

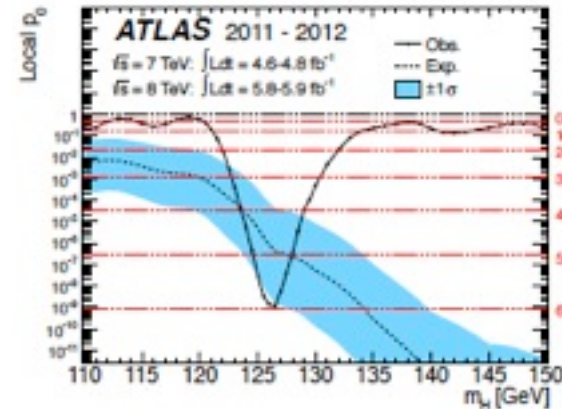
Physique du boson de Higgs et nouvelle physique

Geneviève Bélanger
LAPTH, Annecy-le-Vieux

SFP, Marseille, 3 Juillet 2013

Introduction

- 4 juillet 2012: ATLAS et CMS annoncent un signal compatible avec un boson de Higgs de masse $\sim 125\text{GeV}$



- Mars 2013 : plus de 7 sigmas dans canal ZZ

Le LHC a trouvé Higgs

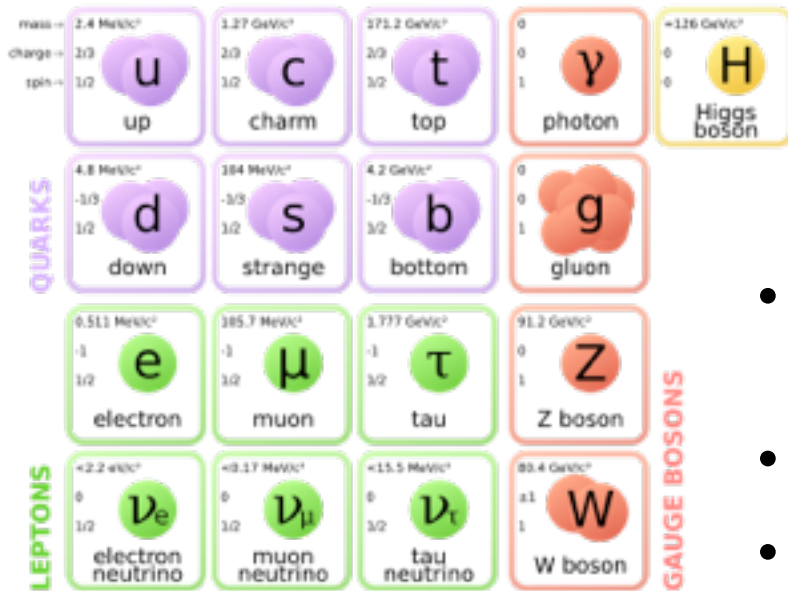


5

Conséquences pour la physique des particules?

- Le modèle standard et le Higgs
 - Rappel
 - au LHC
- Nouvelle physique
 - Quelles pistes?

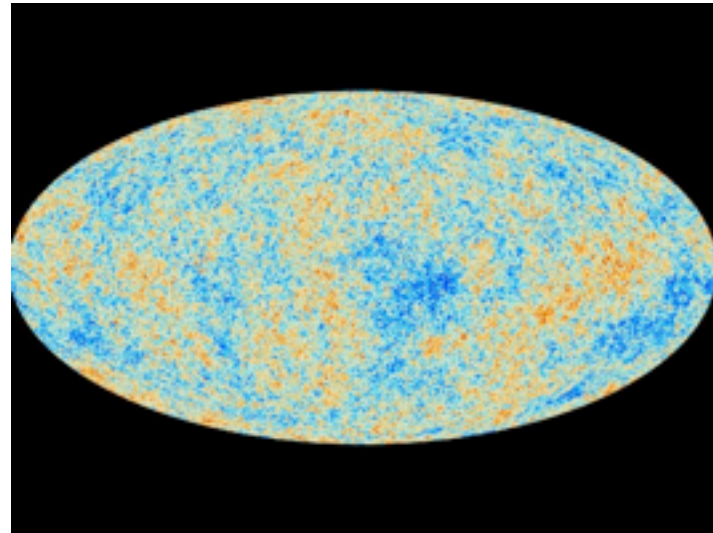
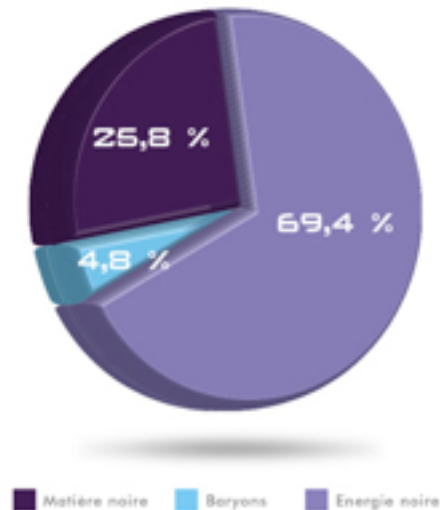
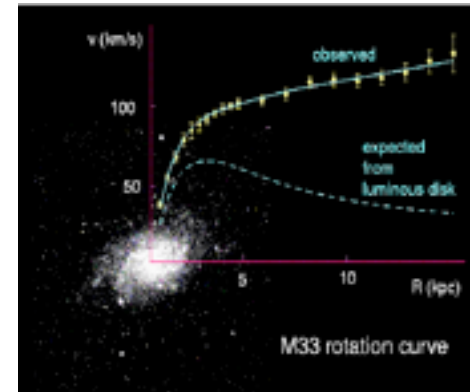
- Comprendre les lois fondamentales de la nature :
constituents élémentaires et forces fondamentales



- D'où vient la masse des particules élémentaires?
- Pourquoi ces masses
- Masse des neutrinos
- Unification des forces (y compris la gravité)
- Pourquoi 3 générations?

Univers

- Contenu masse et énergie de l'Univers
 - matière noire (cosmologie - WMAP et Planck- courbes rotation des galaxies, amas de galaxies ...)



- Asymétrie matière - anti-matière

Modèle standard

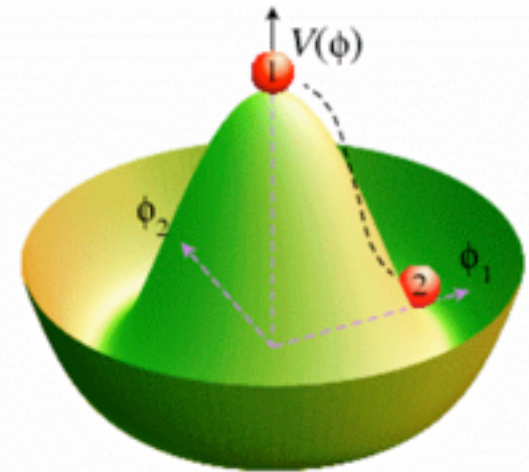
- En 1967 : Glashow-Weinberg-Salam propose le modèle standard: théorie de jauge SU(3)XSU(2)XU(1)
 - unification force electromagnetique et faible
- Utilise le mécanisme de Higgs (1964 - Brout, Englert, Higgs...)
 - Doublet scalaire

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

- brisure spontanée de symétrie

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H(x) \end{pmatrix}$$

- masse des bosons vecteurs (W,Z)

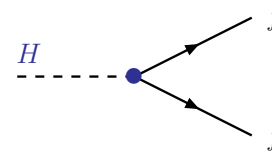


Higgs du Modèle Standard

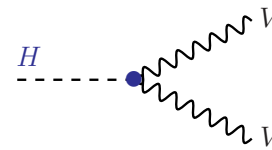
- Masse bosons jauge et fermions
- Masse Higgs $m_h^2 = 2\lambda v^2$

$$M_W = \frac{1}{2} v g_2 \qquad m_u = \frac{\lambda_u v}{\sqrt{2}}$$

- Couplages proportionnels à la masse

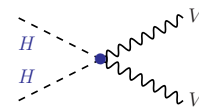


$$g_{Hff} = m_f/v$$

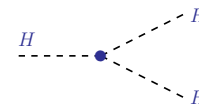


$$g_{HVV} = 2M_V^2/v$$

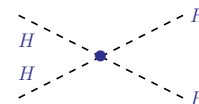
- Couplages quartiques et auto-couplages du Higgs
 - pas encore testé



$$g_{HHVV} = 2M_V^2/v^2$$

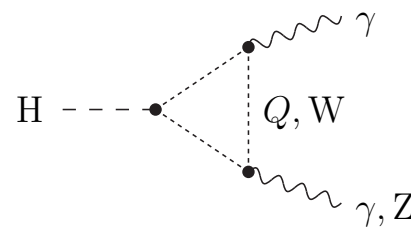
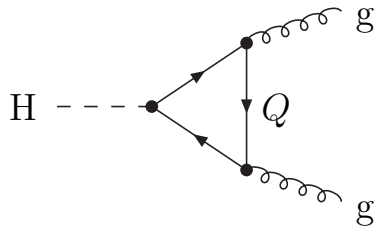


$$g_{HHH} = 3M_H^2/v =$$



$$g_{HHHH} = 3M_H^2/v^2$$

Couplages à une boucle



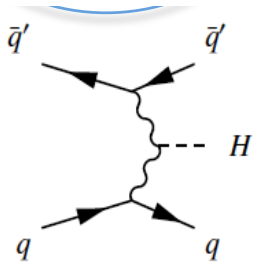
- hgg : contribution dominante top quark
- $h\gamma\gamma$: contribution dominante: W, boucle de top signe opposé

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{G_\mu \alpha^2 M_H^3}{128 \sqrt{2} \pi^3} \left| \sum_f N_c Q_f^2 A_{1/2}^H(\tau_f) + A_1^H(\tau_W) \right|^2$$

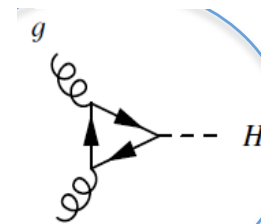
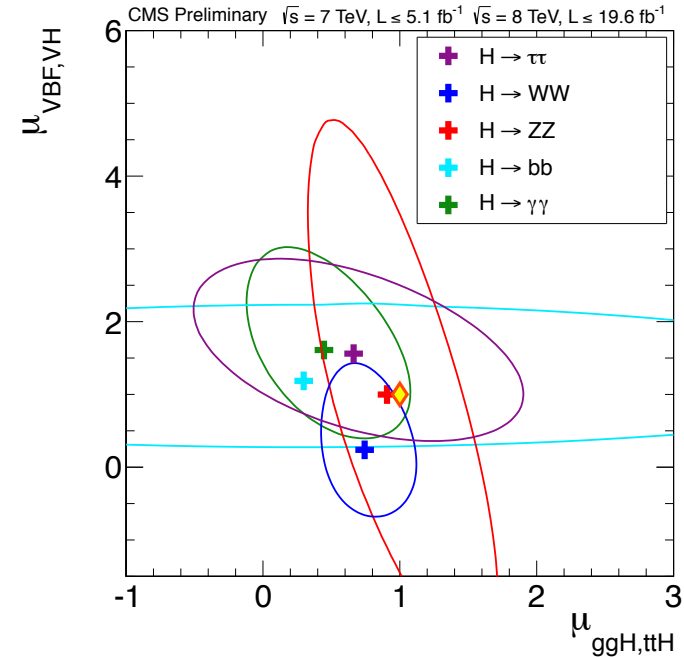
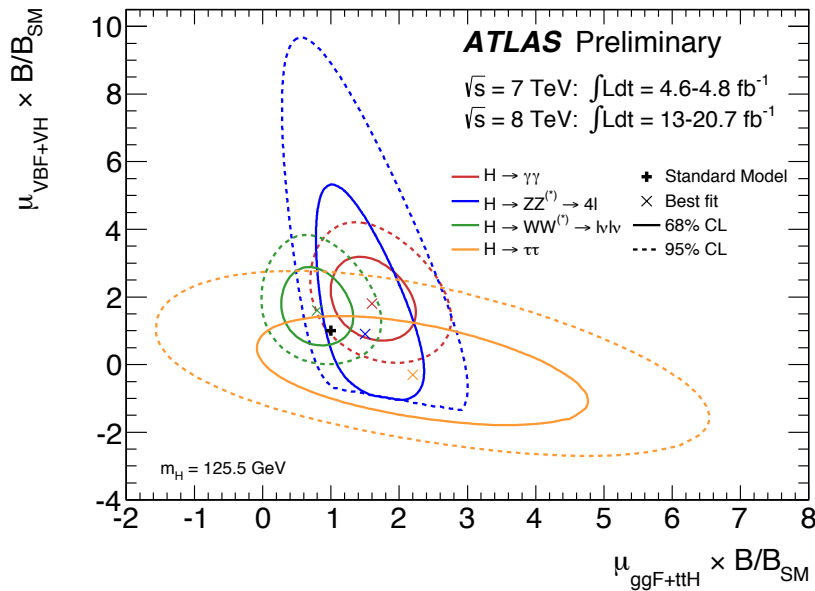
$\frac{4}{3}$
 -8

ATLAS - CMS

- Plusieurs mode de production et désintégration - résultats pour signal relatif au MS dans chaque canal (μ)

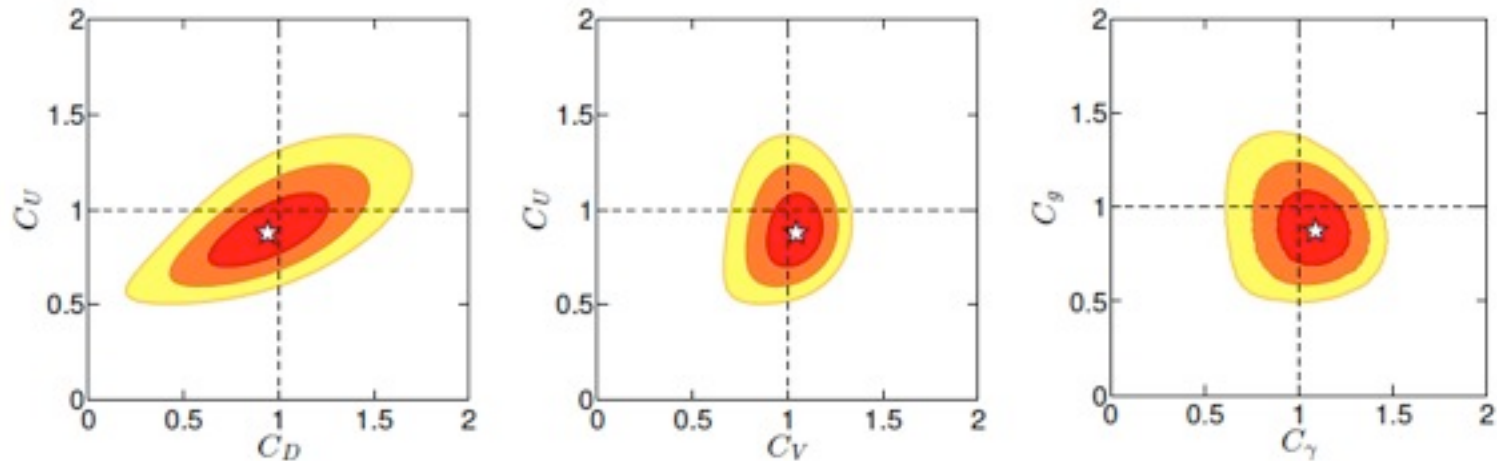


CMS



10

Couplages du Higgs



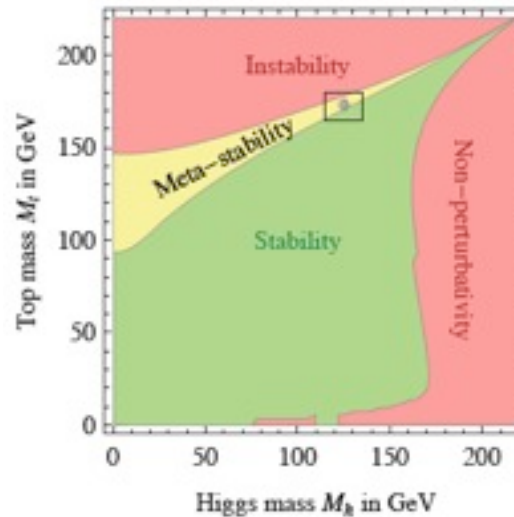
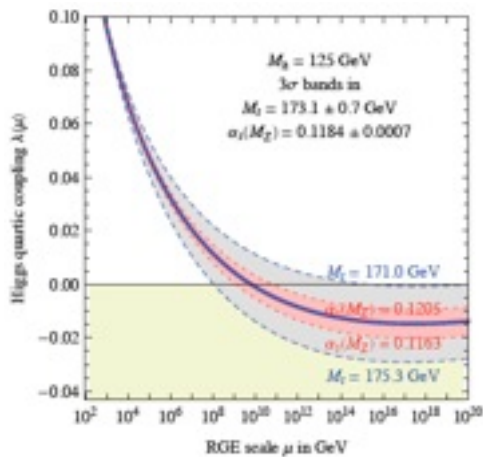
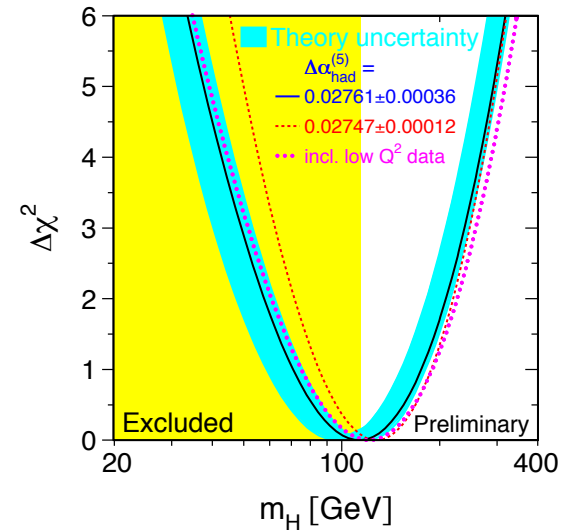
68%-95%-99%CL

GB et al, arXiv:1306.2941

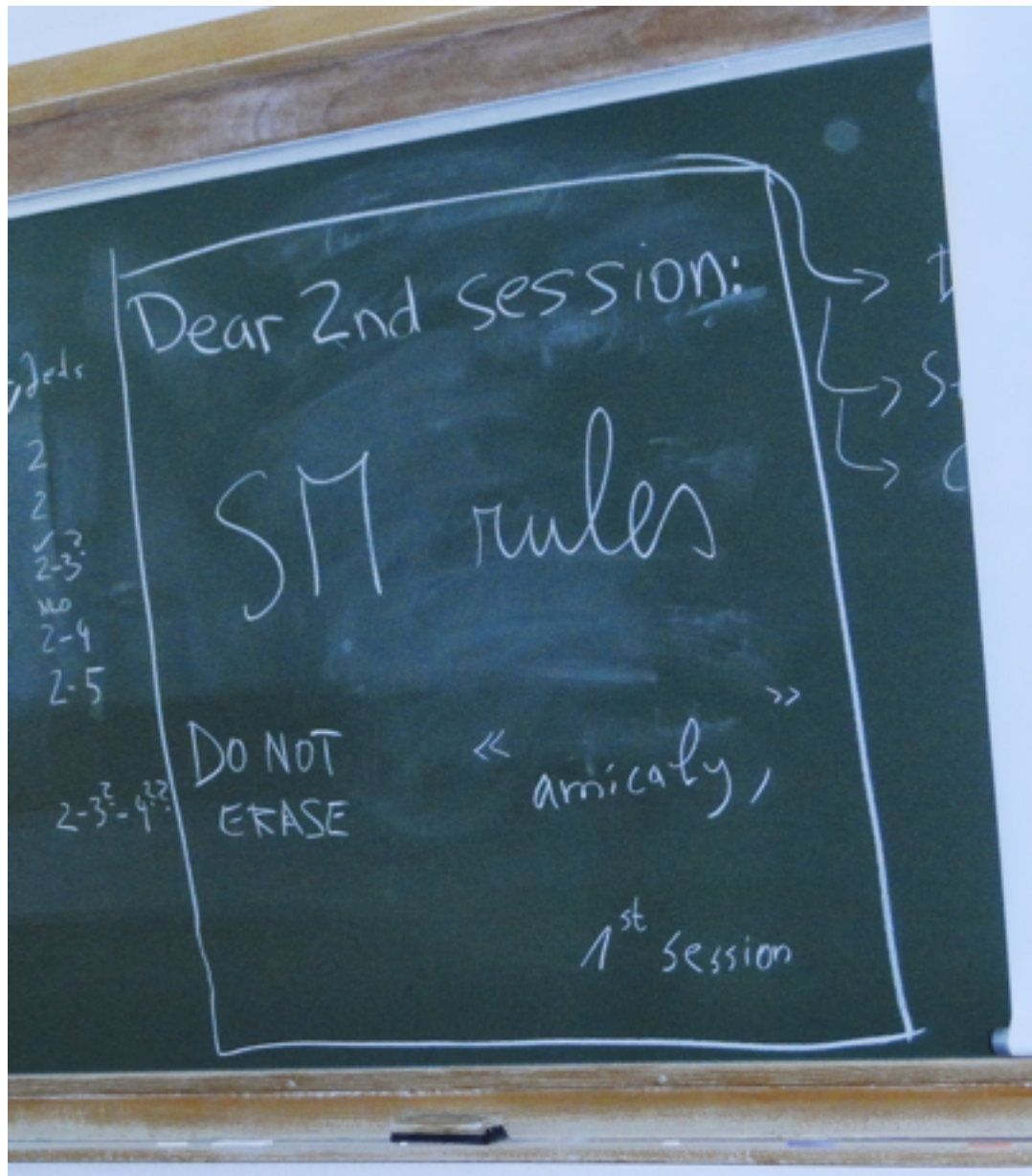
- Couplages compatibles avec MS (mais aussi avec plusieurs extensions du MS)
- Couplage proportionnel à la masse générique si relié au mécanisme pour induire les masses

Higgs à 125 GeV

- Une valeur en accord avec les mesures de précision - M_W , $\sin\theta_W$...
- Stabilité du potentiel de Higgs jusqu'à grande échelle?
 - $\lambda \rightarrow 0$ à M_{planck}
 - Sensible à masse top
 - métastable



Degrassi et al,
1205.6497



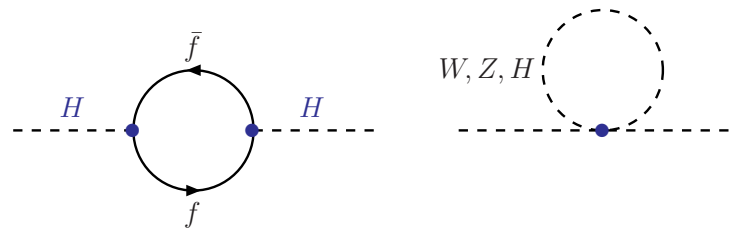
PhysTeV Workshop,
Les Houches, Juin 2013

Au-delà du modèle standard

- Plusieurs questions sans réponse
 - Unification, masses, neutrinos, 3 générations....
 - Matière noire
 - hiérarchie
- Quelle nouvelle physique?
 - Supersymétrie
 - Dimensions supplémentaires
 - Composite
 -
 - (pas technicouleur, Higgsless...)

Hiérarchie

- Pourquoi échelle électrofaible (100 GeV) \ll échelle Planck (10^{19} GeV)
- Pourquoi masse du Higgs ~ 100 GeV



- Corrections à masse du Higgs

$$M_H^2 = (M_H^0)^2 + \frac{3\Lambda^2}{8\pi^2 v^2}$$

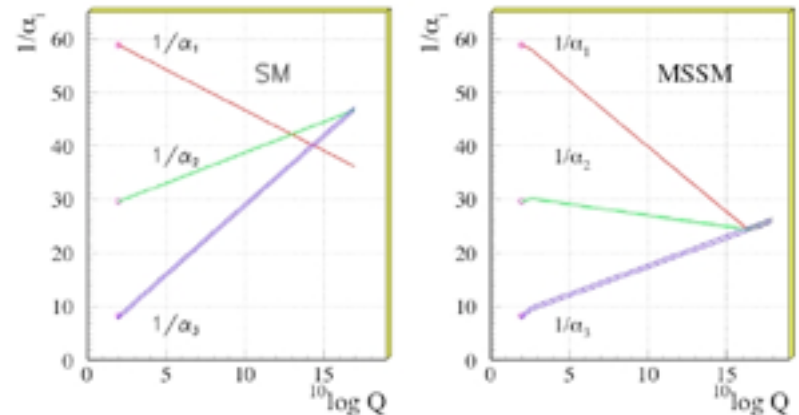
- Corrections quadratiques dépendent de Λ : réglage fin nécessaire pour assurer annulation des divergences quadratiques, masse renormalisée ~ 100 GeV

Solutions

- MS remplacé par autre théorie effective $\sim 1 \text{ TeV}$
 - masse Higgs protégée par une symétrie (par exemple supersymétrie)
 - Higgs ‘composite’
- ou MS remplacé par autre théorie effective à des échelles intermédiaires (‘little Higgs’)
- Echelle Planck/échelle cordes est seulement quelques TeV (dimension supplémentaires)

Supersymétrie

- Unification matière (fermions) et interactions (bosons médiateurs)
 - symétrie reliant fermion - boson
- Vers unification 4 forces
- Unification des couplages



- Prédiction : particules supersymétriques partenaires fermions et bosons - spin 1/2 : recherches au LHC - voir C. Collard

Supersymétrie

- Particules SUSY stabilisent la masse du Higgs
 - Si supersymétrie exacte : chaque scalaire annule exactement la contribution d'un fermion standard.
 - Brisure de supersymétrie : corrections à la masse du Higgs $\sim M_s^2$ - échelle brisure SUSY - divergences quadratiques s'annulent à tous les ordres si $M_s < \text{TeV}$
- Avec R-parité (pour éviter désintégration trop rapide du proton) particule susy la plus légère est stable: candidat matière noire (WIMP) : neutralino

$$\tilde{\chi}_1^0 = N_{11}\tilde{B} + N_{12}\tilde{W} + N_{13}\tilde{H}_1 + N_{14}\tilde{H}_2$$

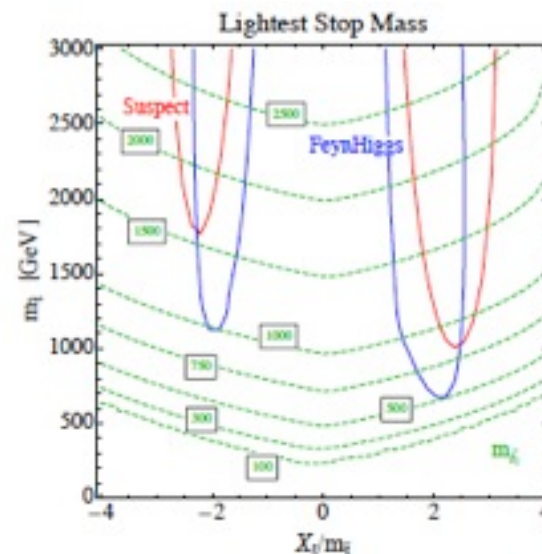
Higgs du MSSM

- Modèle supersymétrique standard minimal (MSSM)
 - seulement partenaires susy particules standard ET deux doublets de Higgs
- Limite supérieure sur m_h

$$m_h^2 \approx m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3}{(4\pi)^2} \frac{m_t^4}{v^2} \left[\ln \frac{m_t^2}{m_t^2} + \frac{X_t^2}{m_t^2} \left(1 - \frac{X_t^2}{12m_t^2} \right) \right]$$

- $m_h \sim 125$ GeV
 - X_t grand, $m_{\text{stop}} > 500$ GeV
- Stop lourd implique réglage fin

$$\delta m_{H_u}^2 \simeq -\frac{3f_t^2}{8\pi^2} (m_{Q_3}^2 + m_{U_3}^2 + A_t^2) \log \left(\frac{\Lambda}{M_{\text{SUSY}}} \right).$$



Hall, 1112.2703

- Brisure de symétrie électrofaible:

$$\frac{M_Z^2}{2} = \frac{m_{H_d}^2 + \Sigma_d^d - (m_{H_u}^2 + \Sigma_u^u) \tan^2 \beta}{\tan^2 \beta - 1} - \mu^2$$

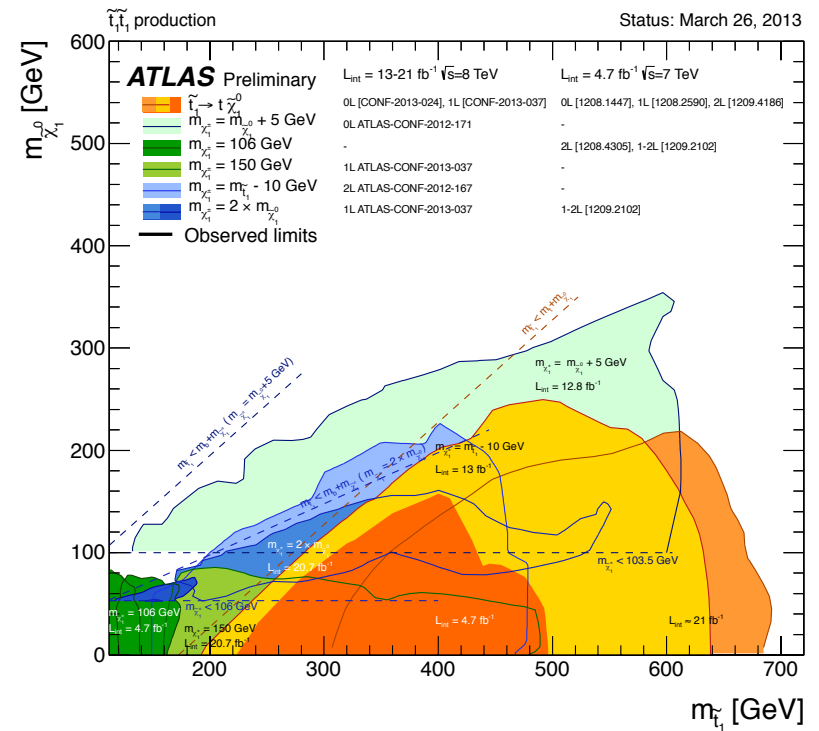
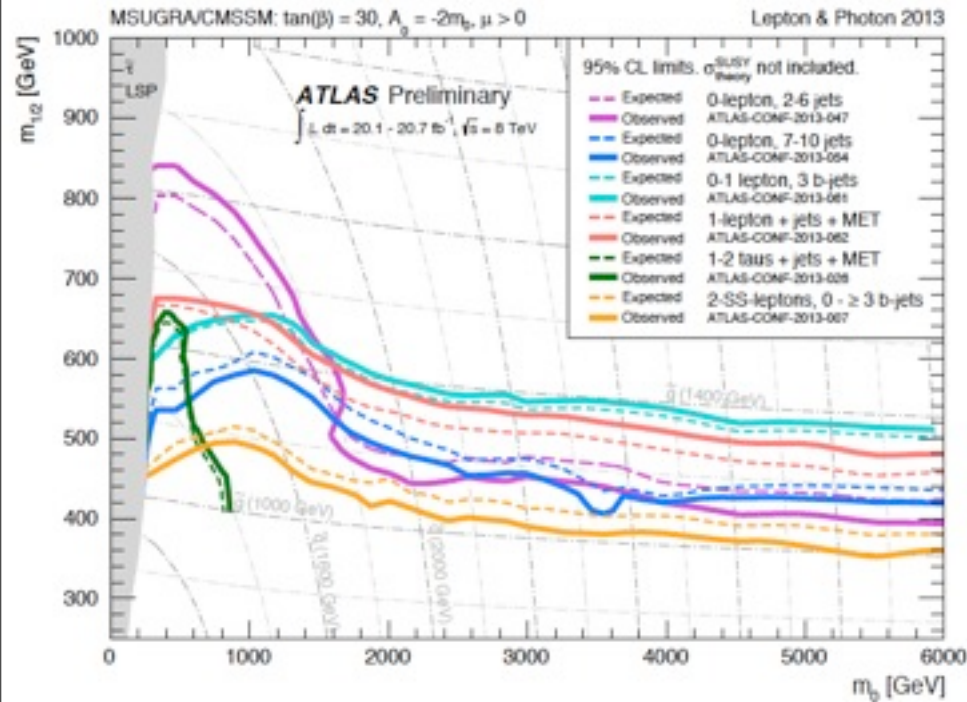
- $M_Z \sim 100$ GeV demande aussi μ petit
- Supersymétrie ‘naturelle’
 - Kitano, Namura, hep-ph/0602096



- μ petit \rightarrow 3 Higgsinos légers (et quasi dégénérés)

SUSY au LHC

- Pas de particules SUSY au LHC @7 et 8 TeV
- Contraintes plus fortes pour squarks 1ere génération

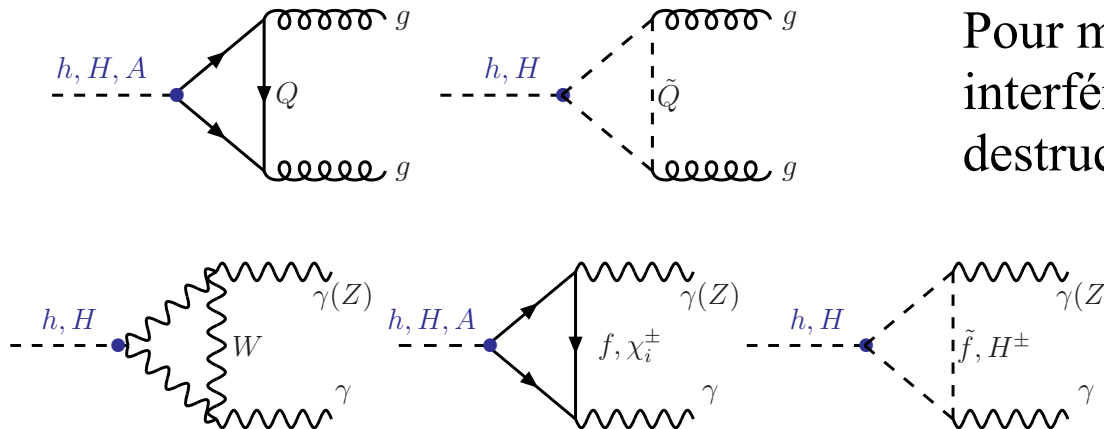


Higgs - MSSM

- Dans la limite du découplage ($\sin\alpha \rightarrow -\cos\beta$) : couplages à l'arbre du Higgs léger \sim couplages du Higgs standard

$$\frac{g_{W^+W^-h}}{g_{SM}} = \sin(\beta - \alpha), \quad \frac{g_{\bar{t}th}}{g_{SM}} = \frac{\cos\alpha}{\sin\beta}, \quad \frac{g_{\bar{b}bh}}{g_{SM}} = -\frac{\sin\alpha}{\cos\beta}.$$

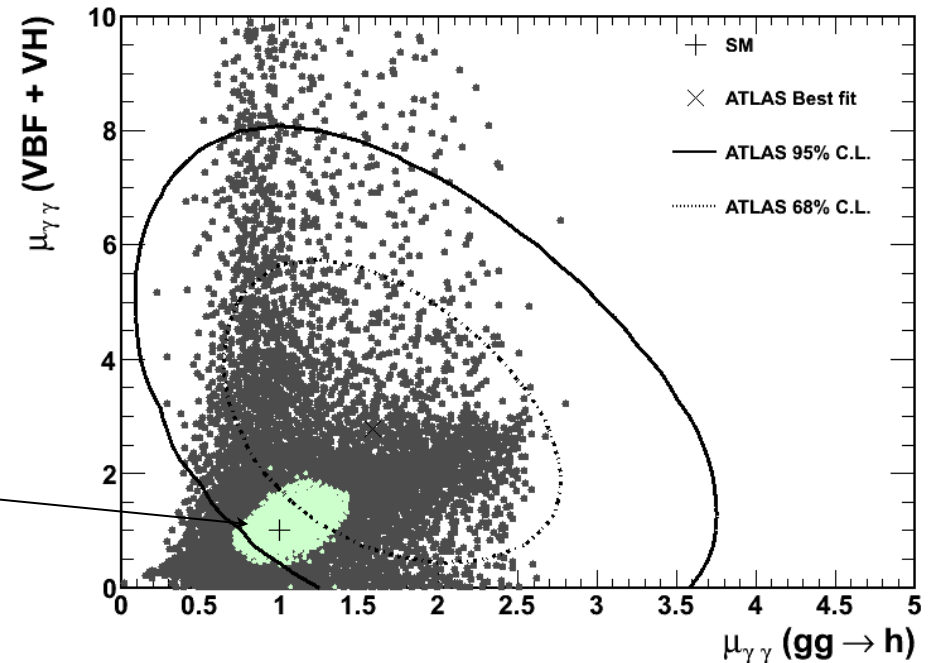
- Boucles : possibilité de corrections importantes des particules SUSY légères (stop, stau, chargino)



Pour $m_h=125$,
interférence
destructive stop/top

MSSM

- Fit pMSSM + couplages Higgs ATLAS (2012)
- Avec particules SUSY et Higgs2 de quelques centaines de GeV : couplages du Higgs à peu près standard



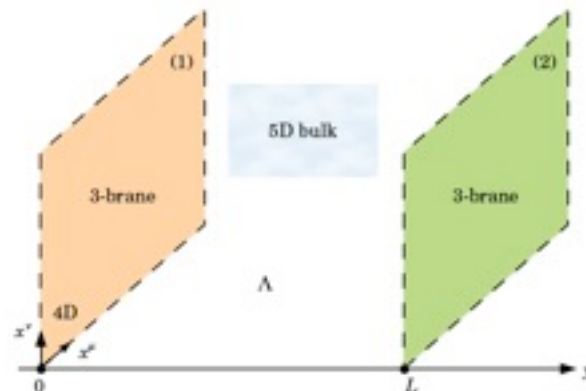
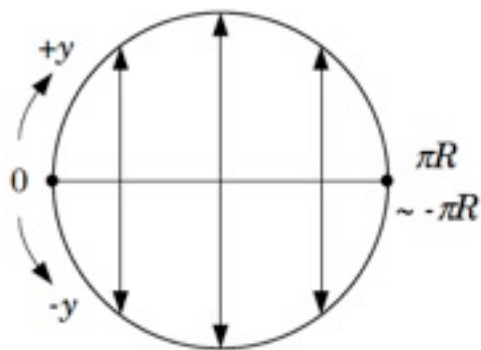
Arbey et al, 1212.4004

Supersymétrie

- Certains modèles SUSY sont fortement contraints par masse du Higgs + recherches infructueuses au LHC
 - CMSSM - relation entre masses des scalaires et limites LHC sur 1ere génération
- D'autres beaucoup moins (supersymétrie 'naturelle') - ou scénarios avec squark 3eme génération ou higgsino/jaugino/sleptons légers
- Extensions du MSSM (NMSSM) nécessitent moins de réglage fin

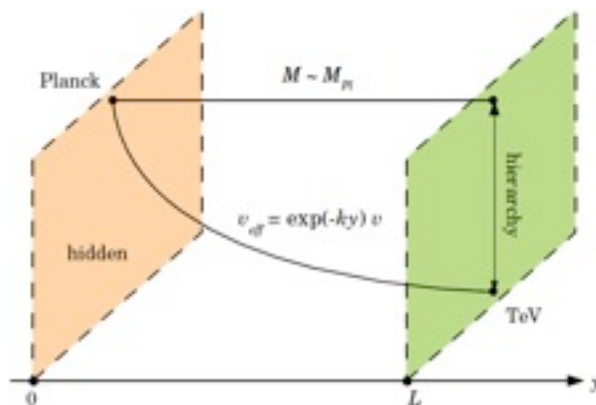
Dimensions supplémentaires

- Randall-Sundrum : une dimension supplémentaire compactifiée sur cercle S^1/Z_2



- métrique

$$ds^2 = e^{-2ky} (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu) - dy^2$$



- Décomposition de Kaluza Klein

$$\Psi(x^\mu, y) = \sum_n \psi_n(x_\mu) \cdot f_n(y)$$

- mode 0 : particule MS

- mode $n > 0$: particules Kaluza-Klein

- Conséquences au LHC

- Modification couplages hWW, hZZ, hff

- Modification couplages boucles (nouvelles particules)

- Fermions exotiques (t')

- Nouvelles particules de KK

Conclusion

- La découverte du Higgs : étape importante pour validation modèle standard
- Potentiel de découverte de nouvelle physique
LHC@13TeV + recherche de matière noire