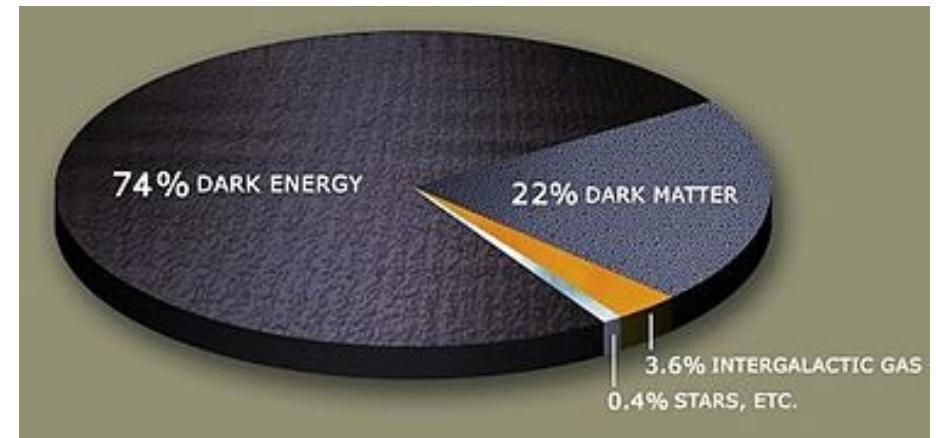
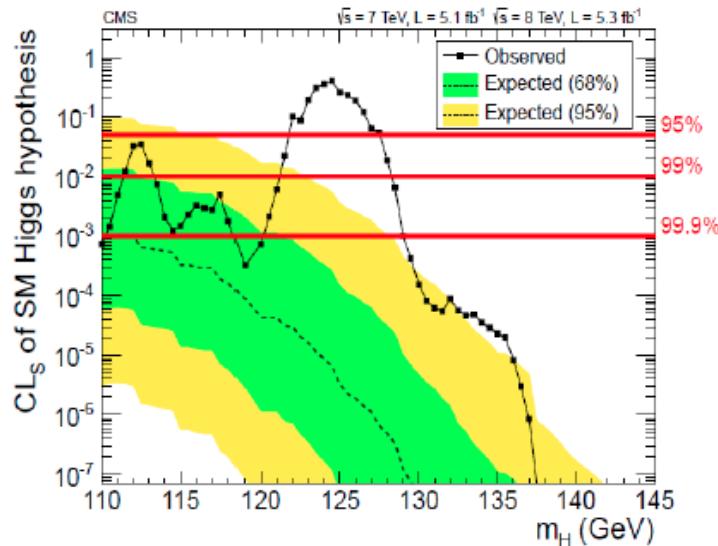
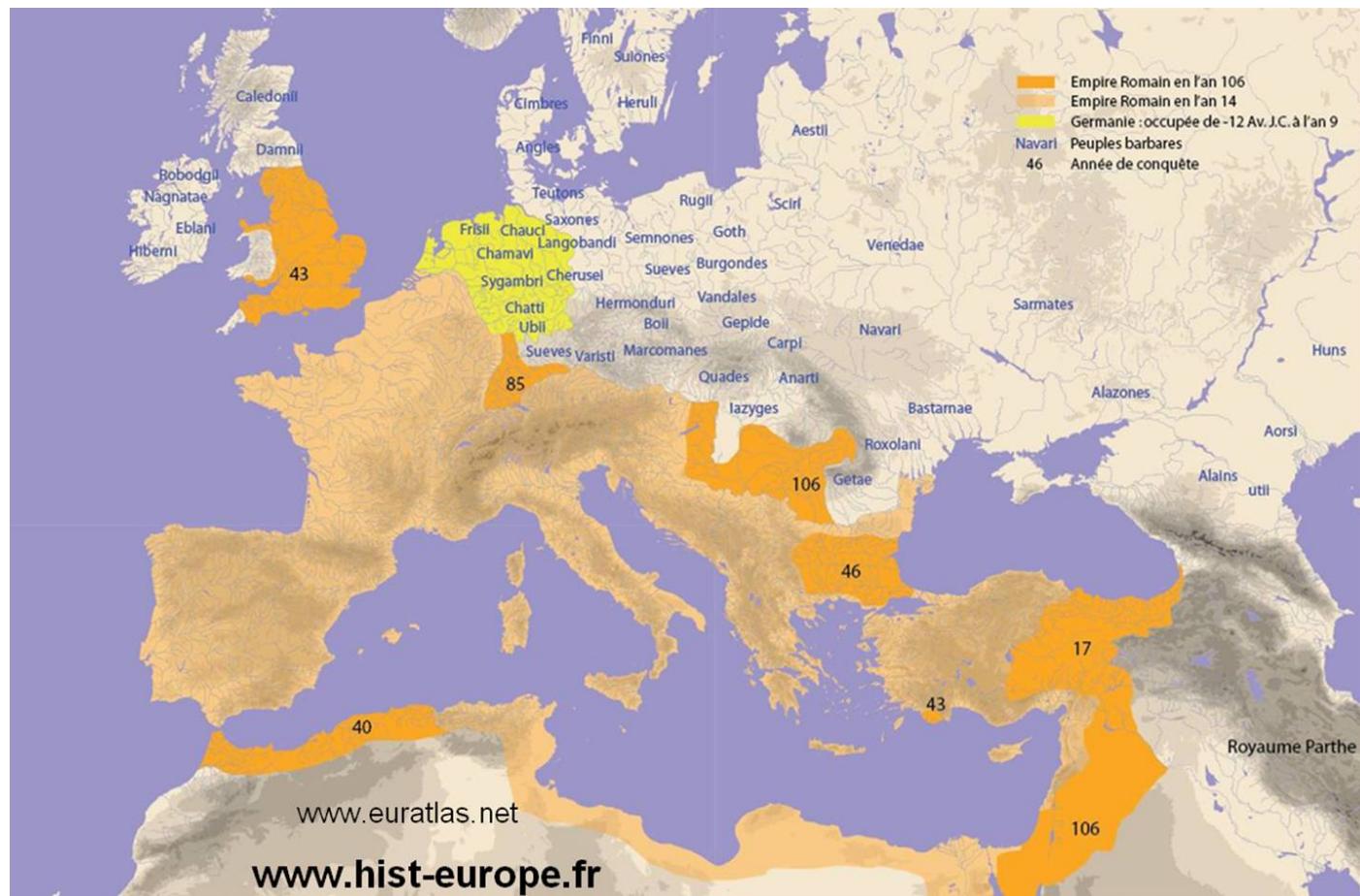


# Grandeur et limites



## du Modèle Standard

Remerciements à Ana Teixeira à qui j'ai beaucoup volé



# Le modèle Standard est né dans les années 70

## *Avant*

- Electrodynamique quantique, une théorie quantique des champs fondée sur *l'invariance de jauge*. Très bien vérifiée, ( $g-2$ ), petit paramètre:  $\alpha$
- Le modèle de Fermi d'interaction faible.(pas renormalisable), des courants chargés
- L'interaction forte très mystérieuse. On connaissait les principes d'unitarité et d'analyticité, Modèles de Regge, cordes hadroniques, "bootstrap". **Le Modèle des quarks** (GELL-MANN, HAN-NAMBU, mais pas de dynamique connue. Situation désespérée car il n'y a pas de petit paramètre comme  $\alpha$  ?

# La fin de l'histoire ....des sciences ?

La découverte du Higgs clôt l'étape de la validation du MS, ce qui nous incite à travailler encore plus dur pour extraire des prédictions de ses prémisses. Le MS est tellement riche que cette tâche est excessivement ardue.

- On le voit, les "problèmes" du MS nous interpellent plus fortement.
- Nous sommes dans cette position difficile où, sur ces problèmes, nous ne savons pas vraiment où aller chercher la solution.
- Mais il faut retenir cette leçon de l'histoire: toute théorie scientifique a ses zones d'ombre et ces zones sont presque toujours le lieu où le progrès se fera.

*Non, pas la Fin de l'histoire des sciences !*

## *Après*

- L'électrodynamique quantique devient une partie d'une théorie unifiée electro-faible  $SU(2) \times U(1)$ , *Invariante de jauge*  
On appelle "isospin faible" le groupe  $SU(2)$ . La théorie implique des courants neutres.

QCD apparaît,  $SU(3)$ . Et on découvre la "liberté asymptotique" !!  
L'interaction forte aussi a un "petit paramètre"  $\alpha_s$  dans le régime des grandes énergie-impulsions.

La clef c'est l'invariance de jauge: elle réduit à **trois (+un)** le nombre de paramètres (masses non comprises), elle rend la théorie renormalisable

*Mais. ....*

# L'invariance de jauge n'aime pas les masses

Brout-Englert et Higgs proposent une solution: valeur moyenne dans le vide d'un champs scalaire, doublet pour SU(2):  $\langle\phi\rangle \neq 0$ . On peut donner des masses sans briser l'invariance de jauge

Le nombre de paramètres augmente considérablement (17). Les neutrinos sont de masse nulle dans le MS

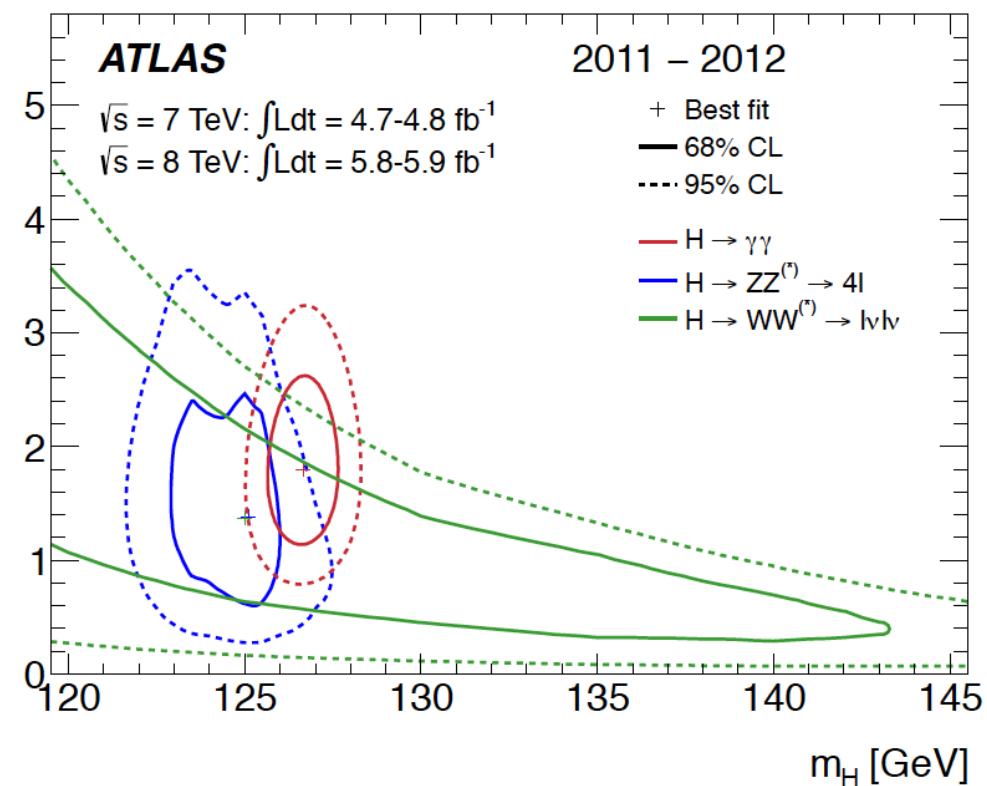
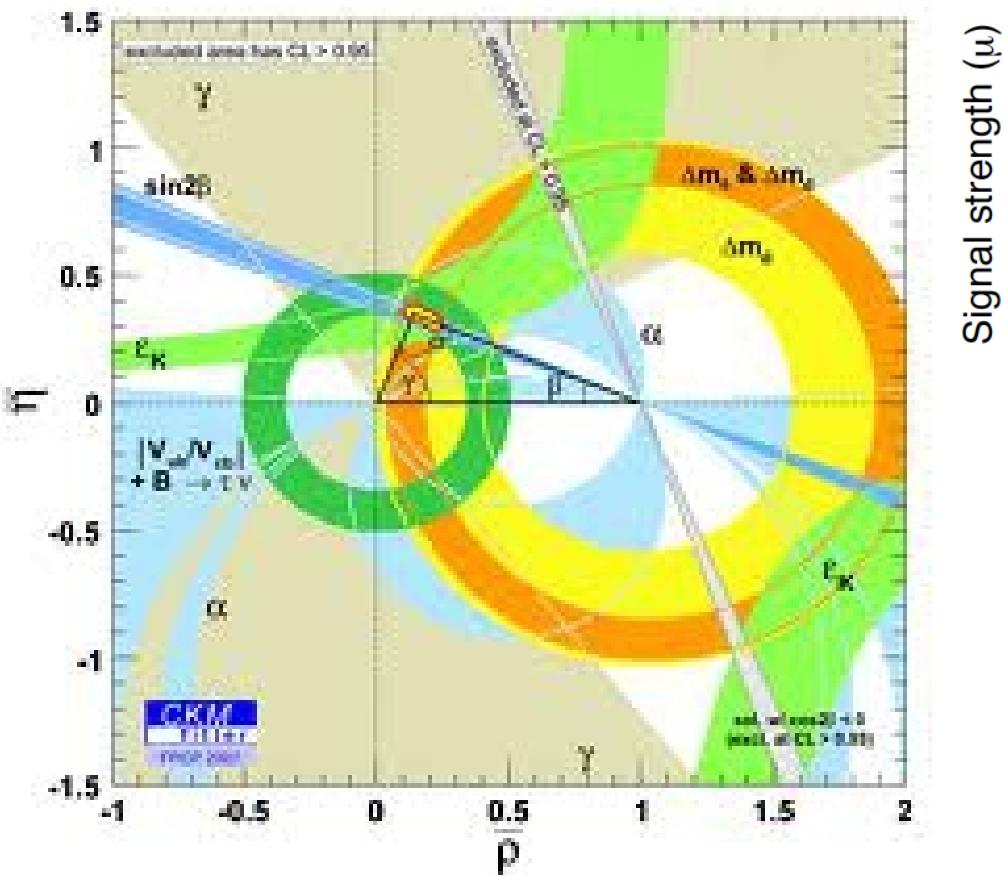
Ce mécanisme explique les masses des particules fondamentales du MS. Mais l'essentiel de la masse de la matière ordinaire (noyaux atomiques) est engendrée par QCD, pas par ce mécanisme.

- *A peine le MS bouclé, on unifie les trois forces,  
le modèle de Georgi-Glashow, SU(5),  
un nouveau triomphe ?*

*Raté !! la nature n'est pas toujours aussi gentille*

- *La durée de vie du proton prévue  $10^{30}$  années est, expérimentalement  $> 10^{32}$ .*
- *Les trois constantes de couplage du MS ne passent pas par un point commun.*

# Les succès du MS: exemples



# Le triomphe ?

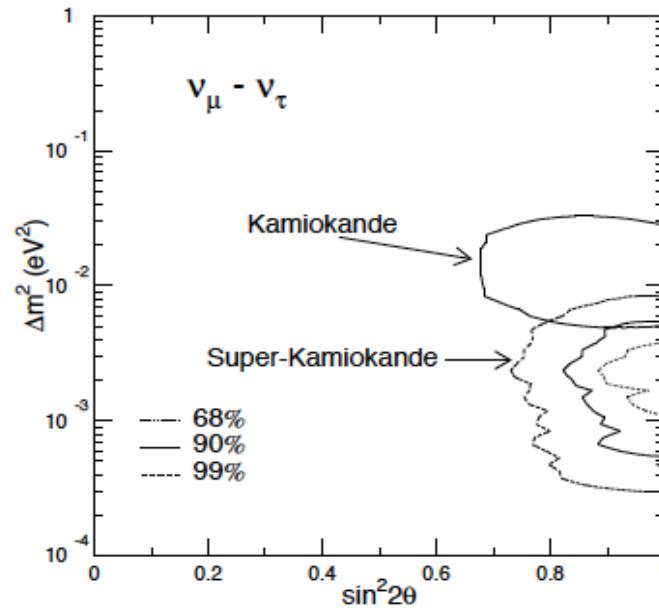
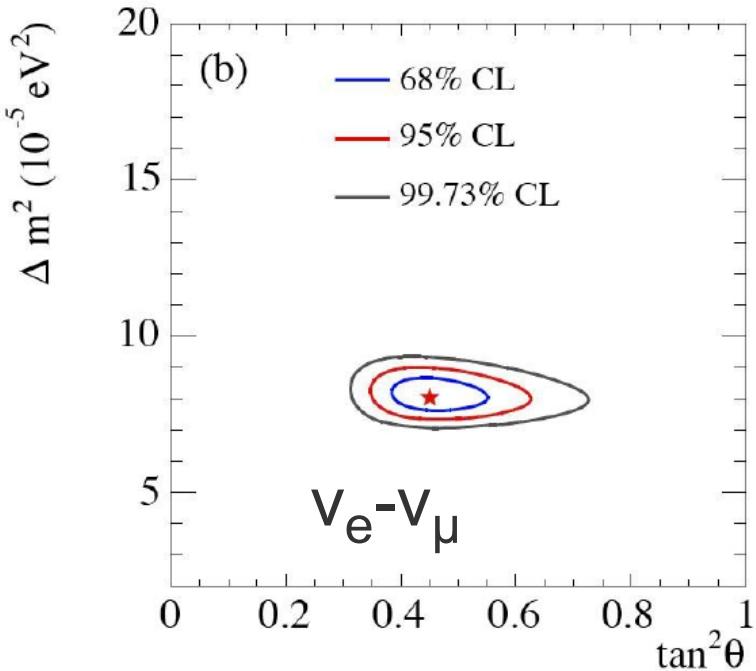


Horum omnium fortissimi sunt Belgae (en français  
« De tous les peuples [de la Gaule], les Belges  
sont les plus braves. »)

# Liste des problèmes

- Masse des neutrinos
- Matière/Energie noires **Experimental**
- Nombre baryonique de l'univers
- Trivialité, métastabilité (?) **Théorie**
- Croisement des constantes de couplage, Gravitation.
- Violation forte de CP
- hiérarchie **Arguments de "naturalité"**

# Oscillations et Masse des neutrinos



Qu'est-ce qui donne la masse à l'électron ?:  $e_L \phi e_R$

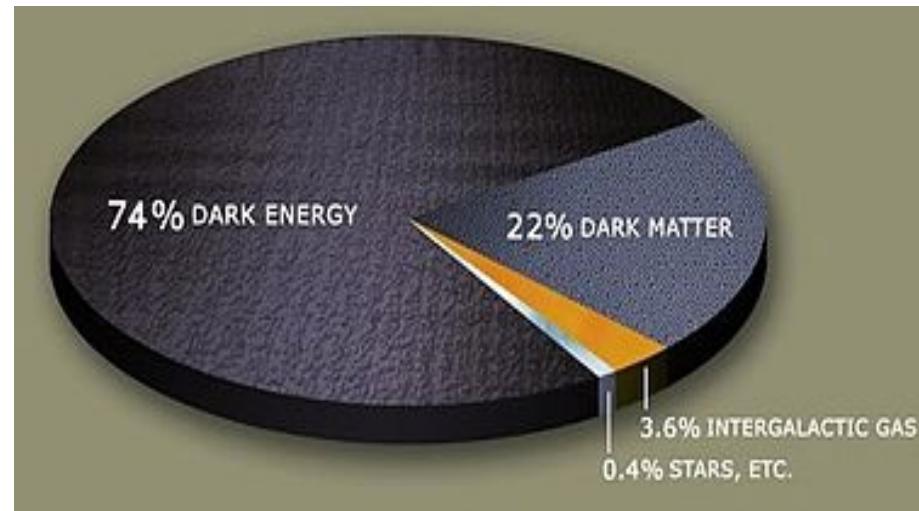
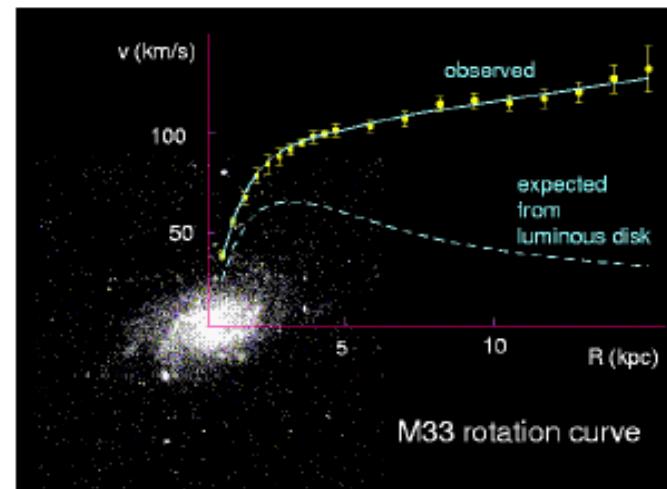
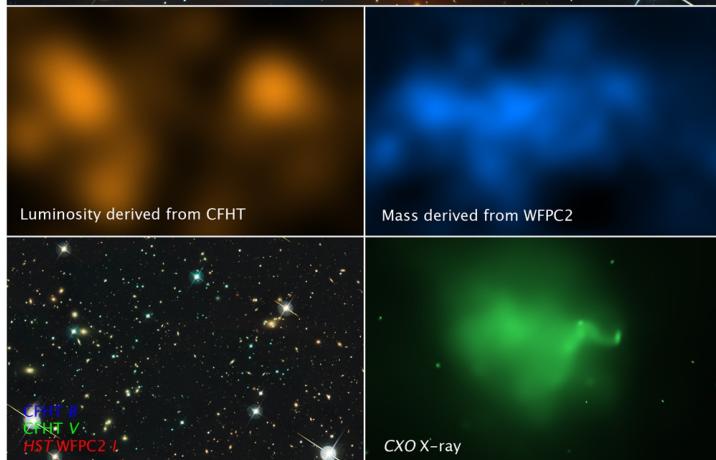
(doublet doublet singlet)

Il n'existe pas dans le MS de  $\nu_R$  pour donner une masse au  $\nu$

Or, s'il y a des différences de masses il y a des masses dirait M. De la Palisse

# Matière/Energie noire

Anagramme d'énergie noire (Etienne Klein Jacques, Perry-Salkow):  
Reine ignorée



# Nombre baryonique de l'univers

- $N_B/N_\gamma = 6 \cdot 10^{-10}$  ;  $N_B$  (aujourd'hui) =  $N_B - N_B^-$  (avant)
- Sakharov: il faut violation de C, CP,  $N_B^- - N_B$  et hors d'équilibre.
- Modèle standard:  $10^{-18}$   
car la violation de CP attendue du MS est trop faible !  
et la transition de phase, de  $\langle \varphi \rangle = 0$  vers  $\langle \varphi \rangle \neq 0$  est trop douce.  
Il faut autre chose ! (un nombre leptonique qui deviendrait un nombre baryonique ?)

# Renormalisation et trivialité

Une théorie quantique des champs a plein de diagrammes de Feynman infinis. Il faut renormaliser.

On régularise, on rend fini les diagrammes, par exemple en fixant une énergie maximum, "cut-off" ( $\Lambda_C$ ).

- Après on renormalise par une règle, et on fait tendre  $\Lambda_C$  vers l'infini.
- Il y a longtemps Landau a dit "Attention" (le pôle de Landau) "внимание !":'

Pour les théories dont la constante de couplage augmente avec l'énergie, on ne peut pas faire tendre le cut-off vers l'infini, il faut un "cut-off" physique, une autre théorie à grande énergie qui régularise notre théorie. C'est vrai pour U(1) et les théories  $\lambda\phi^4$  (secteur du Higgs)

Cependant pour le secteur de Higgs c'est beaucoup plus compliqué, Il faut tenir compte de tous les couplages, de la masse du Higgs, masse du top, de la constante de couplage  $\lambda$ . Des constantes de couplage de SU(3), SU(2), U(1). On calcule le potentiel effectif  $V(\varphi)$  en fonction de l'énergie et on regarde s'il y a des valeurs négatives: Si la réponse est "oui" cela peut signifier instabilité du vide, ou métastabilité du vide. Si la constante de couplage  $\lambda$  devient négative, ça pose un problème, le terme  $\lambda\phi^4$  déstabilise le vide.

# Instabilité du vide

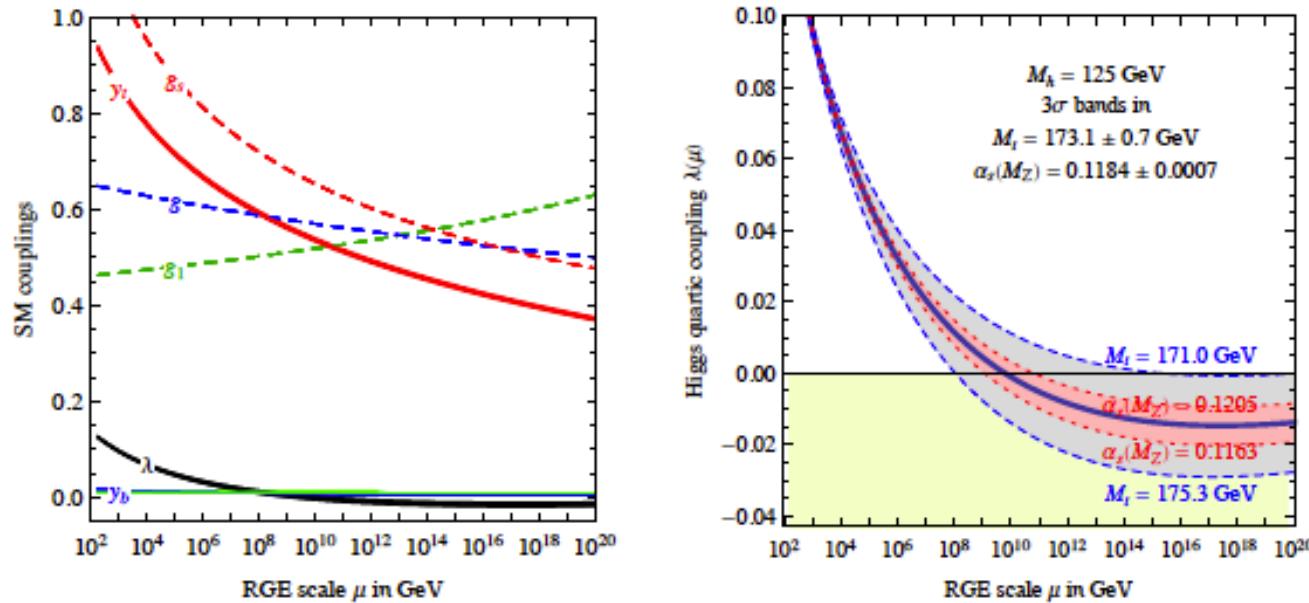


Figure 1: **Left:** SM RG evolution of the gauge couplings  $g_1 = \sqrt{5/3}g'$ ,  $g_2 = g$ ,  $g_3 = g_s$ , of the top and bottom Yukawa couplings ( $y_t, y_b$ ), and of the Higgs quartic coupling  $\lambda$ . All couplings are defined in the  $\overline{\text{MS}}$  scheme. The thickness indicates the  $\pm 1\sigma$  uncertainty. **Right:** RG evolution of  $\lambda$  varying  $M_t$  and  $\alpha_s$  by  $\pm 3\sigma$ .

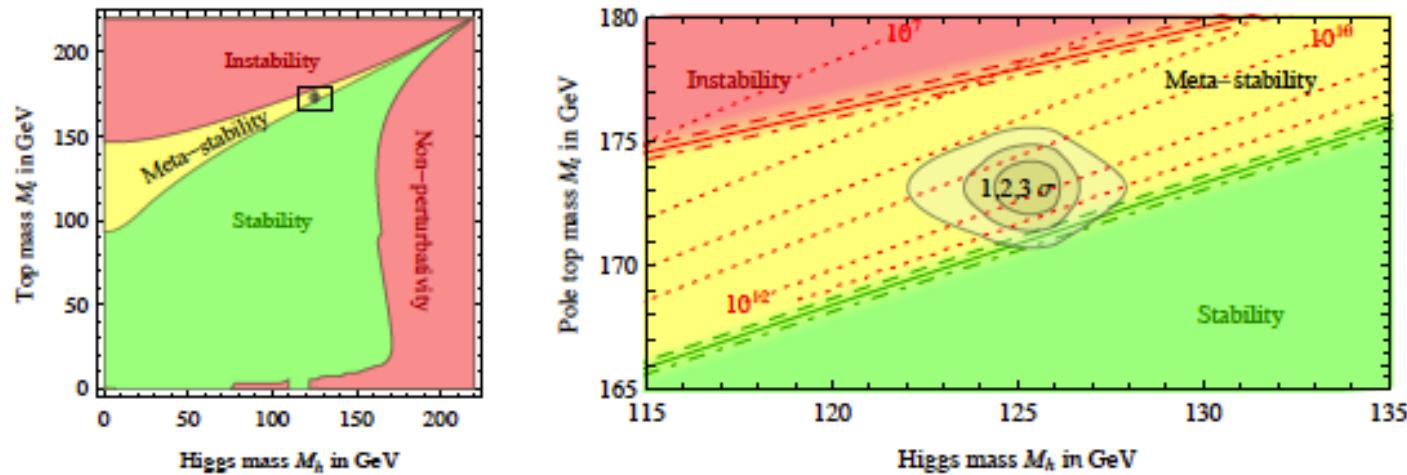


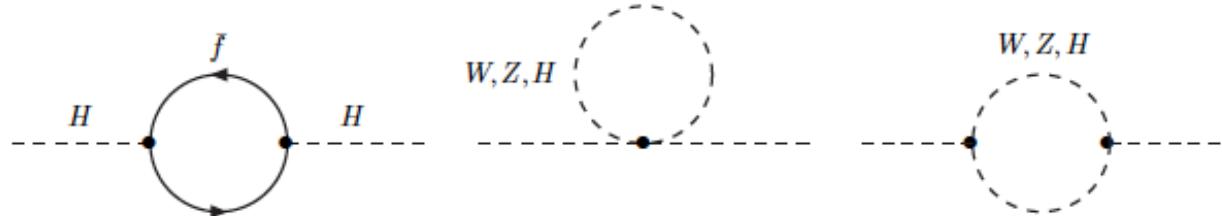
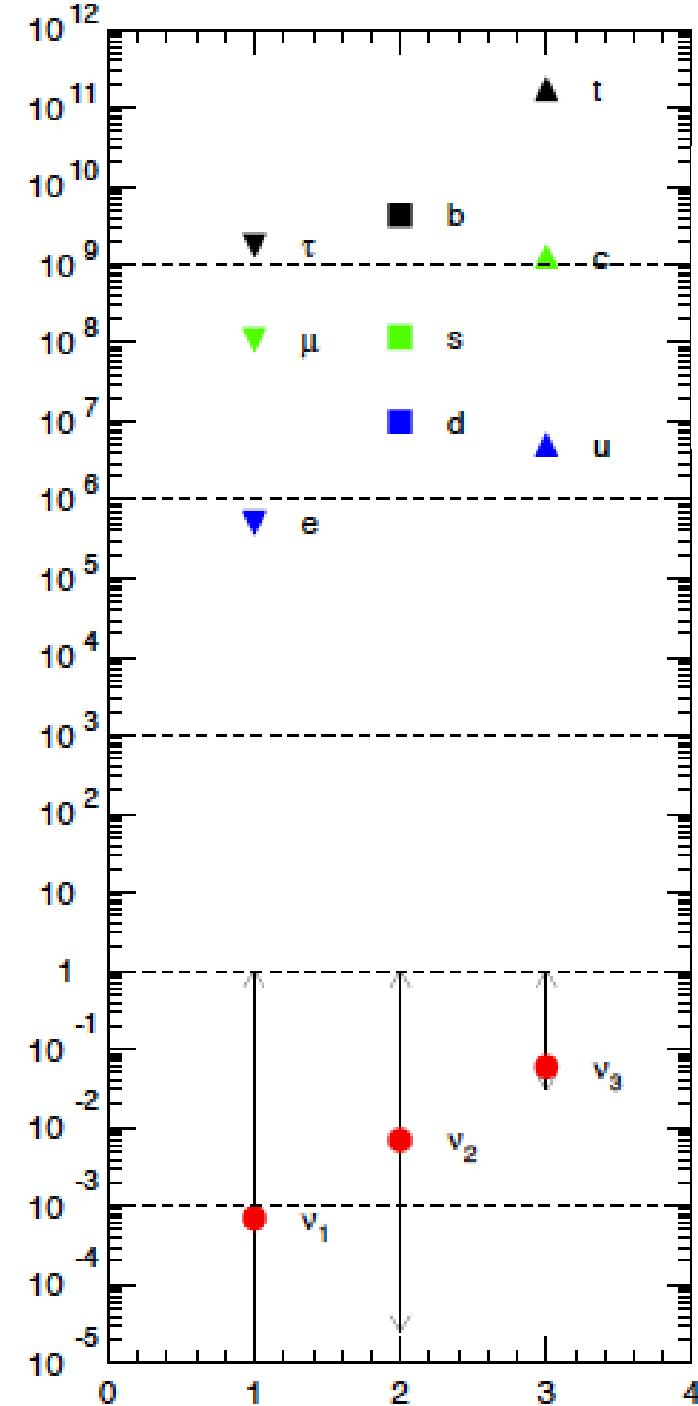
Figure 5: *Regions of absolute stability, meta-stability and instability of the SM vacuum in the  $M_t$ – $M_h$  plane. Right: Zoom in the region of the preferred experimental range of  $M_h$  and  $M_t$  (the gray areas denote the allowed region at 1, 2, and  $3\sigma$ ). The three boundaries lines correspond to  $\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0007$ , and the grading of the colors indicates the size of the theoretical error. The dotted contour-lines show the instability scale  $\Lambda$  in GeV assuming  $\alpha_s(M_Z) = 0.1184$ .*

Degrandi, Di Vita, Elias-Miro, Giudice, Isodori & Strumia, arXiv:1205.6497

Present vacuum probably metastable with lifetime  
 $\gg$  age of the Universe

John Ellis, LAL seminar

# Hiérarchie, ajustement fin



$$\mu_{\text{physical}}^2 = \mu_\Phi^2 - \lambda_\Phi \Lambda_C^2 + \dots$$

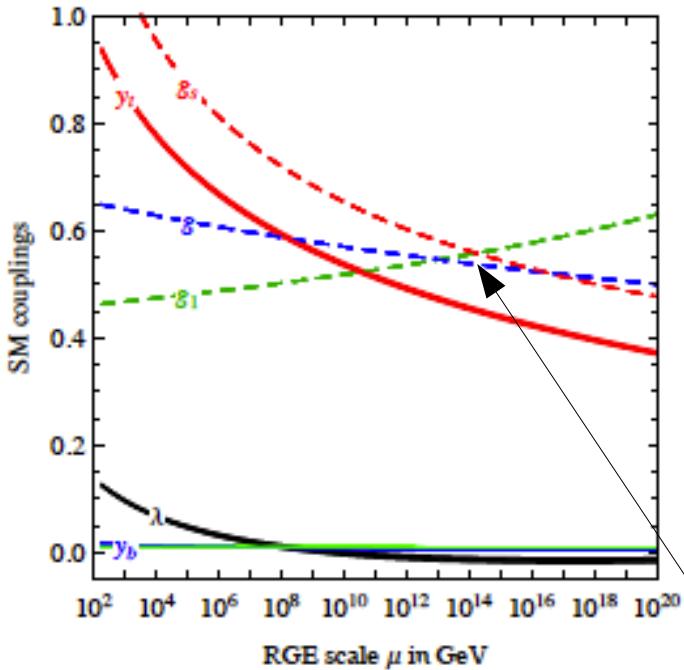
$$(125 \text{ GeV})^2 = \mu_\Phi^2 - \lambda_\Phi (10^{19} \text{ GeV})^2$$

C'est naturel ça ?

Il ne se passerait rien jusqu'à l'échelle de Planck ?

Le MinimalSusySM compense les boucles de bosons  
Par des fermions et vice versa.

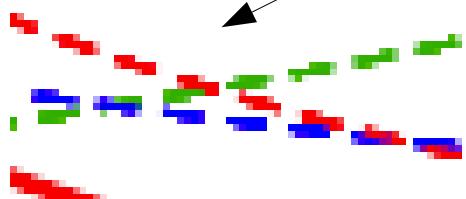
# Croisement des constantes de couplage



- La grande unification ne fait pas partie du MS, mais elle expliquerait de façon simple plusieurs propriétés miraculeuses du MS:

Un seul exemple: pourquoi l'univers est de charge nulle (charge e + charge p = 0)

- Mais ça ne marche pas dans le MS
- Et que fait-on de la gravitation ?



Zoom du croisement des trois constantes de couplage

# La violation forte de CP est.....très faible !!

$$L = -1/4 F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - n_f g^2 \theta / (32\pi^2) \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} + q(i\gamma_\mu D^\mu - m)q$$

Le moment dipolaire électrique  
du neutron,  $d_n$  est borné par l'expérience  
 $d_n < 3 \cdot 10^{-26}$  e cm

Viole CP

$$\Theta=1 \text{ donnerait } d_n \approx 10^{-18} \text{ e cm}$$

La violation de CP attendue naturellement du MS est beaucoup trop forte par rapport à l'expérience  
 $\Theta$  tout petit, c'est pas "naturel"

Concernant la violation de CP, la seule chose qui marche  
C'est le triangle d'unitarité, **ce qui est déjà énorme !**

# Alors comment dépasser le MS ?

- Si on le savait !!
- Nous savons que le MS est excellent dans son domaine.
- Nous savons qu'il n'est pas, et de loin, le dernier mot
- Ce ne sont pas les modèles au delà du MS qui manquent
- Mais aucun n'est aujourd'hui vraiment convaincant.

# Les quarante glorieuses: la théorie Reine

- Depuis Galilée, Newton et Maxwell on s'était habitués à “La déraisonnable efficacité des mathématiques dans les sciences naturelles” (Wigner): chaque progrès dans les sciences unifiait des champs distincts, réduisait le nombre de paramètres
- C'était un moteur à deux temps: l'expérience surprenait, la théorie avançait, l'expérience la confirmait/l'infirmait, la théorie cherchait à nouveau..
- Ces 40 dernières années la théorie était Reine, l'expérience ne faisait (presque) que confirmer le MS

# La fin de l'histoire ....des sciences ?

La découverte du Higgs clôt l'étape de la validation du MS, ce qui nous incite à travailler encore plus dur pour extraire des prédictions de ses prémisses. Le MS est tellement riche que cette tâche est excessivement ardue.

- On le voit, les "problèmes" du MS nous interpellent plus fortement.
- Nous sommes dans cette position difficile où nous ne savons pas vraiment vers où aller, contrairement aux trentes glorieuses.
- Mais il faut retenir cette leçon de l'histoire: toute théorie scientifique a ses zones d'ombre et ces zones sont presque toujours le lieu où le progrès se fera.

*Non, ce n'est pas la fin de l'histoire des sciences!*