



A-T-ON VRAIMENT DÉCOUVERT LE BOSON DE HIGGS AU LHC (CERN) ?

B. Laforge

LPNHE



POURQUOI RECHERCHER LE BOSON DE HIGGS ?

Le problème de la masse en physique des particules

Comme Mendeleïev en son temps, nous classons les particules selon leurs propriétés :

THE STANDARD MODEL					
	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	



Masse

Des similitudes existent entre les propriétés des 3 familles de particules connues dont la seule différence est la **masse**

Certains vecteurs d'interaction sont de masse nulle, d'autres non. Pourquoi ?

Bosons massifs \leftrightarrow courte portée de l'interaction faible.

Quelle explication sous-jacente ?
Qu'est-ce que la masse des particules ?

Y a-t-il d'autres familles plus lourdes ?

POURQUOI RECHERCHER LE BOSON DE HIGGS ?

Le problème de la masse en théorie des champs

Le Modèle Standard de la physique des particules décrit les interactions grâce :

- ✓ A une théorie quantique relativiste des champs : les particules sont les excitations de ces champs
- ✓ A l'introduction d'invariances du Lagrangien du MS sous des symétries de jauge

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ est le groupe de symétries utilisé pour décrire :

- l'interaction électromagnétique avec un groupe de symétrie $U(1)$: g' , B^μ
- l'interaction faible avec un groupe $SU(2)_L$: g , A_1^μ , A_2^μ , A_3^μ
- l'interaction forte avec un groupe $SU(3)_C$ (g_s , 8 champs vectoriels)

Le problème majeur est que le terme de masse pour un boson de jauge comme pour un fermion brise l'invariance sous les transformations de jauge, il faut donc renoncer :

à construire une théorie des interactions basée sur des symétries de jauge

OU

à l'existence d'une masse propre pour les particules

Le modèle de Higgs résout la question par un mécanisme dynamique d'interaction entre un nouveau champs (dit de Higgs) et les champs décrivant les autres particules de masses nulles

LE MODÈLE EN 1 TRANSPARENT !

La brisure de symétrie électrofaible

Pour donner effectivement une masse aux particules, on utilise un mécanisme de brisure spontanée de symétrie qui conduit à un groupe de symétrie résiduelle de la théorie :

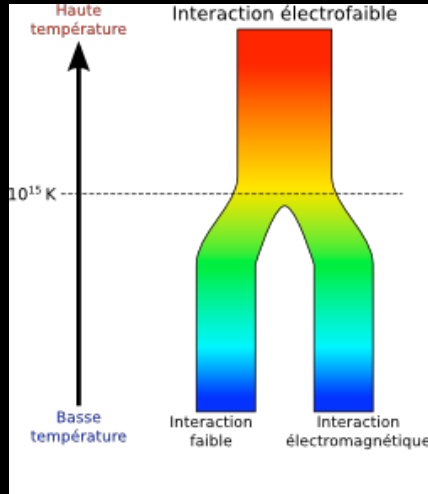
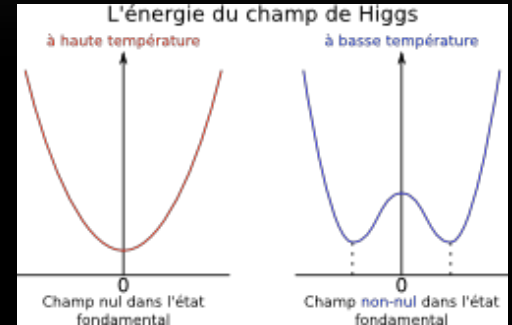
$$\mathcal{L} = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$$D_\mu = \partial_\mu + \frac{1}{2} ig A_\mu^a \tau_a + \frac{1}{2} ig' B_\mu$$



$$SU(3)_C \times U(1)_Q \quad (m_\gamma = 0 !)$$



$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (A_\mu^1 \pm iA_\mu^2)$$

$$Z_\mu = \frac{1}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (g' B_\mu - g A_\mu^3)$$

$$A_\mu = \frac{1}{\sqrt{g^2 + g'^2}} (g B_\mu + g' A_\mu^3)$$

$$m_A = 0$$

$$m_W = \frac{1}{2} g \nu$$

$$m_Z = \frac{1}{2} \sqrt{g^2 + g'^2} \nu$$

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ \nu \end{pmatrix}$$

Le modèle de Higgs résout la question par un mécanisme dynamique d'interaction entre un nouveau champs (dit de Higgs) et les champs décrivant les autres particules de masses nulles

LE MODÈLE EN 1 TRANSPARENT !

La brisure de symétrie électrofaible

Pour donner effectivement une masse aux particules, on utilise un mécanisme de brisure spontanée de symétrie qui conduit à un groupe de symétrie résiduelle de la théorie :

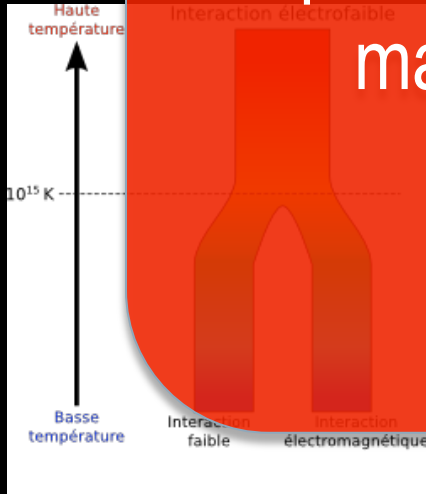
$$\mathcal{L} = (D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi) - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad \text{SU}(3)_C \times \text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y$$

$$D_\mu = \partial_\mu + \frac{1}{2} ig A_\mu^a \tau_a + \frac{1}{2} ig' B_\mu$$



Cependant ce modèle ne prédit pas la masse du boson de HIGGS !

$$m_H^2 = 2\lambda v^2$$



$$m_A = 0$$

$$m_W = \frac{1}{2} g v$$

$$m_Z = \frac{1}{2} \sqrt{g^2 + g'^2} v$$

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

Le modèle de Higgs résout la question par un mécanisme dynamique d'interaction entre un nouveau champ (dit de Higgs) et les champs décrivant les autres particules de masses nulles

Le Modèle Standard de la physique des particules

Further reading : The Higgs boson in the standard model. hep-ph/0503172, A. Djouadi

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Yukawa} + \mathcal{L}_{Higgs}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{gauge} = & -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^i W_{\mu\nu}^i - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} \\ & + i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{Q}_\alpha \gamma^\mu D_\mu Q_\alpha + i\bar{E}_\alpha \gamma^\mu D_\mu E_\alpha \\ & + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha \gamma^\mu D_\mu D_\alpha - (D_\mu H)^\dagger (D_\mu H) \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha D_\beta H + y_{\alpha\beta}^U \bar{Q}_\alpha U_\beta \tilde{H} + h.c.$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a + g_s f^{abc} G_\mu^b G_\nu^c,$$

$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i + g \epsilon^{ijk} W_\mu^j W_\nu^k,$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu,$$

$$D_\mu L_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{g}{2}\tau^i W_\mu^i + i\frac{g'}{2}B_\mu)L_\alpha,$$

$$D_\mu E_\alpha = (\partial_\mu + ig'B_\mu)E_\alpha,$$

$$D_\mu Q_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{g}{2}\tau^i W_\mu^i - i\frac{g'}{6}B_\mu - i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a)Q_\alpha,$$

$$D_\mu U_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{2}{3}g'B_\mu - i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a)U_\alpha,$$

$$D_\mu D_\alpha = (\partial_\mu + i\frac{1}{3}g'B_\mu - i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a)D_\alpha.$$

$$\tilde{H} = i\tau_2 H^\dagger$$

$$SU_{colour}(3) \otimes SU_{left}(2) \otimes U_{hypercharge}(1)$$

Gauge sector: spin 1

<i>gluons</i>	G_μ^a	$SU_c(3)$	g_s	$(a = 1, 8)$
<i>intermediate weak bosons</i>	W_μ^i	$SU_L(2)$	g	$(i = 1, 3)$
<i>abelian boson</i>	B_μ	$U_Y(1)$	g'	

Fermion sector: spin 1/2

$$L_{\alpha L} = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$$

$$E_{\alpha R} = \begin{pmatrix} e_R \\ \mu_R \\ \tau_R \end{pmatrix}$$

$$Q_{\alpha L}^i = \begin{pmatrix} U_\alpha^i \\ D_\alpha^i \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} u^i \\ d^i \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} c^i \\ s^i \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} t^i \\ b^i \end{pmatrix}_L$$

$$\begin{aligned} U_{\alpha R}^i &= u_{iR}, & c_{iR}, & t_{iR}, \\ D_{\alpha R}^i &= d_{iR}, & s_{iR}, & b_{iR}, \end{aligned}$$

$$i = 1, 2, 3$$

Higgs sector: spin 0

$$H = \begin{pmatrix} H^0 \\ H^- \end{pmatrix}$$

Le Modèle Standard de la physique des particules

Further reading : The Higgs boson in the standard model. hep-ph/0503172, A. Djouadi

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_Y$$

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^i W_{\mu\nu}^i - \frac{1}{2}B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} + i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{C}_\alpha \gamma^\mu D_\mu C_\alpha + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha \gamma^\mu D_\mu D_\alpha$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha C_\beta H + y_{\alpha\beta}^U \bar{U}_\alpha C_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{D}_\alpha C_\beta H + h.c.$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g_s f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g W_{\mu\nu}^j A_k^i$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

$$D_\mu L_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{g}{2}\tau^i W_\mu^i + i\frac{g'}{2}B_\mu) L_\alpha$$

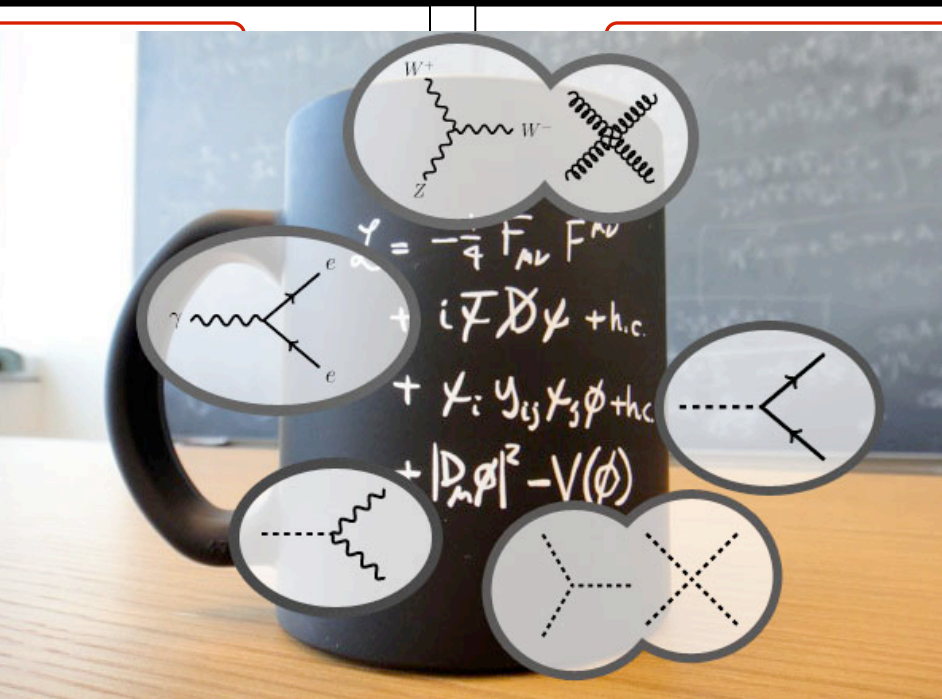
$$D_\mu E_\alpha = (\partial_\mu + i\frac{g'}{2}B_\mu) E_\alpha$$

$$D_\mu Q_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{g}{2}\tau^i W_\mu^i - i\frac{g'}{2}B_\mu - i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a) Q_\alpha$$

$$D_\mu U_\alpha = (\partial_\mu - i\frac{g}{2}\tau^i W_\mu^i - i\frac{g'}{2}B_\mu + i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a) U_\alpha$$

$$D_\mu D_\alpha = (\partial_\mu + i\frac{g'}{2}B_\mu - i\frac{g_s}{2}\lambda^a G_\mu^a) D_\alpha$$

$$\tilde{H} = i\tau_2 H^\dagger$$



$$2) \otimes U_{hypercharge}(1)$$

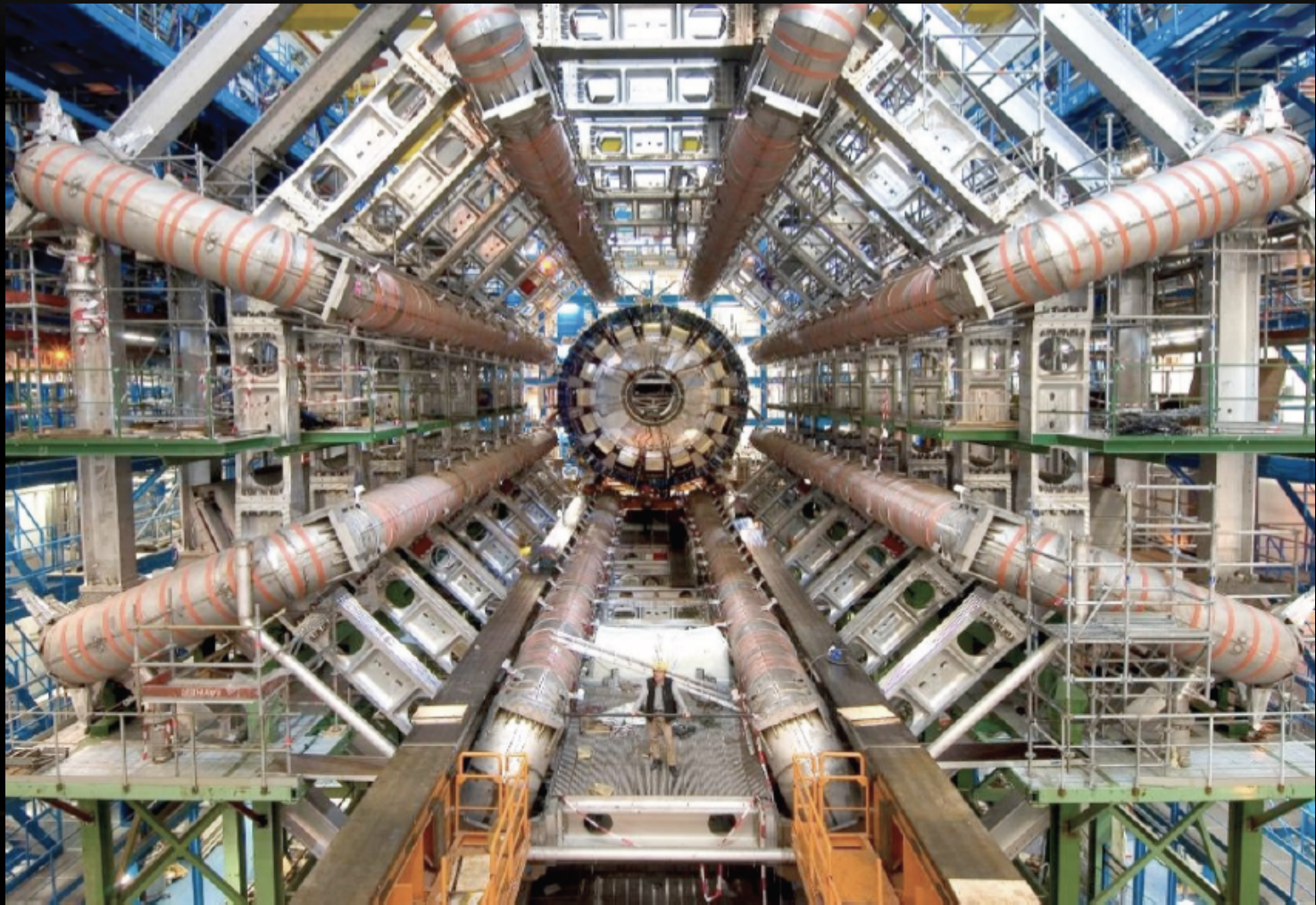
$SU_c(3)$	g_s	$(a = 1, 8)$
$SU_L(2)$	g	$(i = 1, 3)$
$U_Y(1)$	g'	

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_R$$

Découvrir le boson de Higgs du Modèle Standard, c'est montrer que toute nouvelle résonance candidate a bien l'ensemble des propriétés d'interaction contenu dans les termes du Lagrangien

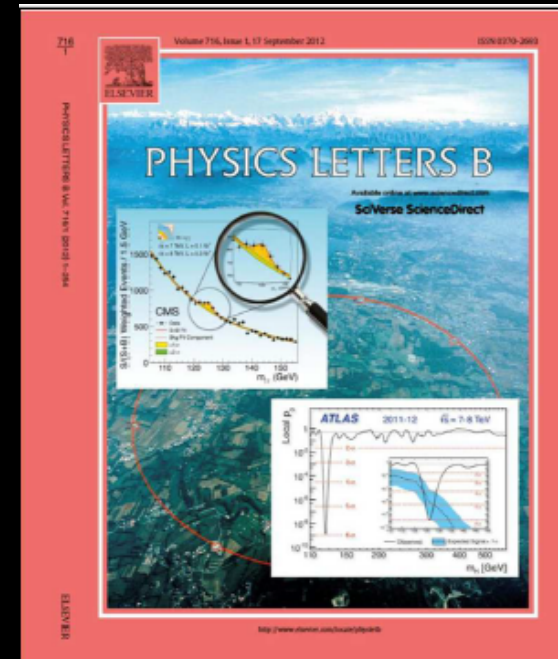
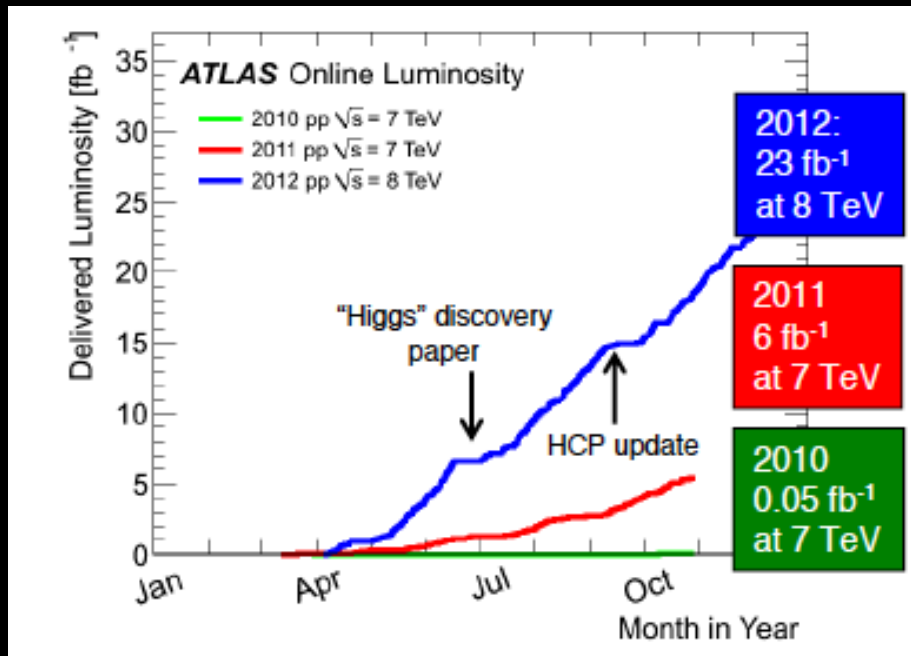
$$H = \begin{pmatrix} H^0 \\ H^- \end{pmatrix}$$

LA TRAQUE DU BOSON DE HIGGS DANS ATLAS (ET CMS...)



EXCELLENTE OPERATIONS DU LHC ET DE ATLAS (CMS) DEPUIS 2010

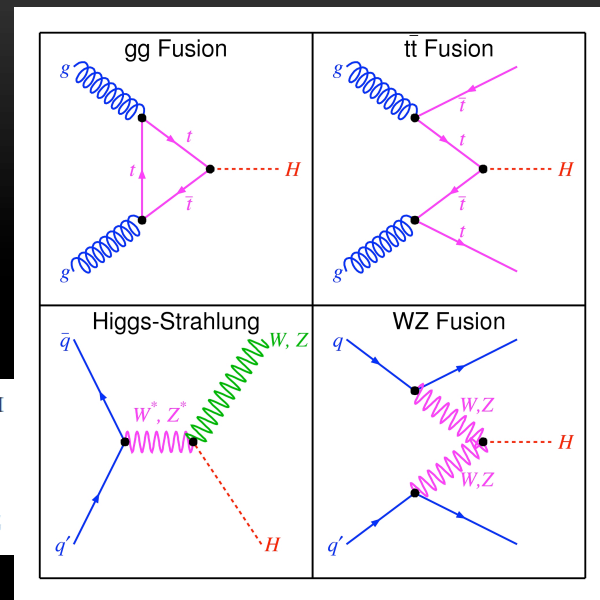
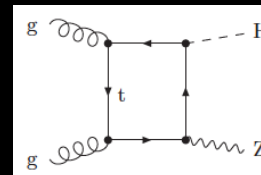
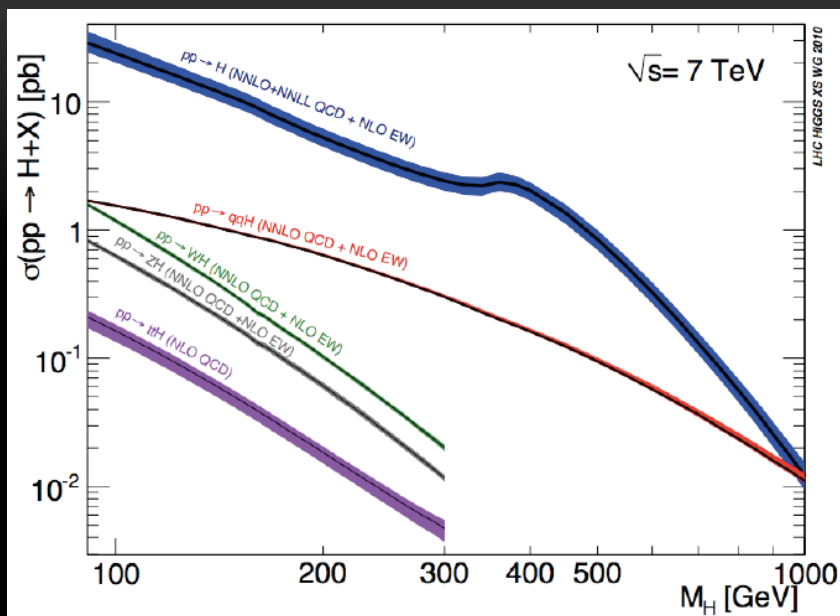
Annonce de l'observation d'un nouveau boson scalaire
le 4 juillet 2012 basée sur $L = 4.9 \text{ fb}^{-1}$ (2011) avec $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ et
sur $L = 5.8 \text{ fb}^{-1}$ (2012) avec $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$



- \sqrt{s} montée à 8 TeV
- Luminosité pic x 2
- $L = 21.7 \text{ fb}^{-1}$ en 2012

Que nous disent ces nouvelles données ?

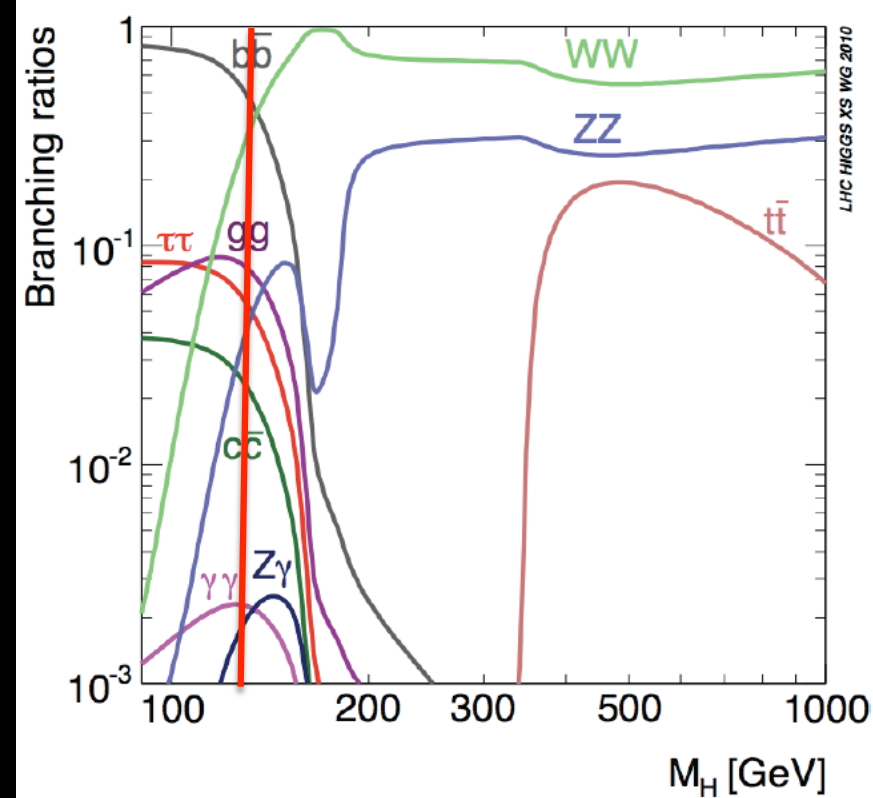
LE HIGGS AU LHC : MECANISMES DE PRODUCTION



- **Fusion de gluons** (~90% de la section efficace)
 - ~500 000 Higgs expected with $M_H = 125$ GeV in 2011-2012 !
 - Environ 25% en plus en 2012
- **Fusion de Bosons Vecteurs (Z,W)**
 - ✧ apporte des signatures exclusives (jet vers l'avant, gap de rapidité)
- **Production associée avec un W/Z ou une paire de top :**
 - ✧ Désintégration leptonique des W/Z apporte des signatures exclusives
 - ✧ Avec une paire de top : faible distinction avec le fond

LE BOSON DE HIGGS AU LHC : MODES DE DESINTEGRATION

- **Canal bb** : canal dominant mais...
 - ✧ fond QCD (jets)
 - ✧ Etat final exclusif nécessaire pour avoir une chance de le distinguer du fond (production associée WH, ZH et bb boosté)
- **$\tau\tau$ channel**:
 - ✧ 2 neutrinos \Rightarrow reconstruction de la masse difficile
 - ✧ Utilisable en VBF et VH sauf pour 2 désintégration semi-leptonic des taus (4 neutrinos !)
- **$\gamma\gamma$ channel**:
 - ✧ **Reconstruction précise de la masse**
 - ✧ Petit BR mais S/B de quelque %
- **WW* channels : (lepton = μ or e)**
 - ✧ Canal dilepton ($l\nu l\nu$) est dominant aux basses masses (mais très mauvaise résolution)
 - ✧ Canal semi-leptonique ($l\nu qq$) a un meilleur BR mais n'est utile qu'à haute masse quand le fond de jet diminue
- **ZZ* channels :**
 - ✧ Canal en or 4 leptons (e, μ) : petit BR mais grand s/b, reconstruction précise de la masse
 - ✧ semii-leptonic ($llqq$): beaucoup de fond
 - ✧ $ll\nu\nu$: meilleur compromis yield/pureté (canal dominant à haute masse)



Branching ratios at 125 GeV:

bb:	57.7%	ZZ:	2.6%
WW:	21.5%	$\gamma\gamma$:	0.23%
$\tau\tau$:	6.3%		

- gg, cc : complètement dominé par QCD
- $Z\gamma$: intéressant mais...
- ✧ Très grande statistique nécessaire pour utiliser la désintégration leptonique du Z
- ✧ Désintégration hadronique du Z dominé par fond QCD

Panorama des recherches du boson de Higgs standard dans ATLAS

Higgs Boson Decay	Subsequent Decay	Sub-Channels	$\int L dt$ [fb ⁻¹]
2011 $\sqrt{s}=7$ TeV			
$H \rightarrow ZZ^{(*)}$	4ℓ	$\{4e, 2e2\mu, 2\mu2e, 4\mu\}$	4.6
$H \rightarrow \gamma\gamma$	–	10 categories $\{p_{Tt} \otimes \eta_\gamma \otimes \text{conversion}\} \oplus \{2\text{-jet VBF}\}$	4.8
$H \rightarrow \tau\tau$	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{lep}}$	$\{e\mu\} \otimes \{0\text{-jet}\} \oplus \{\ell\ell\} \otimes \{1\text{-jet, 2-jet, } p_{T,\tau\tau} > 100 \text{ GeV, } VH\}$	4.6
	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$	$\{e, \mu\} \otimes \{0\text{-jet, 1-jet, } p_{T,\tau\tau} > 100 \text{ GeV, 2-jet}\}$	4.6
	$\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}$	$\{1\text{-jet, 2-jet}\}$	4.6
$VH \rightarrow Vbb$	$Z \rightarrow \nu\nu$	$E_T^{\text{miss}} \in \{120 - 160, 160 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	4.6
	$W \rightarrow \ell\nu$	$p_T^W \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	4.7
	$Z \rightarrow \ell\ell$	$p_T^Z \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	4.7
2012 $\sqrt{s}=8$ TeV			
$H \rightarrow ZZ^{(*)}$	4ℓ	$\{4e, 2e2\mu, 2\mu2e, 4\mu\}$	20.7
$H \rightarrow \gamma\gamma$	–	14 categories $\{p_{Tt} \otimes \eta_\gamma \otimes \text{conversion}\} \oplus \{2\text{-jet VBF}\} \oplus \{\ell\text{-tag, } E_T^{\text{miss}}\text{-tag, 2-jet VH}\}$	20.7
$H \rightarrow WW^{(*)}$	$e\nu\mu\nu$	$\{e\mu, \mu e\} \otimes \{0\text{-jet, 1-jet}\}$	13
$H \rightarrow \tau\tau$	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{lep}}$	$\{\ell\ell\} \otimes \{1\text{-jet, 2-jet, } p_{T,\tau\tau} > 100 \text{ GeV, } VH\}$	13
	$\tau_{\text{lep}}\tau_{\text{had}}$	$\{e, \mu\} \otimes \{0\text{-jet, 1-jet, } p_{T,\tau\tau} > 100 \text{ GeV, 2-jet}\}$	13
	$\tau_{\text{had}}\tau_{\text{had}}$	$\{1\text{-jet, 2-jet}\}$	13
$VH \rightarrow Vbb$	$Z \rightarrow \nu\nu$	$E_T^{\text{miss}} \in \{120 - 160, 160 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\} \otimes \{2\text{-jet, 3-jet}\}$	13
	$W \rightarrow \ell\nu$	$p_T^W \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	13
	$Z \rightarrow \ell\ell$	$p_T^Z \in \{< 50, 50 - 100, 100 - 150, 150 - 200, \geq 200 \text{ GeV}\}$	13

Statistical Interpretation

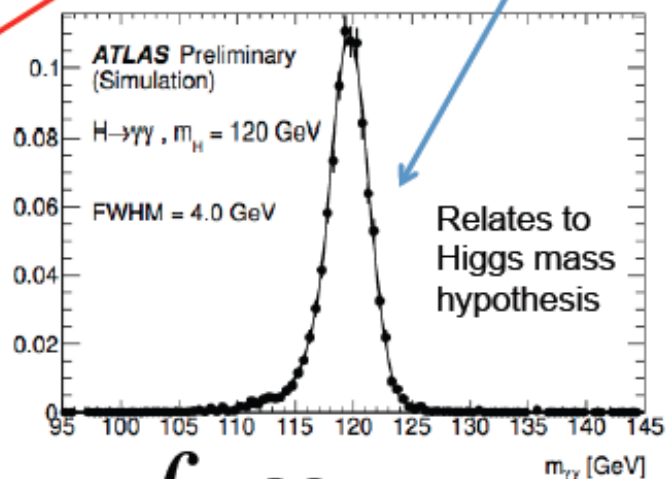
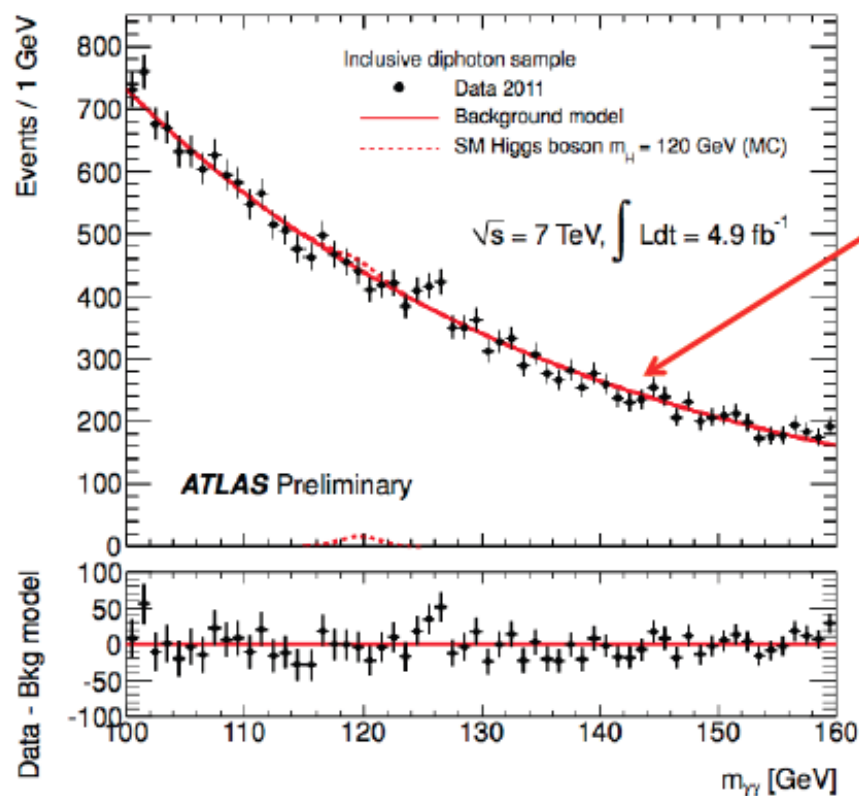
How to read Higgs Search Plots

Hypothesis testing using the Profile likelihood ratio...

Likelihood Definition:

Simplified

$$L(\mu, \theta) = f_b \psi_b(M_{\gamma\gamma}) + f_s \psi_s(M_{\gamma\gamma})$$



$$f_s \propto \mu$$

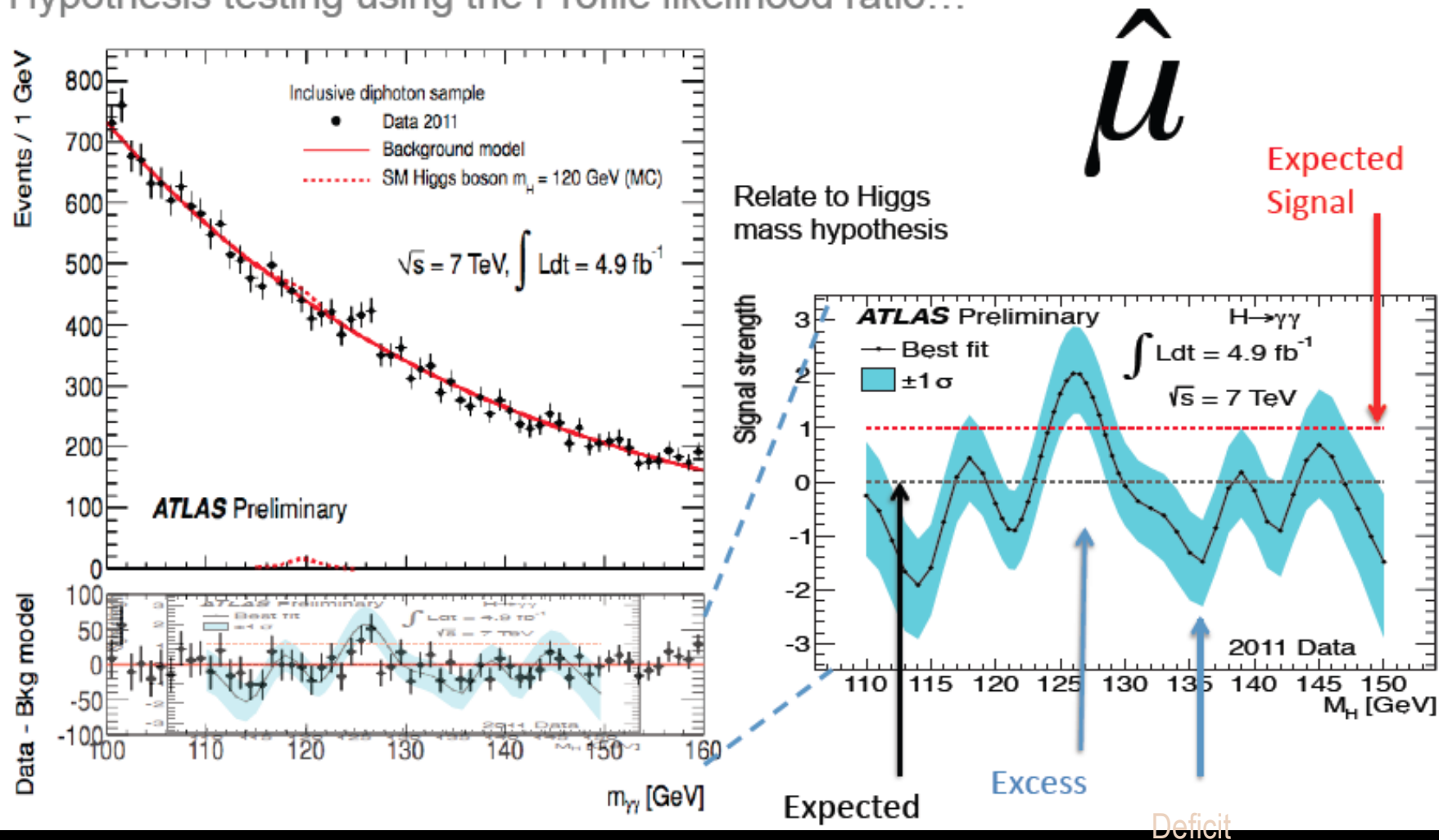
Global coherent factor

$$n_s = \mu \sigma Br L \epsilon$$

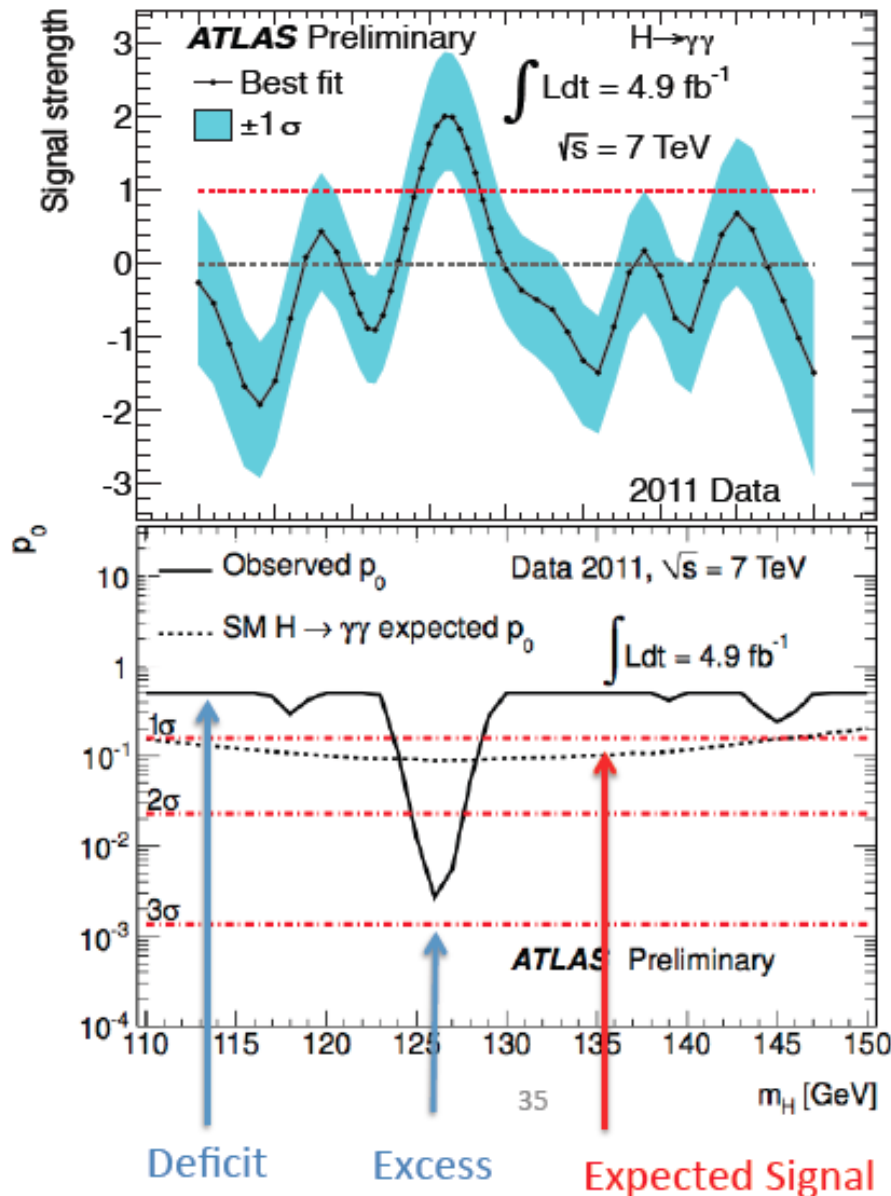
Statistical Interpretation

How to read Higgs Search Plots

Hypothesis testing using the Profile likelihood ratio...

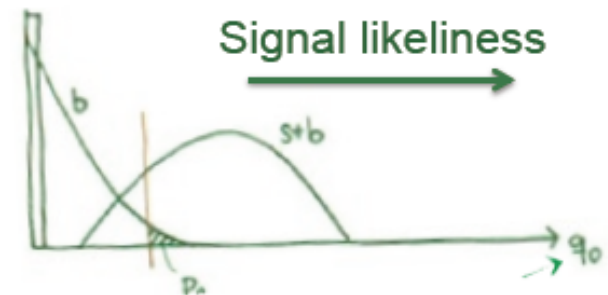


How to Read Higgs Observation Estimates



$$\lambda_0 = \lambda(0, \theta) = \frac{L(0, \hat{\theta}(0))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

$$q_0 = -2 \ln \lambda_0$$



p_0 Probability that a background only experiment be more signal like than observed

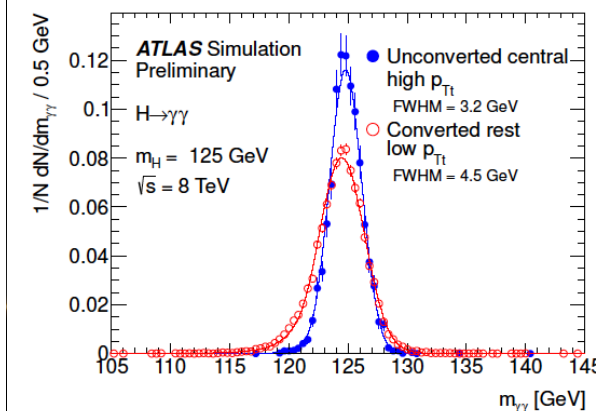
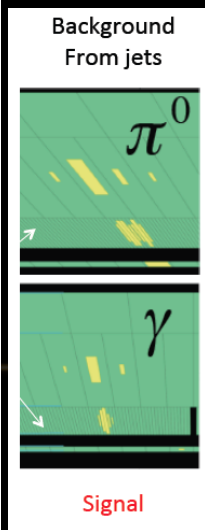
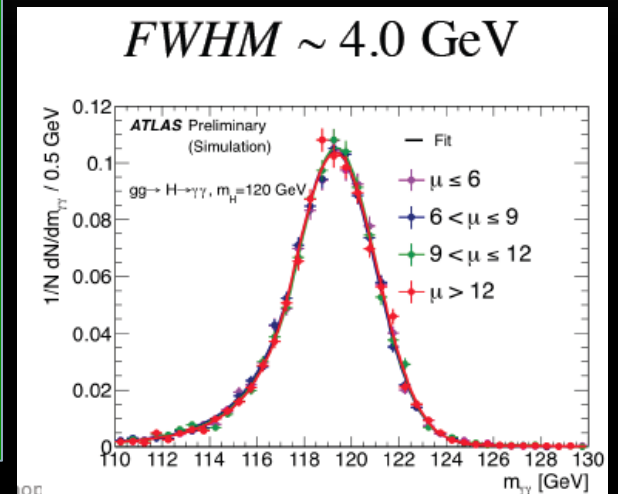
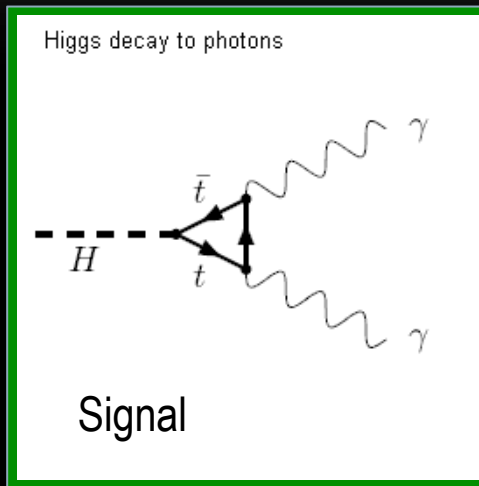
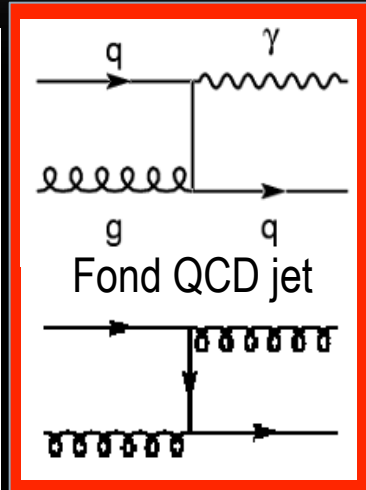
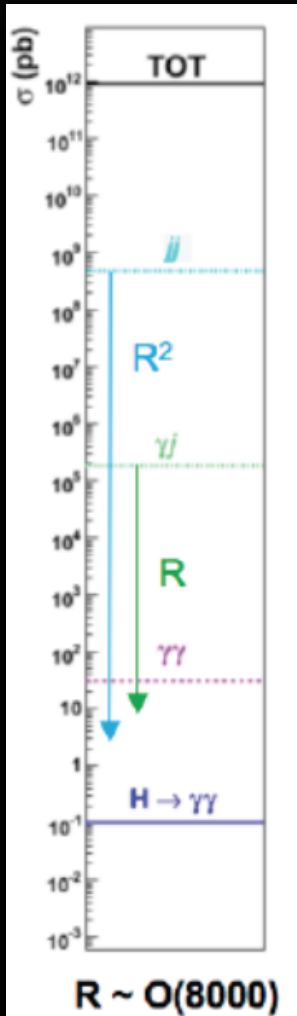
Not a measurement of mass

Not a measurement of cross section

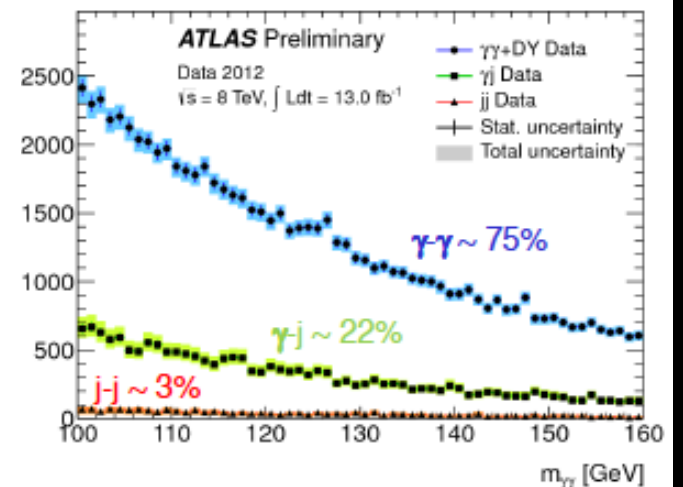
MISE EN EVIDENCE DU NOUVEAU BOSON DANS
DES CANAUX INDIVIDUELS ET ETUDES DE SES
PROPRIETES

HIGGS EN 2 PHOTONS

- Sélection : 2 photons isolés $P_{T1} > 40$ GeV et $P_{T2} > 30$ GeV, $0 < |\eta| < 1.37$ - $1.52 < |\eta| < 2.47$
- 10 (2011) / 14 (2012) catégories (résolution, S/B de 1.5% à O(15%), leptons, 2 jets, Et-miss)

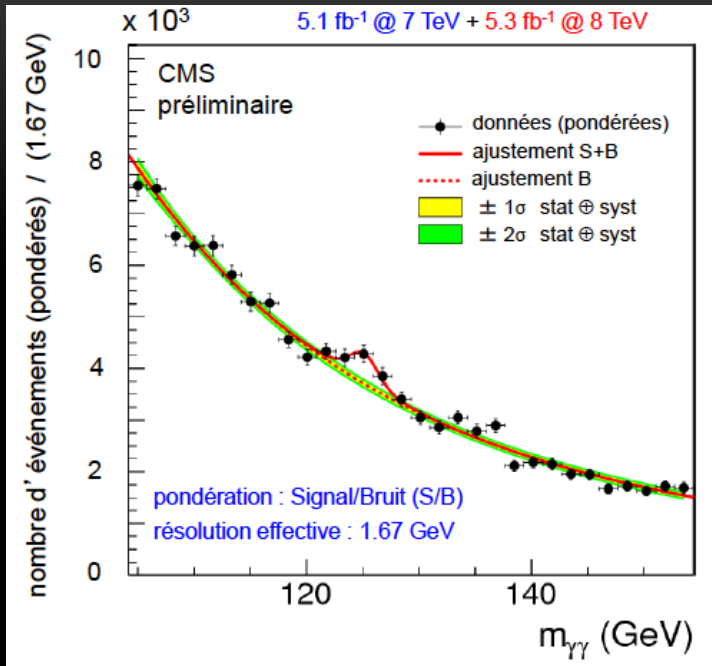


Data-driven background decomposition

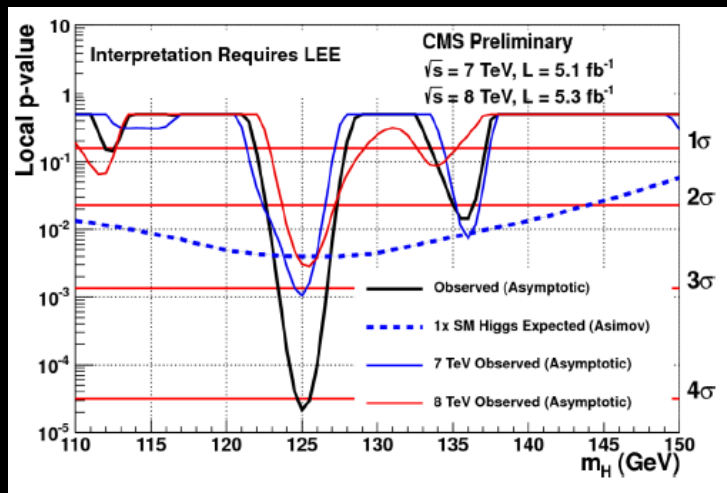
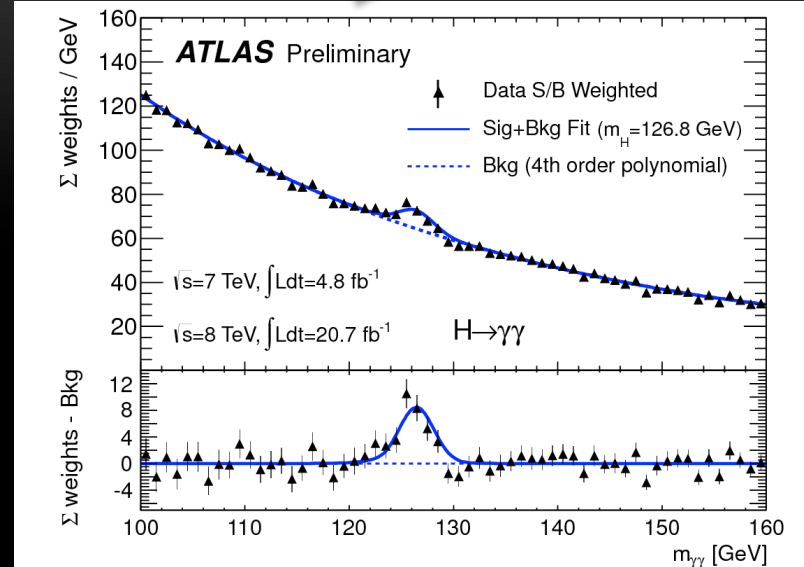


HIGGS EN 2 PHOTONS

NEW
Moriond
2013

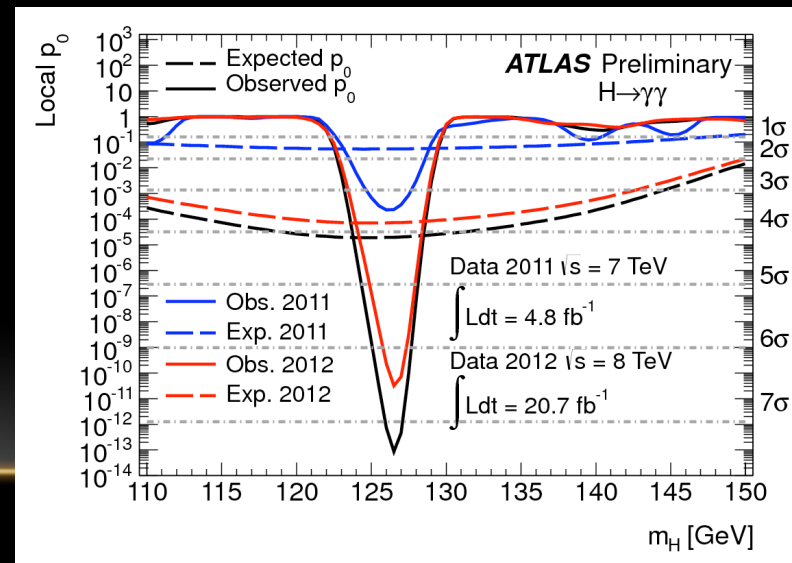


Probabilité
que le fond
fluctue
autant ou
plus que
ce que l'on
observe
est $3 \cdot 10^{-7}$
pour 5σ



CMS
4.1 σ
@125 GeV

ATLAS
7.2 σ
@126.8 GeV

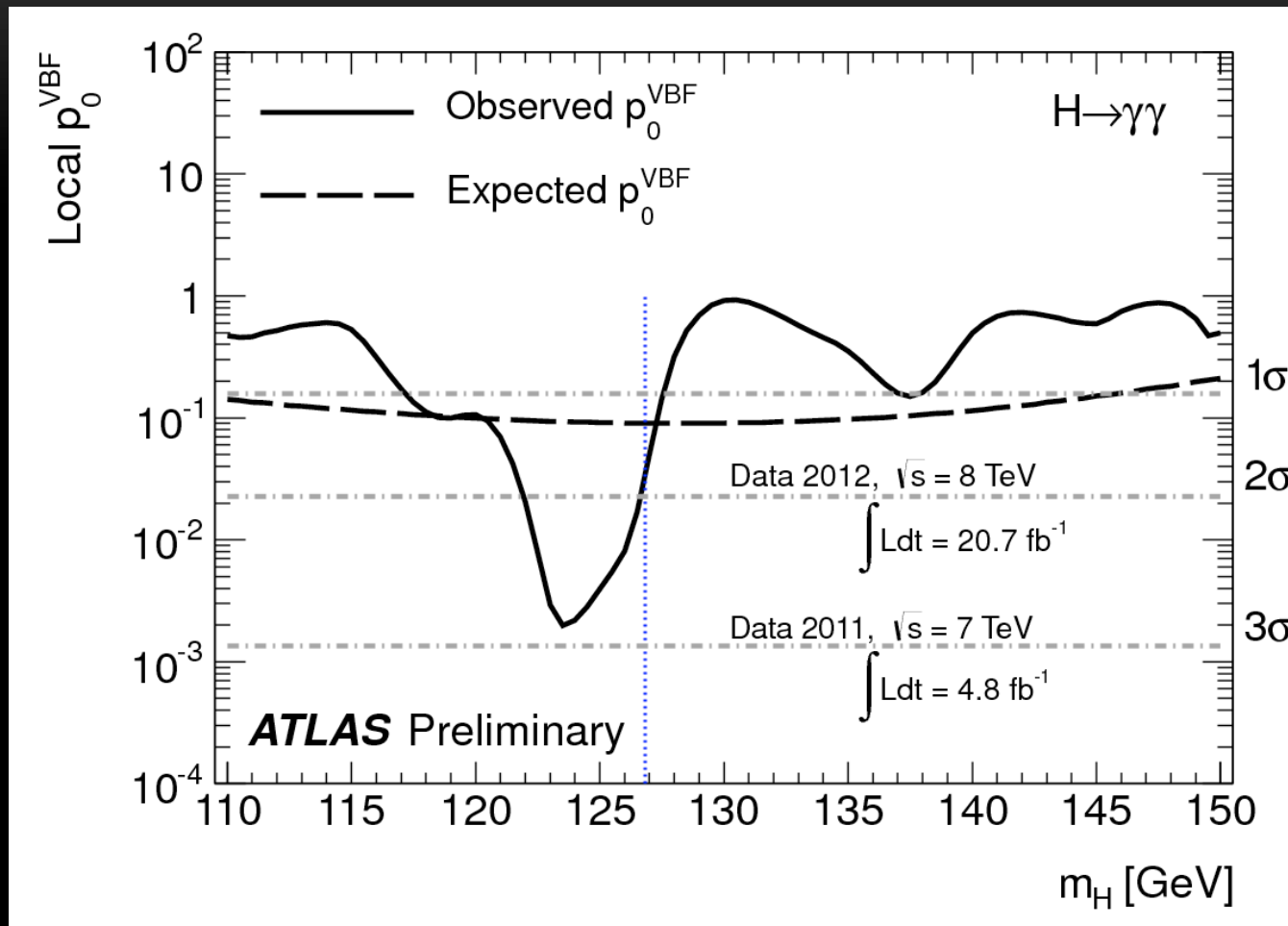


CMS n'a pas mis à jour cette mesure depuis juillet 2012

ATLAS-CONF-2013-012

COMPATIBILITÉ AVEC LE HIGGS STANDARD

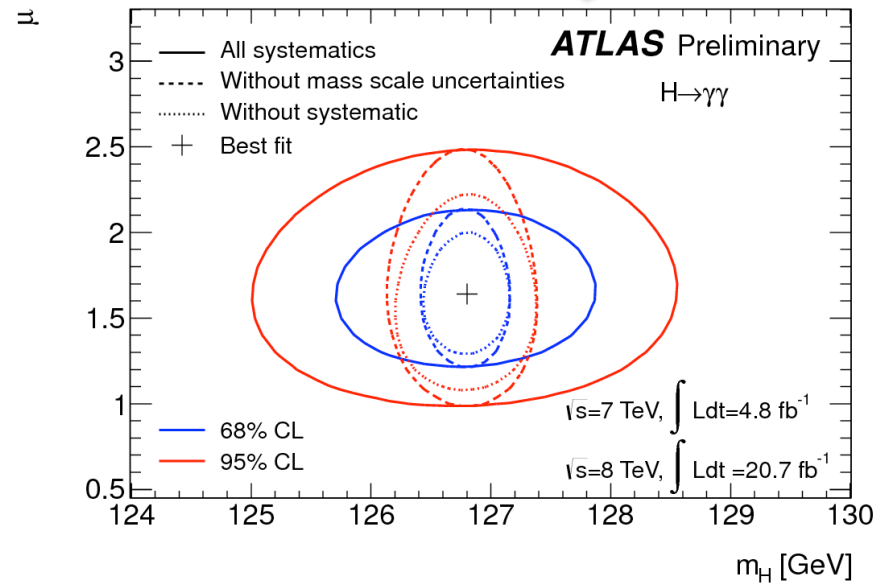
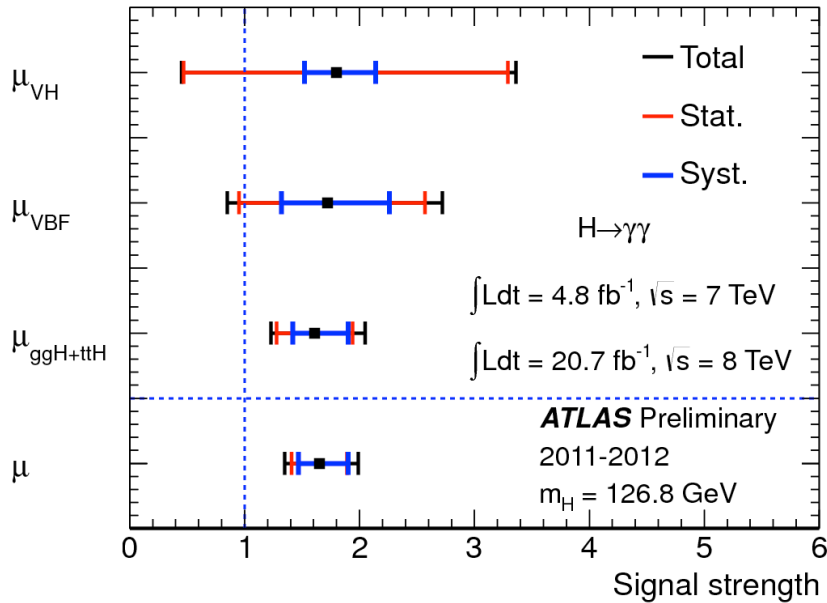
NEW



Mise en évidence de la production par VBF à presque 3σ .

COMPATIBILITÉ AVEC LE HIGGS STANDARD

NEW
Moriond
2013



$$\mu = 1.65^{+0.34}_{-0.30} = 1.65 \pm 0.24 \text{ (stat)}^{+0.25}_{-0.18} \text{ (syst)} \quad (2.4 \sigma)$$

\sqrt{s}	m_H	$\mathcal{B}(H \rightarrow \gamma\gamma)$	$\sigma(pp \rightarrow H)$	$\sigma(gg \rightarrow H)$	σ_{VBF}
7 TeV	125 GeV	2.3×10^{-3}	17.5 pb	15.3 pb	1.2 pb
8 TeV	125 GeV	2.3×10^{-3}	22.3 pb	19.5 pb	1.6 pb

Production encore compatible avec le MS mais petite tension 2.4σ ... A suivre.

HIGGS EN ZZ (4 LEPTONS)

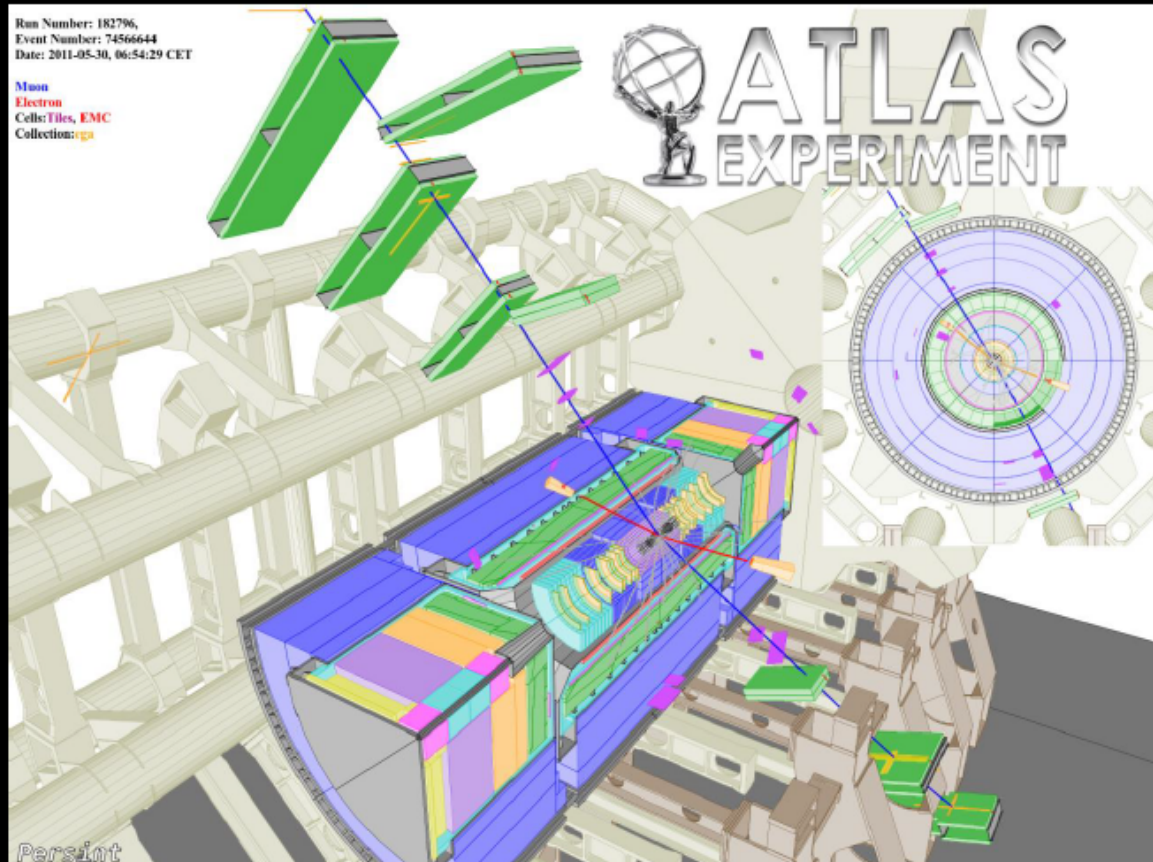
Le boson Z peut se désintégrer (dans 6.7% des cas) en paire de d'électrons ou de muons

Z DECAY MODES

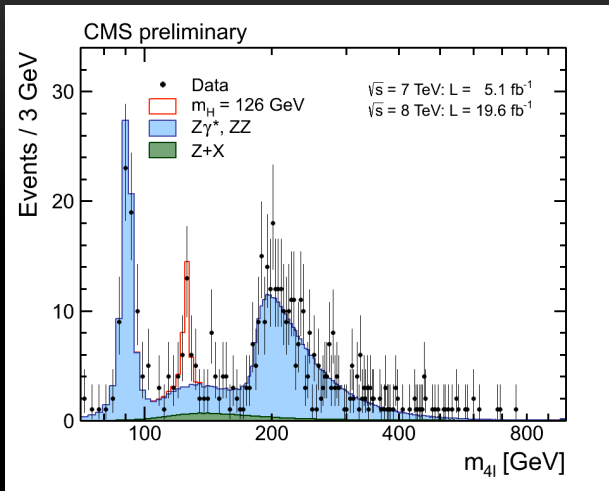
Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1 $e^+ e^-$	(3.363 \pm 0.004) %	
Γ_2 $\mu^+ \mu^-$	(3.366 \pm 0.007) %	

<http://pdg.lbl.gov>

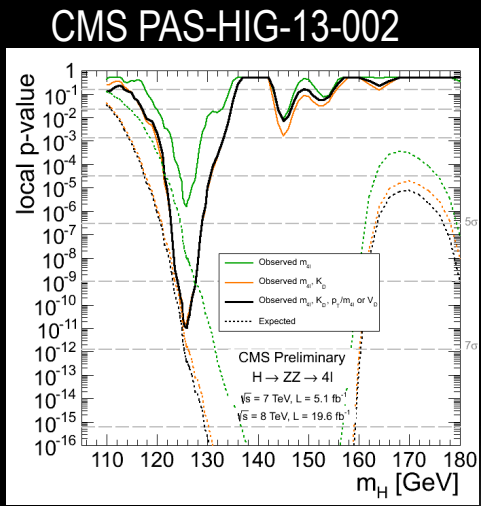
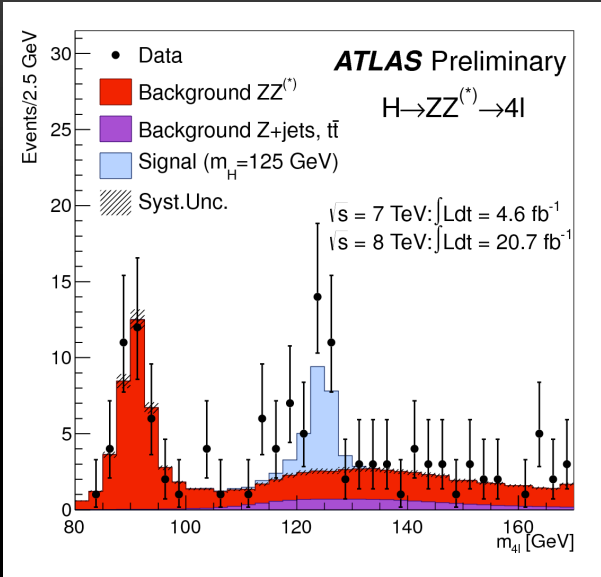
Candidat
 $H \rightarrow 2e2\mu$



HIGGS EN ZZ (4 LEPTONS) (L = e, μ)

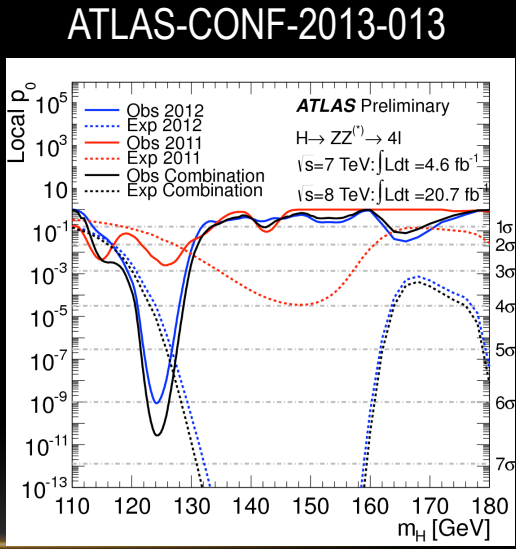


**NEW
Moriond
2013**



**CMS
6.7 σ
@125.8 GeV**

**ATLAS
6.6 σ
@126.5 GeV**

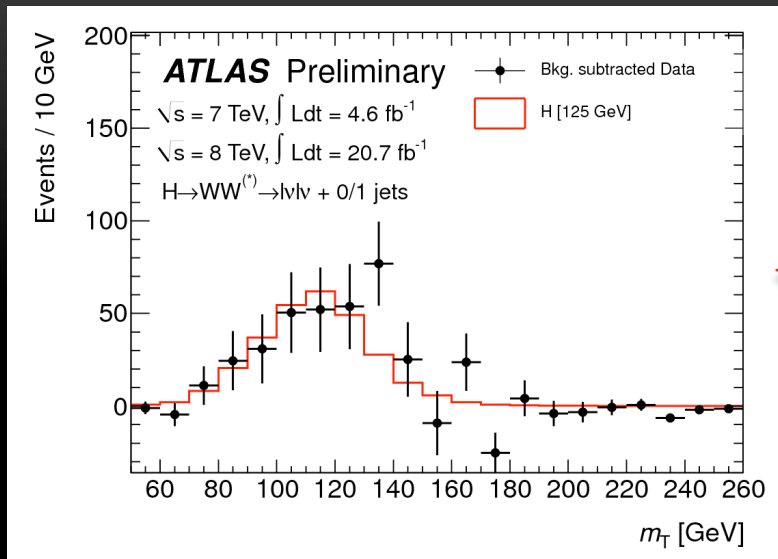


$M_H = 125.8 \pm 0.5(\text{stat.}) \pm 0.2(\text{syst.}) \text{ GeV}$
 $\mu = 0.91^{+0.30}_{-0.24}$

$124.3^{+0.6(\text{stat})+0.5(\text{syst})}_{-0.5-0.3} \text{ GeV}$

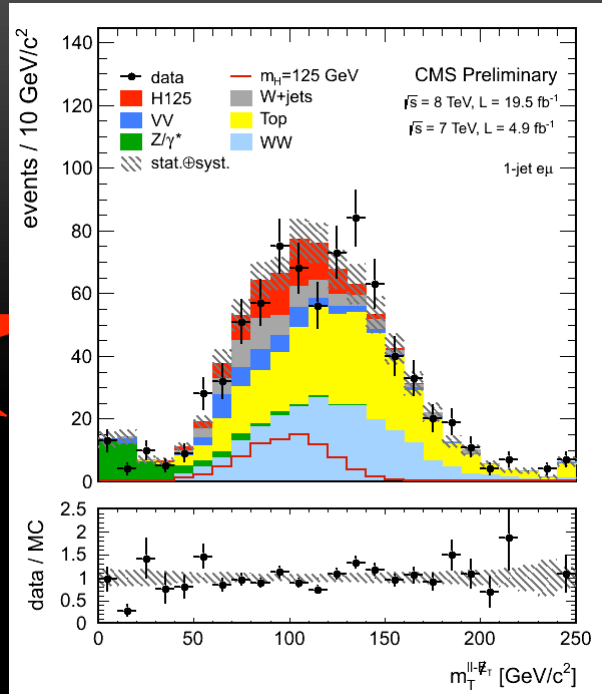
$\mu = 1.7^{+0.5}_{-0.4}$

HIGGS EN WW ($\rightarrow l\nu l\nu$)

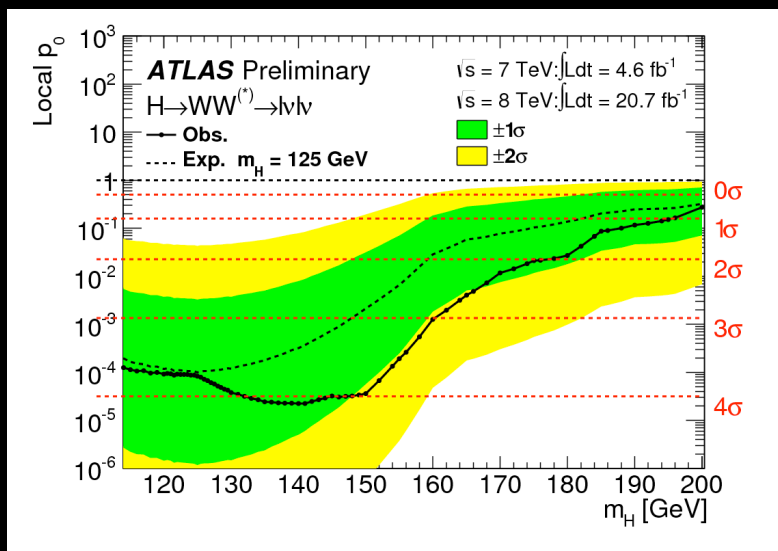


ATLAS-CONF-2013-030

**NEW
Moriond
2013**



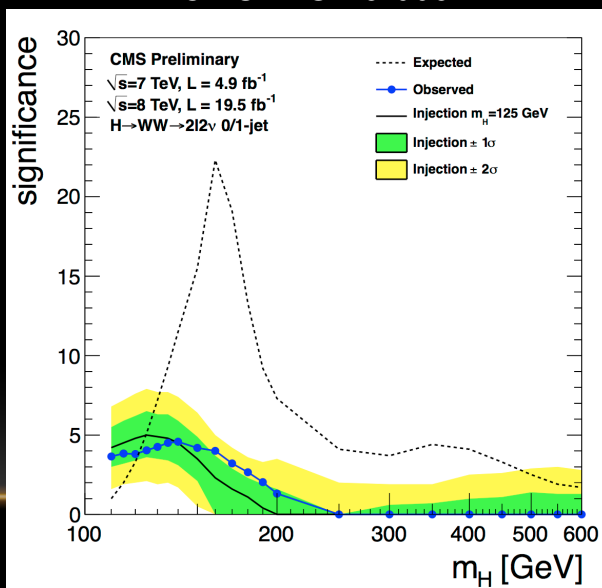
CMS-HIG-13-003



$\mu = 1.01 \pm 0.31$

**CMS
4 σ
@125 GeV**

**ATLAS
3.8 σ
@125 GeV**



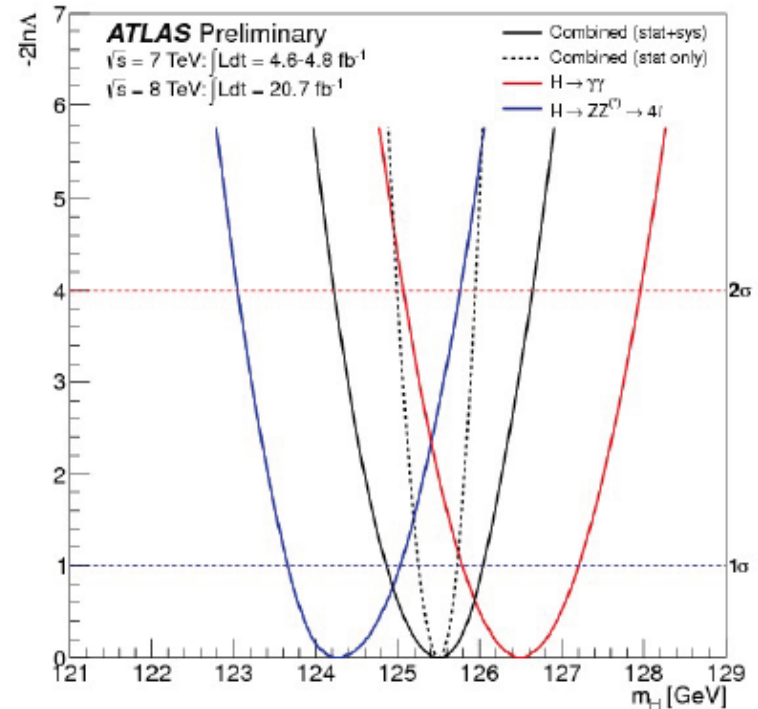
$\mu = 0.76 \pm 0.21$ @ 125 GeV

MESURE DE LA MASSE DANS LES CANAUX BIEN
RESOLUS DANS ATLAS

HIGGS EN $\gamma\gamma$, 4 LEPTONS, WW DANS ATLAS

Mass measurement from $\gamma\gamma$ and 4 leptons

- $\mu_{\gamma\gamma}$ and μ_{4l} treated as independent nuisance parameters
- m_H : parameter of interest
- Full data sample :
2011 (4.8 fb⁻¹) + 2012 (20.7 fb⁻¹)
- Result: $m_H = 125.5 \pm 0.2$ (stat) $^{+0.5}_{-0.6}$ (sys) GeV



INTENSITÉ COMBINÉE DU SIGNAL

(COMBINAISON DE TOUS LES CANAUX)

Signal strength

- Parameter of interest : μ (global)

$\Rightarrow \mu = 1.43 \pm 0.16$ (stat) ± 0.14 (sys)

Council Dec 2012 $\mu = 1.35 \pm 0.19$ (stat) ± 0.15 (sys)

- Consistency tests

- global μ with SM: 3%

- 11% with rectangular

QCD scale and parton dist functions

- 5 μ_i with SM: 8%

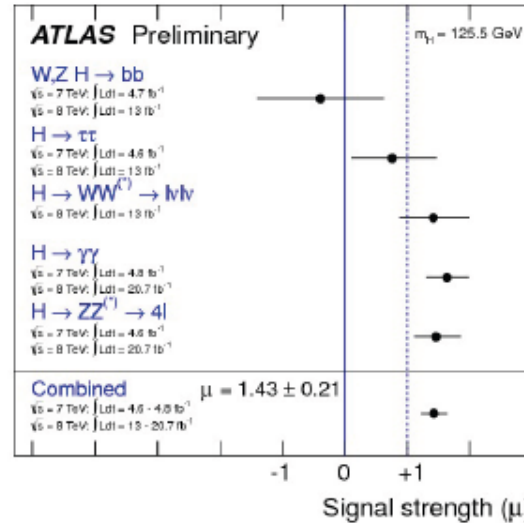
- 5 μ_i with 1.43: 32%

- μ, m_H contours

- $\gamma\gamma$

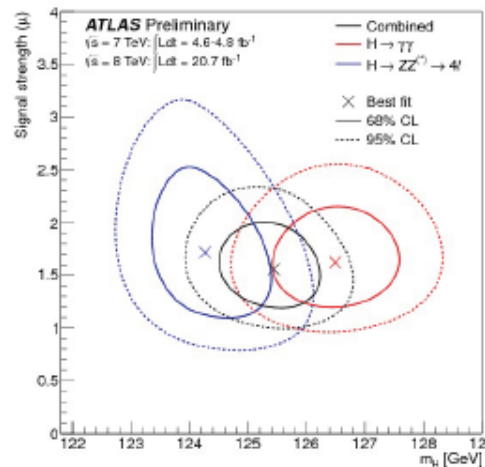
- 4l

- combined



at $m_H = 125.5$

[124.5-126.5]:
 $\mu \pm 4\%$



MISE EN EVIDENCE DU NOUVEAU BOSON DANS
DES CANAUX FERMIONIQUES ?

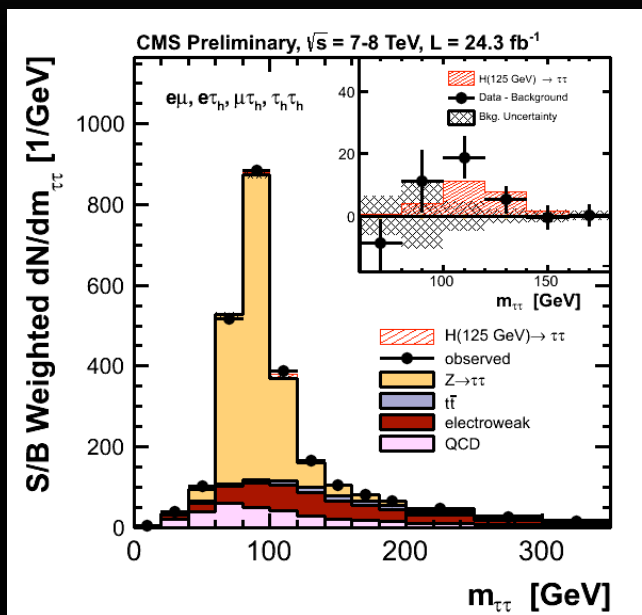
HIGGS EN 2 FERMIONS DANS CMS

CMS-HIG-12-044

$H \rightarrow \tau\tau$



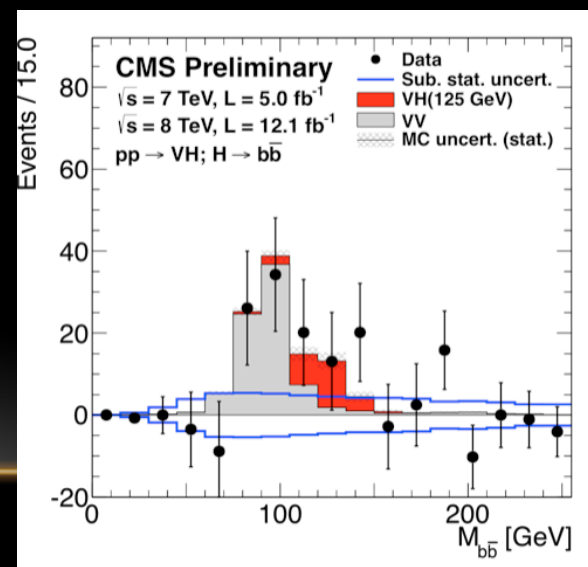
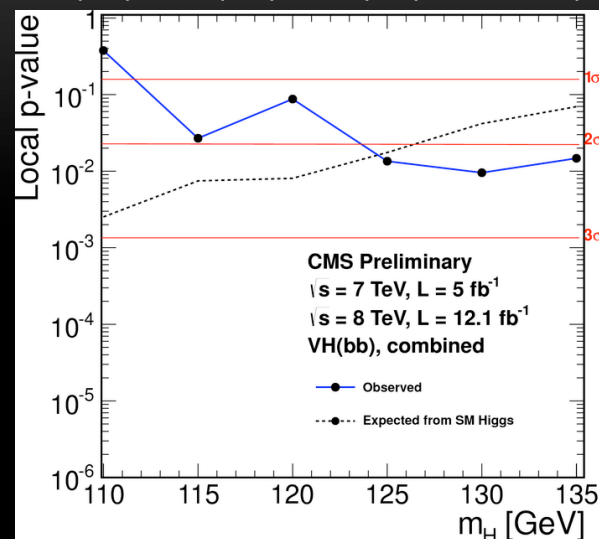
NEW
Moriond
2013



Maximum 2.94 sigma at $m_H = 120$ GeV

CMS-HIG-13-004

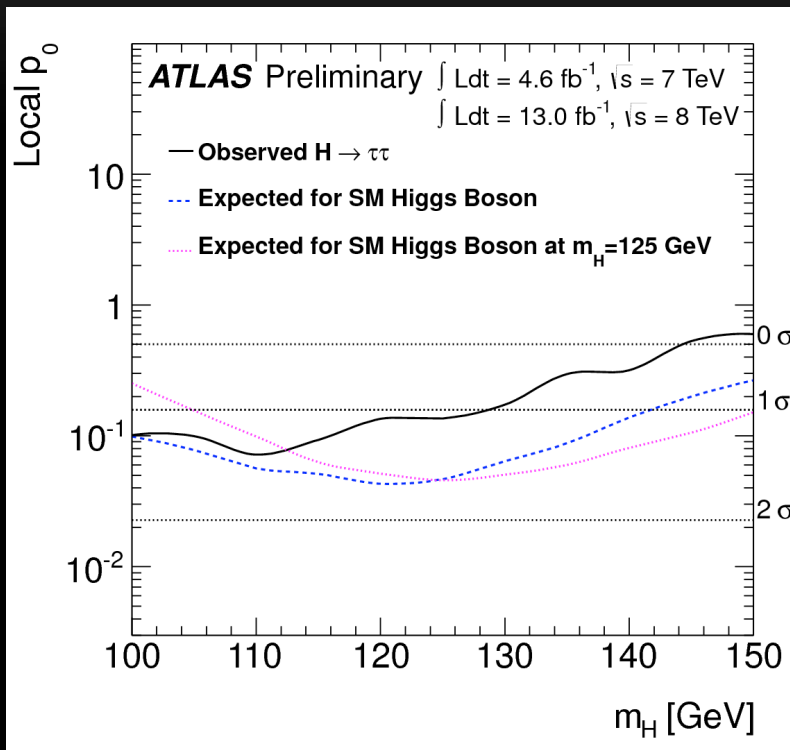
$VH \rightarrow Vbb$
 $W(\mu\nu)H, W(e\nu)H, Z(\mu\mu)H, Z(ee)H$ and $Z(\nu\nu)H$



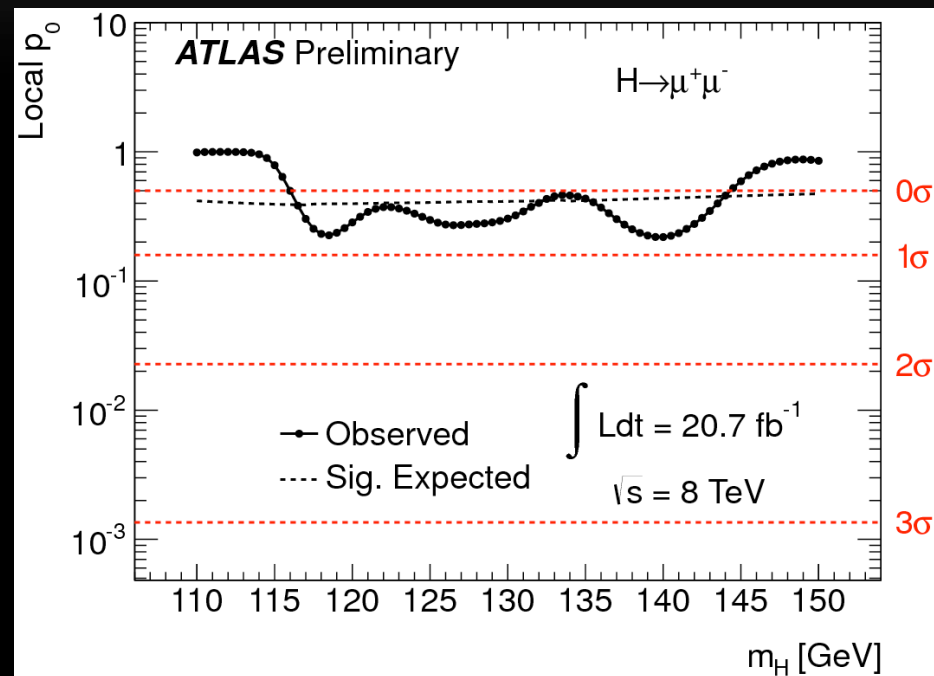
HIGGS EN 2 FERMIONS DANS ATLAS

NEW
Moriond
2013

$H \rightarrow \tau\tau$



$H \rightarrow \mu\mu$



Plus de données nécessaire pour mettre en évidence un couplage direct aux fermions
 Il faut noter que l'accord avec $\mu=1$ dans les canaux bosoniques est une preuve indirecte
 du couplage du Higgs au quark top

SPIN/PARITE DU NOUVEAU BOSON ?

PRESENT SPIN STUDIES IN ATLAS

- In 2012 and 2013 ATLAS has presented two major studies of the spin and parity of the Higgs-like resonance around 126 GeV.
- Decays: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$.
- Spin and parity hypotheses considered: 0^+ , 0^- , 1^+ , 1^- , graviton-like tensor with minimal couplings 2_m^+ , pseudo-tensor 2^- .
 - 2_m^+ and 2^- production. $gg \rightarrow X$: $g_1=1$; $qq \rightarrow X$: $\rho_{12}=1$.
 - 2_m^+ decay $g_1=g_5=1$.
 - 2^- decay: $g_8=g_9=1$.
- The choice of coupling constants follows the formalism described in the JHU papers:
 - Y. Gao, *et al.*, “Spin determination of single-produced resonances at hadron colliders”, Phys. Rev. D81 (2010) 075022, arXiv:1001.3396 [hep-ph]
 - S. Bolognesi, *et al.*, “On the spin and parity of a single-produced resonance at the LHC”, Phys. Rev. D86 (2012) 21.

TWO PHOTON DECAY CHANNEL

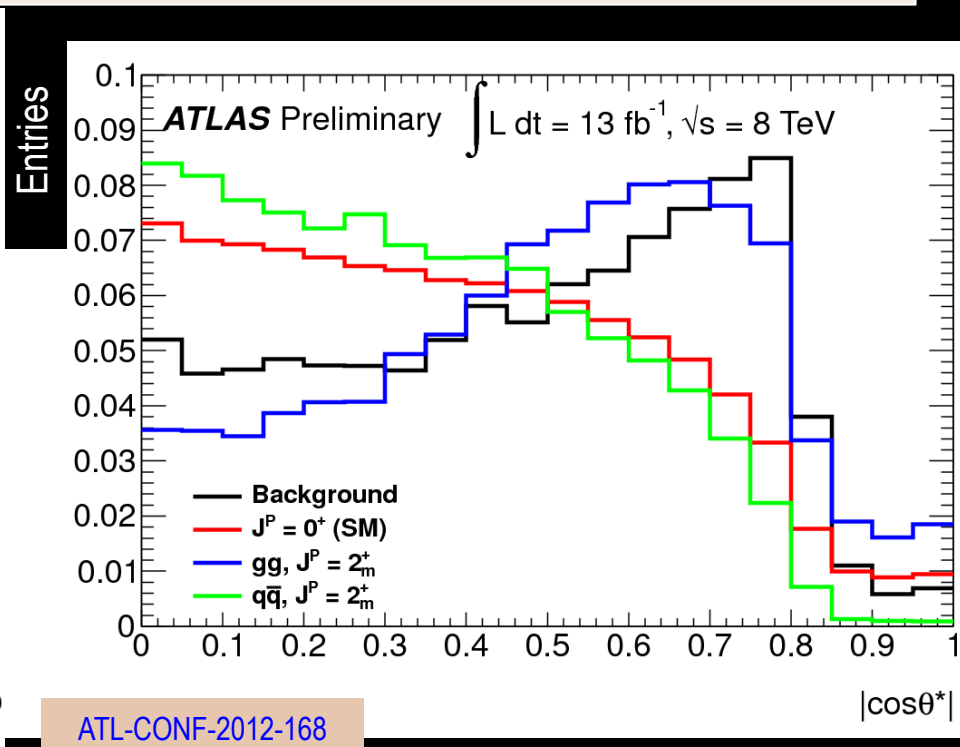
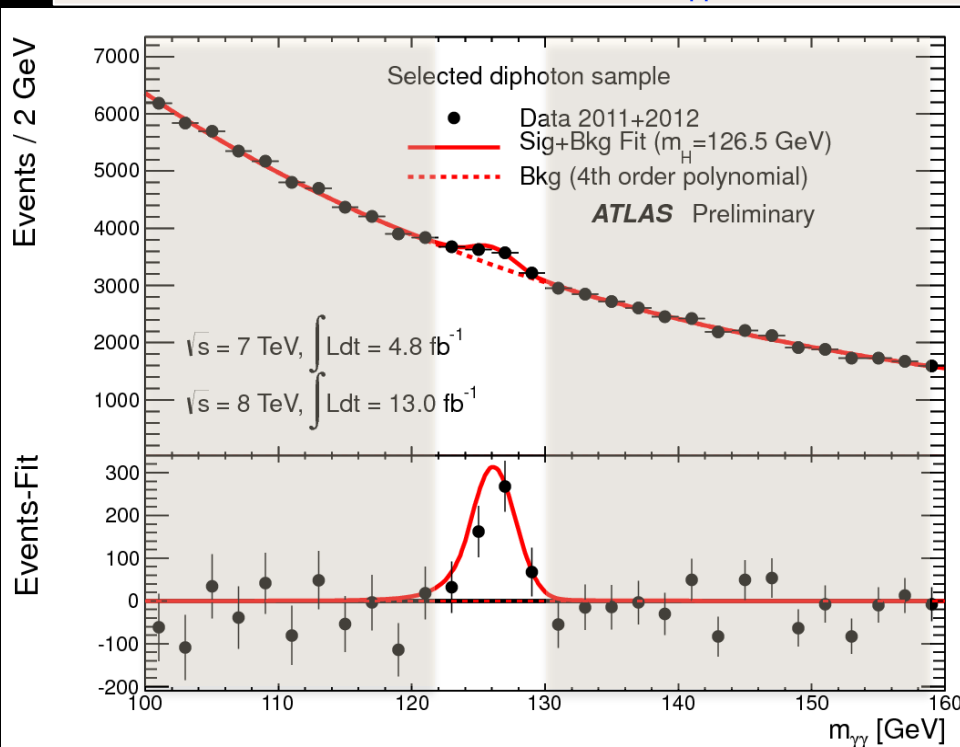
NEW
Moriond
2013

21 fb⁻¹ at 8 TeV (ATLAS-CONF-2013-029)

Two-photon decay channel: inclusive analysis of $M_{\gamma\gamma}$ and $|\cos \theta^*|$ (plus alternative method with $M_{\gamma\gamma}$ fit per bin of $|\cos \theta^*|$).

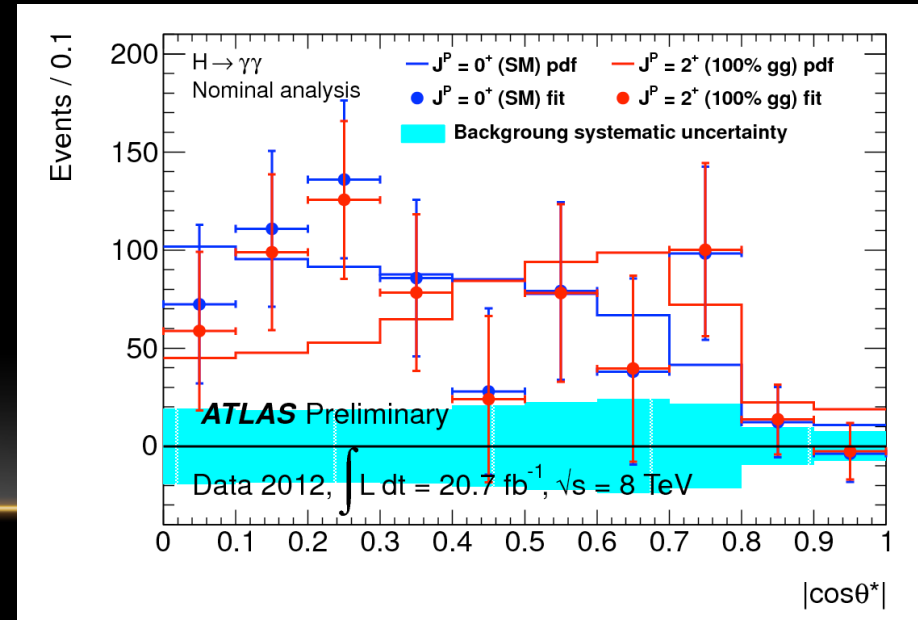
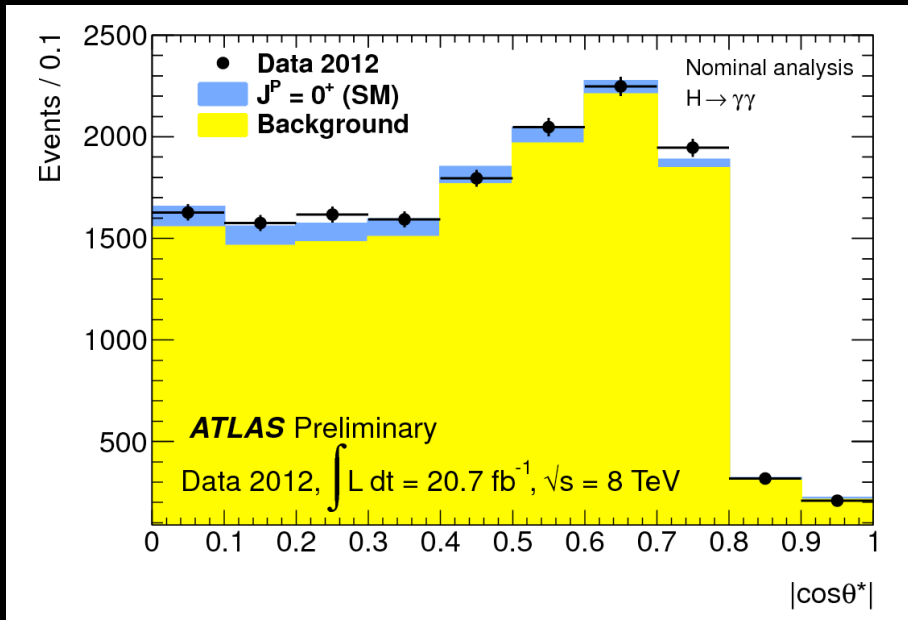
Considered models: 0^+ and 2^+_m (both qqbar and ggF production mechanisms).

No categorization: $122 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 130 \text{ GeV}$



TWO PHOTON DECAY CHANNEL

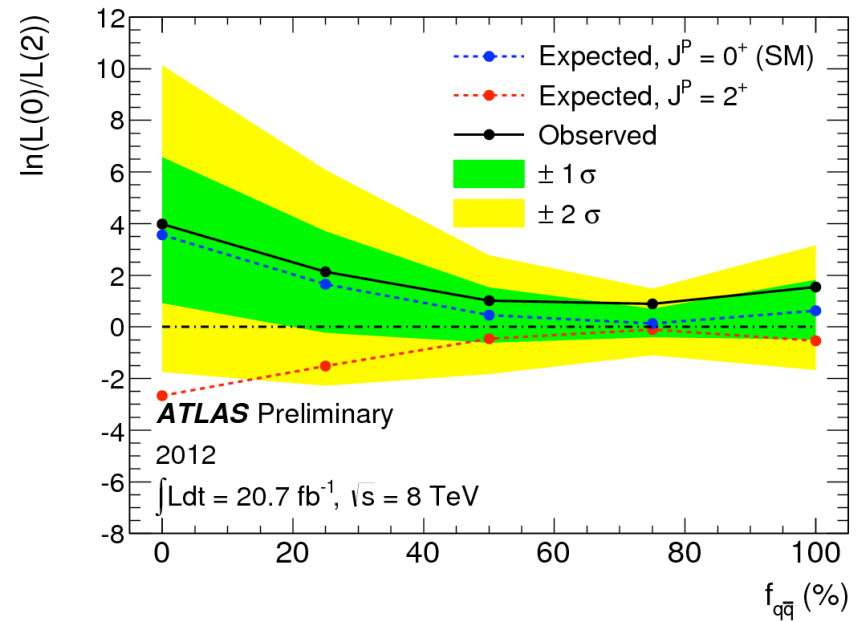
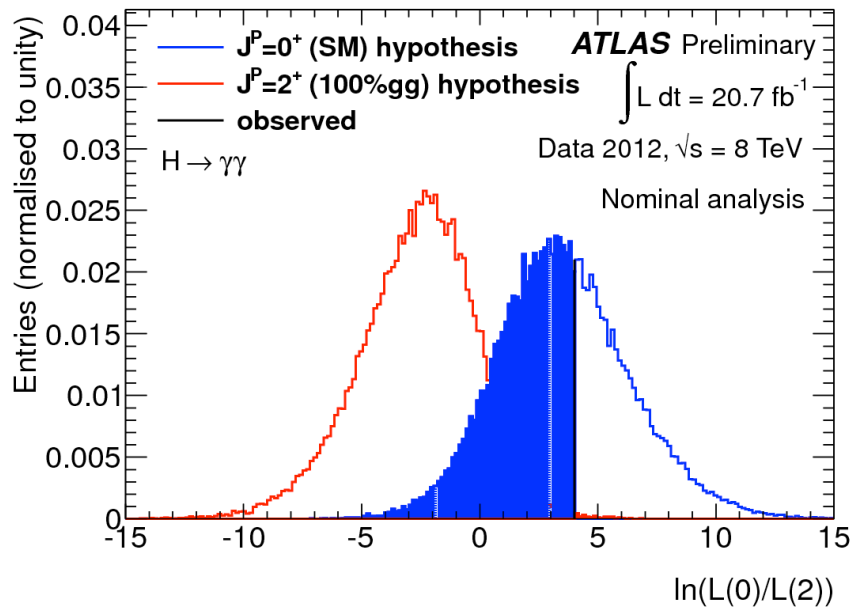
- Left: fitted distribution of $|\cos \theta^*|$ for the SM Higgs boson signal plus background hypothesis, for the data, the background and the signal.
- Right: background-subtracted data distributions, profiled with a fit where the $0^+/2^+_m$ ratio is free.



H → $\gamma\gamma$ @ 21 FB⁻¹ AT 8 TEV

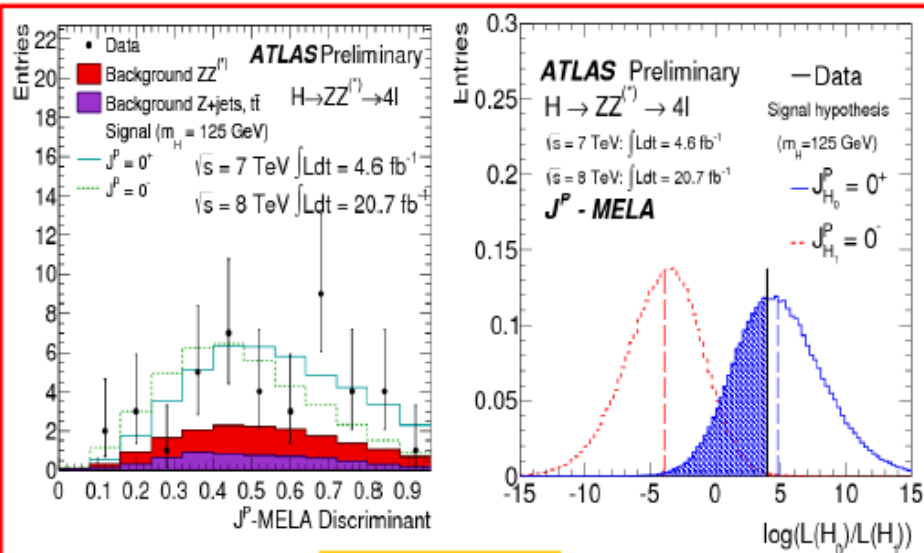
Observed p_0 -value for 0^+ hypothesis: 58.8%.

Data allow to exclude spin 2 at 99.3% CL assuming 100% ggF (goes to 66 % when $f_{qq}=75\%$) → need more data to draw a final conclusion



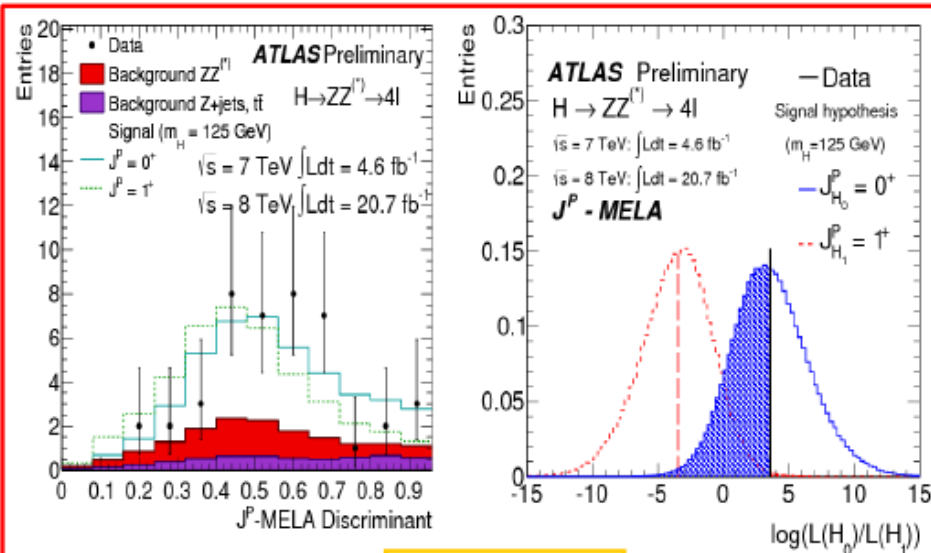
Spin in $H \rightarrow 4$ leptons

- Discriminant combining kinematics of production and decay [5 angles, Z masses], sensitive to new boson spin/parity → 43 events in region $115 \text{ GeV} < m_{4l} < 130 \text{ GeV}$ are used



0⁺ vs 0⁻

Expected exclusion of 0⁻ at 3 σ level
 Observation fully compatible with 0⁺
 Observed exclusion CL_s of 0⁻ at 99.6%



0⁺ vs 1⁺

Expected exclusion of 1⁺ at 3 σ level
 Observation fully compatible with 0⁺
 Observed exclusion CL_s of 1⁺ at 99.4%

Results for spin-1⁻ hypothesis and gg/qq admixtures for spin-2⁺ production in backup

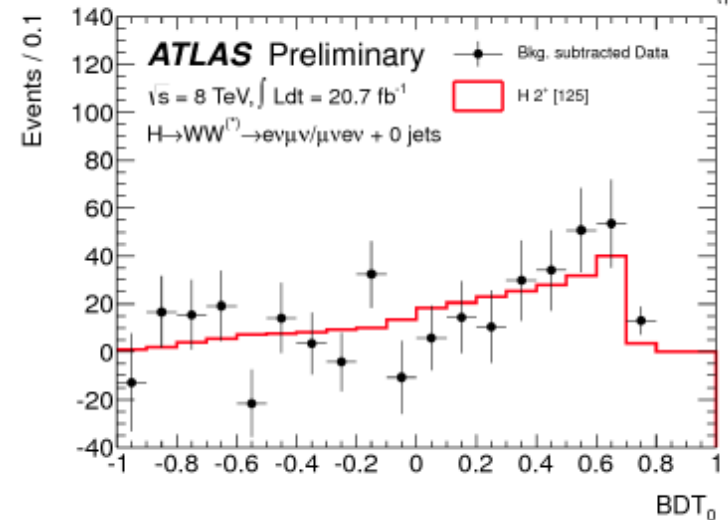
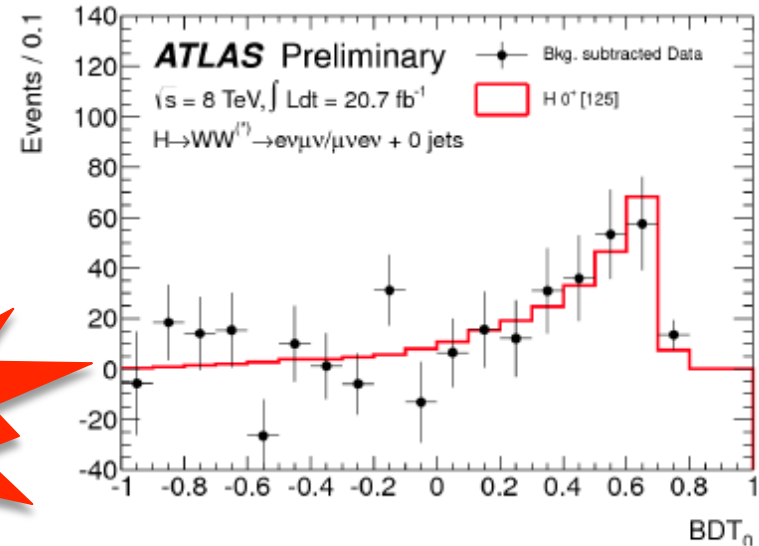
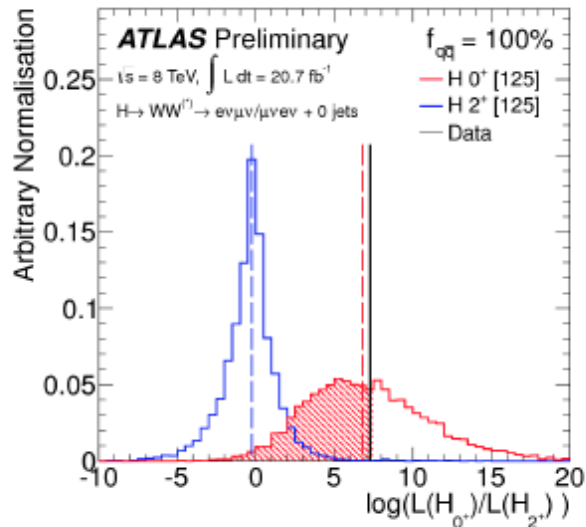
➔ 0⁺ state favoured over tested hypotheses 0⁻, 1⁺, 1⁻ and 2⁺

NEW
 Moriond
 2013

Higgs spin: $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$

- Compare spin 0^+ (SM) to a 2^+_m model (graviton-like with minimal couplings)
- Use m_{\parallel} , p_{\parallel}^T , $\Delta\phi_{\parallel}$, and m_T to form a BDT discriminant
- Compared to 0^+ , can exclude 2^+ at 95-99% (depending on qq production fraction)

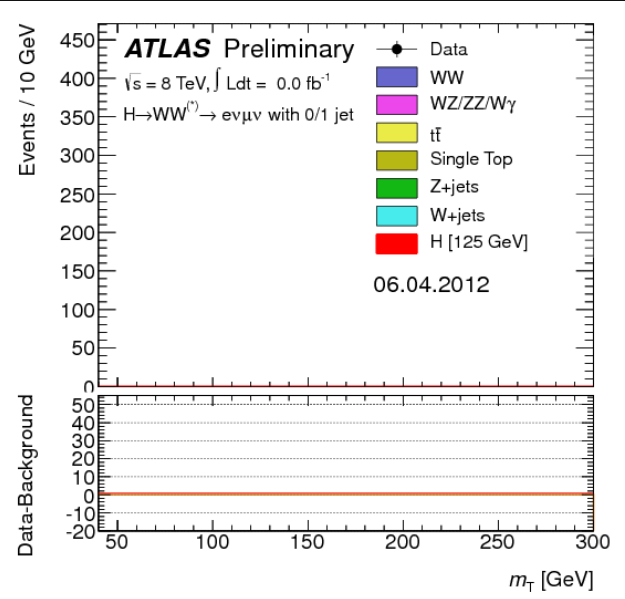
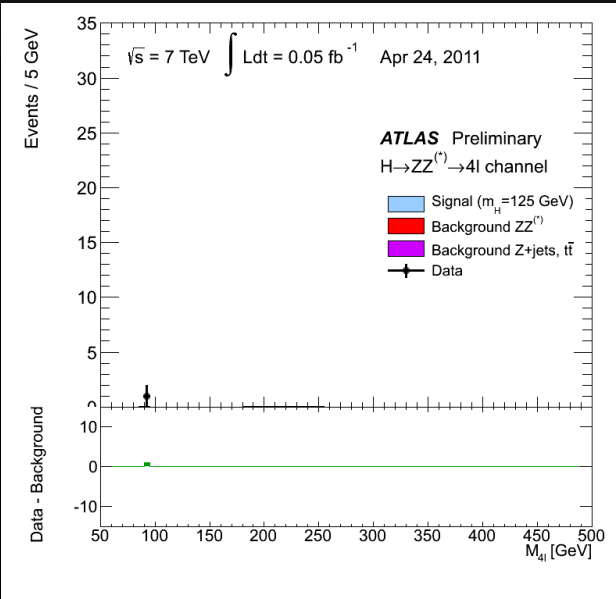
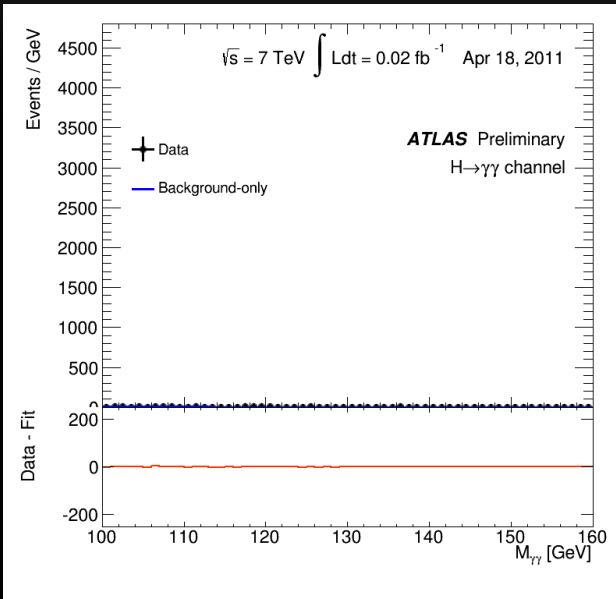
NEW
Moriond
2013



CONCLUSION

- ATLAS et CMS excluent tout autre boson de Higgs standard sur le domaine 100-1000 GeV
- La découverte d'un nouveau boson ressemblant à un bosons de Higgs Standard est confirmée par les expériences ATLAS et CMS.
 - Confirmation de la découverte dans plusieurs canaux individuels
 - Masse : 125.5 ± 0.2 (stat.) $+0.5/-0.6$ (syst.) GeV
 - $\mu = 1.42 \pm 0.16$ (stat.) ± 0.14 (syst.) (2.4σ)
 - Désintégration invisible du Higgs $< 65\%$ @ 95 % CL (non montré)
 - Mesures de couplages préliminaires (RAS, non montré)
- Le spin/parité le plus favorisé pour cette particule est le 0^+ comme attendu
- Les données à venir du LHC (début du run II en 2015) apporteront des données complémentaires permettant de compléter l'étude de ce boson (couplages, exclusion de modèles de couplages non minimaux pour les spins 2, ...)
- Les propriétés d'autocouplage du Higgs ne seront pas testées avant d'accumuler plusieurs centaines (milliers) de fb^{-1} .

LA NAISSANCE D'UNE NOUVELLE PARTICULE



BACKUP-SLIDES

REFERENCES FOR ATLAS

References

- Higgs couplings: [ATLAS-CONF-2013-034](#)
- Higgs mass: [ATLAS-CONF-2013-014](#)

- $\gamma\gamma$: [ATLAS-CONF-2013-012](#), spin: [ATLAS-CONF-2013-029](#)
- ZZ: [ATLAS-CONF-2013-013](#)
- WW: [ATLAS-CONF-2013-030](#), spin: [ATLAS-CONF-2013-031](#)
- $\tau\tau$: [ATLAS-CONF-2012-160](#) (Nov 2012)
- bb: [ATLAS-CONF-2012-161](#) (Nov 2012)
- $\mu\mu$: [ATLAS-CONF-2013-010](#)
- $Z\gamma$: [ATLAS-CONF-2013-009](#)
- $ZH \rightarrow$ invisible: [ATLAS-CONF-2013-011](#)

- Previous combination: [ATLAS-CONF-2012-170](#) (Dec 2012)
- Previous coupling results: [ATLAS-CONF-2012-127](#) (Sep 2012)
- Observation: [Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#) (July 2012)

- LHC XS WG coupling recommendations: [arXiv:1209.0040](#)

HIGGS EN $\gamma\gamma$, 4 LEPTONS DANS ATLAS

Mass systematic uncertainties: 4 leptons and $\gamma\gamma$

- **4 leptons**
 - **Dominated by 4 muons (best resolution, less background)**
 - Muon momentum-scale uncertainty : 0.2% (from $Z, J/\psi \rightarrow \mu\mu$)
 - **electron E-scale => see below**
- **$\gamma\gamma$**
 - **Per category systematic uncertainties:**
 - method $\sim 0.3\%$: (*mainly from $Z \rightarrow ee$ MC/data*)
 - material in front of calorimeter: $\sim 0.3\%$, up to 0.7%
 - relative calibration presampler/calorimeter : $\sim 0.1\%$

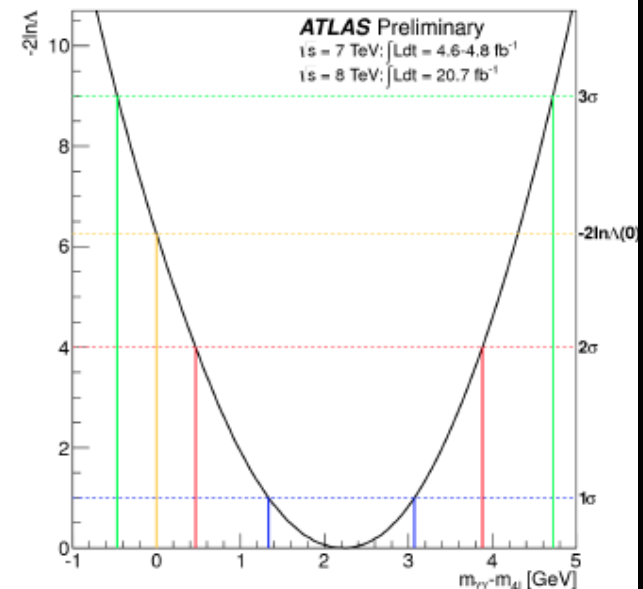
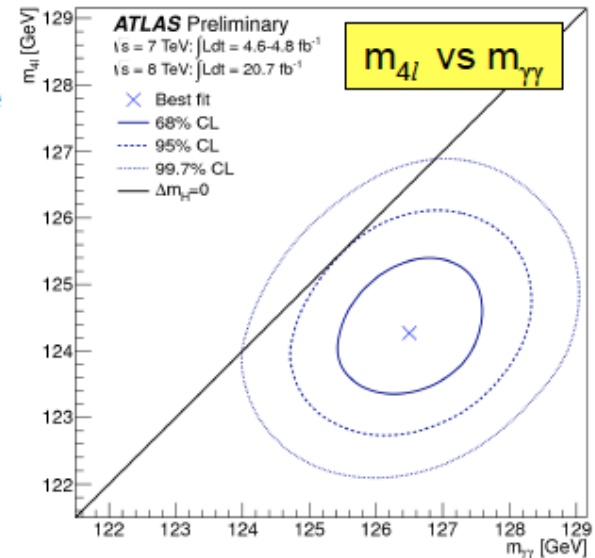
In each of the above: extrapolation in $E \oplus$ transfer from e to γ
 - **Additional (global) syst uncertainties:**
 - E1/E2, linearity, lateral leakage, conversion fraction ... 0.32%
 - **Global mass systematic uncertainty: 0.55% = 0.7 GeV**



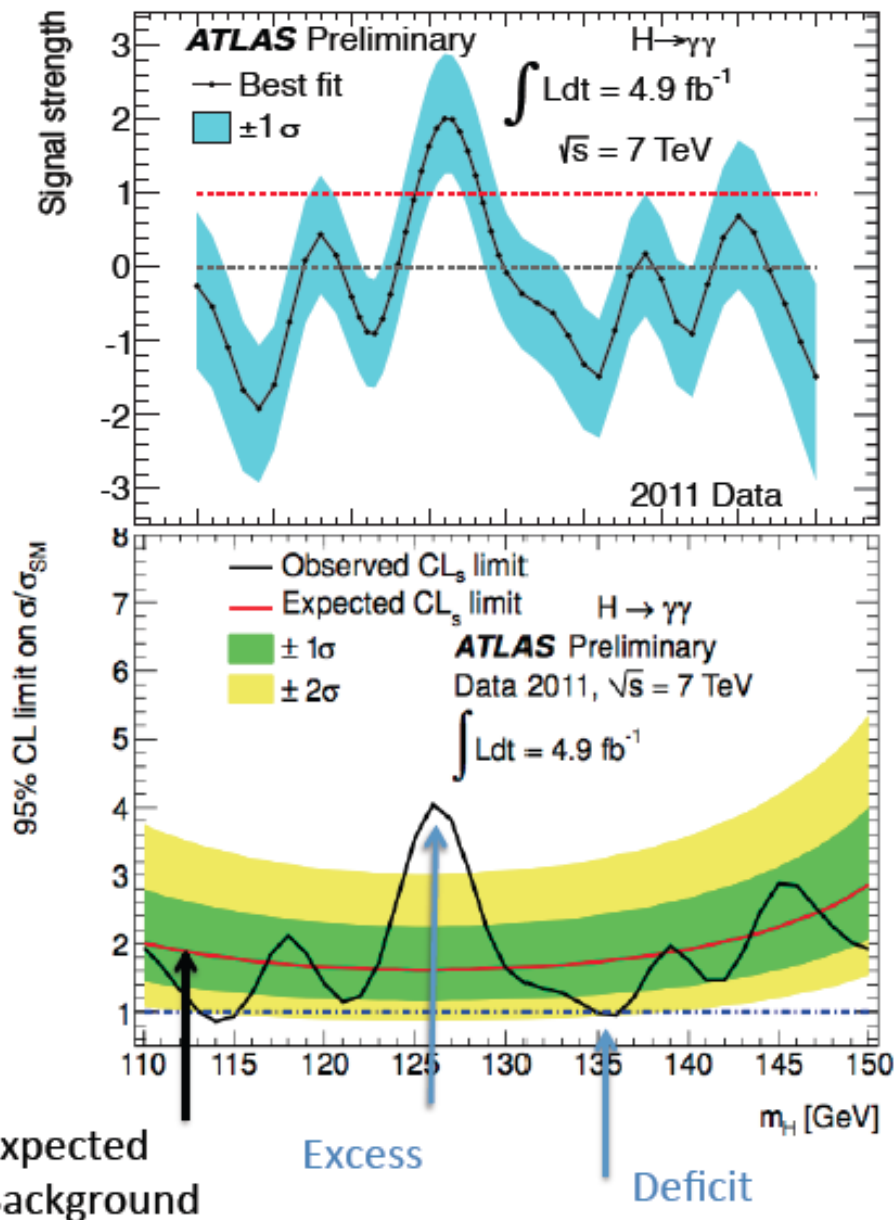
HIGGS EN $\gamma\gamma$, 4 LEPTONS, WW DANS ATLAS

Comparison of masses from $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$

- The individual mass measurements, $m_{\gamma\gamma}$ and m_{4l} , are slightly correlated due to the common EM scale systematic (for photons in $m_{\gamma\gamma}$ and electrons in m_{4l})
 - Pulls $m_{\gamma\gamma}$ down by 350 MeV in combined fit
- Test assumption that both decays come from a common mass
 - $\Delta m_H = m_{\gamma\gamma} - m_{4l}$
 $= 2.3_{-0.7}^{+0.6}$ (stat) ± 0.6 (sys) GeV
- Consistency $\Delta m_H = 0$:
 - p-value = 1.5% (2.4σ)
 - More conservative E scale model: allow systematics to vary without constraint $\pm 1\sigma$ (rectangular PDF): p-value = 8% (1.7σ)
- Previous measurement, Dec 2012:
 - $\Delta m_H = 3.0 \pm 0.8$ (stat) $_{-0.6}^{+0.7}$ (sys) GeV



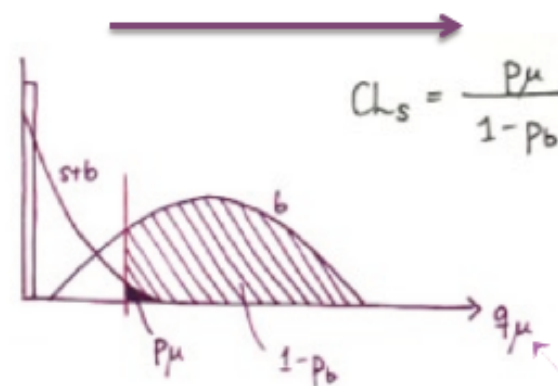
How to Read Higgs Exclusion Limits Plots



$$\lambda_\mu = \lambda(\mu, \theta) = \frac{L(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{L(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

$$q_\mu = -2 \ln \lambda_\mu$$

Background likelihood



CL_{s+b} Probability that a signal-plus-background experiment be more background-like than observed

DES DONNEES AVEC PILE-UP ! UN DEFI POUR LA RECONSTRUCTION

- Augmentation du pile-up avec les petits β^*
- Conditions expérimentales plus difficiles
- Excellent comportement du système de déclenchement

Gros efforts pour améliorer la reconstruction

