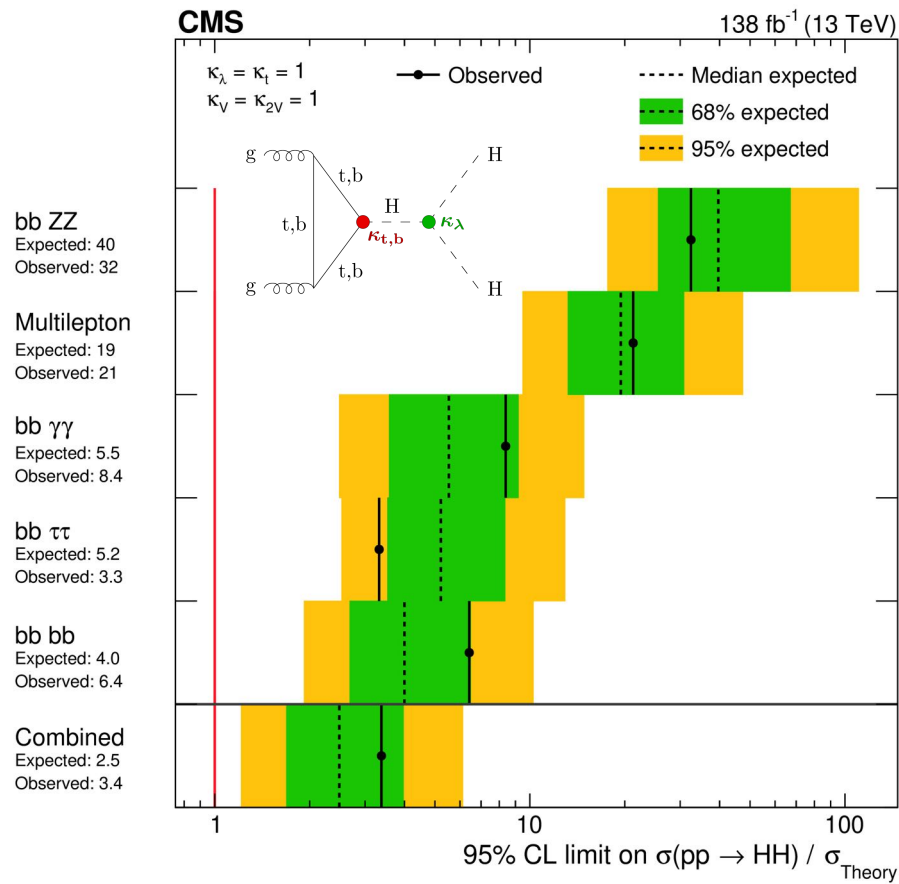
Objectif à terme (HL-LHC):
 Mesure de λ_{HHH}

On atteint $\sim \sigma_{HH} < 2 \times \text{SM}$ (ATLAS+CMS) !

Conclusion

- L'aventure du LHC ne fait que commencer ! ×2 au Run 3, ×10 à HL-LHC
- Déjà une moisson remarquable de découvertes et d'avancées :
 - Découverte du boson H - Mécanisme BEH
 - Exclusion définitive d'un 4^e famille de fermions standards
 - Couplage des particules de matière au champ de Higgs dans le vide
⇔ Origine de la masse (matière et interaction) !
 - Limite contraignantes aux modes de désintégration invisible
⇔ Meilleures contraintes sur la matière noire (WIMPs) pour $m_\chi < m_H/2$
 - Améliorations considérable de la sensibilité à l'auto-couplage
⇔ Accès à terme à la structure du vide avec possiblement des conséquences majeures (asymétrie matière-antimatière ? ondes gravitationnelles ?)
- Et l'ouverture de nouveaux portails vers le côté sombre de l'Univers

A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery



Article

A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery

