

Prospects in High Energy Physics: Theoretical issues

Fawzi BOUDJEMA
LAPTH, CNRS, France

In Search of the Hidden

A la recherche du caché

Hidden symmetry

Hidden matter

Hidden energy

Nature of the vacuum

Introduction: Les particles d' aujourd' hui

dans notre petit monde à nous....

spin-1/2

Matière

	SU(3)	SU(2) _L	U(1) _Y	$Q = T_3 + Y$
$Q = (u_L, d_L)$	3	2	$\frac{1}{6}$	$(\frac{2}{3}, -\frac{1}{3})$
u_R	3	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
d_R	3	1	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
$L = (\nu_L, e_L)$	1	2	$-\frac{1}{2}$	$(0, -1)$
e_R	1	1	-1	-1
ν_R	1	1	0	0

♣ Avec le top le tableau est maintenant complété, mais
pourquoi trois familles? CP?

◇ Description très économique de l'interaction

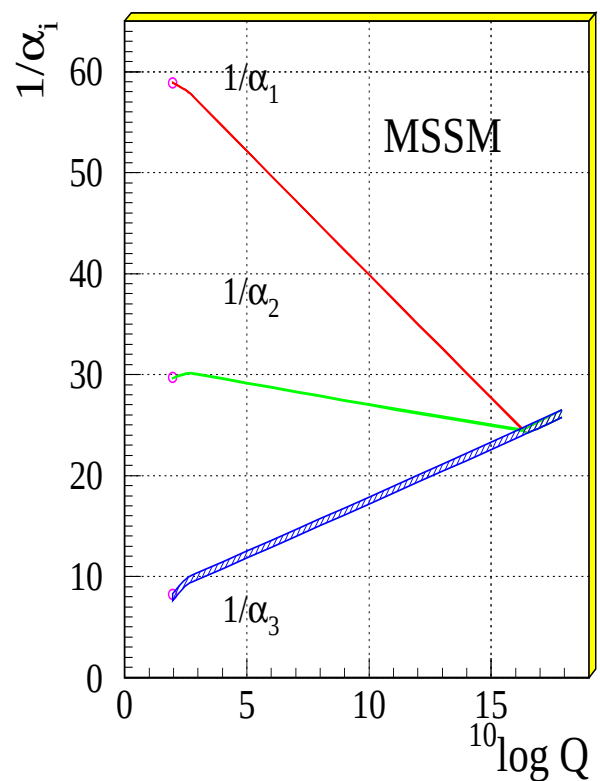
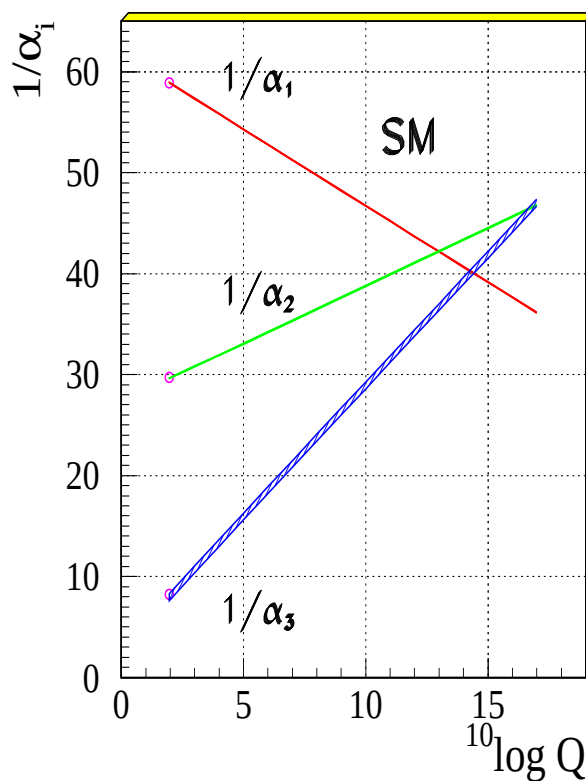
$$\mathcal{L}_{1,1/2} = i \bar{f} \not{D} f - \frac{1}{4} (F_{\mu\nu}^i)^2$$

◇ Sans masse les doublets et les singlets ne se parlent pas!

*spin-1***Forces**

✓ LEP → *Toutes les forces décrites par une symétrie de jauge.*

► 3 constantes de couplages: $SU(2) \times U(1) \times SU(3)$
 mesurées avec une précision telle qu'elles sembleraient s'unifier à Λ_{unif} ,
si l'on postule une nouvelle physique.



Unification, simplicité sous jacente?

$\Lambda_{\text{unif}} \sim 2 \cdot 10^{16} \text{ GeV}$ if $m_{\text{susy}} \sim 1 \text{ TeV}$

$\Lambda_{\text{unif}} \sim 1 - 100 \text{ TeV}$ dans des modèles extra-dim!

sans cependant l'assurance de découvertes de particules nouvelles à l'échelle du TeV!

spin-0

Masse et Brisure de Symétrie

▽ *Pas de Higgs: Higgs=Particule scalaire fondamentale physique*

** Mécanisme de Higgs?*

● *Brisure de symétrie et masse: Bien sur mais comment?*

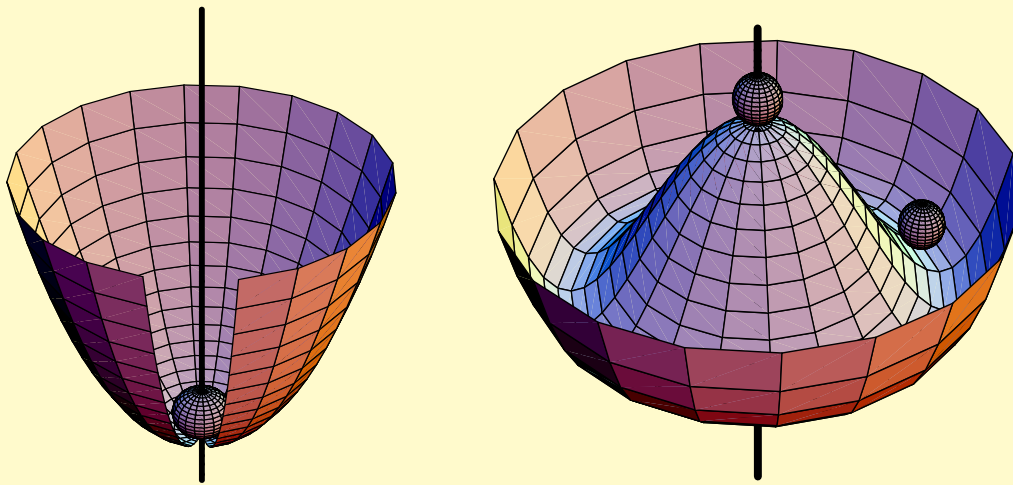
▷ *secteur avec trop de paramètres...*

Modèle Standard

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v + H + i\varphi_3) \end{pmatrix}$$

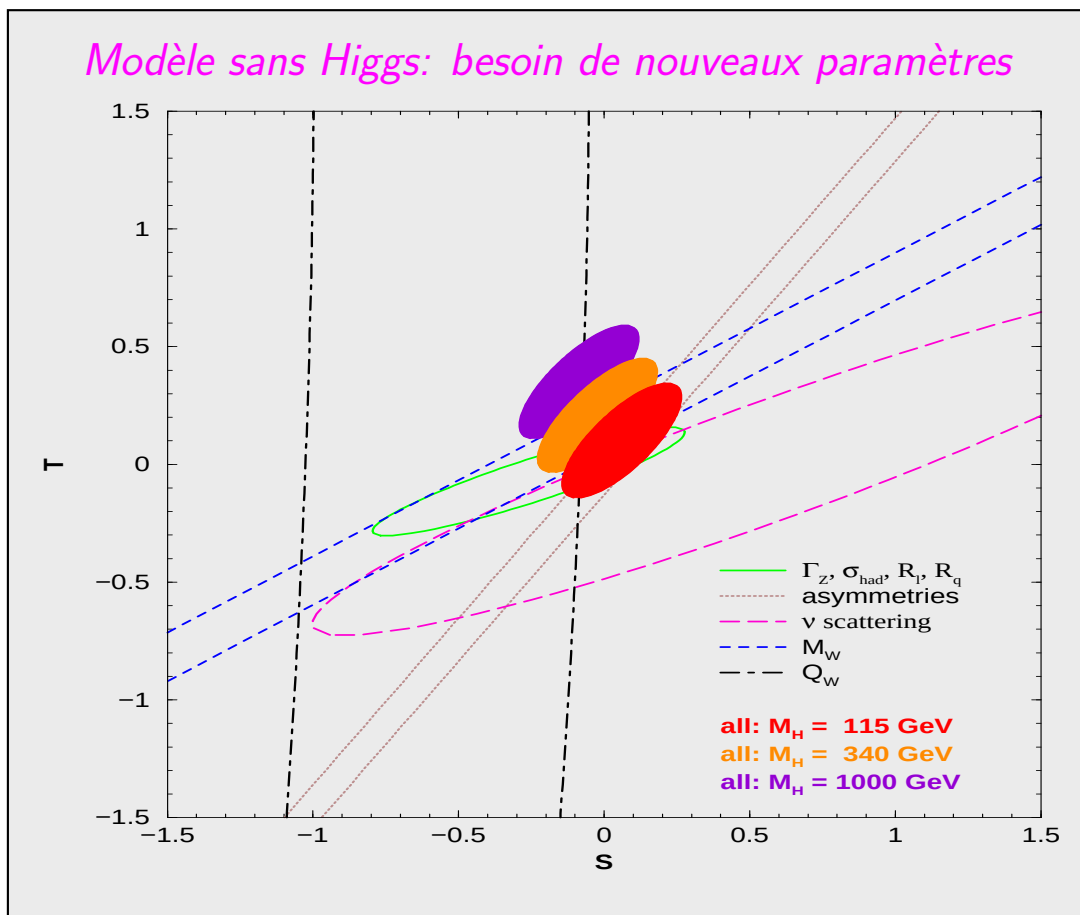
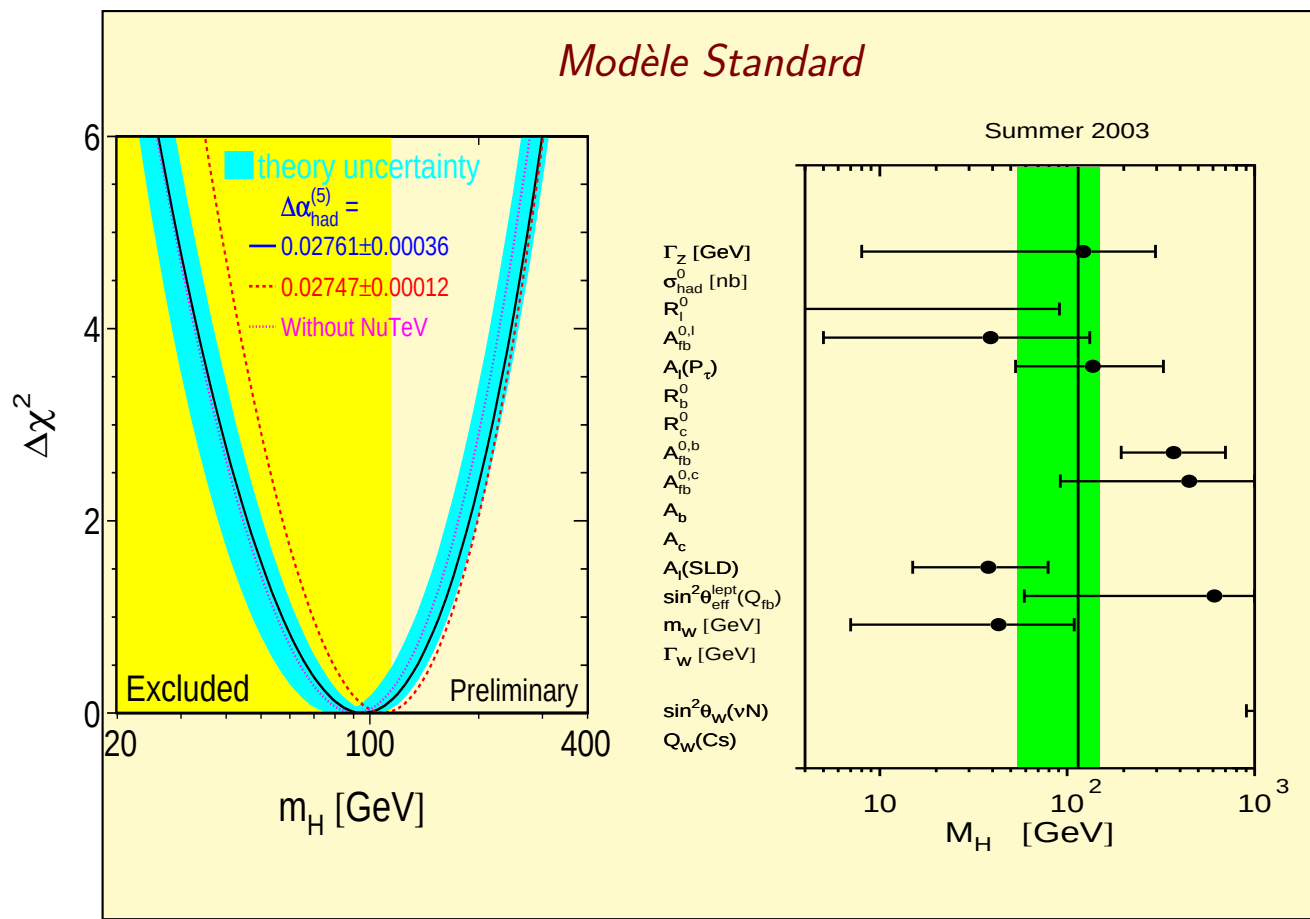
Le mystérieux Potentiel

$$\mathcal{V}_{\text{SSB}} = \lambda \left[\Phi^\dagger \Phi - \frac{v^2}{2} \right]^2 = \lambda \left[\Phi^\dagger \Phi \right]^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda \frac{v^4}{4}$$

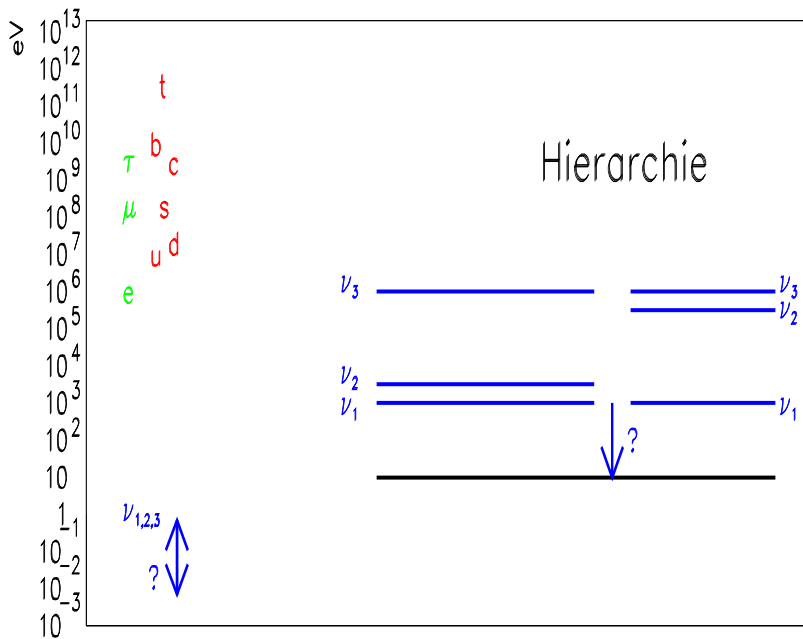
*Modèle sans Higgs, Invariant de jauge, $\rho=1$*

$$\Sigma = \exp\left(\frac{i\omega\tau^i}{v}\right) \quad \mathcal{D}_\mu \Sigma = \partial_\mu \Sigma + \frac{i}{2} (gW_\mu \Sigma - g'B_\mu \Sigma \tau_3)$$

$$\mathcal{L}_M = \frac{v^2}{4} \text{Tr}(\mathcal{D}^\mu \Sigma^\dagger \mathcal{D}_\mu \Sigma)$$



Les fermions, leur masse et le problème de la saveur



$$m_t = 180 \text{ GeV} \quad m_e = 0.5 \text{ MeV}$$

$$-\mathcal{L}_{0+1/2} = M_u^{ij} \bar{u}_R^i \tilde{\Phi}^\dagger Q_L^j + M_d^{ij} \bar{d}_R^i \Phi^\dagger Q_L^j + M_l^{ij} \bar{l}_R^i \Phi^\dagger L_L^j + h.c.$$

neutrinos

$$\text{WMAP data} \Rightarrow \sum \nu_i m_{\nu_i} < 0.7 \text{ eV}$$

$$\odot \Delta m_{12}^2 = 7.1_{-0.6}^{+1.2} 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\nabla \Delta m_{32}^2 = 2.0_{-0.4}^{+0.6} 10^{-3} \text{ eV}^2$$

ν Physique Nouvelle

Quark: saveur

Violation de CP confirmée, mais pas assez de CP pour Baryogénèse

Reconstruire matrices de masses: plus de précision sur CKM

$$M_u = \lambda_t \begin{pmatrix} 0 & 0 & c \epsilon^3 e^{i\phi} \\ 0 & \lambda_c / \lambda_t & 0 \\ c \epsilon^3 e^{-i\phi} & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_d = \lambda_b \begin{pmatrix} 0 & a \epsilon^3 & 0 \\ a \epsilon^3 & \epsilon^2 & b \epsilon^2 \\ 0 & b \epsilon^2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$a, b, c \sim 1 \Rightarrow V_{us} = \sqrt{m_d / m_s}.$$

Structures sous-jacentes?

Masse des neutrinos à la See-saw: Neutrino droit très lourd, N :

$$(\nu_L, N) \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ N \end{pmatrix} \longrightarrow m_\nu \sim M_D^2/M_N \longrightarrow \mathbf{M}_N \sim 10^{10} \dots 10^{15} \text{ GeV}$$

Nouvelle Physique à l'échelle M :

$$\frac{1}{M} \nu \Phi \cdot \nu \Phi, \quad m_\nu \nu \cdot \nu : m_\nu = \frac{\langle 0 | \Phi | 0 \rangle^2}{M} \longrightarrow m_\nu \sim v^2/M$$

CKM (MNS) des neutrinos à reconstruire

$$V = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13}e^{-i\delta} \end{pmatrix}.$$

l'asymétrie (Looooooooong Baseline)

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) = 16s_{12}c_{12}s_{13}^2c_{13}^2s_{23}c_{23} \sin \delta \sin \left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E} \right)$$

N à la source de la leptogénèse? through CP violation in decay

Cerner la hiérarchie des neutrinos

Masses des Neutrinos, $\Delta L_{e,\mu,\tau} \neq 0$

Baryogénèse via Leptogénèse?

Violation de CP dans le secteur leptonique?

A faire:

1) infirmer LSND

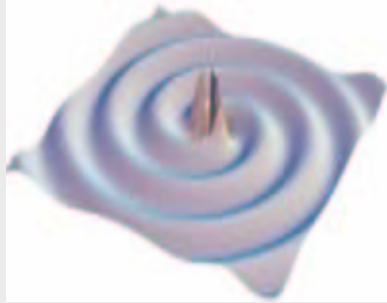
2) θ_{13}

3) phase CP , δ

BEMOL (Unification, quantification,..)

spin-2

ondes gravitationnelles ? VIRGO



*Pas de théorie quantique de la gravité mais
grand pas dans la mesure
géométrie, quantité de mati'ere-énergie*

$$\text{Einstein} \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} \right)$$

Isotrope et Homogène

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) [d\rho^2 + f^2(\rho)(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)]$$

$$= -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

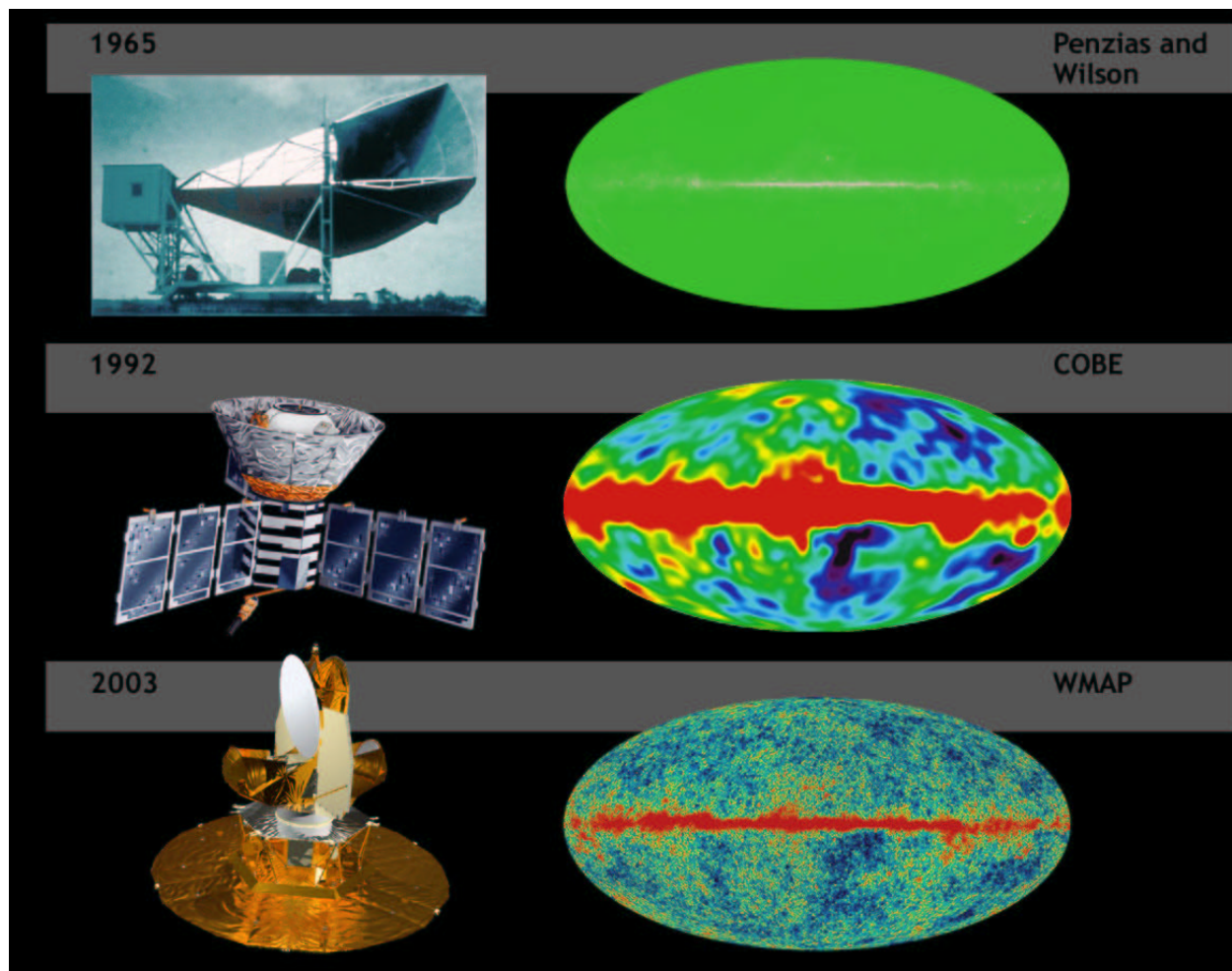
$$\text{conservation} \quad H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i - \frac{k}{a^2}$$

$$\rightarrow \sum_M \Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1 \quad \Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c} \quad \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

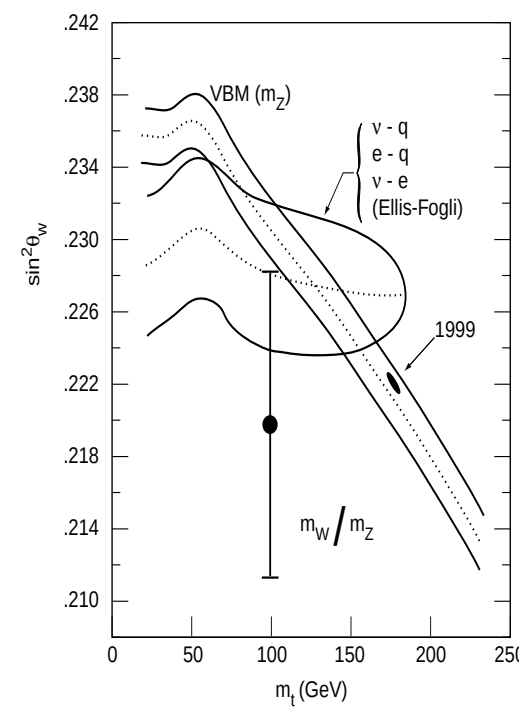
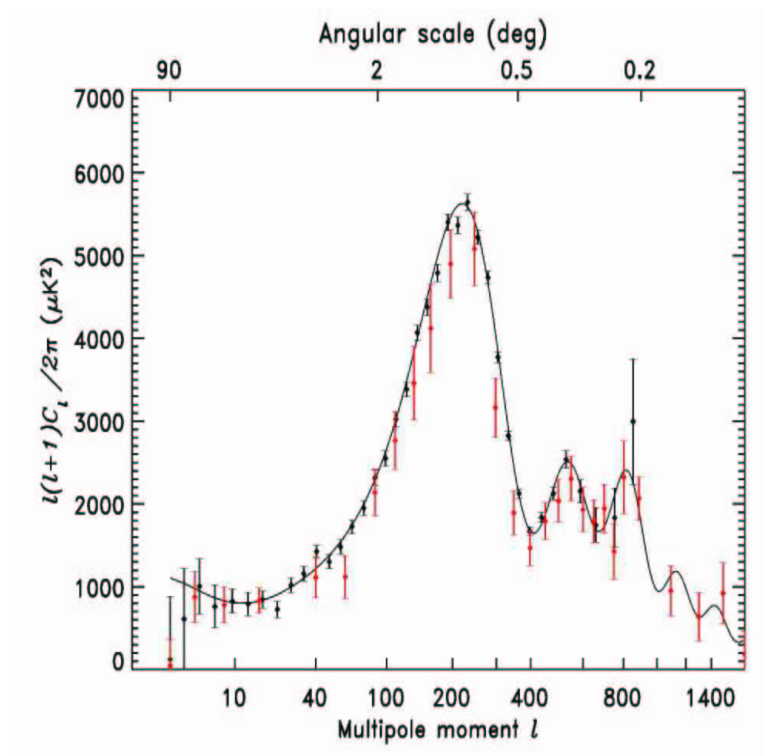
Accélération

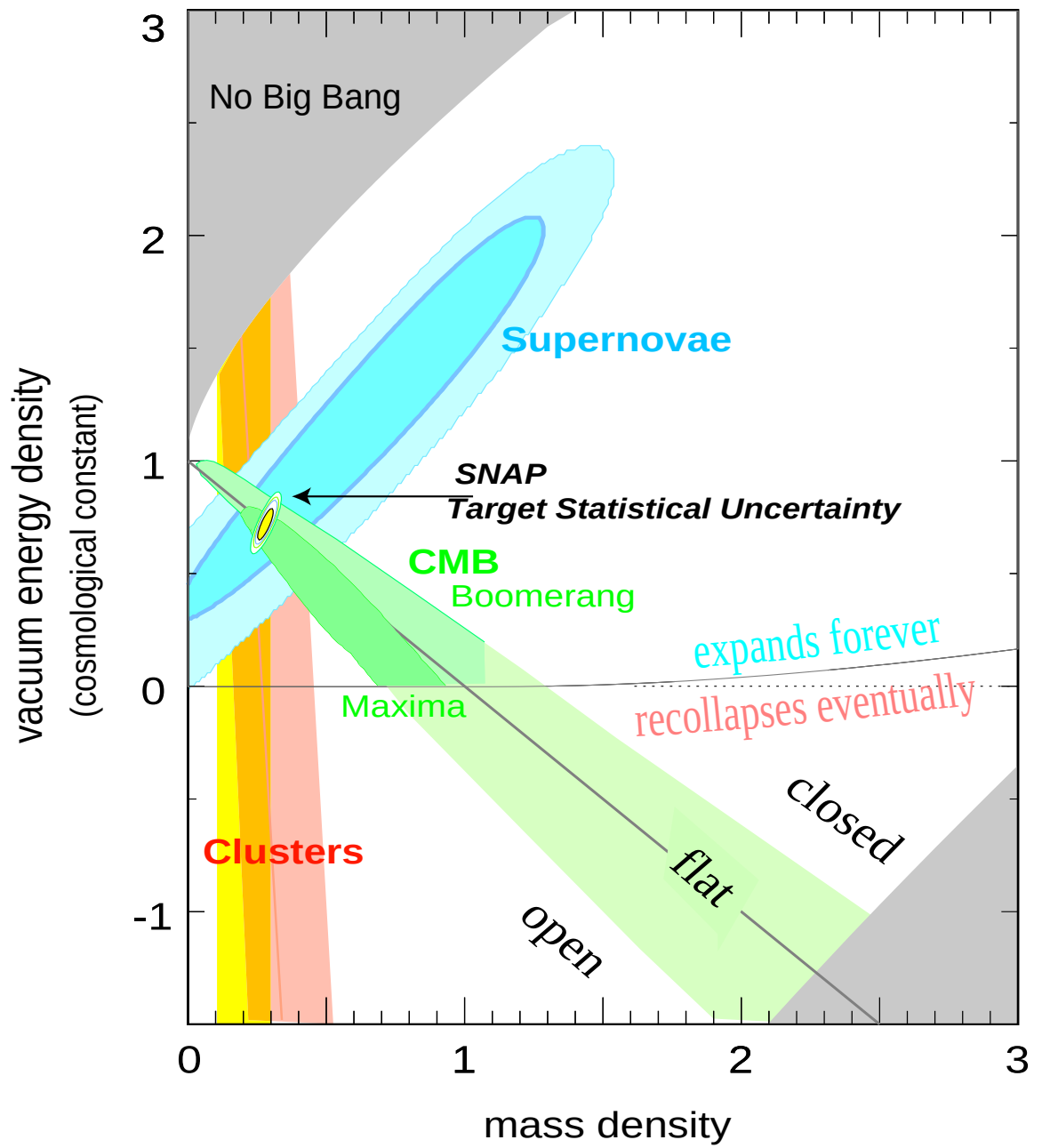
$$\left(\frac{\ddot{a}}{a} \right) = -\frac{4\pi G}{3} \sum_i (\rho_i + 3p_i) \quad p = w\rho$$

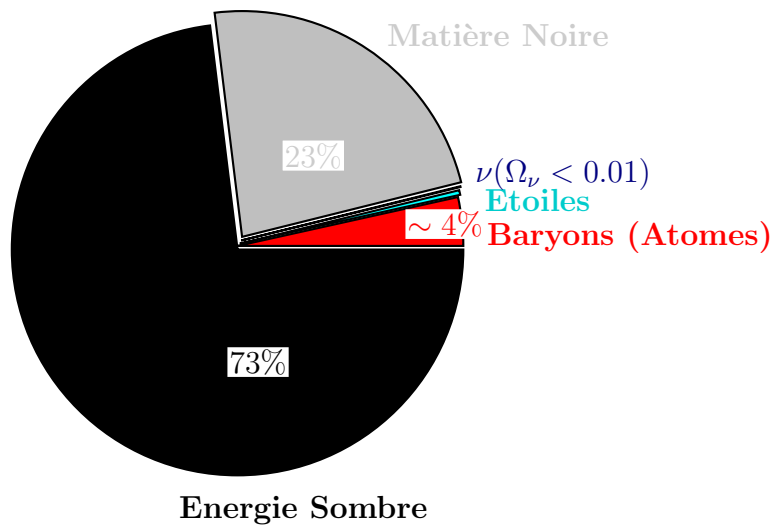
$$\rho(a) \propto \frac{1}{a(t)^{3(1+w)}} \quad w_{rad} = 1/3 \quad w_M = 0 \quad w_\Lambda = -1$$



Pre-WMAP and WMAP vs Pre-LEP and LEP

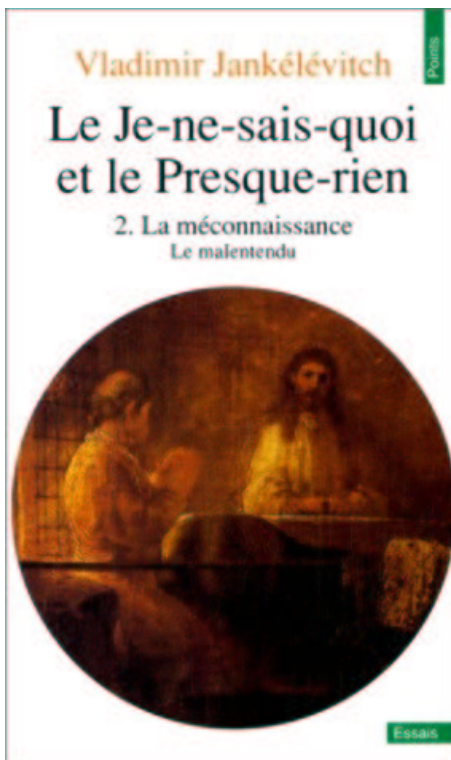






Baryon Asymmetry?

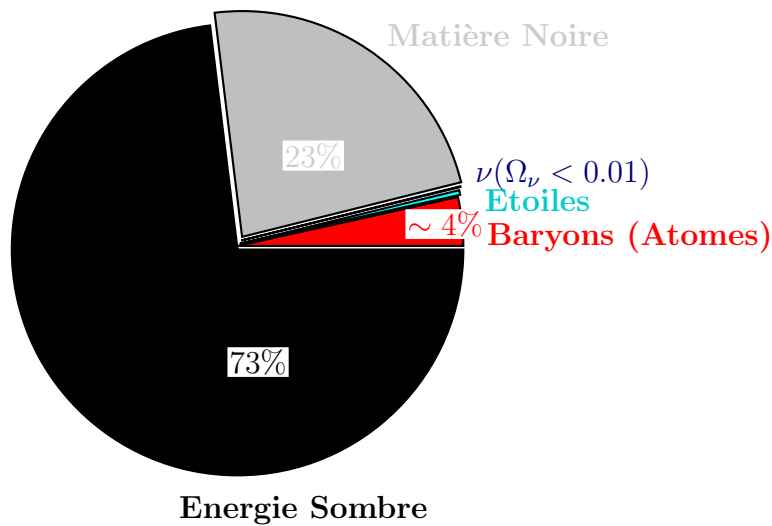
$$\Delta B/B = 10^{-10} !!!$$



$$t_0 = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr (1.5\%)}$$

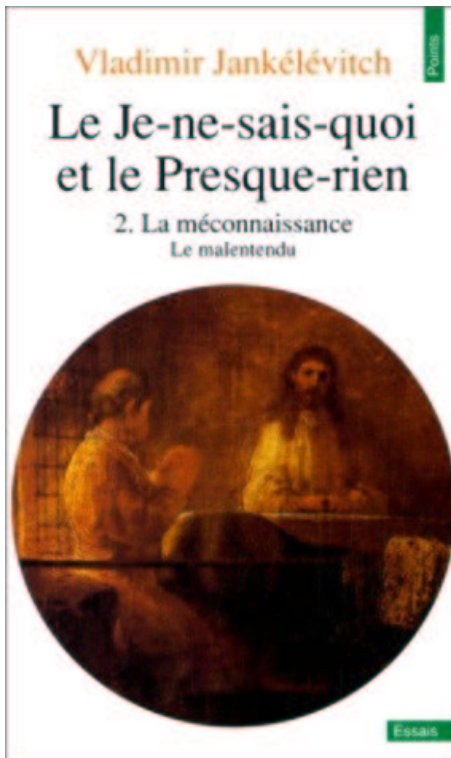
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02 \text{ (2\%)}$$

$$\Omega_{\text{DM}} = 0.23 \pm 0.04 \text{ (17\%)}$$



Baryon Asymmetry?

$$\Delta B/B = 10^{-10} !!!$$



$$t_0 = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr } (1.5\%)$$

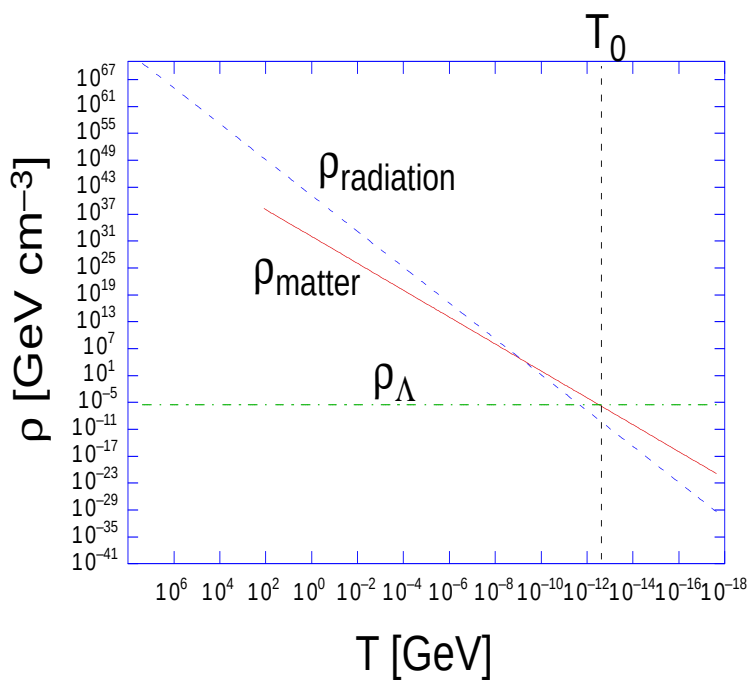
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 \pm 0.02 (2\%)$$

$$\Omega_{\text{DM}} = 0.23 \pm 0.04 (17\%)$$

$$\alpha^{-1} = 10 t_0 (10^{-7}\%)$$

$$\rho = \Omega_{\text{tot}} (\sim 0.1\%)$$

$$\sin^2 \theta_{\text{eff}} = \Omega_{\text{DM}} (0.08\%)$$



*Nous vivons des temps heureux!
Coincidence Pourquoi maintenant?
et si Λ dynamique? $w \neq -1$??*

mesuré

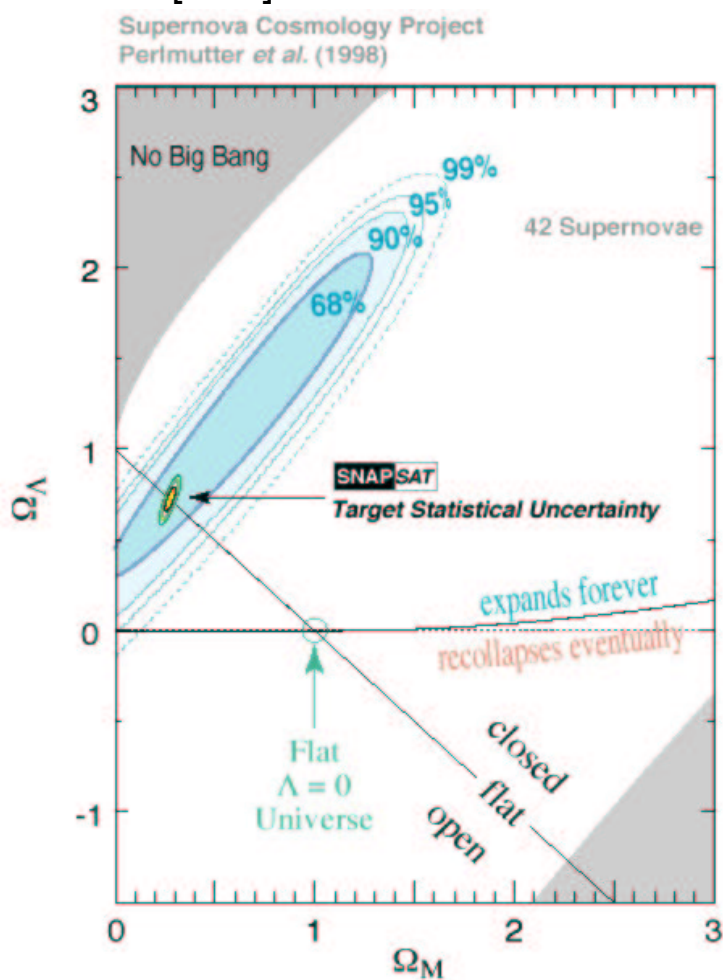
$$\rho_{\Lambda} \sim 10^{-50} \text{GeV}^4 \sim (10^{-3} \text{eV})^4$$

$$\sim (m_{\nu})^4 \sim (M_W^2/M_P)^4$$

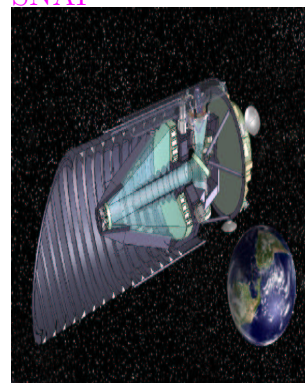
Théorie

$$\rho_{\text{Higgs}} \sim 10^{60} \rho_{\Lambda}$$

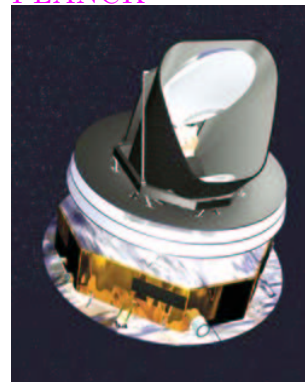
$$\rho_{\text{GUT}} \sim 10^{120} \rho_{\Lambda}$$



SNAP



PLANCK

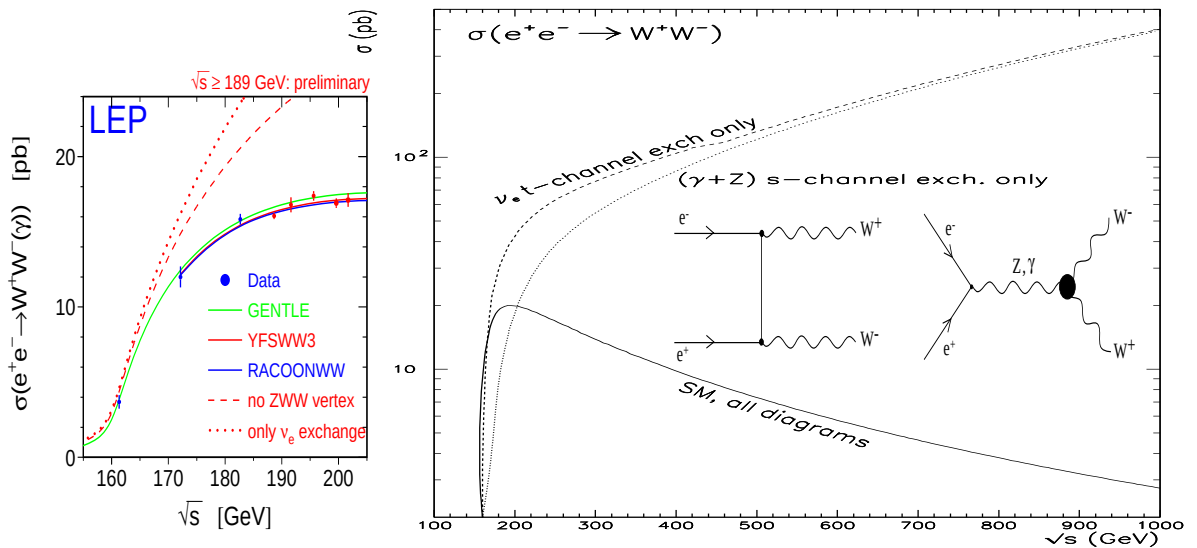


Leçon du passé : l'argument "unitarité"

ou pourquoi une nouvelle physique aux énergies du TeV

ceci est l'argument non biaisé: On ne peut pas avoir une probabilité

$$\mathcal{P} > 1$$



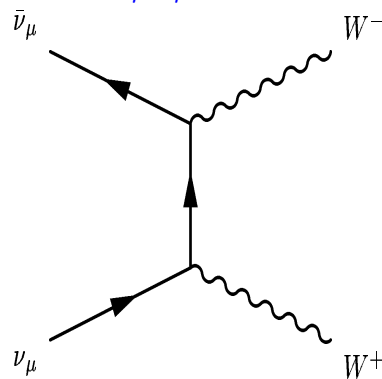
Ex. 1: désintégration β (ou du muon) et théorie de Fermi

$$\bar{\nu}_\mu \mu \rightarrow \bar{\nu}_e e$$

$$\mathcal{M} \sim G_F^2 E^2 \xrightarrow{\text{unitarité}} E > G_F^{-1/2} \sim 300 \text{ GeV}$$

Solution échange de W : $M_W = 80 \text{ GeV}$,

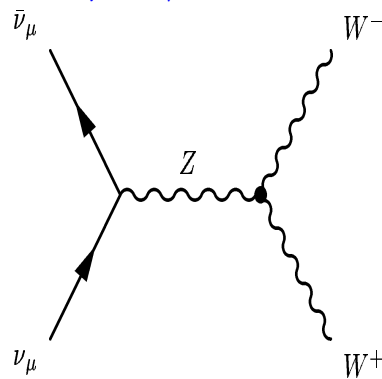
mesures de précision indirectes $E < 80 \text{ GeV} < 300 \text{ GeV}$.

Ex. 2: $\nu_\mu \bar{\nu}_\mu \rightarrow W^+ W^-$ 

avec seulement le canal t , unitarité pour

l'onde partielle $J = 1$ si

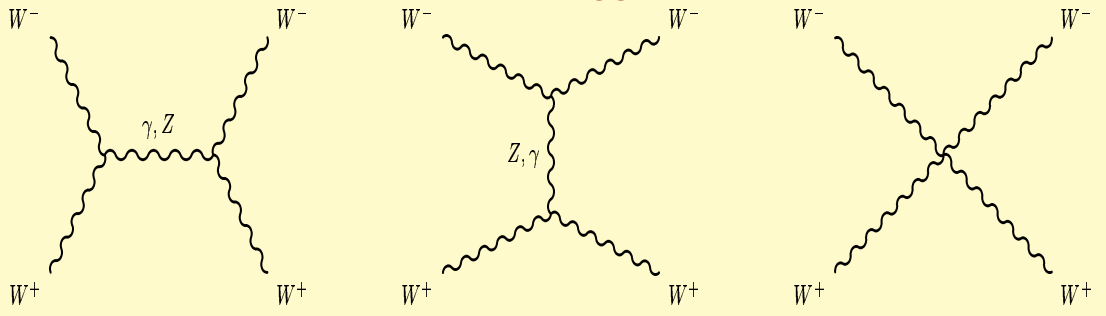
$$E \leq \sqrt{3\pi/G_F} \sim 1 \text{ TeV}$$



Couplage WWZ au LEP2 (LEP1) bien avant 1 TeV.

Appliqué à aujourd'hui: $W^+W^- \rightarrow W^+W^-$

Sans Higgs

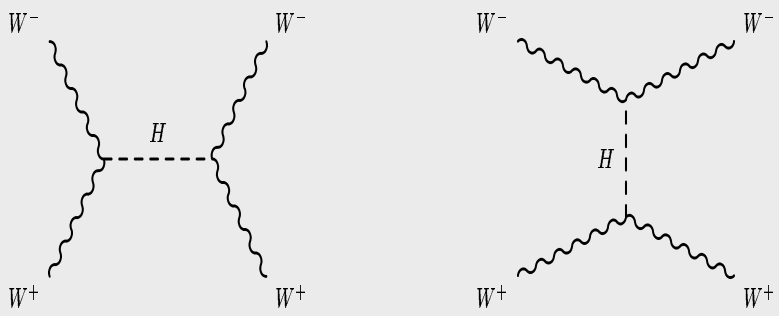


$\mathcal{M}_{LLLL} \sim \sqrt{2}G_F u$
Unitarité seulement si

$\sqrt{s_{WW}} \leq 1.2\text{TeV}$

*requiert une machine pp post-LHC
ou e^+e^- (ou même $\mu^+\mu^-$) $\sqrt{s} = 3\text{TeV}$
Bien sur l'histoire montre que moins que cela pourrait suffire.*

ceci dit dans le modèle standard:



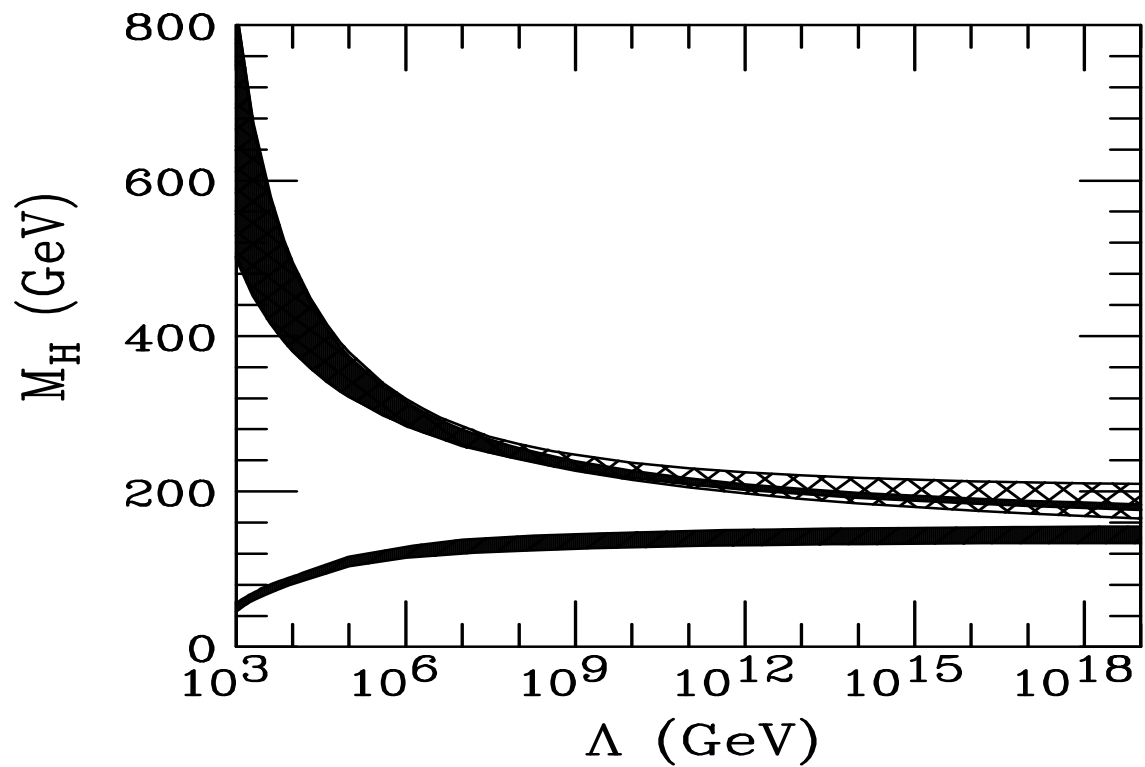
$\mathcal{M}_{LLLL} \sim -\sqrt{2}G_F M_H^2 \left(\frac{s}{s-M_H^2} + \frac{t}{t-M_H^2} \right)$

Unitarité implique

$M_H \leq \frac{4\pi\sqrt{2}}{3G_F} \sim 700\text{GeV}$

s'impliquer dans la physique du Higgs

Argument théorique



limite supérieure: imposer aux couplages du Higgs de “rester perturbatifs” jusqu’à l’échelle Λ

limite inférieure: condition de stabilité du potentiel.

*Problème du Higgs dans le Modèle Standard:
Description pathologique: Pourquoi $M_H < 1\text{TeV}??$*

à une boucle:

Spin-1, Symétrie de jauge locale

$$M_\gamma^2 = M_{\gamma,0}^2 = 0$$

Spin-1/2, Symétrie chirale (globale)

$$m_e = m_e^0 \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\alpha}{\pi} \log(\Lambda^2/m_e^2)\right) \quad \Lambda = \Lambda_P \implies \delta_m \sim 30\%$$

Spin-0,

$$M_H^2 - M_{H,0}^2 \sim \frac{\alpha}{\pi} \Lambda^2$$

Fine tuning

Nouvelle Physique doit expliquer pourquoi:

$$M_H, v \ll \Lambda_{\text{Planck}}$$

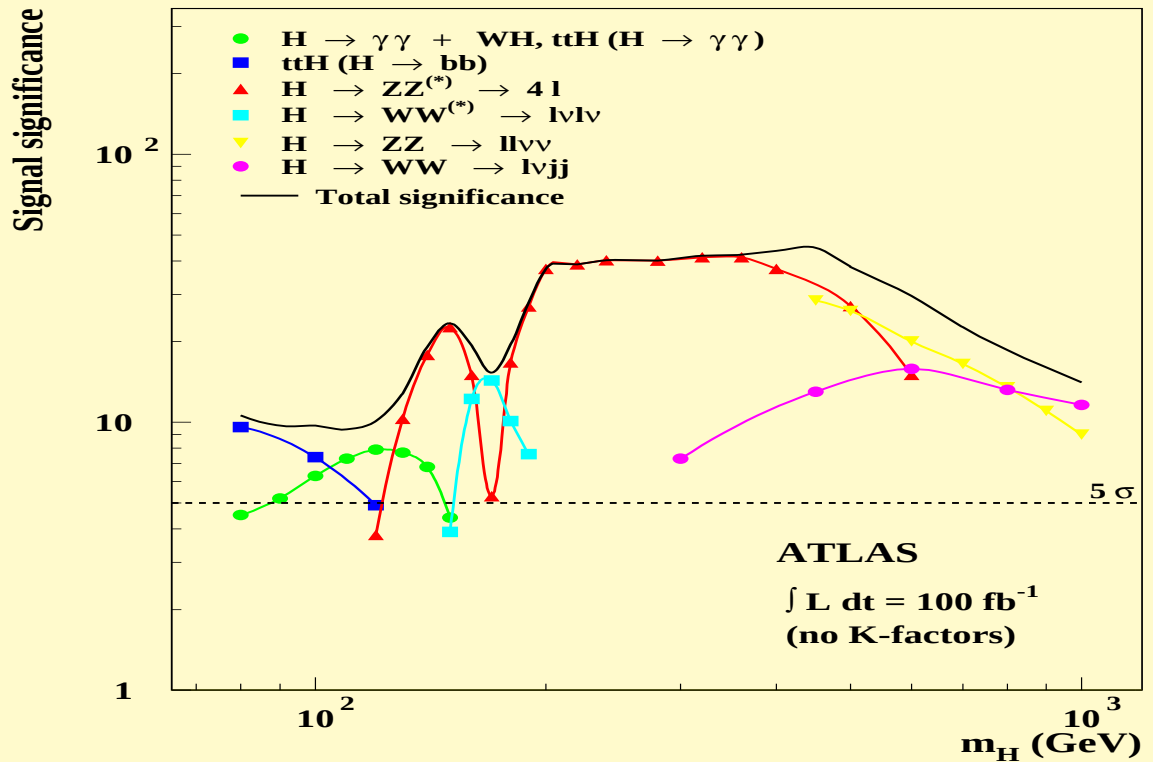
3 Solutions

- *Modèle sans Higgs*
- $\Lambda \sim 1, 10, \dots, 100 \text{ TeV}$: *Dimensions supplémentaires, "Petit Higgs", ...*
- $\ll$: *symétrie=supersymétrie*

*De plus en plus
un mélange des trois.....*

*Priorité des Priorités:
Higgs au(x) collisionneur(s)*

Le Higgs du MS au LHC: découverte garantie (même en invisible)



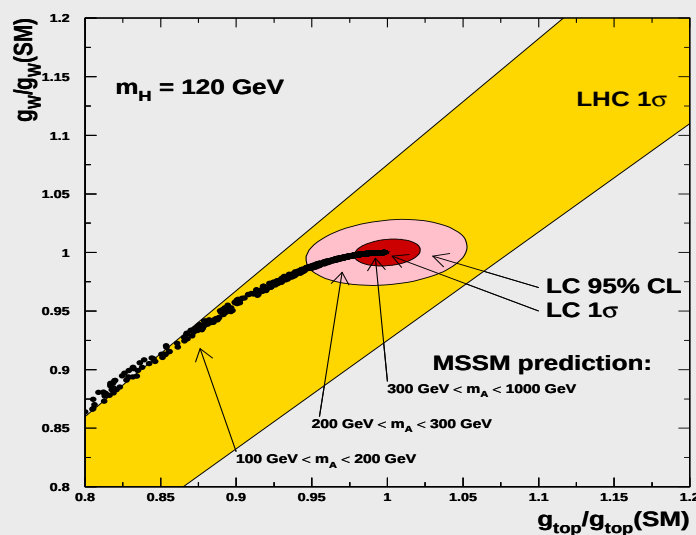
Un Higgs au LHC: est-ce bien le Higgs?

Spin? Parité (pour moi OK)

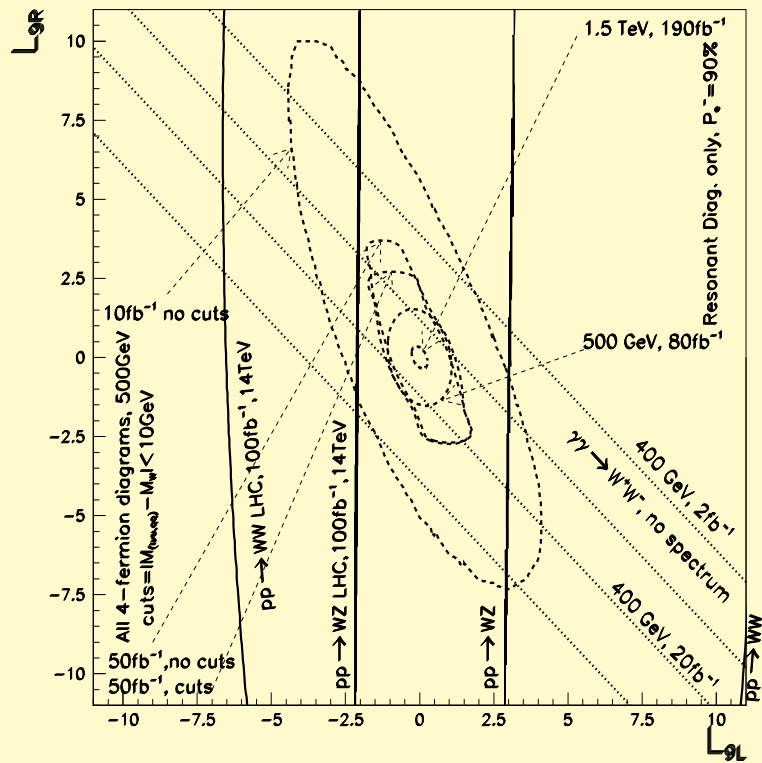
Couplage à la matière, rapport d'embranchement:

LC avec un peu de chance

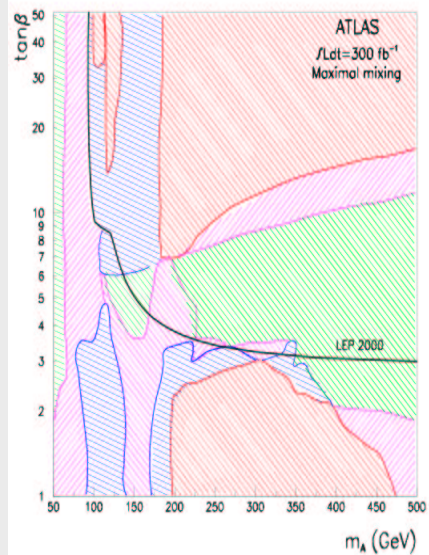
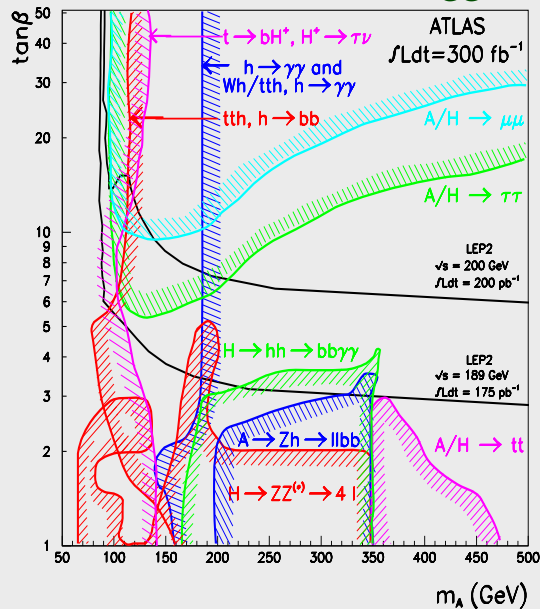
*le potentiel de Higgs? self-couplage: Hyper intéressant:
ni LHC ni LC*



Modèle sans Higgs: Physique du w les S, T, U Post-LEP



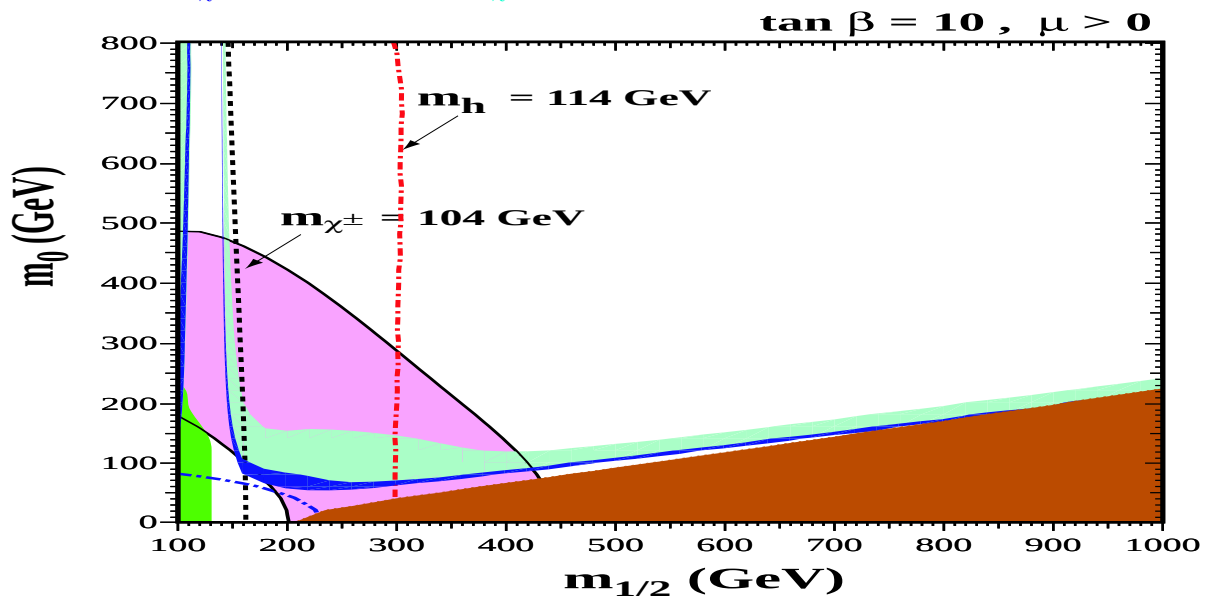
Les Higgs de SUSY



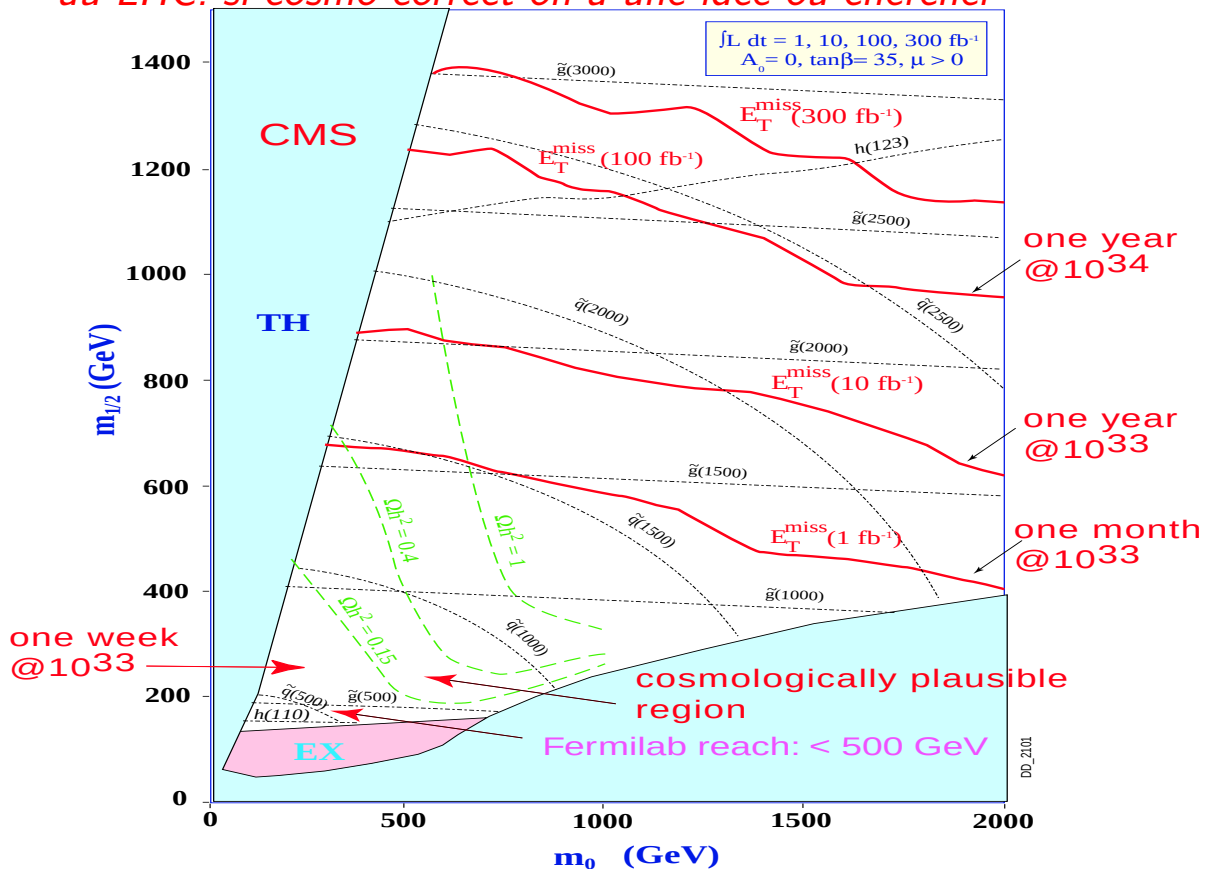
*Recherche de Nouvelles Particules:
Synergie: Collisionneurs-Cosmo-Astro:
(mesures de précision)*

Exemple: SUSY

Pré-LHC $0.094 < \Omega_\chi h^2 < 0.129$ $0.1 < \Omega_\chi h^2 < 0.3$, $g-2$, H_{LEP} , $b \rightarrow s\gamma$



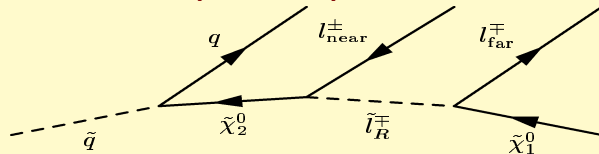
au LHC: si cosmo correct on a une idée où chercher



*Reconstruire les paramètres du modèle:
confirmer $\Omega_\chi h^2 \sim 1 / \langle \sigma v \rangle$??
Thermodynamique et historique de l'univers primordial*

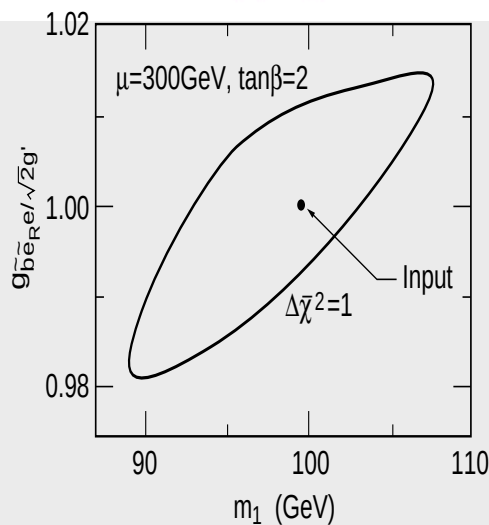
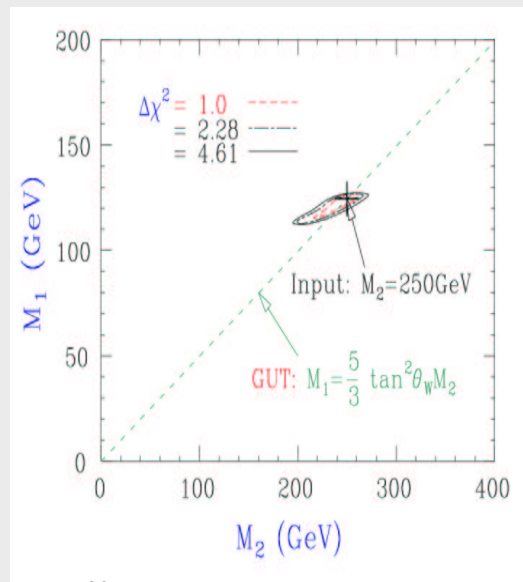
LHC:

*Programme trop ambitieux:
Réponses partielles sauf si beaucoup de chance..*

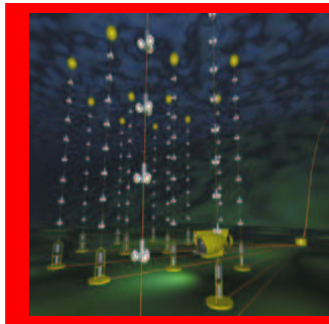


*Comment savoir si e_L ou e_R ,
 $m_{\chi_1^0}$, $g_{\tilde{e}_R \tilde{\chi}_1^0}$, spin,..*

*Collisionneur Linéaire avec Faisceaux Polarisés:
Machine de Rêve pour SUSY:*

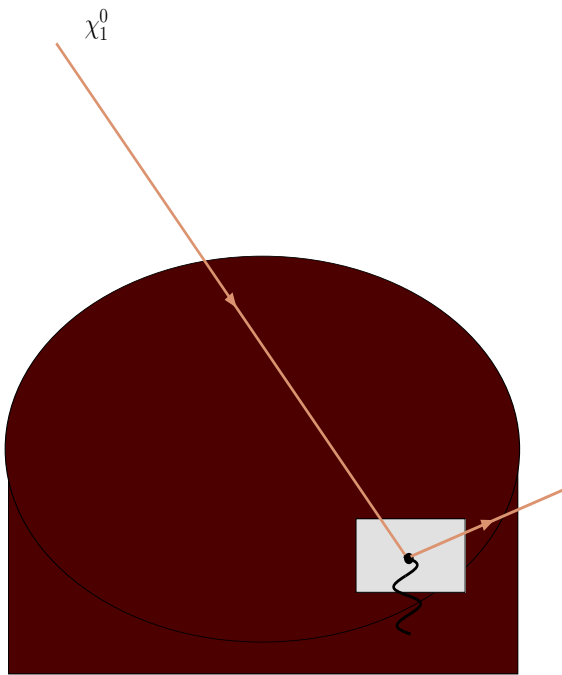


*choisir la polar sélectionne le nombre quantique,
 e_L ou e_R $m_{\chi_1^0}$,..., spin,..*

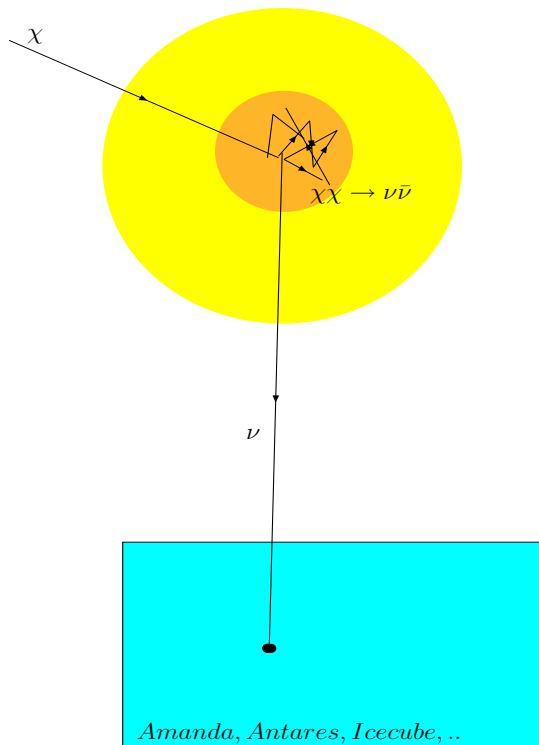


Detection directe et indirecte
Incertitudes astrophysiques

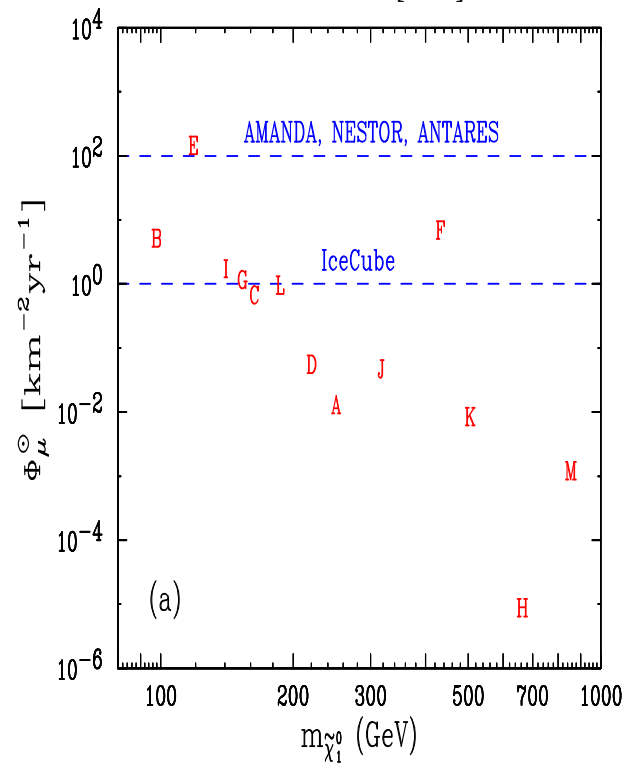
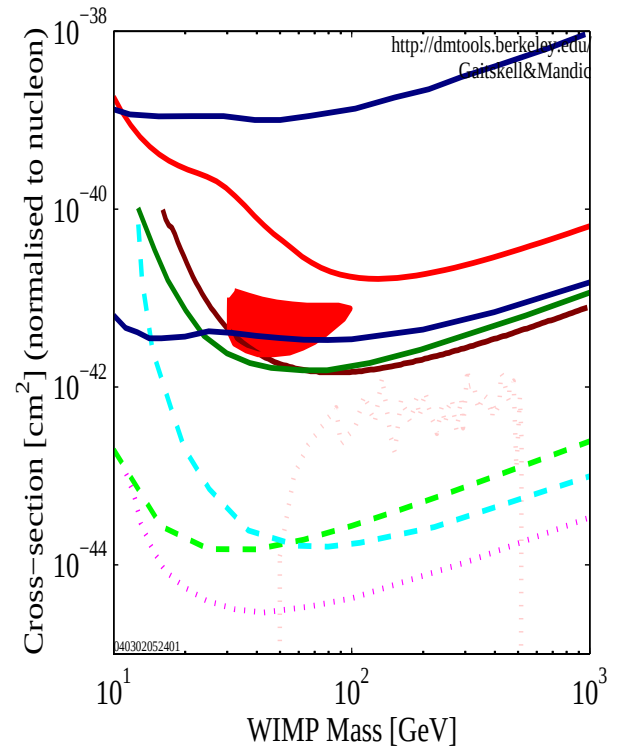
$\bar{p}, e^+, \gamma \dots$

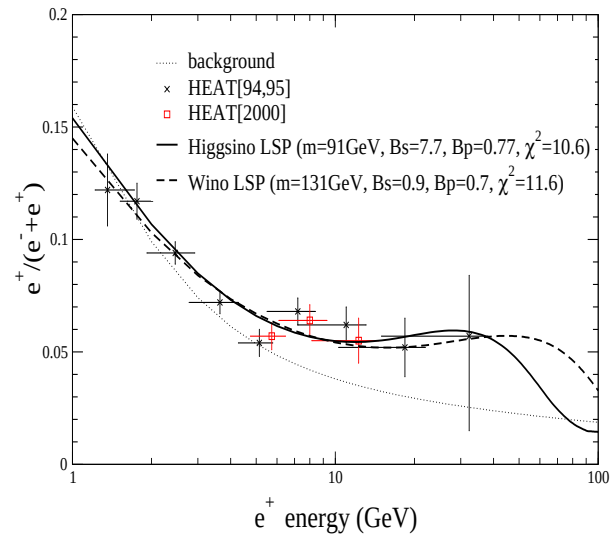
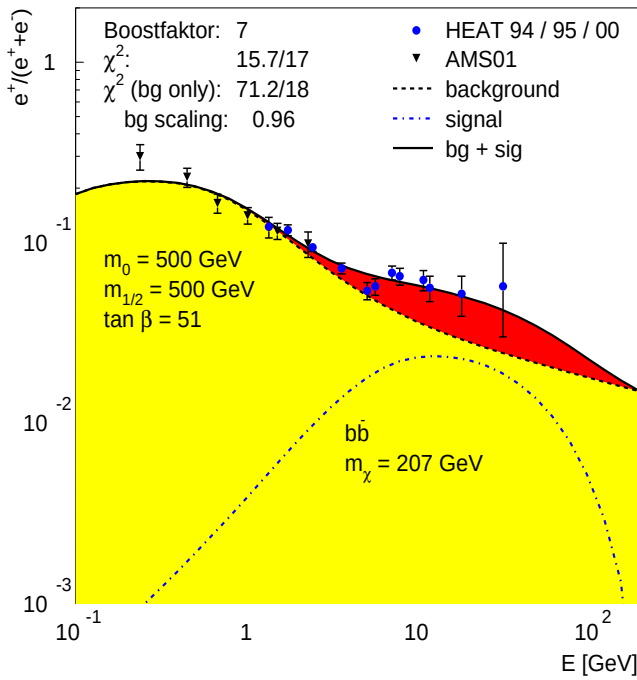
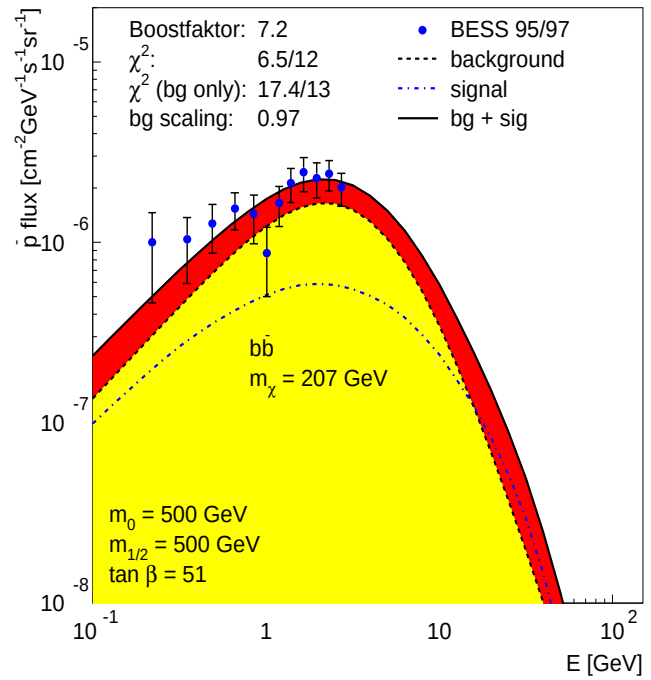
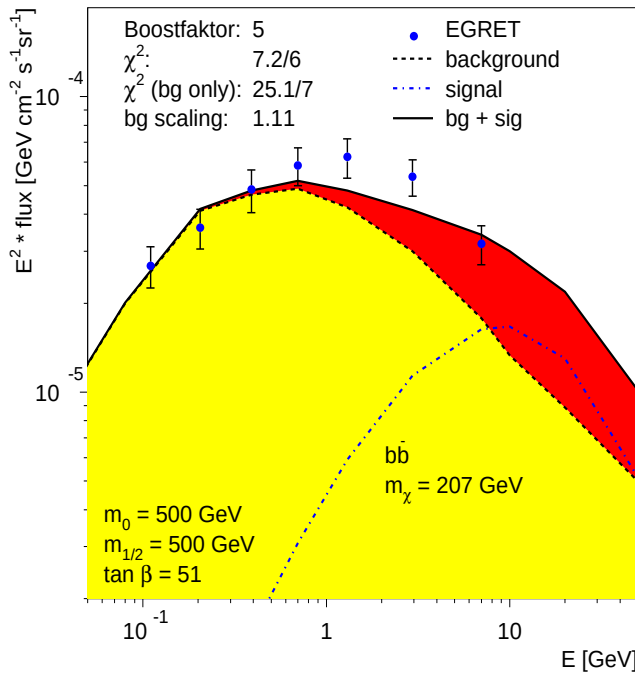


CDMS, Edelweiss, DAMA, Genuis, ..



Amanda, Antares, Icecube, ..





Wim de Boer

Gordy Kane!

$$\frac{d\Phi_\gamma}{d\Omega dE_\gamma} = \sum_i \underbrace{\frac{dN_\gamma^i}{dE_\gamma} \sigma_i v}_{\text{Physique des Particules}} \underbrace{\frac{1}{4\pi m_\chi^2} \int \rho^2 dl}_{\text{Astro}}$$

Propagation, Profile du halo: clumps, cusps, ..

Résumé

Higgs ou se qui lui tient lieu:
LHC
LC

neutrinos
 θ_{13}, δ
Leptogénèse?

Planck+SNAP (2007)
Synergie LHC + expériences astro
LC?