

IFAC

Interactions Fondamentales, Astroparticules et Cosmologie

Responsable : Cyril Hugonie



Les membres permanents

■ Au L2C :

- Michele Frigerio : CR₂ CNRS (2010)
- Jean-Loïc Kneur : DR₂ CNRS (1992)
- Gilbert Moutaka : CR₁ CNRS (1989)
- David Polarski : PR₁ UM₂ (2002)

■ Au LUPM :

- Michel Capdequi-Peyranère : MCFHC UM₂ (1972)
- Pierre Grangé : DREM CNRS (1993)
- Cyril Hugonie : MCF UM₂ (2005)
- Karsten Jedamzik : CR₁ CNRS (2001)
- Julien Lavalle : CR₁ CNRS (2011)
- Stephan Narison : DR₁ CNRS (1983)
- Fernand Renard : DREM CNRS (1968)

Les membres non-permanents

■ Post-docs :

- A. Villanova del Moral : post-doc IN2P3 puis ATER UM2 (2009)

■ Thésards :

- B. Mutet : P. Grangé et J. F. Mathiot (LPC Clermont), soutenue 01/2011
- G. Espitalier-Noël : C. Hugonie et J.L. Kneur, soutenue 11/2012
- M. Ughetto : G. Moulta et L. Vacavant (CPPM), 2011 (bourse IN2P3/INP)
- S. Magni : J. Lavalle, 2012 (bourse IN2P3/UM2)
- A. Rabemananjara et F. Fanomezana (iHEP-MAD) : S. Narison, 2010
- R. Albuquerque : S. Narison et M. Nielsen (Sao Paulo), soutenue 02/2013
- J. Ramadan : M. Capdequi-Peyranère et M. Chabab (Marrakech), 2009
- L. Rahili : G. Moulta et A. Arhrib (Tanger), 2009 (financement LIA-ILCP)

■ Etudiants de Master 2 :

- 2011 : M. Ughetto, S. Bonnefoy
- 2012 : D. Veissi, M. Mikolajczak
- 2013 : N. Bizot (futur thésard IFAC/L2C)

Rayonnement académique

- **LabEx OCEVU** (*Origines, Constituants, EVolution de l'Univers*, 2012-2020) : toute l'équipe est impliquée, C. Hugonie et J. Lavalley sont membres du CS
- **PEPS IFAC-CPPM** (INP-IN₂P₃, 2010-2011) : mis en oeuvre par C. Hugonie, J.L. Kneur, G. Moulaka avec le groupe ATLAS-CPPM
- **GDR Terascale** (2008-2012, renouvelé pour 2013-2017) : C. Hugonie, J.L. Kneur (membres du conseil de groupement), G. Moulaka (directeur)
- **Théorie-LHC-France** (IN₂P₃) : post-doc d'A. Villanova del Moral
- **Comité de Financement de la Théorie** (IN₂P₃) : C. Hugonie (depuis 2012)
- **LIA-ILCP** (France/Maroc/Suède, 2009-2013) : C. Hugonie, M. Capdequi-Peyranère, G. Moulaka, J. Ramadan, L. Rahili
- **FAPESP** "*Exotic Heavy Hadrons*" (2010-2012) : S. Narison, M. Nielsen, F. Navara, R. Albuquerque (Sao Paulo)
- **PICS** "*Light Scalar Mesons*" (2010-2012) : S. Narison, R. Kaminski (Varsovie)
- **ANRJ** "*Test et Analyse de la Physique Au-delà du Modèle Standard*" (2009-2013) : C. Hugonie, Y. Mambrini, G. Moreau et A. Djouadi (LPT Orsay)
- **Comité ANR SIMI-5** : J. Lavalley (depuis 2013)

Production scientifique

■ Conférences, séminaires :

- **QCD** (Montpellier, 2012) et **HEPMad** (Madagascar, 2011 et 2013) : S. Narison
- **Workshops** "*Cosmic-ray physics and dark matter searches*" (2012) et "*News from the Dark*" (2013) : J. Laval (financement IN2P3/UM2)
- **Rencontres de physique des particules** (2012), **GDR Terascale** (2013) : C. Hugonie, J. Laval, J.L. Kneur, G. Moulaka, M. Frigerio (LOC)
- K. Jedamzik : comité d'organisation de **Lithium in the Cosmos**, Paris (2012) et **Identification of Dark Matter**, Chicago (2012)
- ~30 séminaires/an communs IFAC LUPM/L2C + journal club hebdomadaire

■ Publications :

- **Côté LUPM** : 5 preprints (papiers soumis en 2013)
32 publications dans des revues avec comité de lecture
8 communications avec actes (dont QCD12 et HEPMad11)
5 communications sans actes et conférences invitées
Total : 45 publications pour 7 permanents sur 2 ans
- **Côté L2C** : 21 publications pour 4 permanents sur 2 ans

**Pas de
non-publiant**

Formation, communication

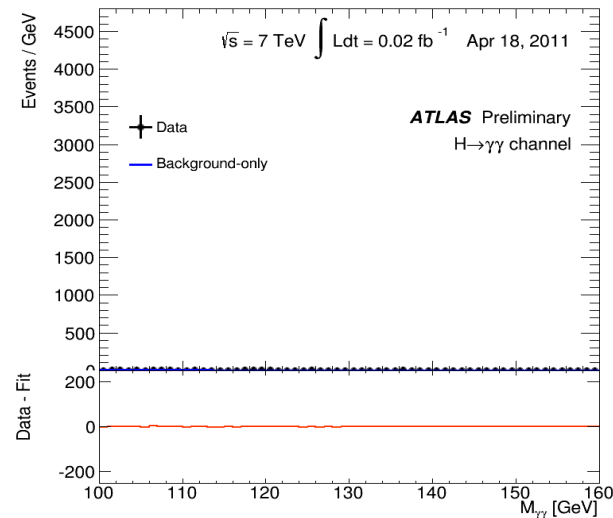
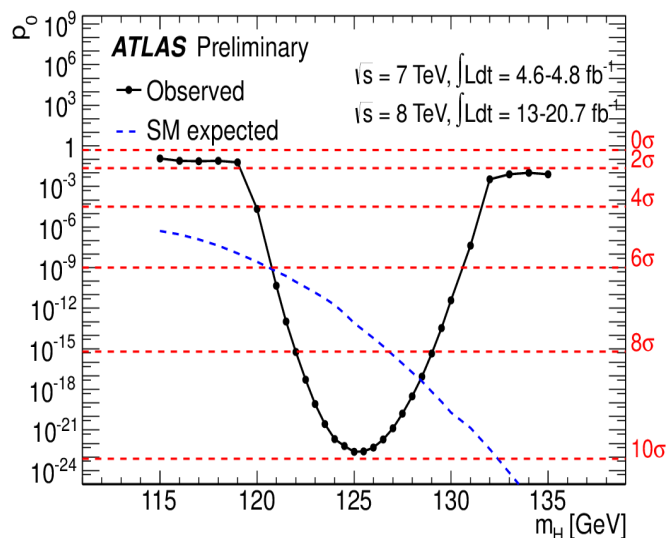
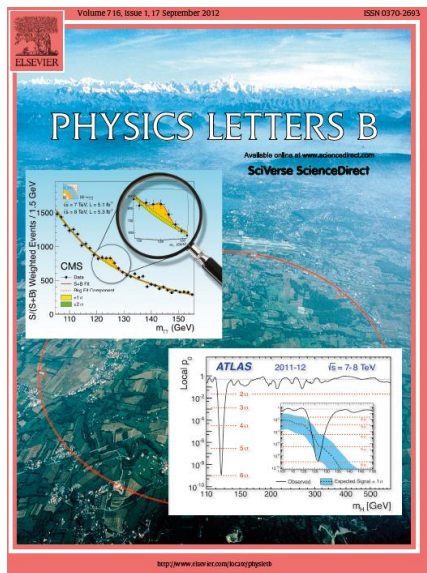
- **Master Cosmos Champs et Particules** : responsable C. Hugonie (depuis 2009)
Enseignants : M. Capdequi-Peyranère, J. Lavalley, G. Moulaka, D. Polarski
2010-2011 : 10 étudiants, 8 thèses
2011-2012 : 8 étudiants, 4 thèses
2012-2013 : 12 étudiants, 10 thèses (?)
Étudiants participant au rayonnement national et international de l'équipe !
- **Écoles de Physique** :
 - African School of Physics : S. Narison (comité international)
 - École de Physique des Astroparticules : J. Lavalley (comité scientifique)
 - École de GIF de Physique : C. Hugonie (comité d'organisation)
- **Communication** :
 - Participations à la *Fête de la Science*, interventions dans les Lycées, conférences grand public, interviews dans la presse/radio locale...
 - C. Hugonie : *Le boson de Higgs*, Agora des Savoirs (Montpellier, 12/2012)
 - J. Lavalley : *L'énigme de la matière noire*, Planétarium de Montpellier (04/2013) et hors-série Pour la Science 2012, 'Les trous noirs de masse intermédiaire'

Thématiques de recherche

- **Théorie quantique des champs (1+1)**
Approches non-perturbatives, transitions de phase à température/densité finie, aspects formels, quantifications alternatives
- **QCD non-perturbative (1)**
Méthode des règles de somme spectrale (Schifman, Vainshtein, Zakharov, 72), applications au calcul du spectre et des propriétés des hadrons, tests de précision
- **Théorie et phénoménologie au-delà du Modèle Standard (5+3)**
Extensions supersymétriques du MS : minimale (MSSM) ou non-minimale (NMSSM), modèles de brisure de la supersymétrie, théories GUT, physique des saveurs (neutrinos), modèles composites, calcul de spectre par des codes dédiés (SuSpect, NMSSMTools), phénoménologie aux accélérateurs et complémentarité par recherche de matière noire
- **Physique des astroparticules (3+2)**
Matière noire supersymétrique (neutralinos, gravitinos, singlinos) ou composite, thermique (WIMPs) ou non-thermique (FIMPs), détection directe/indirecte, rayons cosmiques
- **Cosmologie (1+1)**
Energie noire, modèles d'inflation, expansion de l'univers et croissance des perturbations, ondes gravitationnelles, champs magnétiques cosmologiques, nucléosynthèse primordiale, méthodes analytiques en magnéto-hydrodynamique, modèles de gravitation modifiée

Contexte scientifique

■ Une découverte majeure annoncée le 04/07/2011



Résultats présentés à Moriond (03/2013)

■ Un nouveau boson de masse ~ 125.6 GeV a été observé !

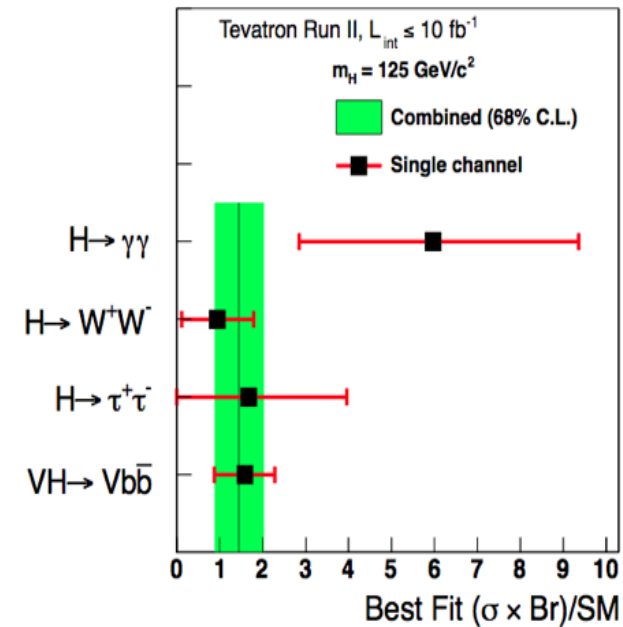
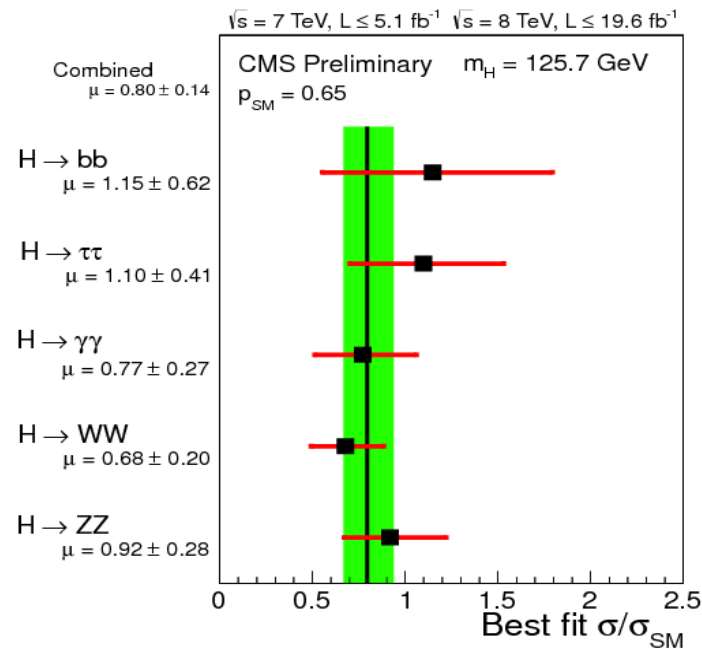
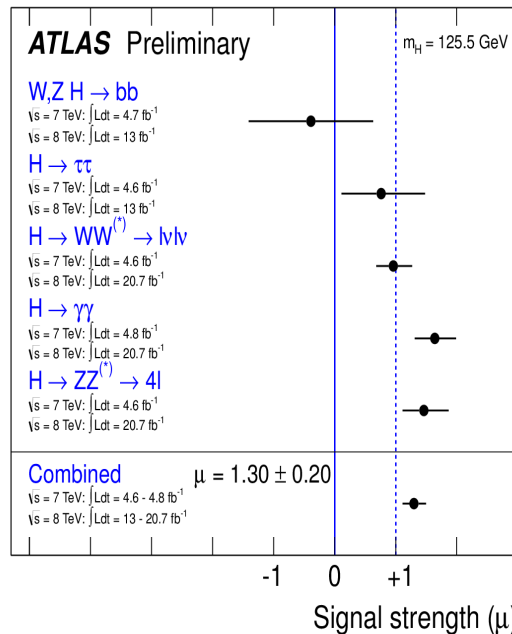
Résultats confirmés par le Tevatron (compétitif sur bb , excès en $\gamma\gamma$)

➤ Est-ce le boson de Higgs du Modèle Standard ?

- ✓ Vérifier son spin/parité (0^+), pas de surprise attendue de ce côté-là
- ✓ Vérifier ses modes de production/désintégration (ses couplages)
- ✓ Vérifier le mécanisme de Higgs (auto-couplage) : TLEP/VHE-LHC ?

Canaux de désintégration

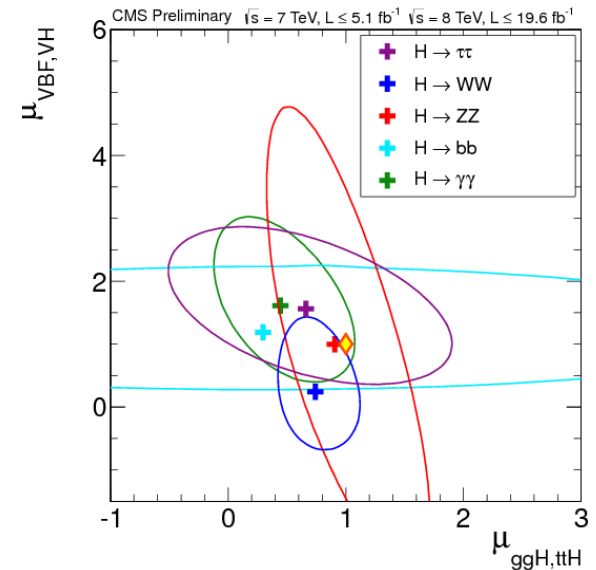
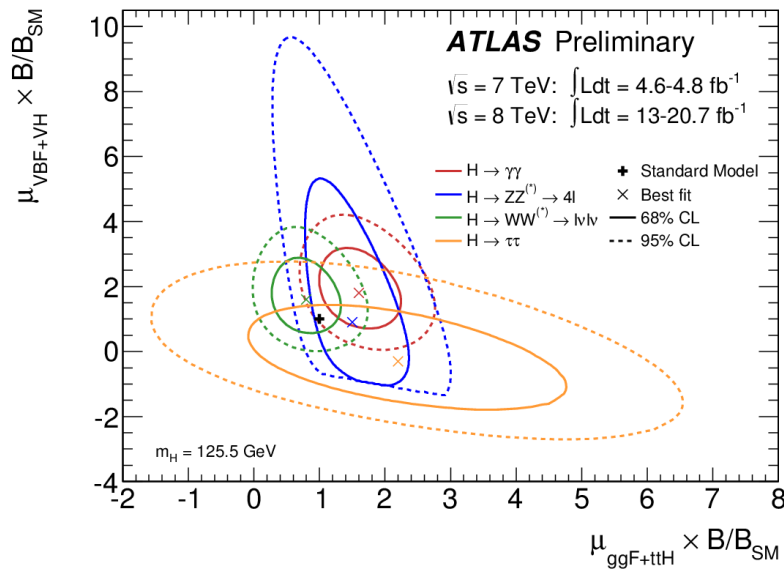
Observé dans divers canaux :
$$\mu_i = \frac{[\sum_j \sigma_{j \rightarrow h} \times \text{Br}(h \rightarrow i)]_{\text{observed}}}{[\sum_j \sigma_{j \rightarrow h} \times \text{Br}(h \rightarrow i)]_{SM}}$$



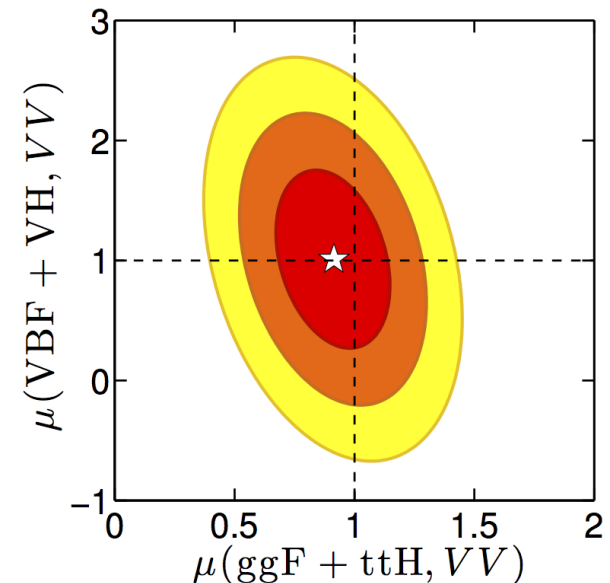
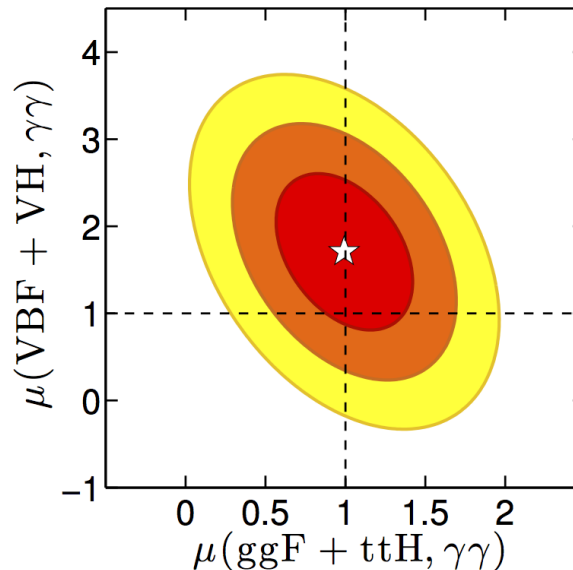
Cependant la “Nouvelle Physique” peut modifier la désintégration du Higgs mais aussi sa production !

Modes de production

- Les résultats d'ATLAS/CMS les + utiles pour un théoricien :



- Combinaison obtenue par B. Dumont (ex CCP) thésard de S. Kraml en collab. avec G. Bélanger, U. Ellwanger et J. Gunion



Au-delà du Modèle Standard

- (Presque) tout semble indiquer que le MS est correct.
C'est une théorie renormalisable. Fin mot de l'histoire ?
- Oui, s'il n'y a pas de Nouvelle Physique à une échelle Λ_{NP}
 - ❑ Trivialité ($\lambda < +\infty$) : pas d'information sur Λ_{NP} ($> \Lambda_{\text{Planck}}$)
 - ❑ Stabilité ($\lambda > 0$) : le vide électrofaible est méta-stable...
 - ☑ Gravitation quantique : nouveau paradigme au-delà de Λ_{Planck}
 - ☑ Baryogénèse : transition de phase électrofaible pas assez forte
 - ☑ Matière Noire : pas de candidat dans le Modèle Standard
 - ☑ Saveurs : masse des neutrinos, familles, hiérarchie de masse...
 - ☑ Théorie GUT : unification imparfaite, désintégration du proton
- **Problème de Hiérarchie** : $\delta M_h^2 \sim \Lambda_{\text{NP}}^2$

Supersymétrie (Susy)

- Extension non-triviale la plus générale de Poincaré
- Algèbre de Lie graduée : $Q|F\rangle = |B\rangle$, $Q|B\rangle = |F\rangle$
- Susy locale fait apparaître la gravitation (SuGra)
- Extension Susy minimale du Modèle Standard :
 - fermions du MS (quarks, leptons) \Leftrightarrow sfermions (spin 0)
 - bosons de jauge, Higgs \Leftrightarrow gauginos, higgsinos (spin 1/2)
 - 2 doublets de Higgs \Rightarrow 2 scalaires (h, H) + 1 pseudoscalaire (A)
- Solution technique au pb de hiérarchie : $\delta M_h^2 \sim m_B^2 - m_F^2$
- Théories GUT cohérentes ($\Lambda_{\text{GUT}} \sim 10^{16}$ GeV, $\tau_{\text{proton}} > 10^{32}$ années)
- Baryogénèse possible (transition de phase du 1^{er} ordre)
- LSP (particule Susy la + légère) : candidats matière noire

Modèle SuperSymétrique Minimal (MSSM)

- F. Renard très actif sur le sujet (6 papiers depuis 2011 !)
 - **Détermination du paramètre $\tan\beta$** ($= v_u/v_d$) par mesure de l'asymétrie $A_{LR}(t)$ dans $bg \rightarrow tH^- + R_{bb}$ par mesure de $A_{LR}(Z)$ dans $bg \rightarrow bZ$ (LHC)
 - **Supersimplicité** : SUSY confère aux amplitudes de diffusion électrofaibles à haute énergie des propriétés remarquables de conservation d'hélicité. Les processus $gg \rightarrow VV'$ ou $\chi\chi'$ (LHC) et $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$ ou W^+W^- (ILC) = test de SUSY vs MS ou autres extensions
- **Le code SuSpect**, largement utilisé par la communauté
 - Calculer les masses/couplages des sparticules à partir des paramètres de brisure de Susy à l'échelle Λ_{GUT} (eq. du groupe de renormalisation)
 - Développé à partir de 1997 par A. Djouadi, J.L. Kneur, G. Moultaka
 - Réécrit en **C++** en collaboration avec D. Zerwas (LAL) et M. Ughetto (thèse IFAC/CPPM) : automatisation et flexibilité (nouveaux modèles)
 - **Collaboration IFAC/ATLAS-CPPM** autour de la recherche du Higgs et des sparticules bientôt renforcée par un **post-doc du LabEx OCEVU**

Extension non-minimale (NMSSM)

- Secteur de Higgs étendu : 2 doublets H_u, H_d + 1 singlet S
- Solution au problème μ du MSSM : $\mu \sim \Lambda_{\text{weak}} \sim \Lambda_{\text{Susy}}$?
 - $\mu = 0$: exclu expérimentalement
 - $\mu = \Lambda_{\text{Planck}}$: problème de hiérarchie

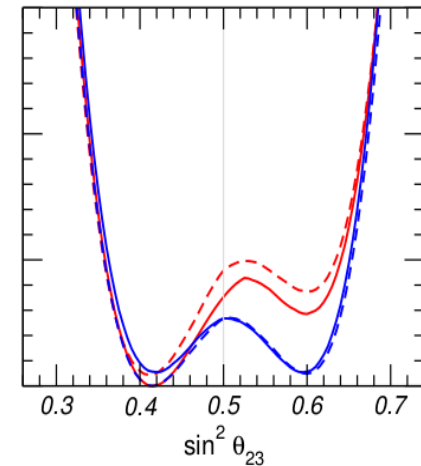
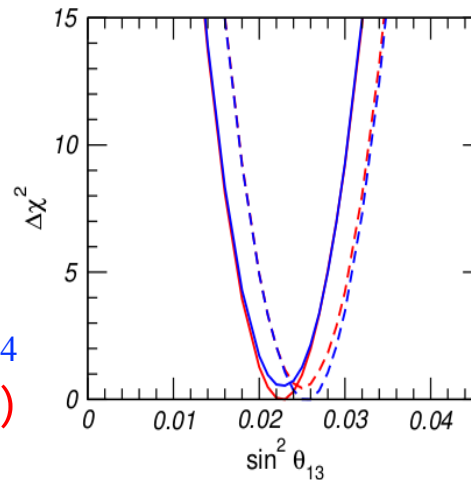
On remplace $\mu H_u H_d$ par $\lambda S H_u H_d \Rightarrow$ après brisure électrofaible $\mu_{\text{eff}} = \lambda \langle S \rangle \sim \Lambda_{\text{weak}}$
- + 2 Higgs par rapport au MSSM (3 scalaires, 2 pseudoscalaires, 1 chargé)
- + 1 neutralino (singlino) \Rightarrow **phénoménologie plus riche** (\supset MSSM)
 - singlino LSP \Rightarrow cascade supplémentaire dans la production de sparticules
 - Higgs (\sim singlet) très léger non exclu par LEP (difficile à produire au LHC)
 - masse du Higgs doublet le plus léger plus élevée que dans le MSSM ($< M_Z$!)
- Développement du **code NMSSMTools** (équivalent de SuSpect)
 - Etude de l'impact de la non-observation de sparticules au LHC (U. Ellwanger, G. Espitalier-Noël, C. H.) : **fine-tuning moins important que dans le MSSM**
 - Un Higgs à 125 GeV avec un taux en $\gamma\gamma$ plus important que dans le MS s'obtient de façon naturelle, à condition d'avoir un **autre Higgs plus léger** (e.g. 100 GeV)

Modèles composites

- Pour protéger la masse du boson Higgs on peut aussi supposer que ce n'est pas un état fondamental mais **composite** ($h \sim \bar{\psi}\psi$)
- Idée inspirée de QCD où on a des scalaires légers sans problème de hiérarchie : $m_\pi < \Lambda_{\text{QCD}} \ll \Lambda_{\text{Planck}} \Leftrightarrow$ apparaissent pour $\alpha_s \gg 1$
QCD + (u,d) : symétrie globale accidentelle $SU(2)_L \times SU(2)_R \rightarrow SU(2)_V$ par $\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$
 \Rightarrow 3 bosons de Goldstone (π) mais $m_\pi \sim m_q$ car m_q brise explicitement $SU(2)_L \times SU(2)_R$
- On suppose que le Higgs est un **pseudo-Goldstone** d'une symétrie globale brisée par le condensat d'une nouvelle interaction forte
 - modèle minimal : $SO(5) \rightarrow SO(4)$, 4 bosons de Goldstone = 1 doublet de Higgs h
 - matière noire : $SO(6) \rightarrow SO(5)$, 5 bosons de Goldstone = 1 doublet h + 1 singlet η
- M. Frigerio, J.L. Kneur + **1 thèse LabEx** avec le CPT Marseille
+ collaboration avec le groupe ATLAS-CPPM (**post-doc LabEx**)

Masses des neutrinos

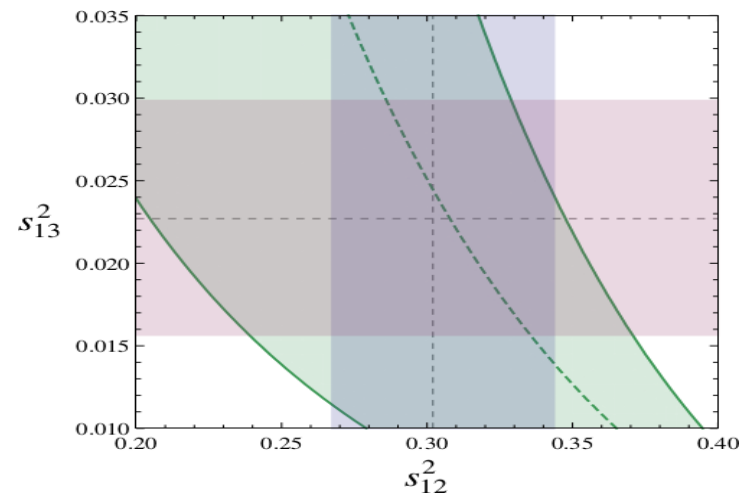
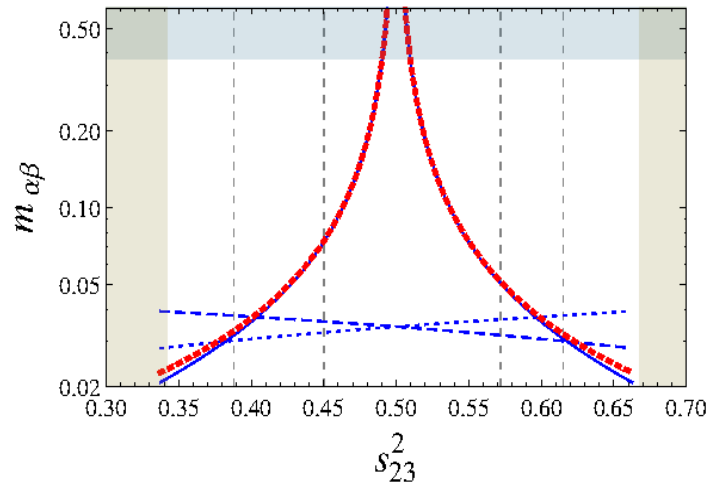
- Daya Bay (2012) : $\theta_{13} \neq 0$
 \Rightarrow fits exp. : $\theta_{23} \neq 45^\circ$
 Prédictions th. : $\theta_{23} = 45^\circ$
- Modèles pour obtenir cela
 avec à des symétries Q_6, A_4
 (A. Villanova et M. Frigerio)



--- hiérarchie
 inverse
 --- normale

- $m = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & 0 & d \\ c & d & 0 \end{pmatrix}$

- $m = \begin{pmatrix} a & b & c \\ b & a & d \\ c & d & a \end{pmatrix}$



Triplet de Higgs

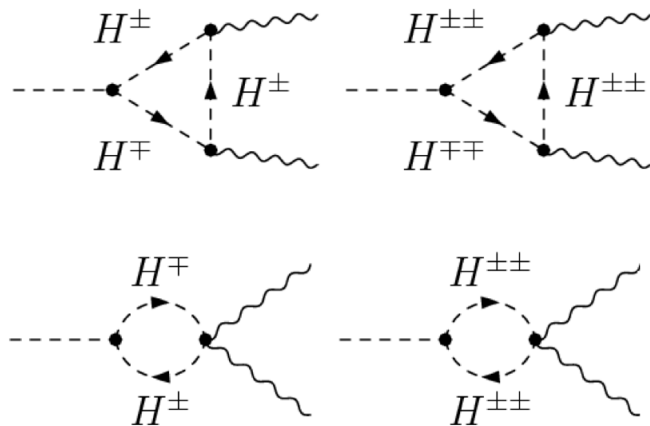
- Apparaissent dans les modèles de masse des neutrinos (see-saw de type II) :

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \supset L^T C \otimes i \sigma^2 \Delta L \quad \text{où } Y_{\Delta} = 2 \Rightarrow \Delta = \begin{bmatrix} \delta^+ & \delta^{++} \\ \delta^0 & -\delta^+ \end{bmatrix} \text{ en plus du doublet } H = \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{bmatrix}$$

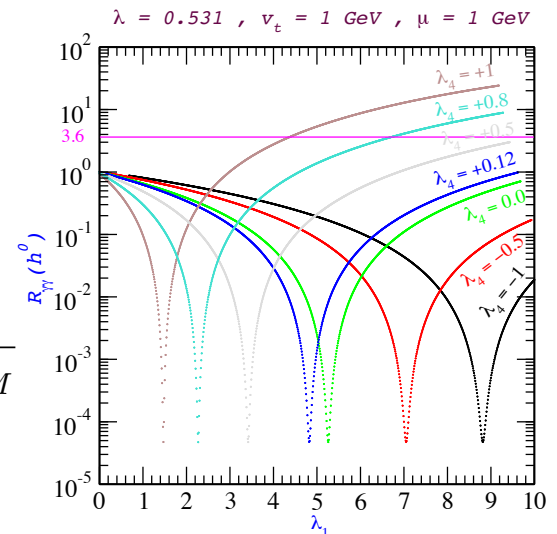
- Le modèle comporte 8 paramètres dont 1 est fixé par M_Z (7 sont libres):

$$V(H, \Delta) = -m_H^2 H^\dagger H + M_\Delta^2 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + [\mu (H^T i \sigma^2 \Delta^\dagger H) + \text{h.c.}] + \frac{\lambda}{4} (H^\dagger H)^2 \\ + \lambda_1 (H^\dagger H) \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_2 (\text{Tr} \Delta^\dagger \Delta)^2 + \lambda_3 \text{Tr}(\Delta^\dagger \Delta)^2 + \lambda_4 H^\dagger \Delta \Delta^\dagger H$$

+ 7 états physiques (**h**, **H**, **A**, **H[±]**, **H^{±±}**) contribuant à la boucle $h \rightarrow \gamma\gamma$:



$$R_{\gamma\gamma} = \frac{\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma)_{SM}}$$



[M. Capdequi-Peyranère, G. Moulta, J. Ramadan, L. Rahili...]

Autres thématiques

- **QCD non-perturbative** ou comment calculer les propriétés des hadrons en utilisant la technique des règles de somme (S. Narison)
- Reformulation mathématique de la **théorie quantique des champs** en tant que distributions à valeurs d'opérateurs (P. Grangé)
- **Cosmologie** : nucléosynthèse primordiale, problème du ${}^7\text{Li}$, origine et évolution des champs magnétiques, méthodes semi-analytiques en Magnéto-Hydro Dynamique (K. Jedamzik)
- **Astroparticules** : Matière noire, détection directe et indirecte, mécanismes alternatifs de production dans l'univers primordial, propagation des rayons cosmiques (J. Lavalle, K. Jedamzik)