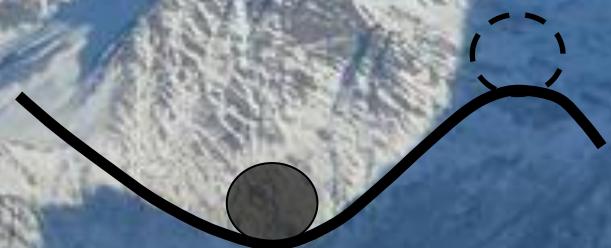


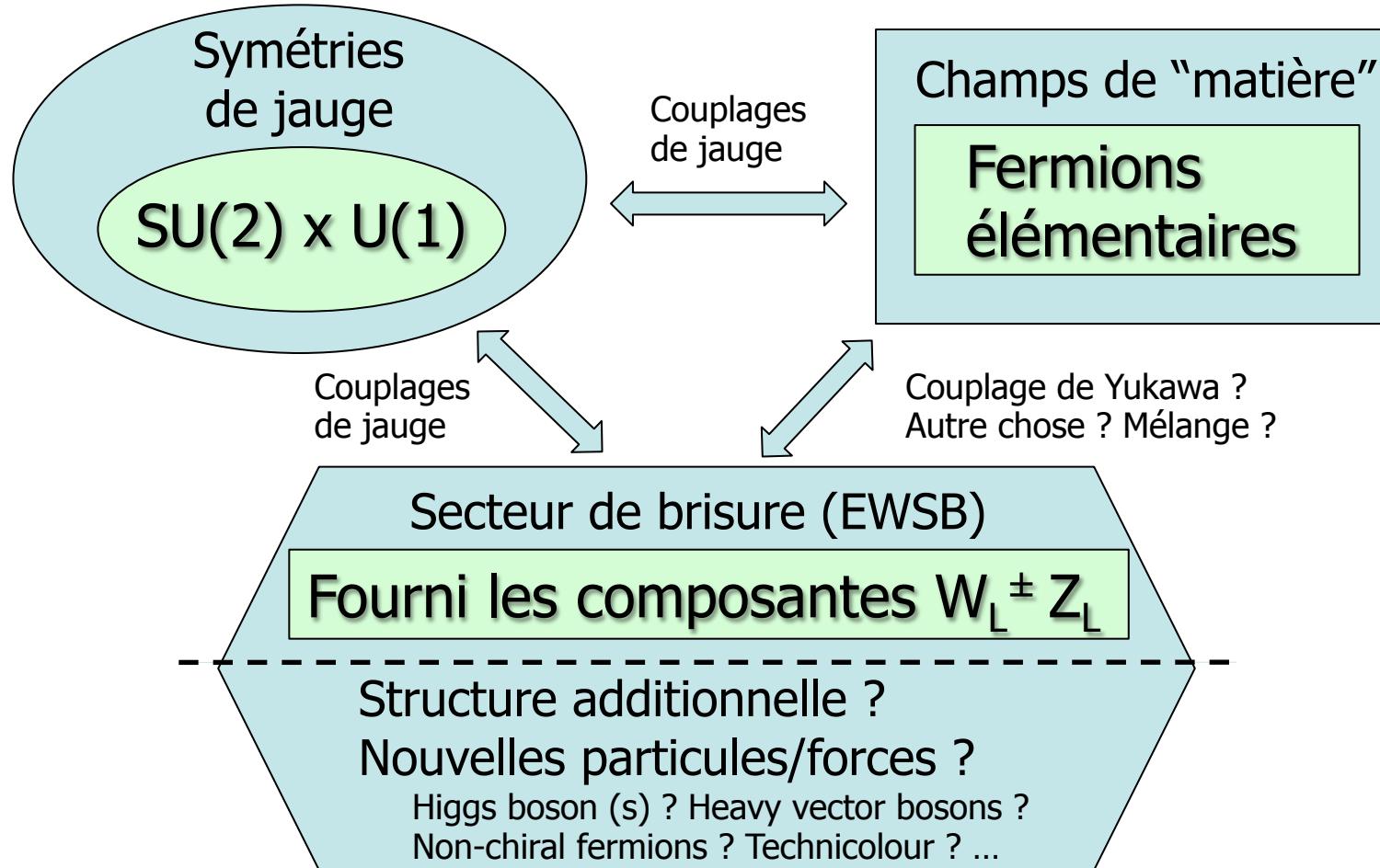
# **Le boson de Higgs au LHC ... l'univers ... et l'au-delà**



Y.S.

Colloque de St-Gervais, IN2P3

# Boson de Higgs et Modèle Standard



Il faut “autre chose” pour:

- Expliquer l’origine des masses de particules
- Préserver les symétries de jauge au niveau fondamental
- Permettre l’unitarisation de la théorie (ou au moins retarder le problème)

# Boson de Higgs et Mécanisme BEH

On postule l'existence d'un champ scalaire présent dans tout l'univers

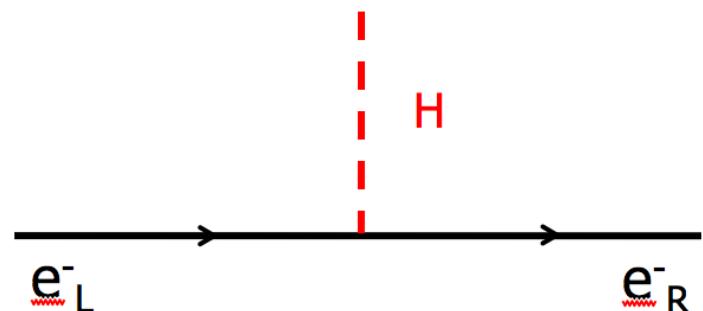
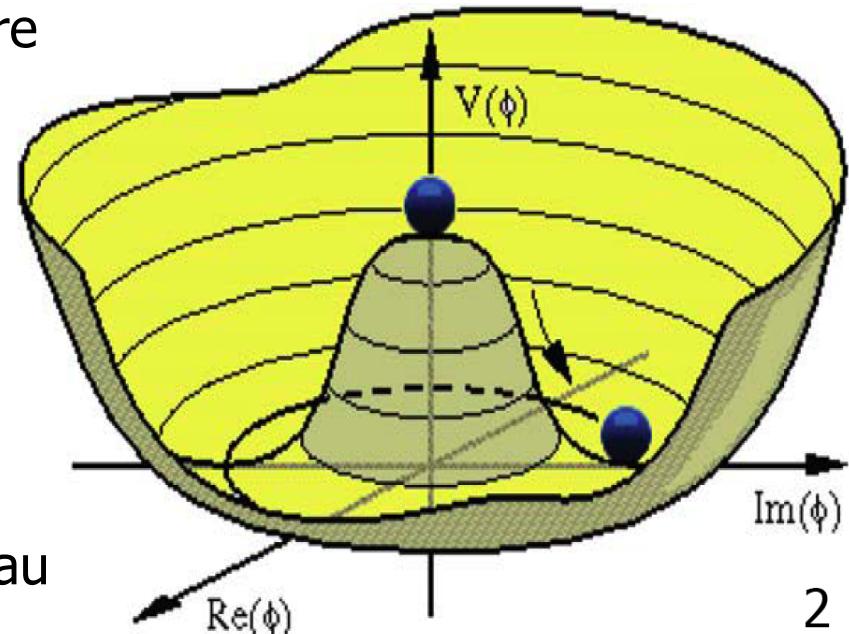
Le potentiel associé à ce champ est au minimum pour une valeur non-nulle  
⇒ **brisure spontanée de la symétrie**  
electrofaible (EWSB) ... Les bosons Z et  $W^\pm$  acquièrent une masse

Les symétries de jauge sont préservées au niveau fondamental

⇒ c'est la propagation dans le vide « rigidifié » qui brise spontanément la symétrie

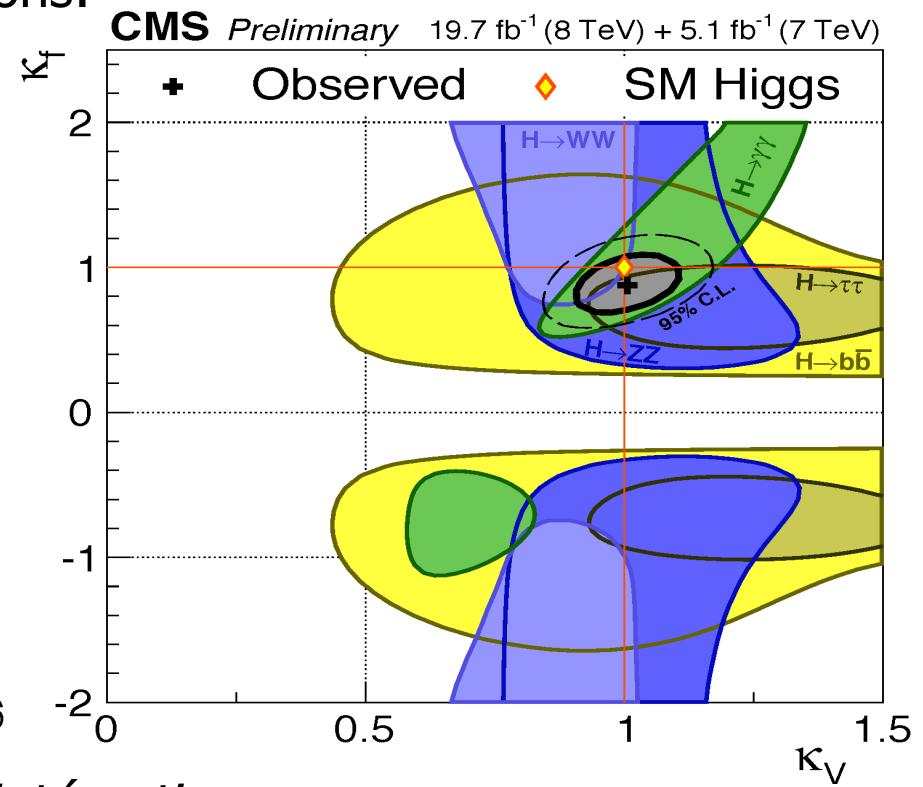
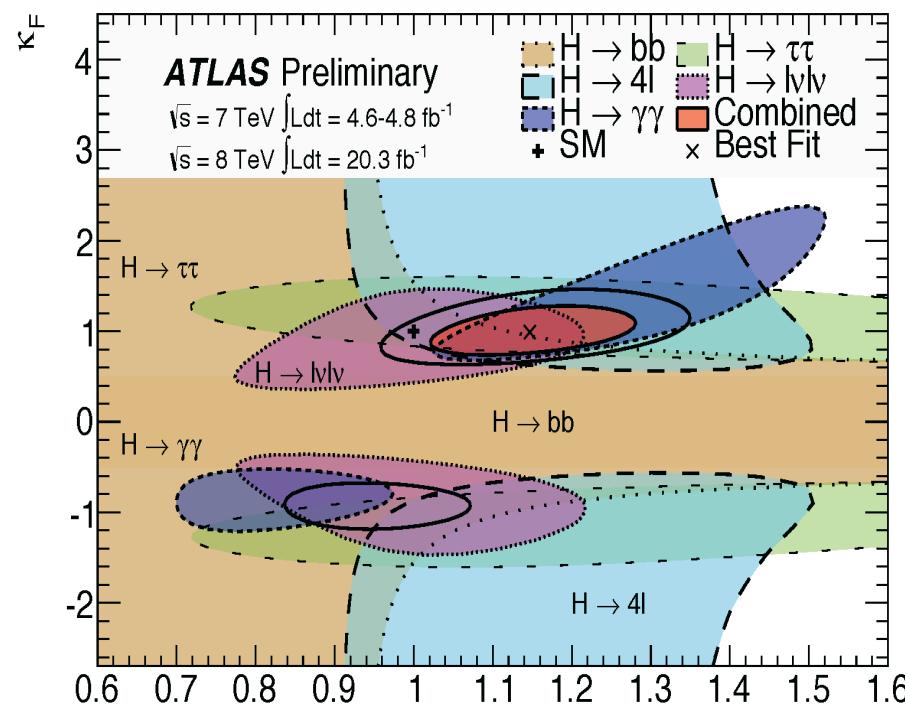
Les fermions élémentaires interagissent avec le champ et acquièrent une masse

(i.e. les composantes de chiralité gauches et droites se mélagent !)



# Boson de Higgs: État de l'art (1)

- Masse et spin-parité en combinant  $H \rightarrow \gamma\gamma$  et  $H \rightarrow 4\ell \Rightarrow S^{\text{CP}} = 0^{++}$   
 $M_H(\text{ATLAS}) = 125.46 \pm 0.41 \text{ GeV} \quad M_H(\text{CMS}) = 125.03 \pm 0.30 \text{ GeV}$
- Intensité du signal ( $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}}$ ) en combinant tous les canaux  
ATLAS:  $\mu = 1.30^{+0.18}_{-0.17}$  CMS:  $\mu = 1.00 \pm 0.09(\text{stat.})^{+0.08}_{-0.07}(\text{theo.}) \pm 0.07(\text{syst.})$
- Couplages aux fermions et aux bosons:

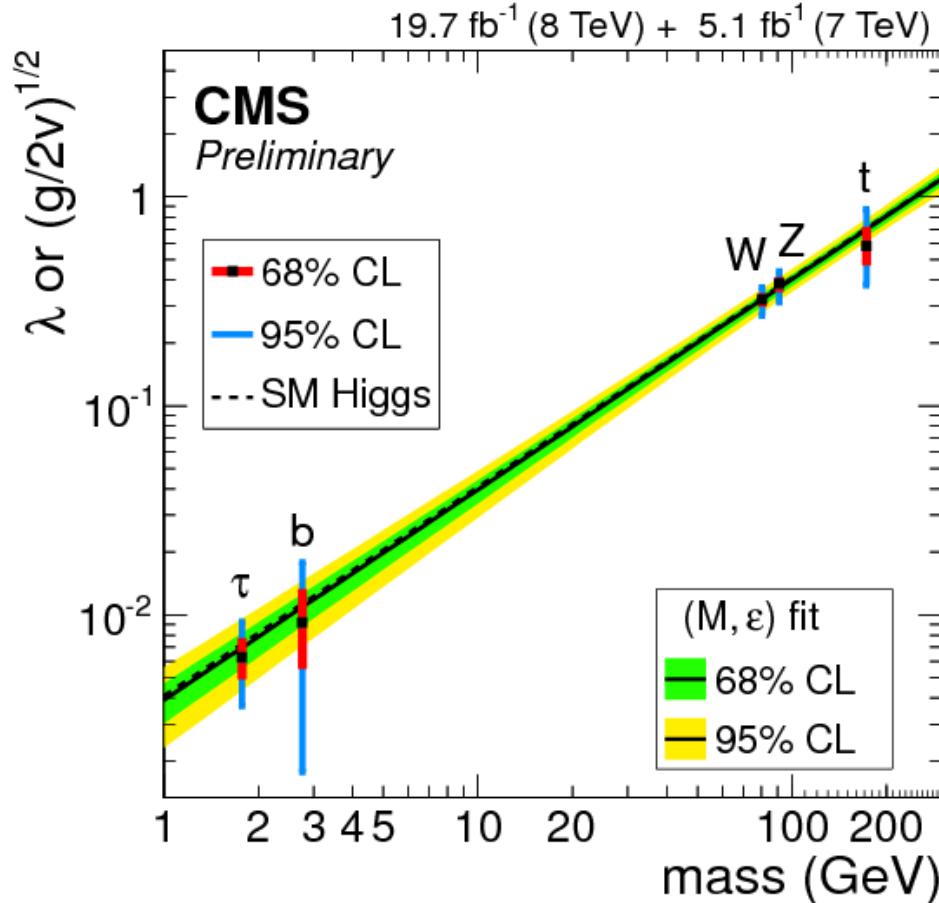


- Pour déconvoluer *production x désintégration*  
on considère  $\kappa_V (= \kappa_W = \kappa_Z)$  &  $\kappa_f (= \kappa_l = \kappa_q)$

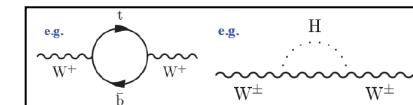
$$\kappa_i^2 = \frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\text{SM}}} \quad \kappa_j^2 = \frac{\Gamma_j}{\Gamma_j^{\text{SM}}}$$

# Boson de Higgs: État de l'art (2)

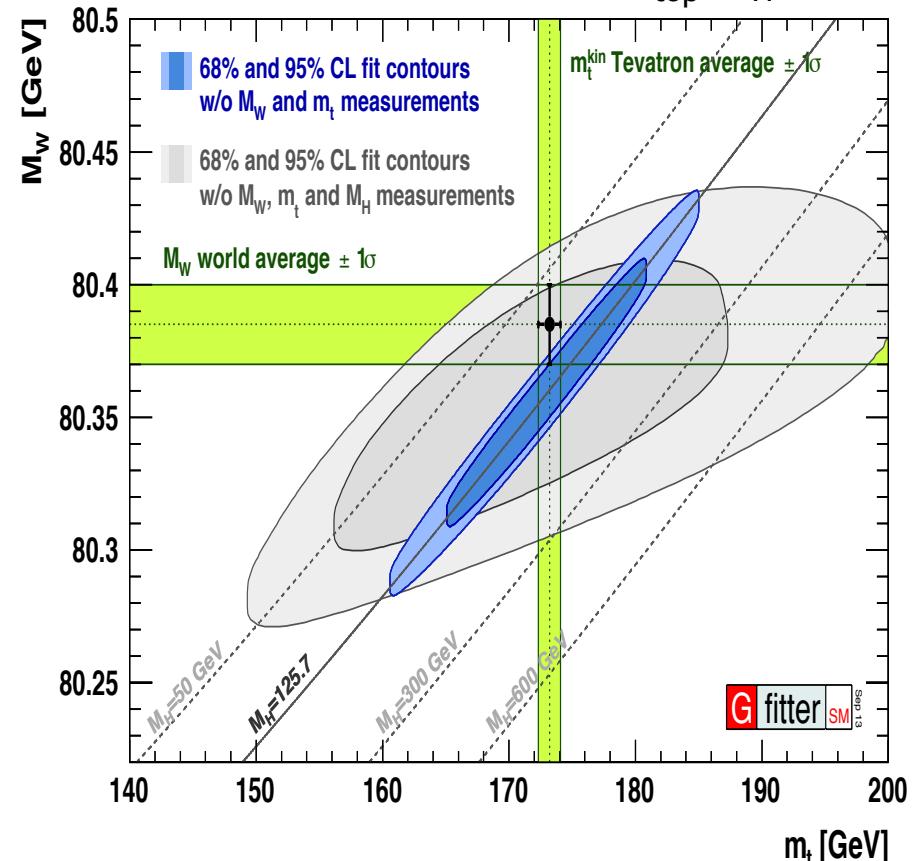
Couplings to fermions and to weak bosons  
(verified to  $\sim 10\text{-}30\%$  precision)



Rad. corrections:



W, Z meas. sensitive to  $M_{\text{top}}$   $M_H$



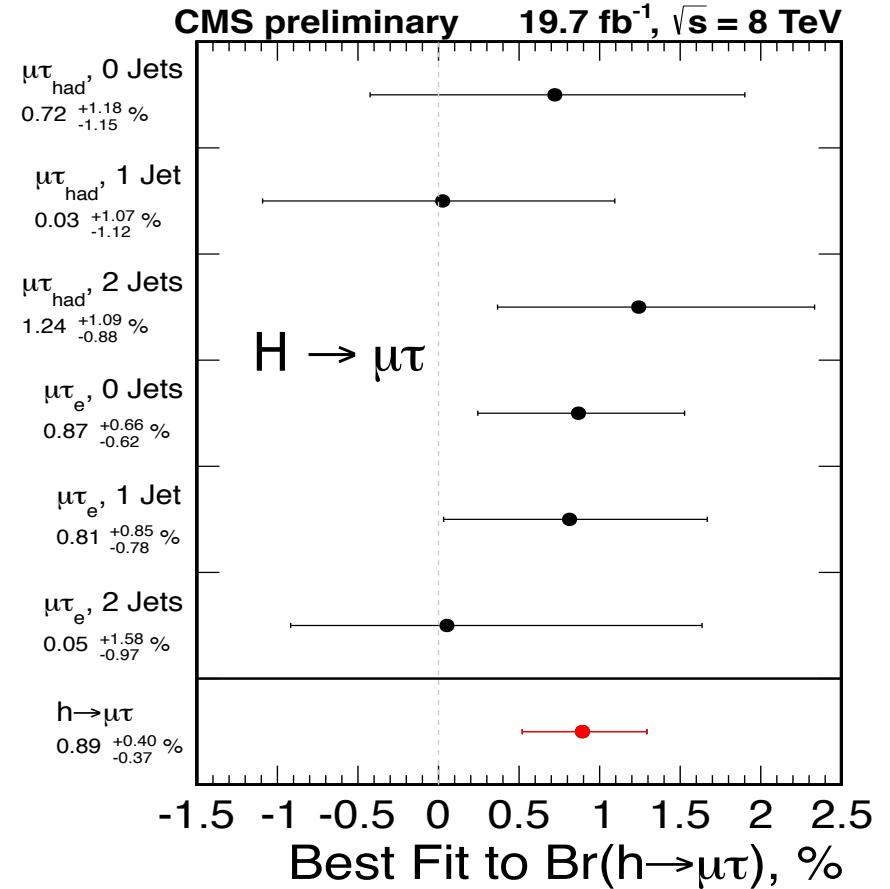
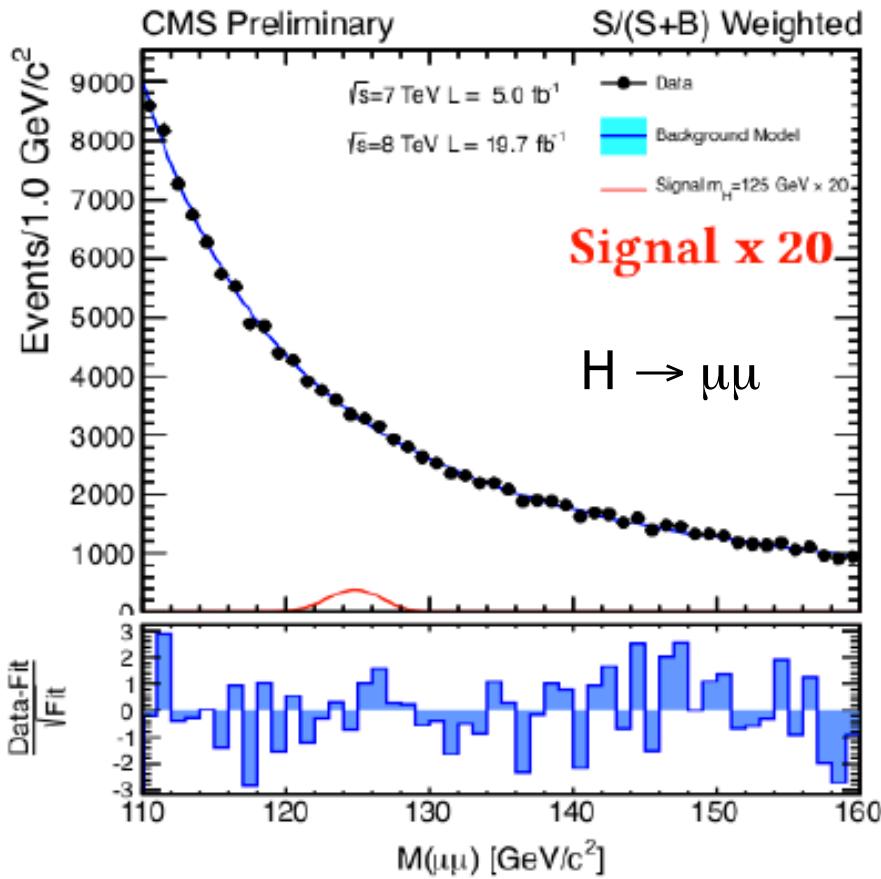
- SM-like Higgs at  $\sim 125.7$  GeV is compatible with global EWK data at  $1.3\sigma$  ( $p = 0.18$ )
- Indirect constraints now superior to some precise direct W, Z measurements

Indirect (EWK fit):  $M_W = 80.359 \pm 0.011$

Direct (World average):  $M_W = 80.385 \pm 0.015$

# Boson de Higgs: État de l'art (3)

## Désintégrations rares ou interdites



Expected limit at  $\sim 5.1 \times \text{SM}$   
(will be probed with  $25 \times$  more data !)

H has non-universal couplings to leptons !  
Origin of the families lie in the scalar sector ...

$$\text{B}(H \rightarrow \mu\tau) = 0.89 \pm 0.38$$

The CMS combined excess is  $2.5 \sigma$   
(local p-value below  $10^{-2}$  at  $M_H \sim 125 \text{ GeV}$ )

# On The H Boson So far ...

- Higgs boson discovery is now firmly established at  $M_H \sim 125$  GeV
  - ✓ Couplings to fermions and to weak bosons (verified to  $\sim 10\text{-}30\%$  precision) consistent with the minimal scalar sector required for the BEH mechanism
  - ✓ Custodial symmetry verified ( $\sim 15\%$  precision) and the existence of a boson with non-universal family couplings established ( $\tau\tau$  evidence + no  $\mu\mu$  signal)
  - ✓ Provides unitarization of the theory ! (at least partially – additional or different structure still possible but postponed)
- Culmination of a reductionism strategy **evolving from the question of the *structure of matter* to that of the *very origin of interactions* (local gauge symmetries) *and matter* (interactions with Higgs field)**
- The Higgs boson is not a gauge boson (mass not protected by symmetries of the theory) ... all other “problems” of the SM remain

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}}(A_a, \psi_i) + \mathcal{L}_{\text{Higgs (Symm. Break.)}}(\phi, A_a, \psi_i)$$

Natural  
verified with high precision; stable with respect to quantum corrections; highly symmetric (gauge and flavour symmetries)

Ad hoc  
but necessary (other mass terms forbidden by EWK gauge symmetries); unstable with respect to quantum corrections; at the origin of flavour structure and all other problems of the SM

# BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

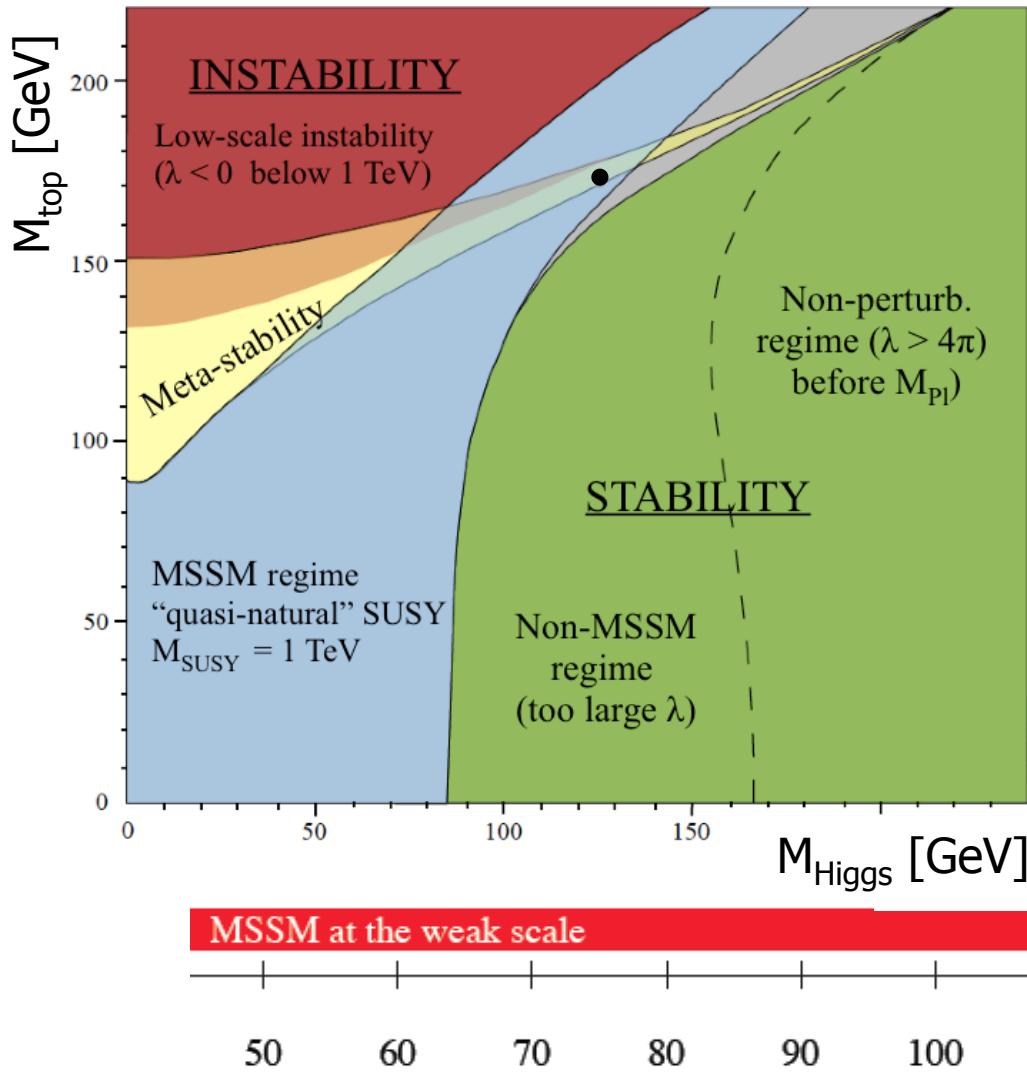
SESSION 2015

## Boson de Higgs ... et au-delà: les grandes questions

- Peut-on éviter l'arbitraire pour masse du boson de Higgs et/ou contraindre le secteur scalaire ? Déduire le boson de symétries géométriques ? Faire émerger l'auto-couplage à partir des couplages de jauge ?
- Le secteur scalaire « Higgs » est-il relié à l'inflation et/ou à l'énergie noire ?
- Le secteur scalaire de « Higgs » déstabilise-t'il le vide ?
- Le secteur scalaire de « Higgs » est-il un portail vers la matière noire ?
- Le secteur scalaire de « Higgs » est-il responsable de la baryogénèse ?
- Le secteur scalaire permet (est à l'origine ?) de distinguer les familles de fermions ... mais comment générer la structure ?
- Le secteur scalaire de « Higgs » parle-t-il aux neutrinos ( $\nu_L \leftrightarrow \nu_R$ ) ?

DURÉE DE L'ÉPREUVE : 10-30 ans – COEFICIENT 6  
L'usage de collisionneurs est permis

# Le Choix Malicieux de la Masse

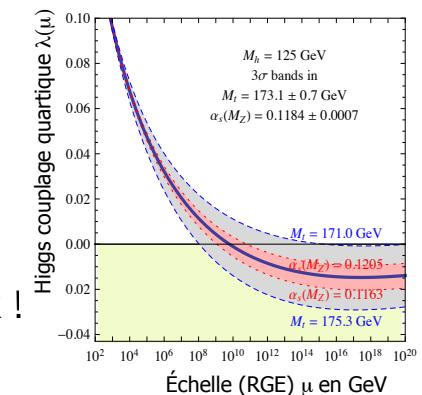


G. Isodori et al.

Nous habitons un recouin très particulier d'espace des paramètres !

En assumant la validité du Modèle Standard jusqu'à l'échelle de Planck, le destin de l'univers dépend de la valeur précise de  $M_{\text{top}}$  and  $M_{\text{Higgs}}$  !

Note:  
L'auto-couplage  $\lambda$  du boson de Higgs évolue vers les petites distance et s'annule quasiment à l'échelle de Planck !



Le boson de Higgs « SM-like » à 125 GeV est compatible avec SUSY ... et il n'y a pas d'indication pour l'échelle de brisure de Supersymétrie !

# Why Precision at HL-LHC ?: For Discovery

Snowmass 2013 CMS extrapolation

$L (fb^{-1})$	$\kappa_\gamma$	$\kappa_W$	$\kappa_Z$	$\kappa_g$	$\kappa_b$	$\kappa_t$	$\kappa_\tau$	$\kappa_{Z\gamma}$	$BR_{inv}$
300	[5, 7]	[4, 6]	[4, 6]	[6, 8]	[10, 13]	[14, 15]	[6, 8]	[41, 41]	[14, 18]
3000	[2, 5]	[2, 5]	[2, 4]	[3, 5]	[4, 7]	[7, 10]	[2, 5]	[10, 12]	[7, 11]

HL-LHC experiments will each achieve 2-10% precision on the Hff and HVV couplings

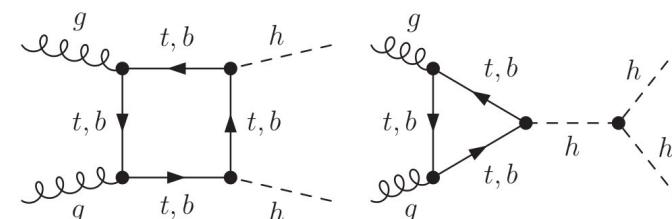
Gupta & Wells

How large are expected deviations on couplings from BSM physics ?

	$\Delta hVV$	$\Delta h\bar{t}t$	$\Delta hbb$
Mixed-in Singlet	6%	6%	6%
Composite Higgs	8%	tens of %	tens of %
Minimal Supersymmetry	< 1%	3%	10% <sup>a</sup> , 100% <sup>b</sup>

HL-LHC experiments will each achieve  $\sim 30\%$  precision  $\lambda$  in SM case ... but HH prod. could be enhanced from BSM

Delicate HH prod. cancellation in SM ... enhanced with anomalous ttH couplings



HL-LHC experiments sensitive to rare decay BSM enhancement (possibly  $>> 10\%$ )

BSM easily competes with SM decays

... with  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \tau\tau$  because of small couplings;  
... with  $H \rightarrow ZZ^*$ ,  $WW^*$  because of V off-shell;  
... with  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $Z\gamma$  because of loops

# Conclusions

- Le boson scalaire découvert à  $m_H \sim 125$  GeV au LHC par ATLAS et CMS a les propriétés attendues pour le boson de Higgs prédit par le mécanisme BEH (secteur scalaire minimal pour le SM)
- L'origine du mécanisme et de la masse  $m_H$  et/ou les liens avec la cosmologie et la matière noire, impliquent une extension du secteur scalaire  $\Rightarrow$  déviations pour les couplages et/ou nouveaux bosons
- L'exploration du secteur scalaire pourra être déterminante au LHC/HL-LHC en profitant des hautes énergies (nouveaux bosons) et de la haute luminosité (mesures de précision, désintégrations rares)
- Cette exploration profite déjà d'avancées spectaculaires dans la compréhension et la modélisation des bruits de fond du MS