

$$E = mc^2$$

Petite balade au-delà du modèle standard

Christophe Grojean

Service de Physique Théorique - CEA Saclay

(grojean@spht.saclay.cea.fr)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 16\pi G T_{\mu\nu}$$

LPSC Grenoble
jeudi 20 octobre 2005

Une décennie de succès expérimentaux

- ① découverte du top
- ① oscillations de neutrinos solaires, atmosphériques et terrestres
- ① violation directe de CP dans les K
- ① violation de CP dans les B
- ① validation de la nature quantique du MS
- ① mise en évidence de l'accélération de l'expansion de l'Univers
- ① détermination de la composition en matière/énergie de l'Univers

Une première conclusion s'impose...

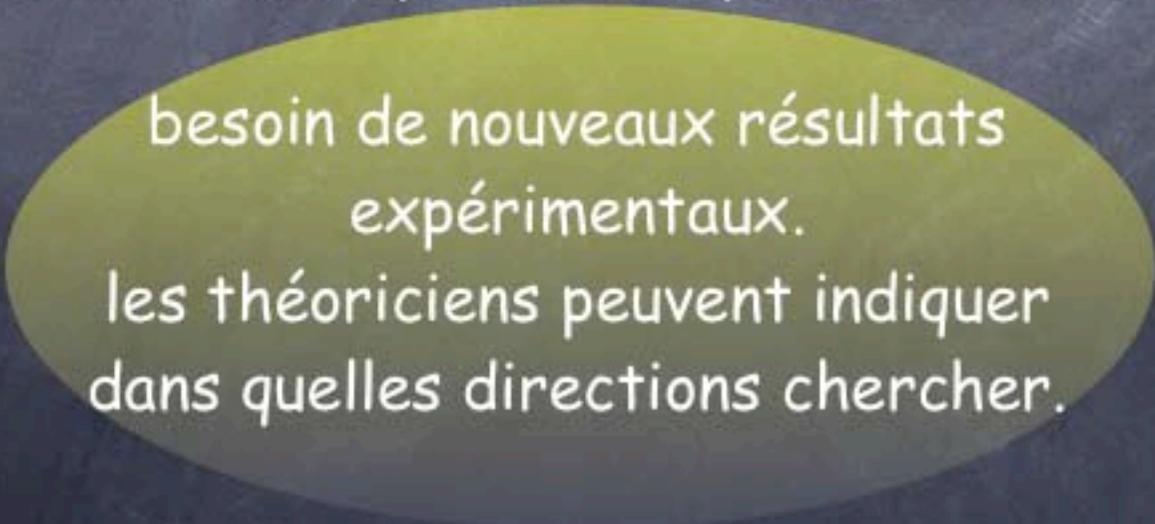


beaucoup de questions ouvertes restent encore sans réponse !

Des indices pour une nouvelle physique

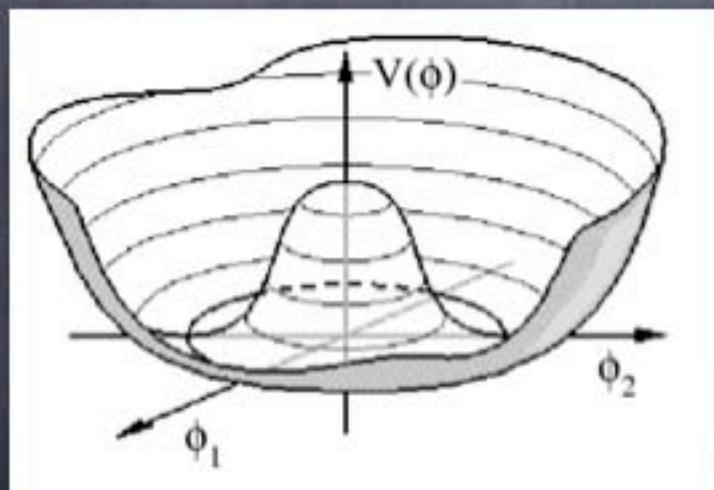
- 🌀 Trois résultats expérimentaux sans explication théorique :
 - 🌀 la masse des particules élémentaires (bosons de jauge, quarks et leptons) ?
 - 🌀 la matière noire (particule neutre, non baryonique, stable, non relativiste) ?
 - 🌀 l'asymétrie matière - antimatière (trois conditions de Sakharov) ?

Beaucoup de modèles, mais pas de compréhension théorique globale

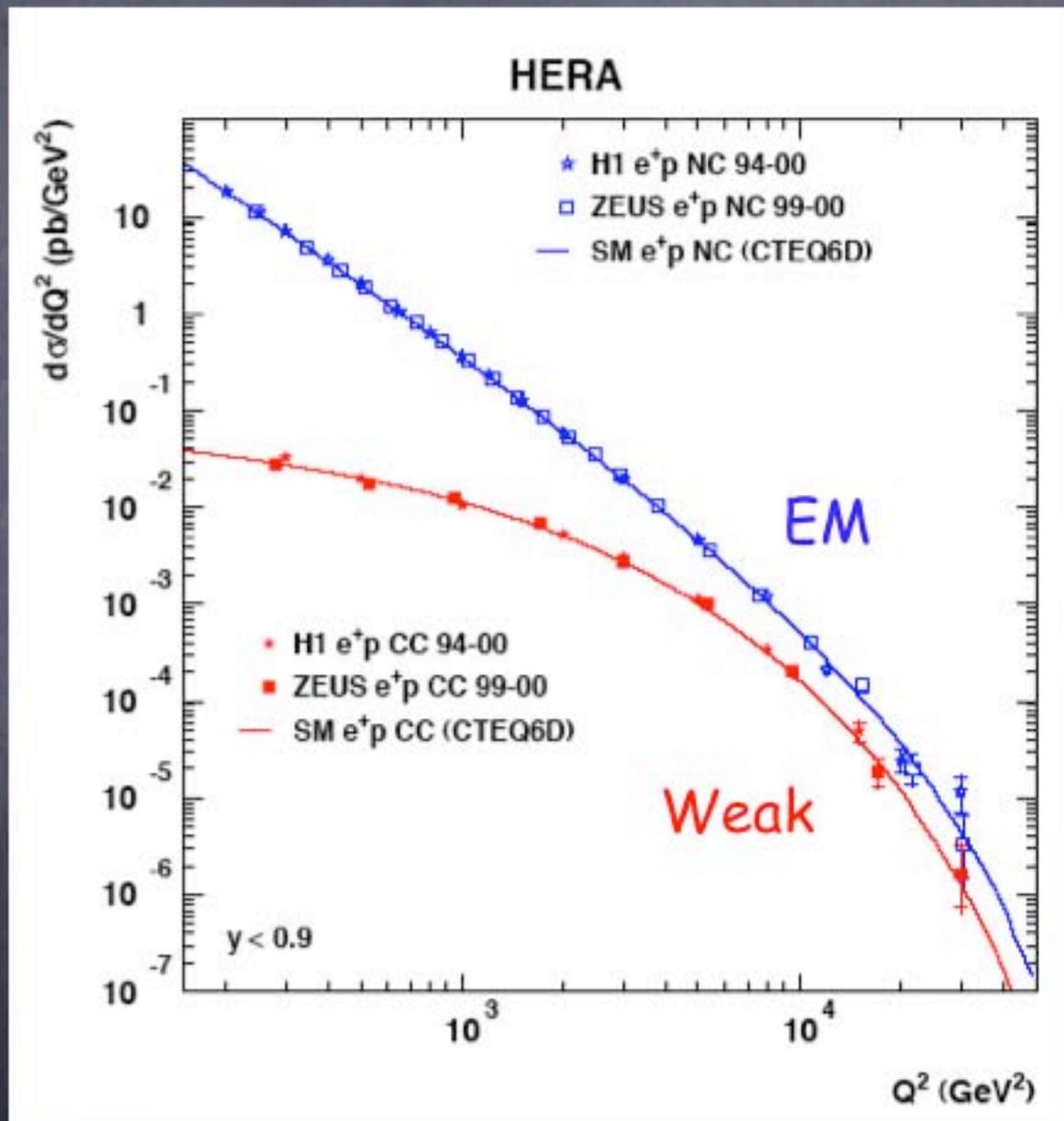


besoin de nouveaux résultats
expérimentaux.
les théoriciens peuvent indiquer
dans quelles directions chercher.

Brisure électrofaible



L'unification électrofaible



La brisure de symétrie électrofaible

A petite distance, W , Z et γ sont interchangeables.

Mais cette pièce est pleine de photons alors qu'il n'y a aucun W ou Z .

La symétrie entre W , Z et γ est brisée à grande distance !

Cette brisure de symétrie est mesurée expérimentalement :

$$m_\gamma < 6 \times 10^{-17} \text{ eV}$$

$$m_{W^\pm} = 80.425 \pm .038 \text{ GeV}$$

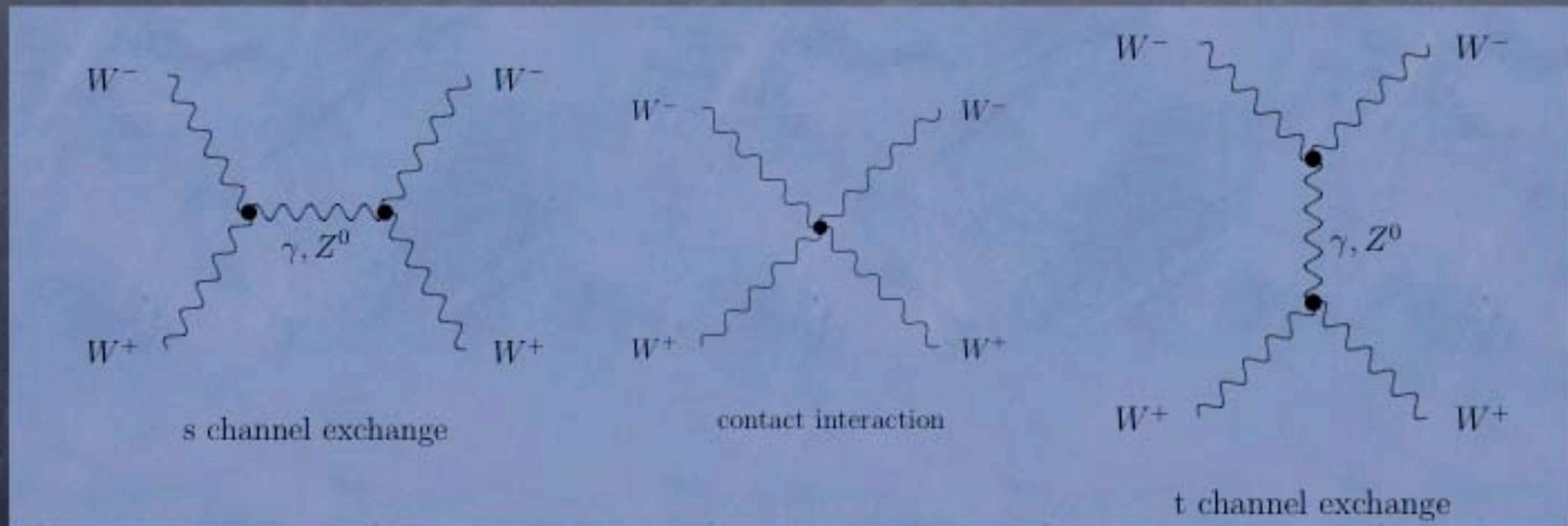
$$m_{Z^0} = 91.1876 \pm .0021 \text{ GeV}$$

Mais il n'y a pas moyen de donner un cadre théorique cohérent à ces masses avec le contenu en particules connues actuellement !

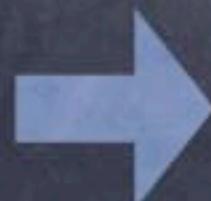
Besoin de nouvelle physique au TeV

les bosons de jauge massifs sont problématiques

- Réponse du théoricien : brisure explicite de l'invariance de jauge
($A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \epsilon$)
- En pratique : violation de l'unitarité au niveau perturbatif



$$\mathcal{A} = g^2 \left(\frac{E}{M_W} \right)^2$$



besoin de nouveaux états physiques
avant $E \sim 4 \pi g M_W \sim 1 \text{ TeV}$
pour restaurer l'unitarité

Brisure spontanée de symétrie



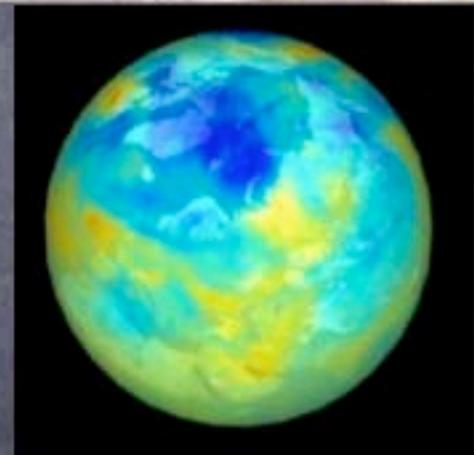
Isotropie dans les
trois directions
d'espace

$SO(3)$



$SO(2)$

Balade au-delà du modèle standard



Sur Terre
isotropie dans les deux
directions horizontales
uniquement

Brisure spontanée de symétrie



La Terre est un condensat qui brise $SO(3)$ en $SO(2)$.
Quel est le condensat qui brise $SU(2) \times U(1)$ en $U(1)_{em}$?

d'espace

$SO(3)$



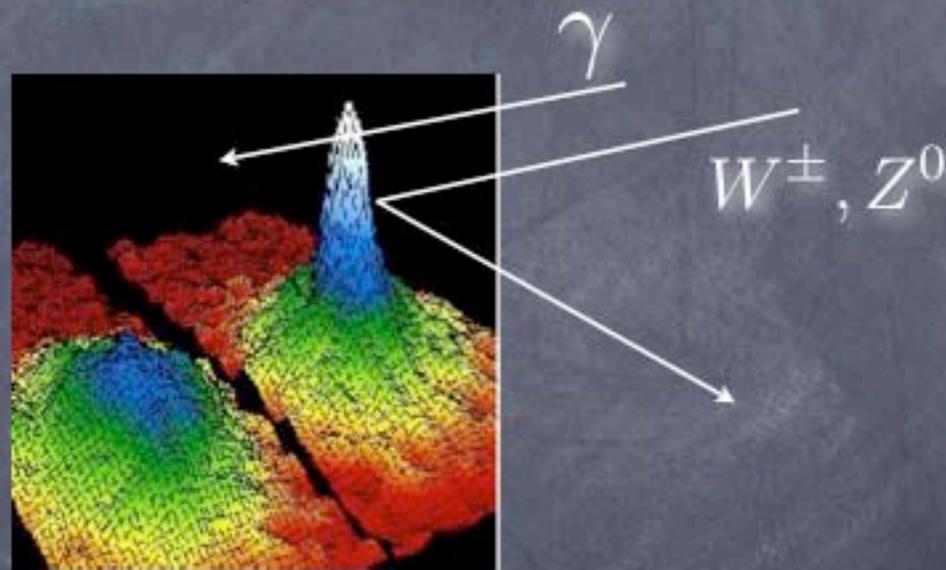
$SO(2)$



Sur Terre
isotropie dans les deux
directions horizontales
uniquement

Un condensat scalaire : le boson de Higgs

champ scalaire = boson = statistique de boson Einstein



un condensat transparent aux photons, mais opaques aux W, Z

Un condensat scalaire : le boson de Higgs

champ scalaire = boson = statistique de boson Einstein

symétrie des interactions

$$SU(2)_L \times U(1)_Y$$

théorie de jauge exacte

Doublet de Higgs

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}$$

Interaction HHZZ : $g^2 |H^0 Z|^2$

$$m_W = m_Z = m_\gamma = 0$$

Interaction Huu :

$$\lambda_u (H^0 U_L U_R + H^+ D_L U_R)$$

symétrie du vide

$$U(1)_{e.m.}$$

théorie de jauge spontanément brisée

Valeur moyenne dans le vide

$$\langle H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix} \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

Terme de masse ZZ : $g^2 v^2 Z^2$

$$m_W \sim m_Z \sim 100 \text{ GeV}$$

$$m_\gamma = 0$$

Terme de masse uu :

$$\lambda_u v U_L U_R$$

Un condensat scalaire : le boson de Higgs

champ scalaire = boson = statistique de boson Einstein

symétrie des interactions

$$SU(2)_L \times U(1)_Y$$

théorie de jauge exacte

Doublet de Higgs

$$H = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}$$

Interaction HHZZ :

$$m_W = m_Z = m_\gamma$$

Interaction H_u :

$$\lambda_u (H^0 U_L U_R + \dots)$$

symétrie du vide

$$U(1)_{e.m.}$$

théorie de jauge spontanément brisée

état de moyenne dans le vide

$$\begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix} \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

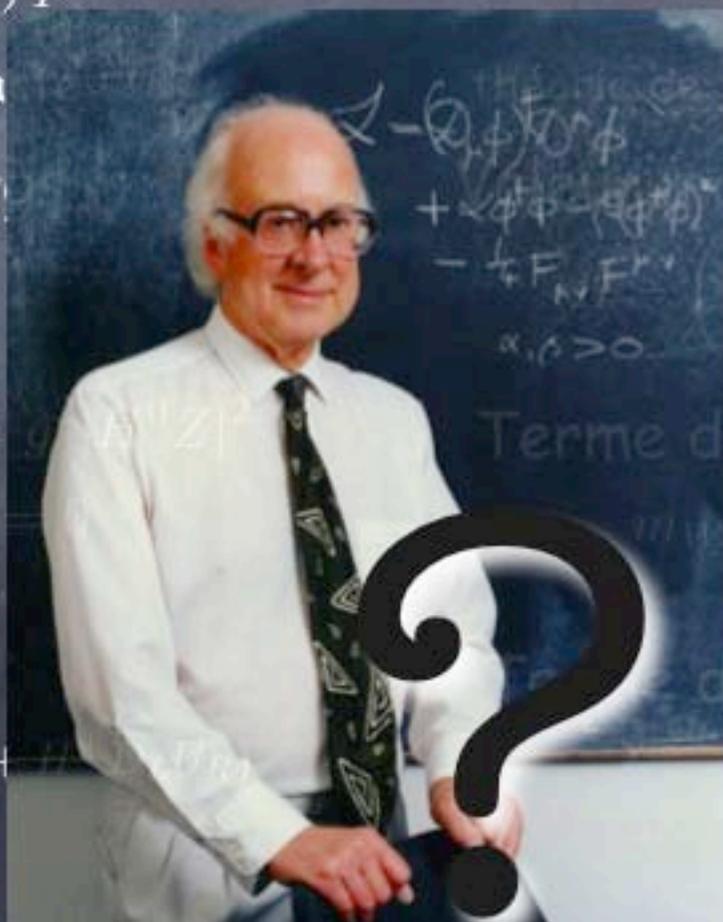
Terme de masse ZZ : $g^2 v^2 Z^2$

$$m_Z \sim m_Z \sim 100 \text{ GeV}$$

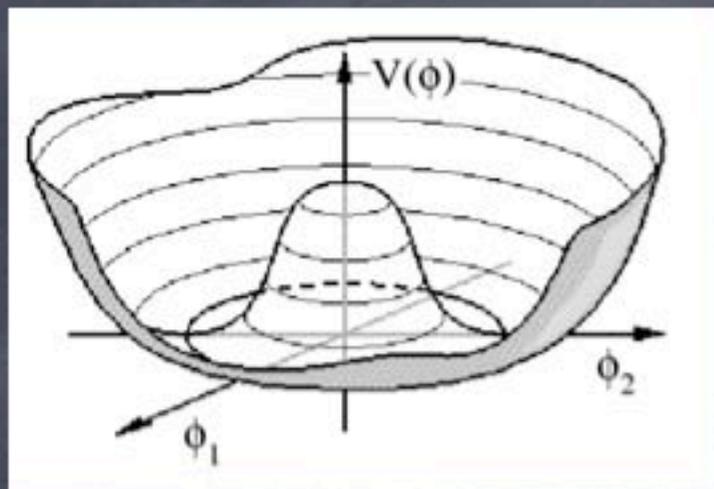
$$m_\gamma = 0$$

Terme de masse uu :

$$\lambda_u v U_L U_R$$



Mécanisme de Higgs : modèle sans dynamique



$$\sqrt{2} \langle H^0 \rangle = 246 \text{ GeV}$$

Aucune dynamique à l'origine
de l'instabilité à l'origine

Le mécanisme de Higgs est une description de la brisure de symétrie, ce n'est pas une explication.

○ Physique hadronique

π, K, η
 $p, n, \Lambda \dots$

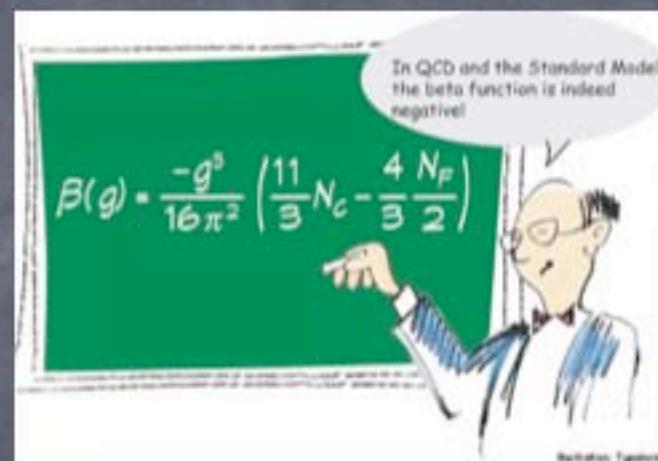
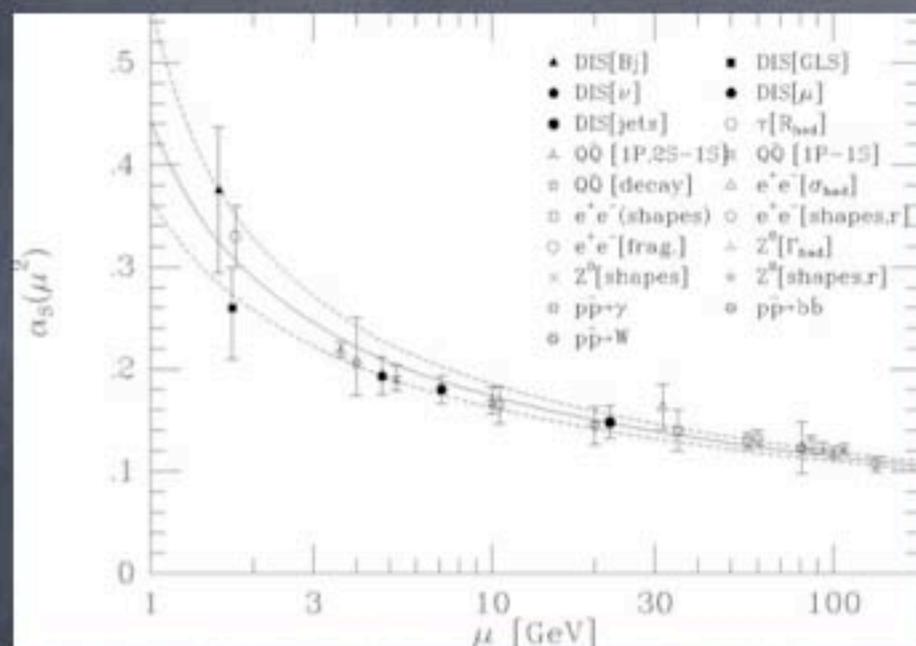


constituants élémentaires : u, d, s

interaction de jauge



Mécanisme de Higgs : modèle sans dynamique



○ Physique hadronique

π, K, η
 $p, n, \Lambda \dots$



constituants élémentaires : u,d,s

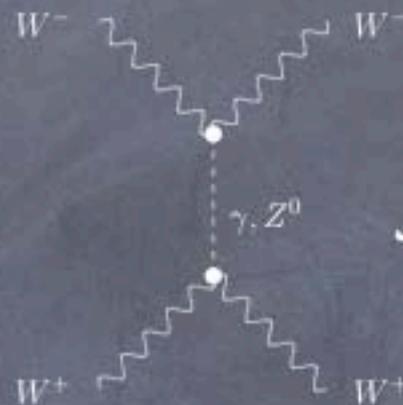
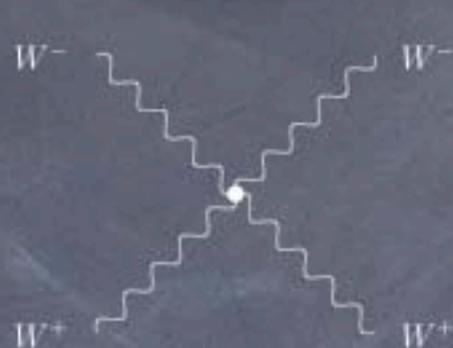
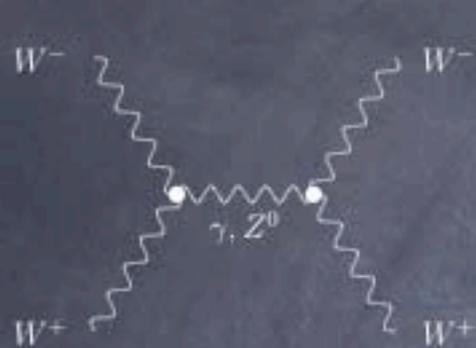
interaction de jauge



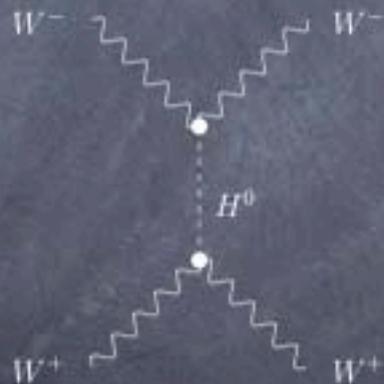
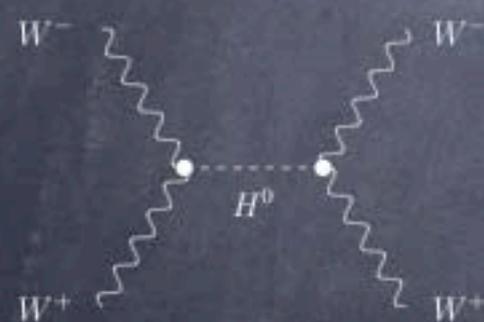
liberté asymptotique



Limite d'unitarité



$$\mathcal{A} = g^2 \left(\frac{E}{M_W} \right)^2$$

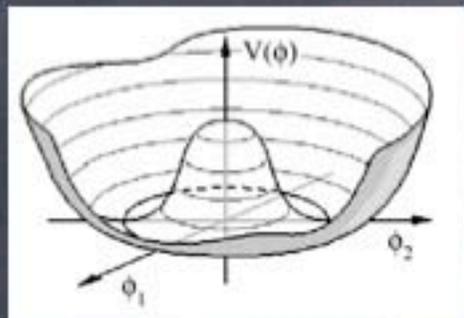


$$\mathcal{A} = -g^2 \left(\frac{E}{M_W} \right)^2$$

Le Higgs unitarise la théorie (si sa masse est inférieure à $\sim 700 \text{ GeV}$)

$$\mathcal{A} = g^2 \left(\frac{M_H}{M_W} \right)^2$$

Limite de trivialité



$$V(h) = -\frac{1}{2}\mu^2 h^2 + \frac{1}{4}\lambda h^4$$

v.e.v. : $v^2 = \mu^2/\lambda$ mass : $m_H^2 = 2\lambda v^2$



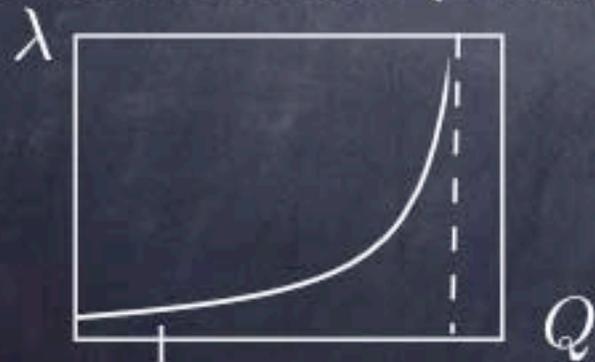
$$16\pi^2 \frac{d\lambda}{d \ln Q} = 24\lambda^2 - (3g'^2 + 9g^2 - 12y_t^2)\lambda + \frac{3}{8}g'^4 + \frac{3}{4}g'^2 g^2 + \frac{9}{8}g^4 - 6y_t^4 + \text{Higher loops}$$

Small Yukawa

Grande masse (λ dominated RGE)

$$\lambda(Q) = \frac{m_H^2}{4v^2 - \frac{3}{2\pi^2} m_H^2 \ln(Q/v)}$$

$m_H \nearrow$



Pôle de Landau

instabilité

$$\Lambda \leq v e^{8\pi^2 v^2 / 3m_H^2}$$

borne supérieure sur m_H

Stabilité du vide

Petite masse (y_t dominated RGE) $\lambda(Q) = \frac{m_H^2}{4v^2} - \frac{3}{8\pi^2} y_t^4(v) \ln(Q/v)$ $m_H \searrow$
 instabilité

$$\left(16\pi^2 \frac{dy_t}{d \ln Q} = \frac{9}{2} y_t^2 + \text{Higher loops} \right. \\
\left. \text{Small Yukawa} \right)$$

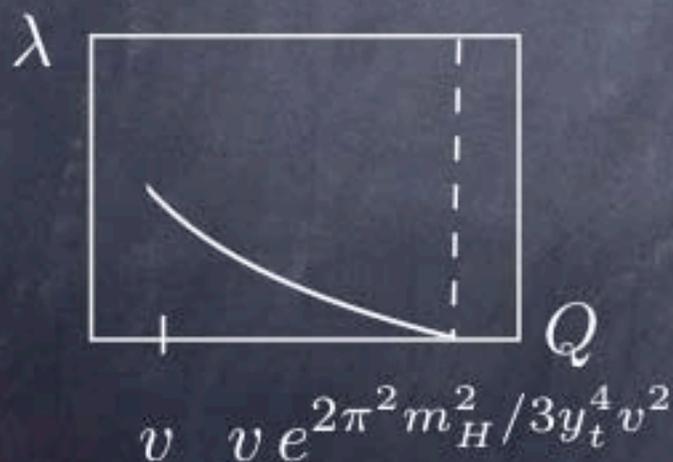


$$\lambda < 0$$



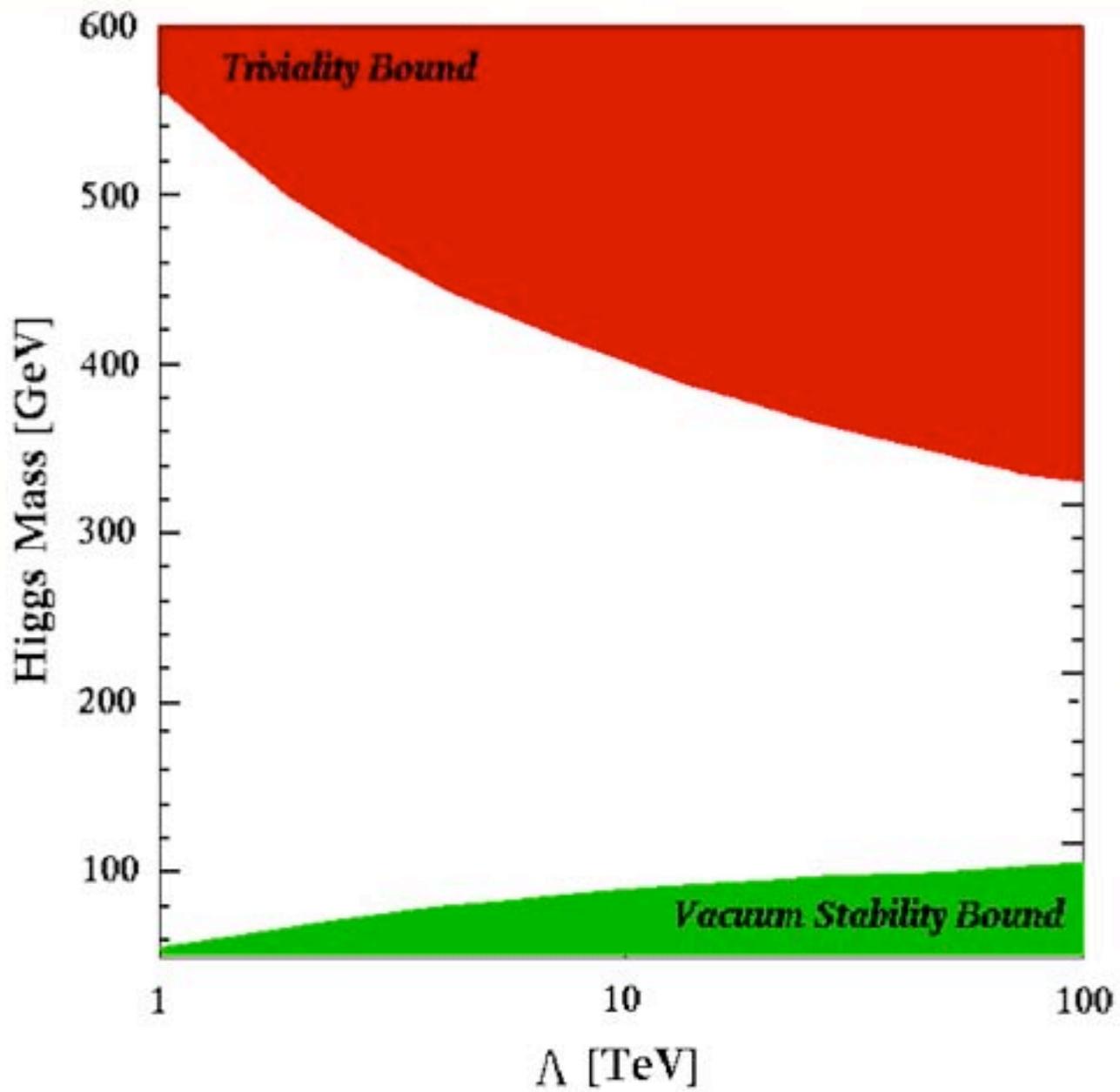
Potentiel non borné inférieurement

~~EWSB~~



$$\Lambda \leq v e^{2\pi^2 m_H^2 / 3y_t^4 v^2}$$

borne inférieure sur m_H



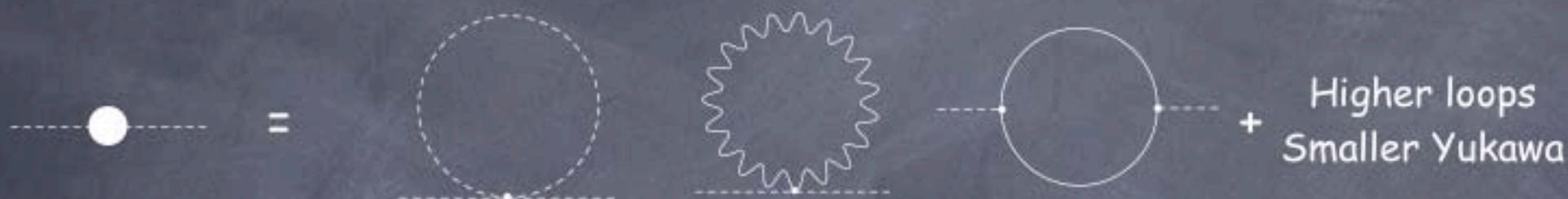
Contraintes sur l'échelle de nouvelle physique

nouvelles particules \Rightarrow nouvelles interactions entre les particules du modèle standard

| broken symmetry | operators | scale Λ |
|---------------------------------------|--|-----------------|
| B, L | $(QQQL)/\Lambda^2$ | 10^{13} TeV |
| flavor (1,2 nd family), CP | $(\bar{d}s\bar{d}s)/\Lambda^2$ | 1000 TeV |
| flavor (2,3 rd family) | $m_b(\bar{s}\sigma_{\mu\nu}F^{\mu\nu}b)/\Lambda^2$ | 50 TeV |
| custodial $SU(2)$ | $(h^\dagger D_\mu h)^2/\Lambda^2$ | 5 TeV |
| none (S-parameter) | $(D^2 h^\dagger D^2 h)/\Lambda^2$ | 5 TeV |

Pourquoi $m_h^2 \ll \Lambda^2$? Besoin de stabiliser la masse du Higgs.

Instabilité quantique de la masse du Higgs



$$\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{1}{k^2 - m^2} \propto \Lambda^2 \quad \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} \frac{k^2}{(k^2 - m^2)^2} \propto \Lambda^2$$

$$\delta m^2 = \left(\frac{1}{4}(9g^2 + 3g'^2) - 6y_t^2 + 6\lambda \right) \frac{\Lambda^2}{32\pi^2}$$

for a 10 TeV cutoff: $(600 \text{ GeV})^2$ $-(1.5 \text{ TeV})^2$ $(800 \text{ GeV})^2$

Le problème de hiérarchie est un problème technique des théories des champs impliquant des champs scalaires

D'ailleurs aucun champ scalaire fondamental n'a été observé à basse énergie

Comment contrôler les corrections radiatives

Théorème de Goldstone

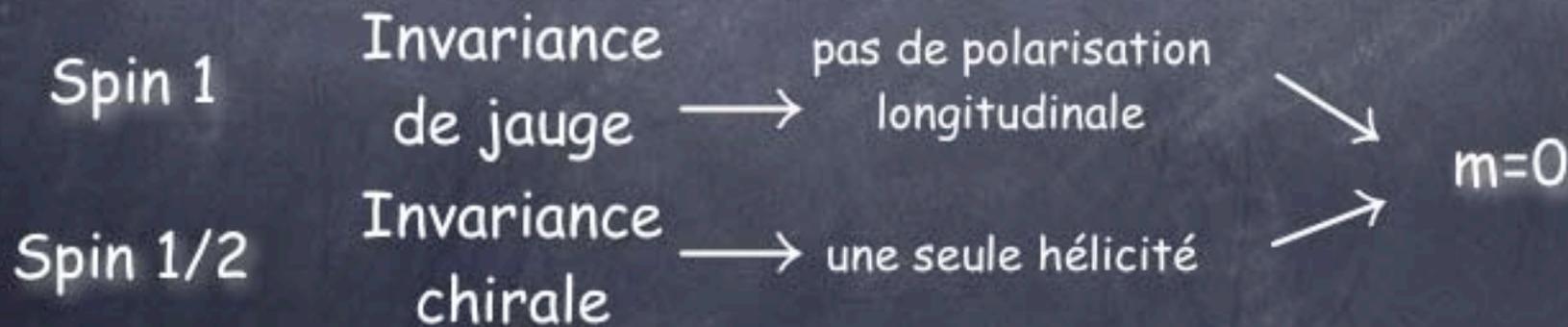
Symétrie globale spontanément brisée \Rightarrow scalaire de masse nulle

... mais le Higgs a des couplages non dérivatifs

L'astuce du spin

$2s+1$ états de polarisation

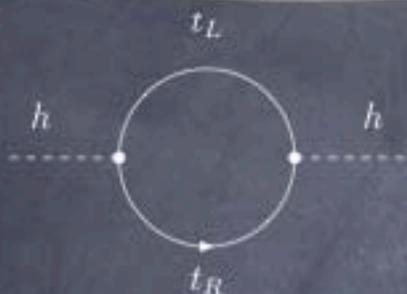
Une particule de spin s : ...sauf si elle se propage à la vitesse de la lumière
... moins d'états de polarisation



... mais le Higgs a un spin 0

① Supersymétrie

Scalaire \longleftrightarrow Fermion



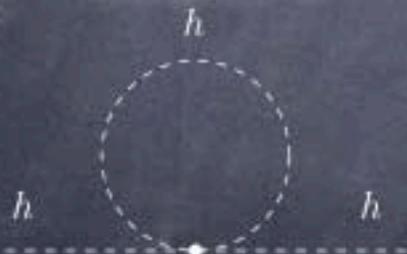
Absence de divergence quadratique

partenaires supersymétriques du MS = nouvelles particules \sim TeV

② Unification Higgs-Jauge

Lorentz $d > 4$ $\begin{cases} A_\mu & \text{vecteur 4d} \\ A_5 & \text{scalaire 4d} \end{cases}$

Scalaire \longleftrightarrow Boson de Jauge



$$\propto \Lambda^2$$



$$\propto -\Lambda^2$$



Absence de divergence quadratique

partenaires de spin 1 du MS = nouveaux bosons de jauge \sim TeV

Aucune de ces deux symétries ne peut être une symétrie exacte de la nature. Symétrie brisée (de façon douce)

③ Little Higgs theories

Higgs = Pseudo Goldstone + brisure collective

Symétrie globale doit être brisée... mais pas n'importe comment :

- deux interactions g_1 et g_2
- ensemble, elles brisent toutes les symétries globales
- individuellement, elles ne brisent qu'une partie des symétries globales

$$[SU(3)/SU(2)]^2$$

2x(8-3)=10 Goldstone

$$\mathcal{S} = \frac{1}{f^2} |D_\mu \phi_1|^2 + \frac{1}{f^2} |D_\mu \phi_2|^2$$

$$\text{○ } g_2 \rightarrow 0$$

symétrie globale :

$$\phi_1 \rightarrow U_1 \phi_1 \text{ et } A_\mu \rightarrow U_1 A_\mu U_1^\dagger \Rightarrow 5 \text{ GB}$$

$$\text{○ } g_1 \rightarrow 0$$

symétrie globale :

$$\phi_2 \rightarrow U_2 \phi_2 \text{ et } A_\mu \rightarrow U_2 A_\mu U_2^\dagger \Rightarrow 5 \text{ GB}$$

$$\phi_1 \text{ avec } \langle \phi_1 \rangle = f \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ et } \phi_2 \text{ avec } \langle \phi_2 \rangle = f \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Jauge :

$$SU(3)_d \rightarrow SU(2)_d$$

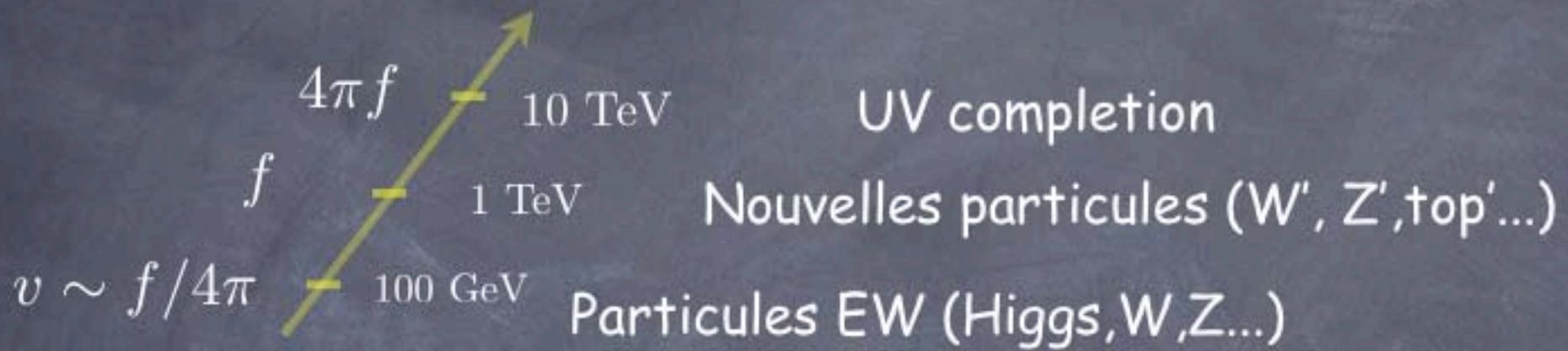
5 Goldstone sont mangés.
Il reste 5 PGB.

En présence de g_1 et $g_2 \Rightarrow 0 \text{ GB} \Rightarrow$ masse terme pour 5PGB

Pas de dv quadratique à une boucle car pas de diagrammes avec g_1 et g_2

③ Little Higgs theories

Higgs = Pseudo Goldstone + brisure collective



$$[SU(3)/SU(2)]^2$$

2x(8-3)=10 Goldstone

$$\mathcal{S} = \frac{1}{f^2} |D_\mu \phi_1|^2 + \frac{1}{f^2} |D_\mu \phi_2|^2$$

$$0 \quad g_2 \rightarrow 0$$

symétrie globale :

$$\phi_1 \rightarrow U_1 \phi_1 \quad \text{et} \quad A_\mu \rightarrow U_1 A_\mu U_1^\dagger \Rightarrow 5 \text{ GB}$$

$$0 \quad g_1 \rightarrow 0$$

symétrie globale :

$$\phi_2 \rightarrow U_2 \phi_2 \quad \text{et} \quad A_\mu \rightarrow U_2 A_\mu U_2^\dagger \Rightarrow 5 \text{ GB}$$

$$\phi_1 \text{ avec } \langle \phi_1 \rangle = f \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \phi_2 \text{ avec } \langle \phi_2 \rangle = f \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Jauge :

$$SU(3)_d \rightarrow SU(2)_d$$

5 Goldstone sont mangés.
Il reste 5 PGB.

En présence de g_1 et $g_2 \Rightarrow 0 \text{ GB} \Rightarrow$ masse terme pour 5PGB

Pas de dv quadratique à une boucle car pas de diagrammes avec g_1 et g_2

④ Higgsless theories

$$m^2 = E^2 - \vec{p}_3^2 - \vec{p}_\perp^2$$

impulsion dans dimensions supplémentaires \sim masse à 4D

générer une masse sans Higgs = donner une impulsion transverse

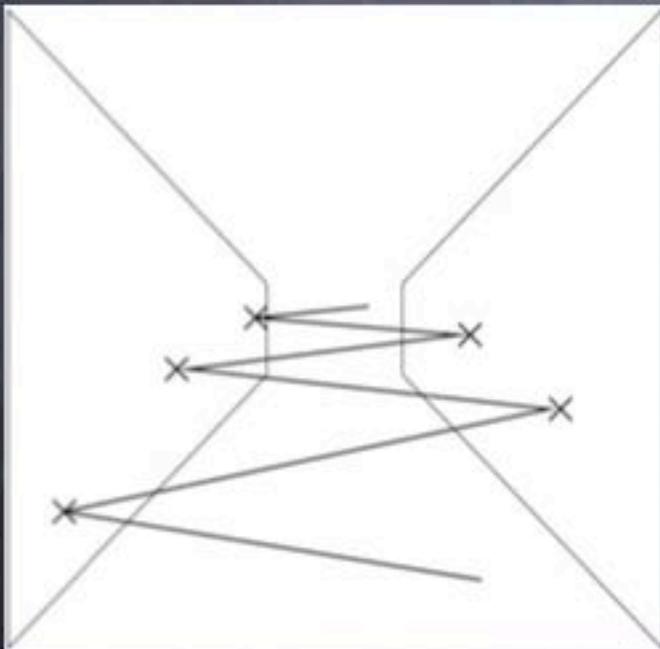
Unitarité restaurée par l'échange KK

$$g_{WWWW}^2 - \sum_k g_{WWZ_k}^2 = 0$$

$$4g_{WWWW}^2 M_W^4 - 3 \sum_k g_{WWZ_k}^2 M_{Z_k}^2 = 0$$

règles de somme = identité de Ward 5D

contraintes sur les masses et les couplages des résonances
(model-indépendent)

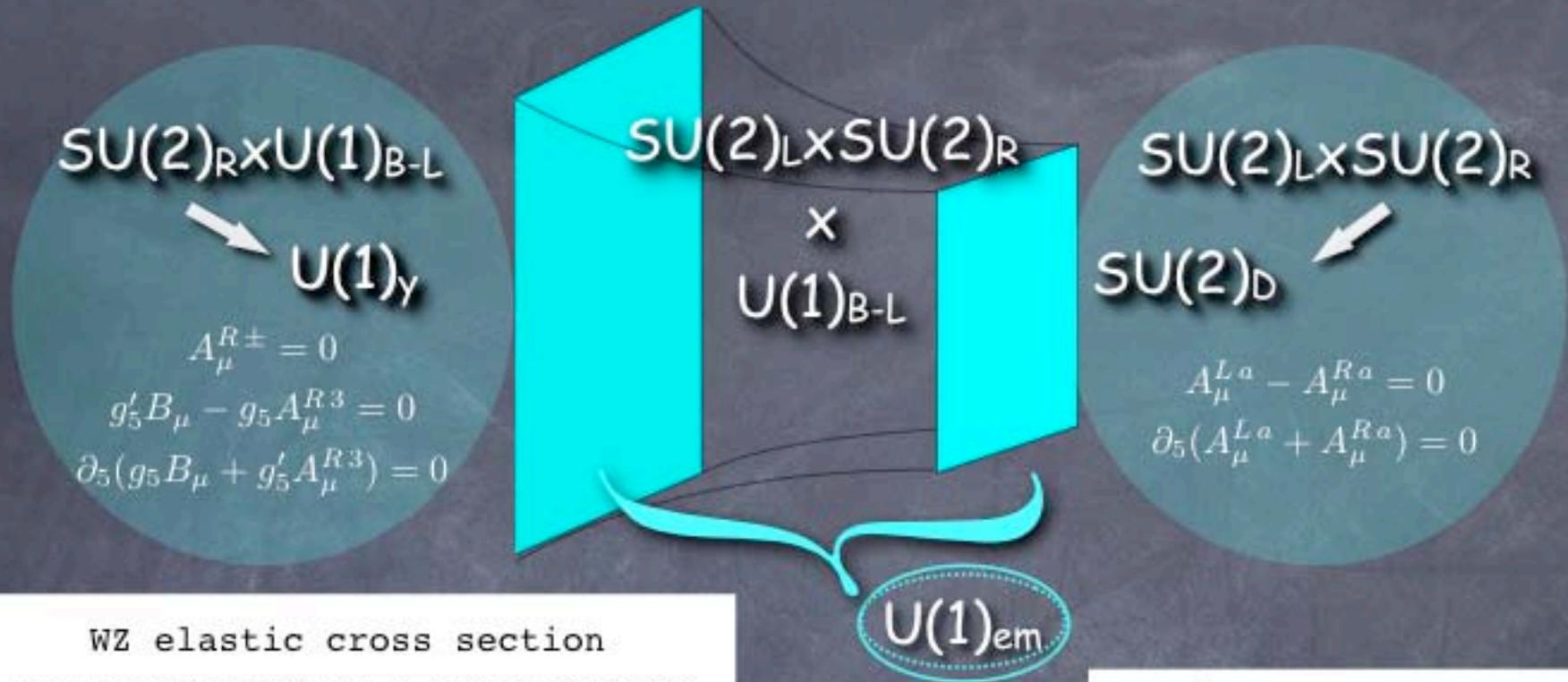


$$g_{WW'Z} \leq \frac{g_{WWZ} M_Z}{\sqrt{3} M_{W'} M_W}$$

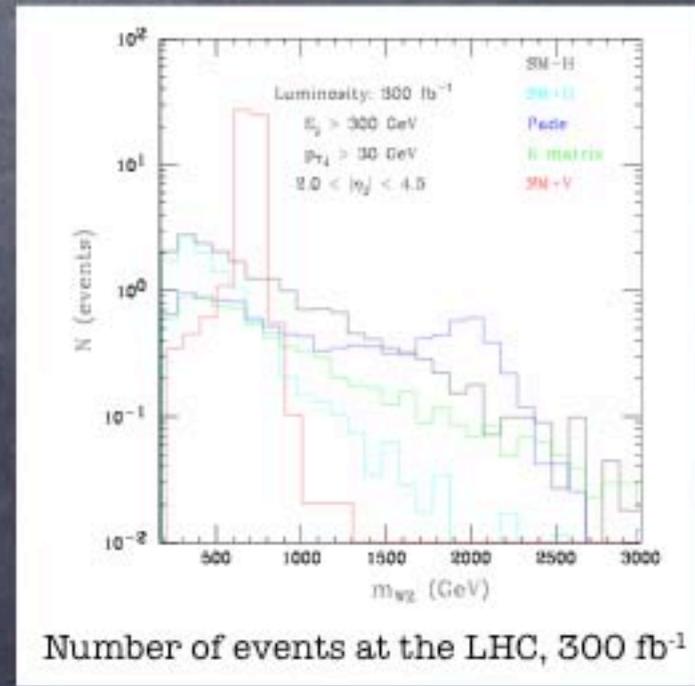
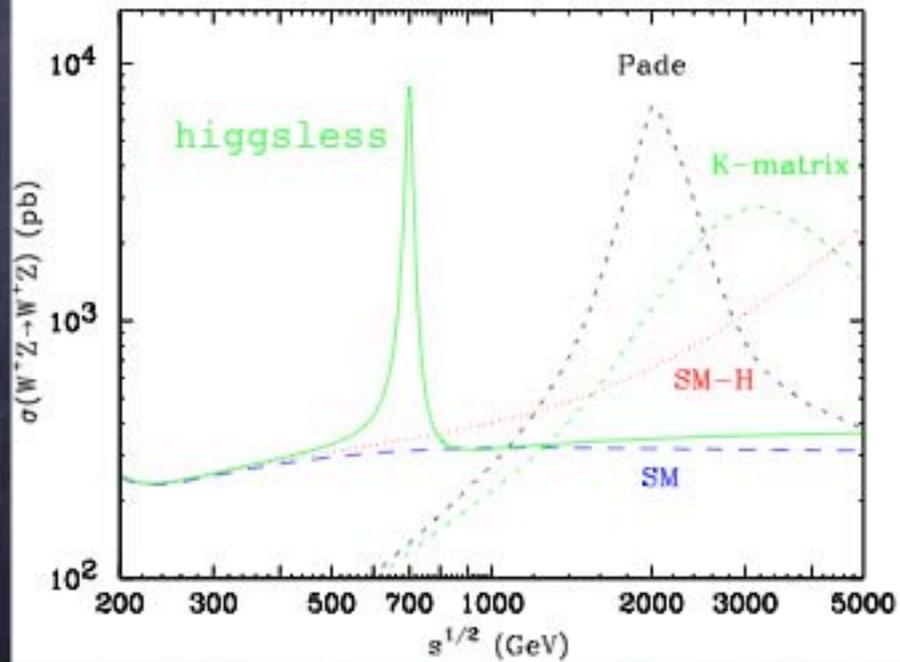
Excursion au-delà du modèle standard

$$\Gamma(W' \rightarrow WZ) = \frac{\alpha M_{W'}}{144 s^2 M_W^2}$$

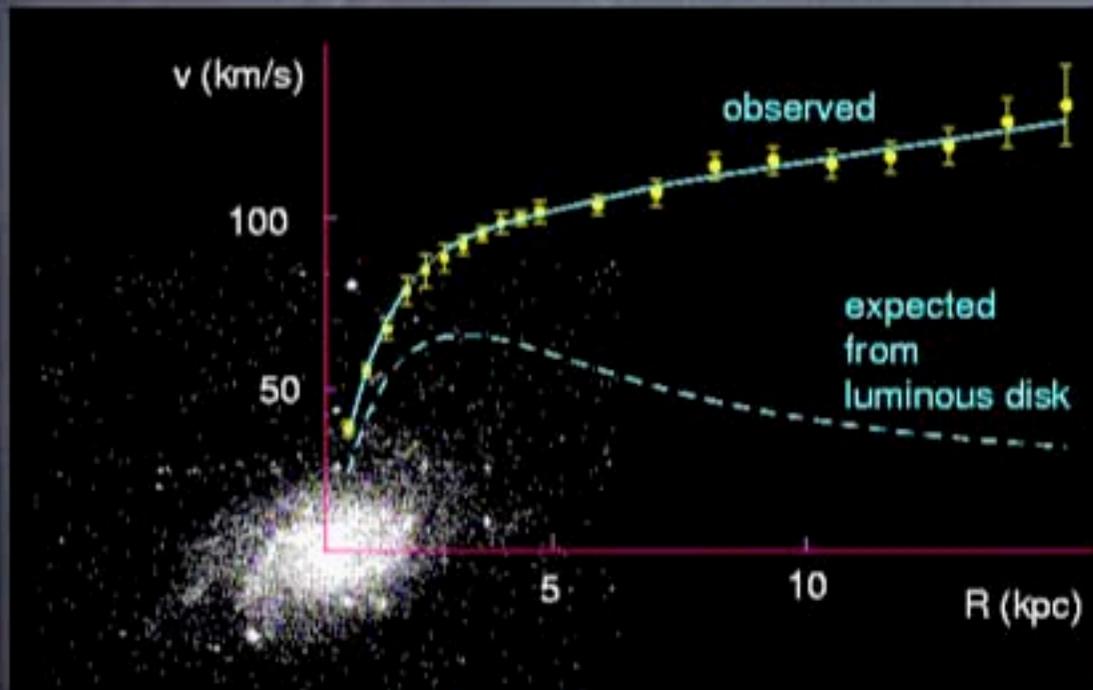
Grenoble, 20 Oct. 07



WZ elastic cross section



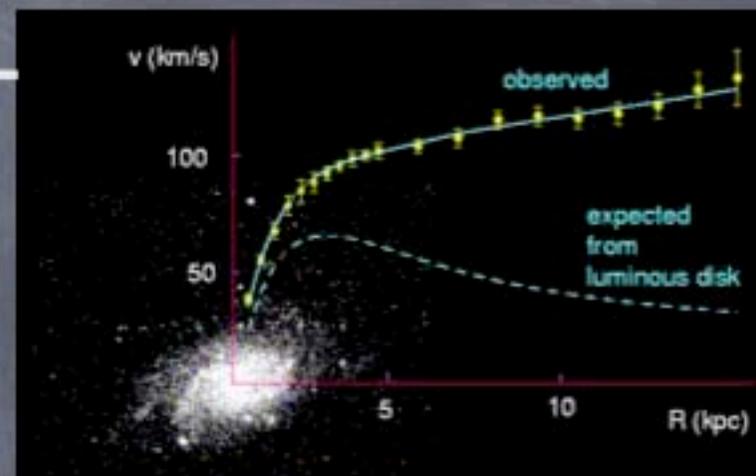
Matière noire



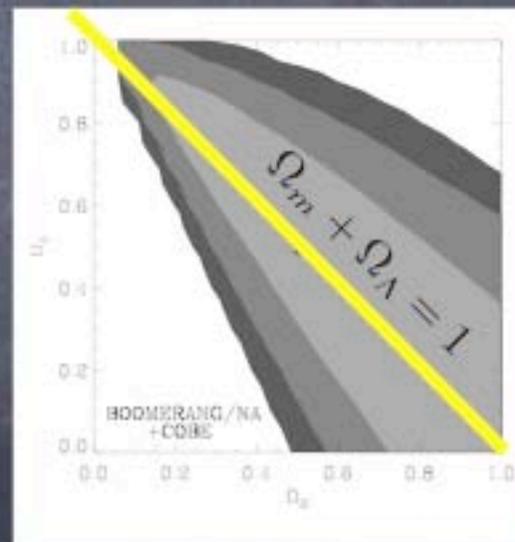
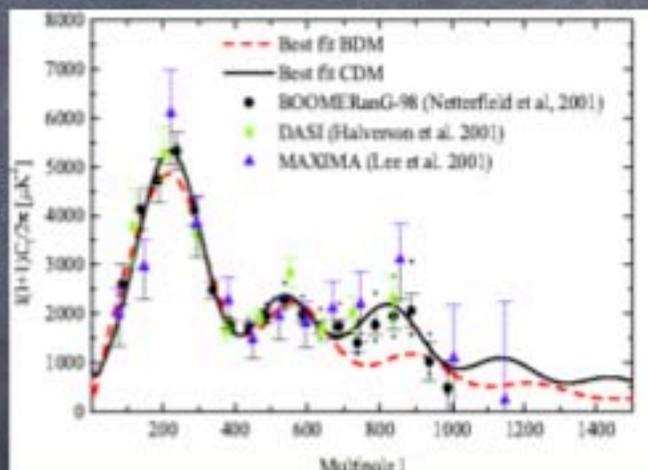
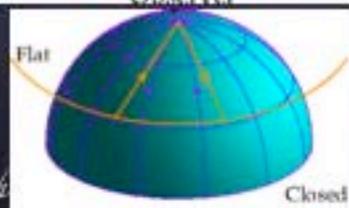
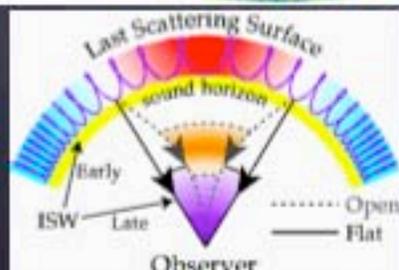
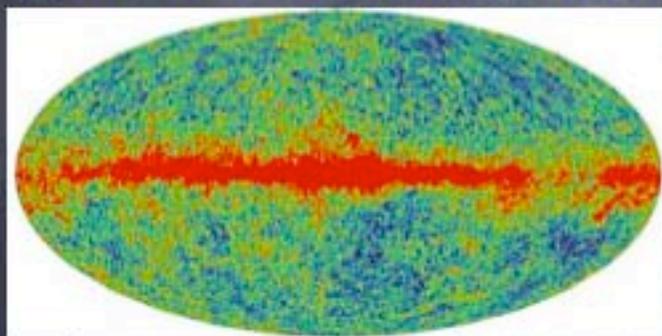
Matière noire

① courbe de rotation des galaxies

$$\Omega_b < \Omega_{\text{matiere}}$$



② fluctuations du fonds diffus cosmologique (CMB)



Position du premier pic : Ω_{total}

Hauteur du premier pic : Ω_{matiere}

$$\Omega_{\text{total}} = 1 \pm .03$$

courbe de rotation des galaxies

$$\frac{G_N M m}{r} = m v^2$$

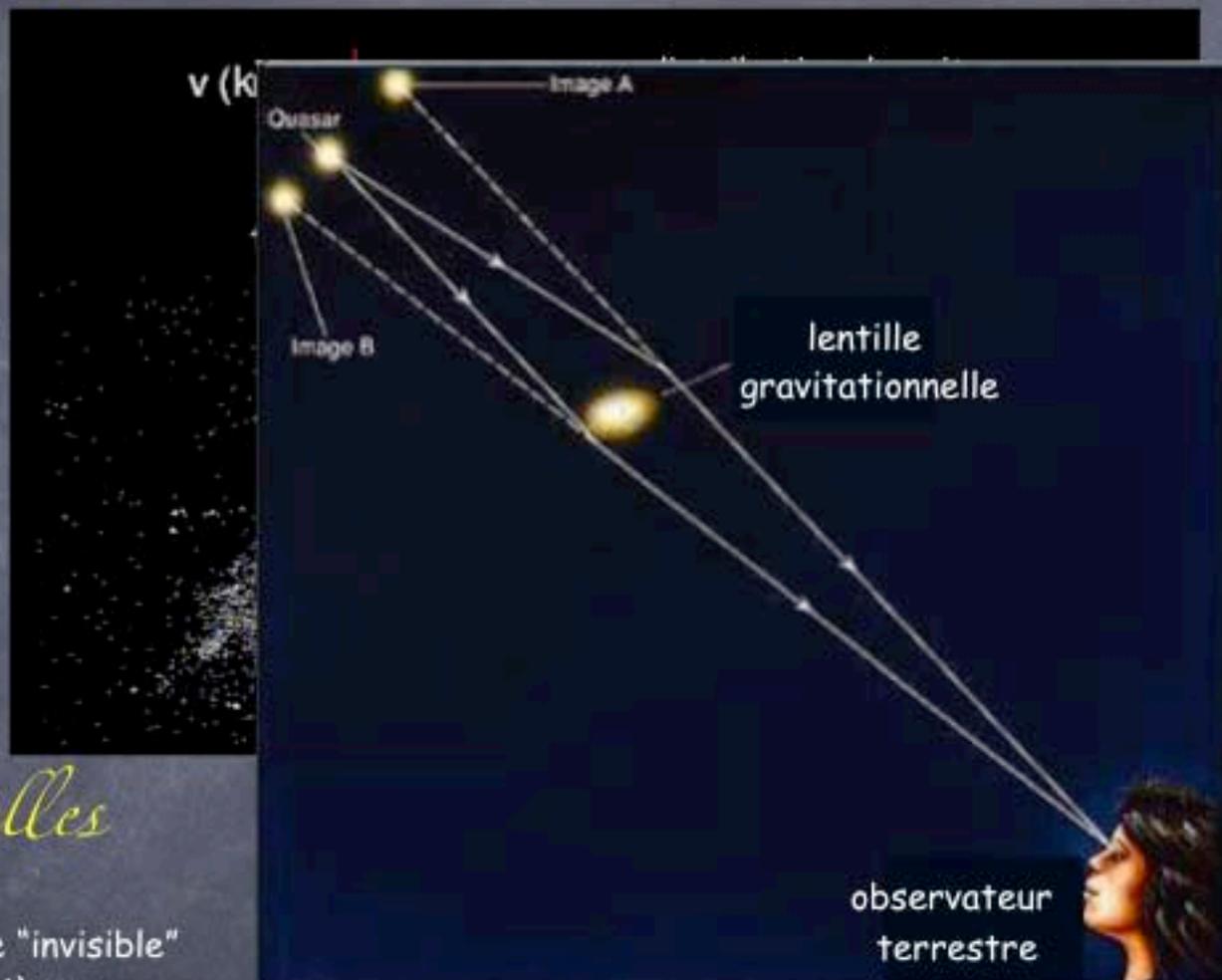


$$v = \sqrt{G_N \frac{\text{masse}_{\text{galaxie}}}{\text{distance}}}$$

l'énergie de liaison des galaxies est bien supérieure à l'énergie gravitationnelle provenant de la masse des étoiles.

lentilles gravitationnelles

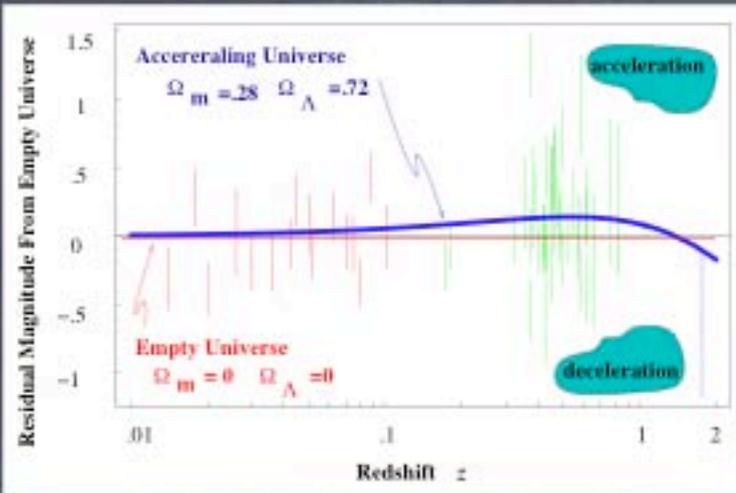
il existe de la matière "invisible" qui dévie la lumière



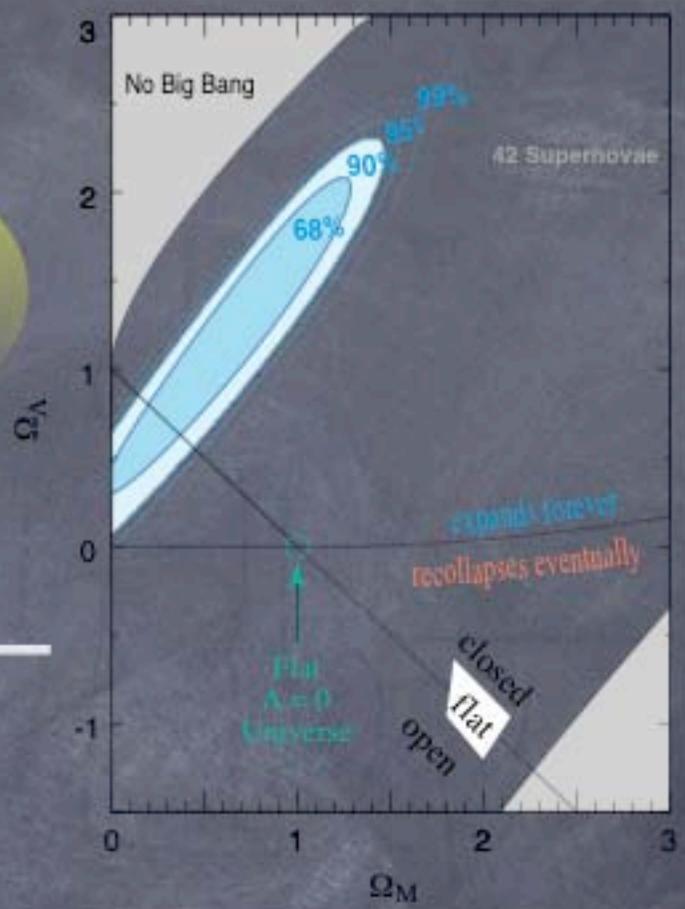
la matière du MS ne représente que 20% de la matière totale

(Besoin d'une particule stable, électriquement neutre, non-baryonique et non-relativiste)

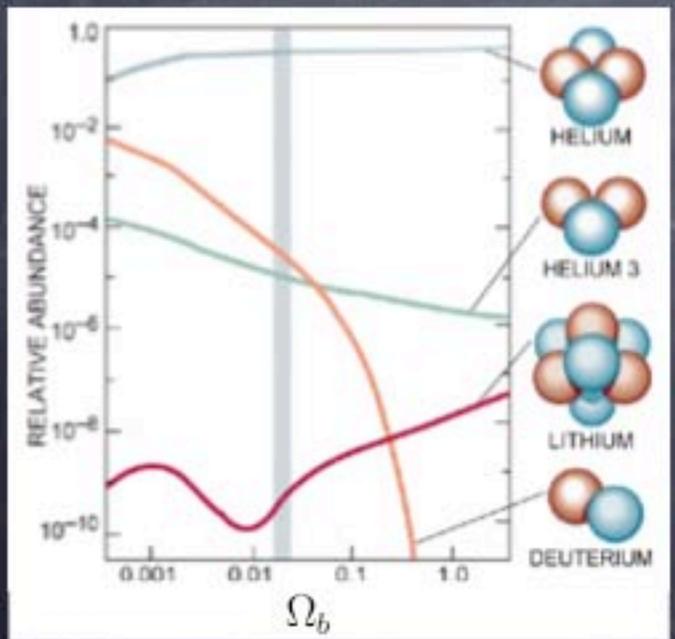
③ redshift des supernovae



$\Omega_{\Lambda} \sim .7$
 $\Omega_m \sim .3$

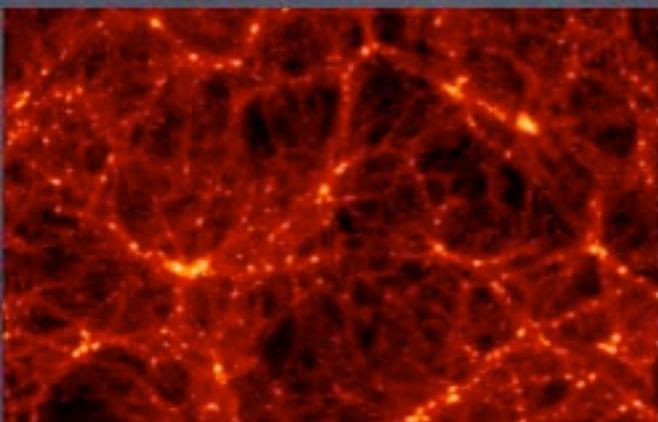


④ Nucléosynthèse primordiale



$\Omega_b \sim .04$

5 formation des structures



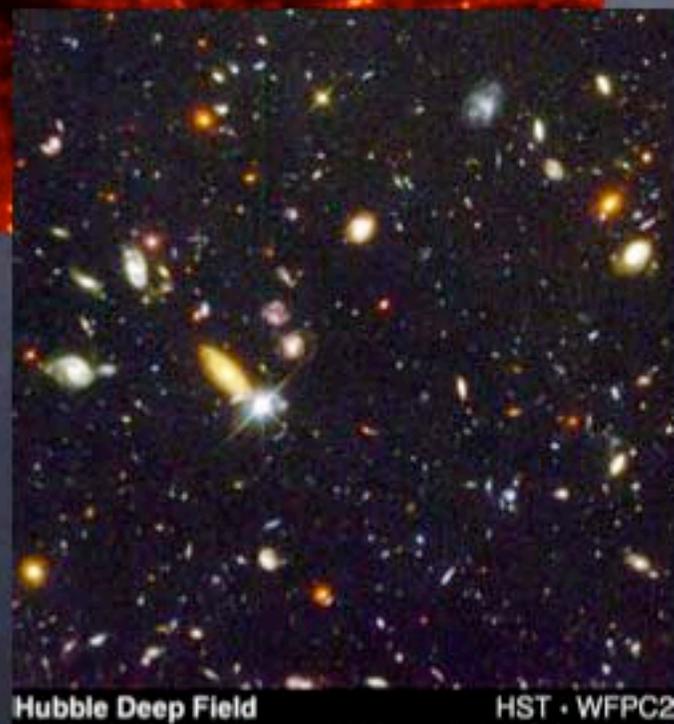
instabilités de Jeans des systèmes auto-gravitants
➤ formation des structures

fluctuations initiales de densité

peu d'évolution dans
un Univers dominé par
la radiation ou
l'énergie du vide

croissance linéaire
dans un Univers
dominé par la matière

si toute la matière était sous forme de baryons,
la transition radiation/matière aurait eu lieu trop tard
et les fluctuations n'auraient pas eu assez de temps pour
croître.



Hubble Deep Field

HST · WFPC2

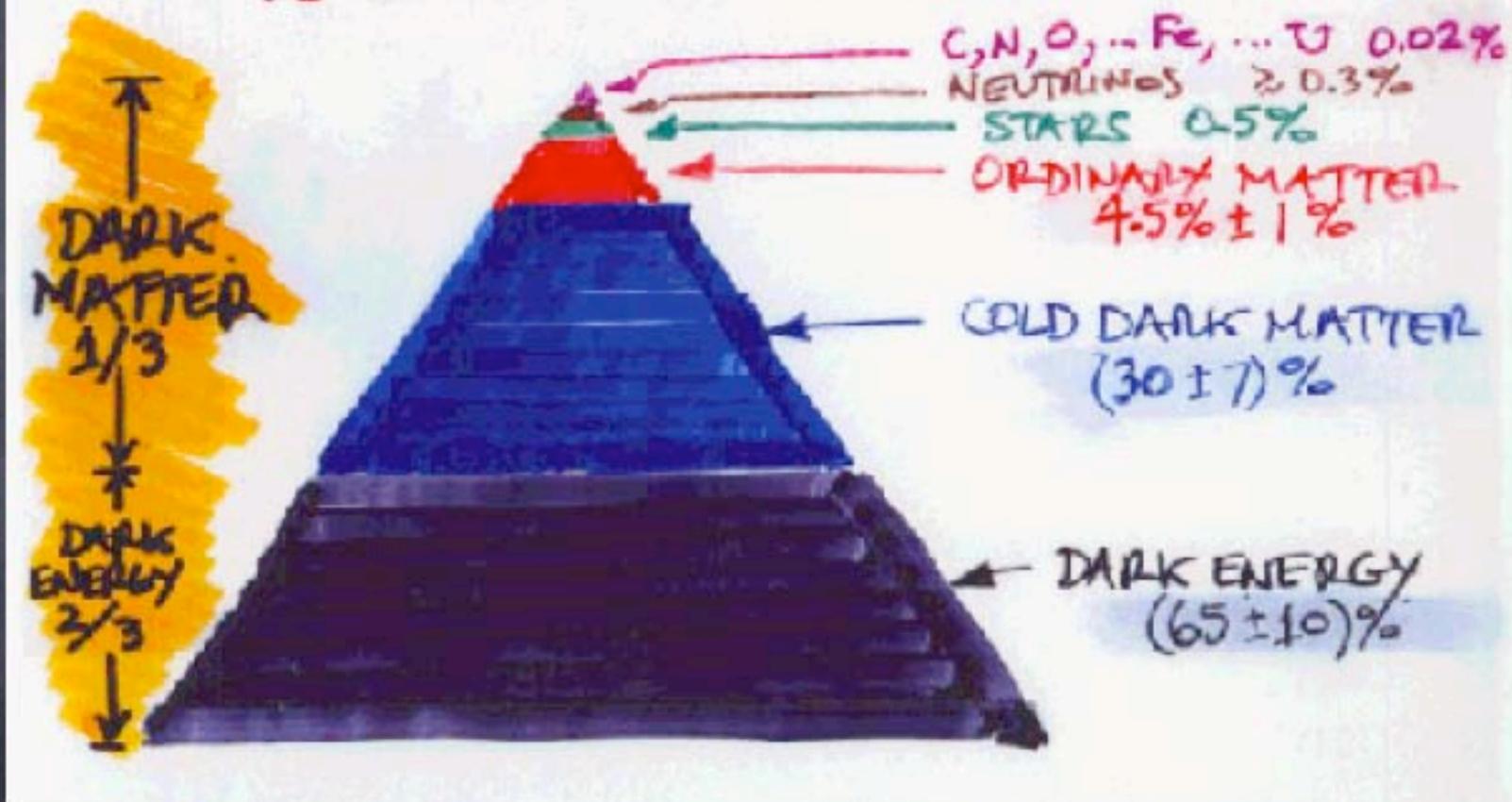
2dF
Sloan Digital Sky Survey

$$\Omega_b \sim .04$$

$$\Omega_m \sim .3$$

Cosmic food chain (M. Turner)

= $\frac{1}{3}$ DARK MATTER + $\frac{2}{3}$ DARK ENERGY



Matière noire et accélérateurs au TeV

Besoin d'une particule stable, électriquement neutre,
non-baryonique et non-relativiste



Aucun candidat possible parmi les particules du MS !

$$\Omega_m \sim \frac{\alpha^2}{\text{TeV}^2 \sigma_{\text{ann}}}$$

Une particule avec des interactions ~ faibles
⇒ bonne densité relique

La matière noire pourrait être produite au LHC/LC

carte d'identité

- nombres quantiques
 - spin
- interactions

fenêtre sur des processus ayant eu lieu aux
premiers temps de l'univers

- désintégration de particules lourdes...

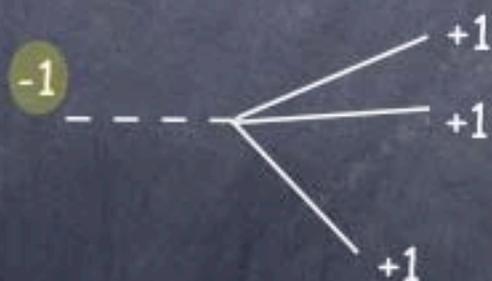
Nouvelle physique au TeV et matière noire

susy, dimensions supplémentaires, Little Higgs



il faut interdire certains mélanges entre les nouvelles particules et les particules du MS (sinon violation de CP, désintégration du proton etc...)

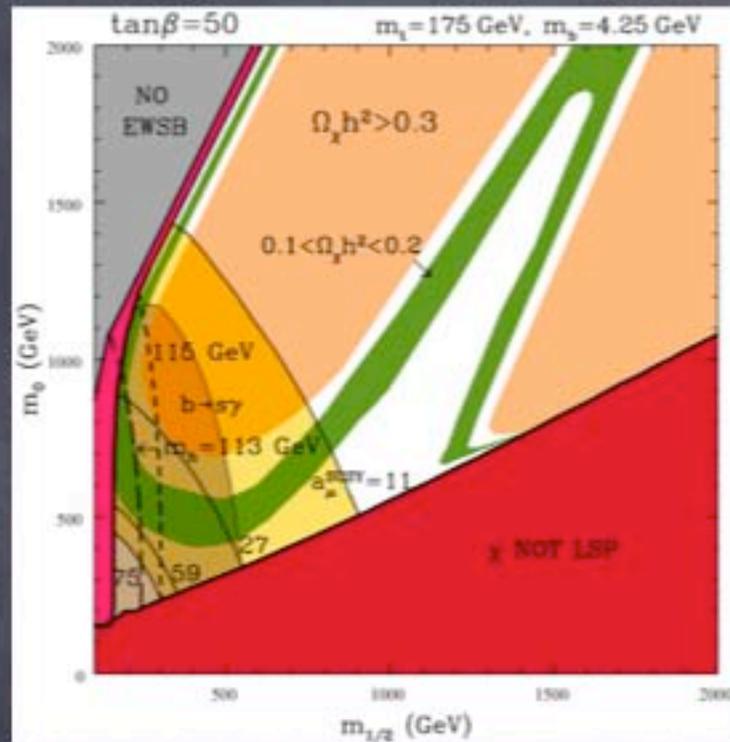
R-charge : +1 pour les particules du MS
-1 pour les nouvelles particules



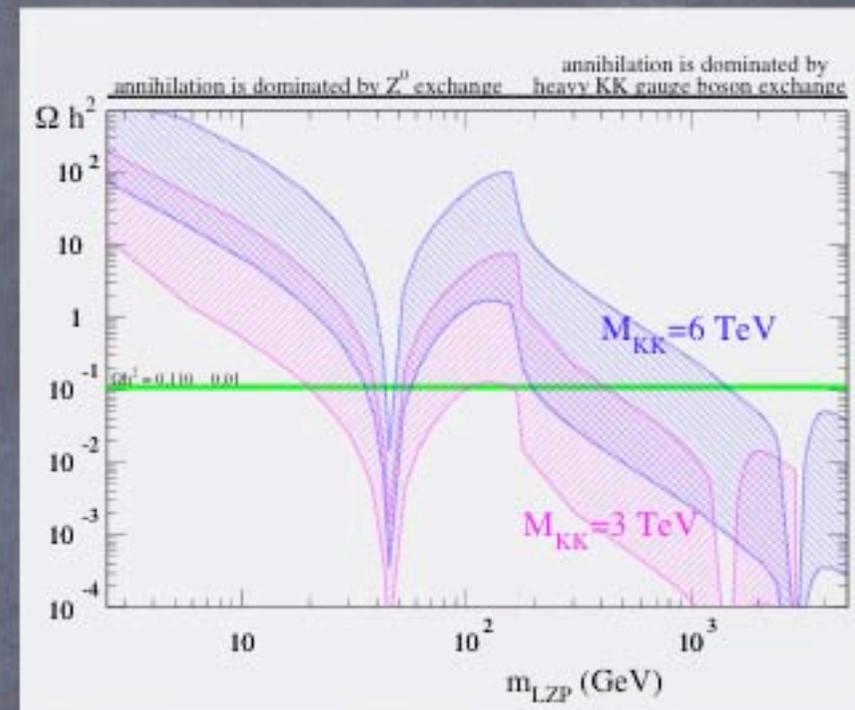
Processus interdit

la plus légère des nouvelles particules est stable
⇒ candidat idéal de matière noire

matière noire supersymétrique LSP



matière noire de Kaluza-Klein LKP



Riche programme de projets expérimentaux complémentaires

- accélérateurs : LHC, LC
- détection directe : DAMA, CDMS, Edelweiss...
- détection indirecte : gamma (Hess, Glast), neutrinos (Amanda, IceCube, Antares)

Asymétrie matière-antimatière

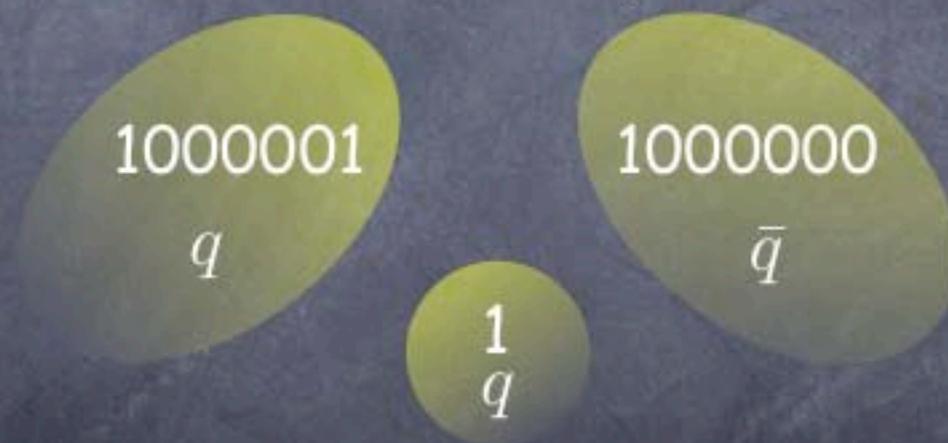


Asymétrie matière-antimatière

aujourd'hui, l'univers est composé (presque) exclusivement de matière

Dans l'univers primordial, quarks et antiquarks ont une distribution thermique

$$T \geq 1 \text{ GeV} : \frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q} \sim 10^{-8}$$



Baryogénèse

initialement, univers symétrique

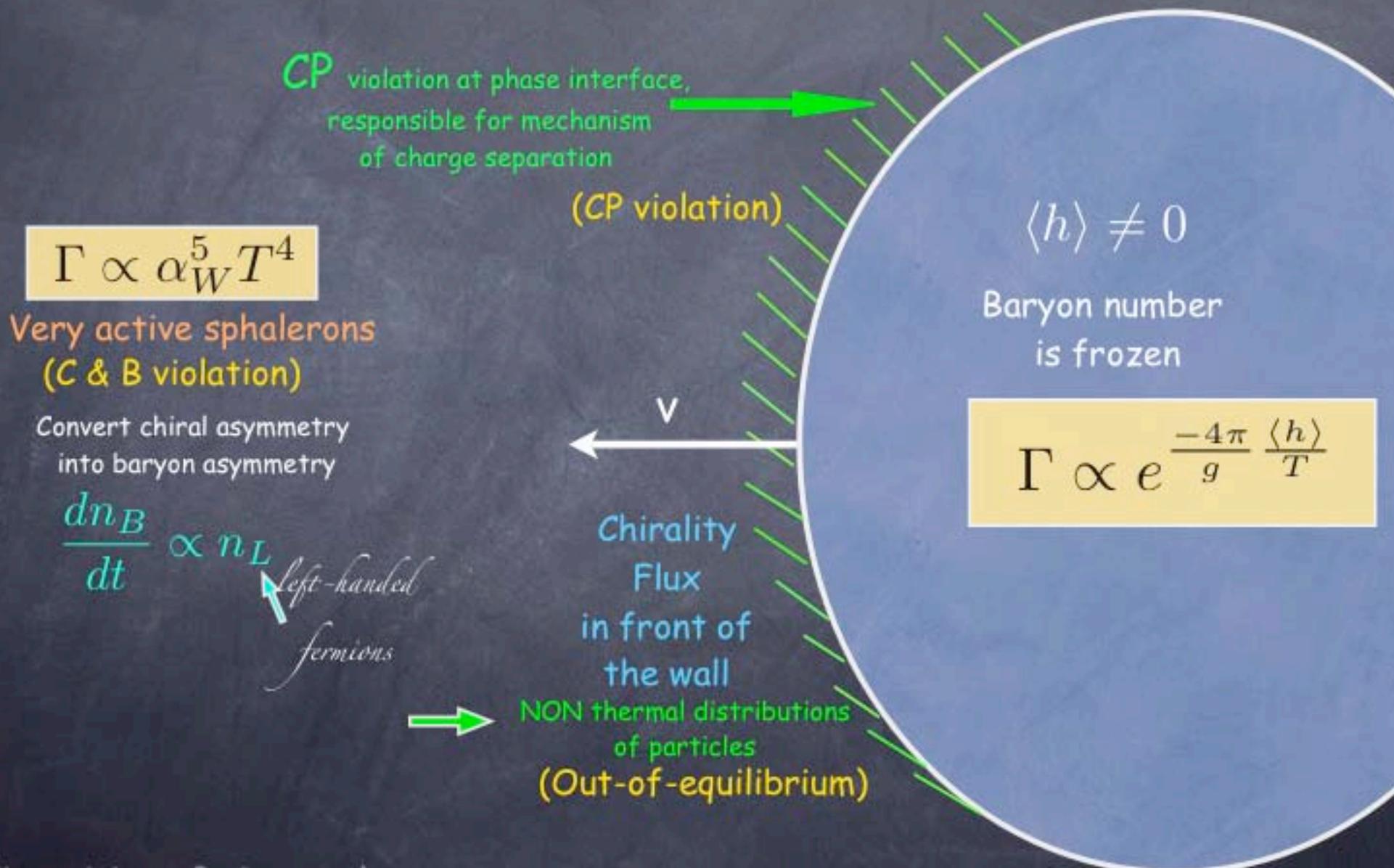
création d'une asymétrie matière-antimatière

Conditions de Sakharov pour la baryogénèse

SM

- ✓  Violation du nombre baryonique *sphalerons*
- ✓  Violation de C et CP *CKM*
- ✓  Phase hors d'équilibre : $\Gamma(\Delta B > 0) > \Gamma(\Delta B < 0)$ *transition de phase*

Baryogénèse électrofaible



0 violation CP:

asymétrie produite : $\frac{n_b}{s} \sim \frac{\alpha_w^4}{g_*} \epsilon_{CP}$ (BBN demande 10^{-10})

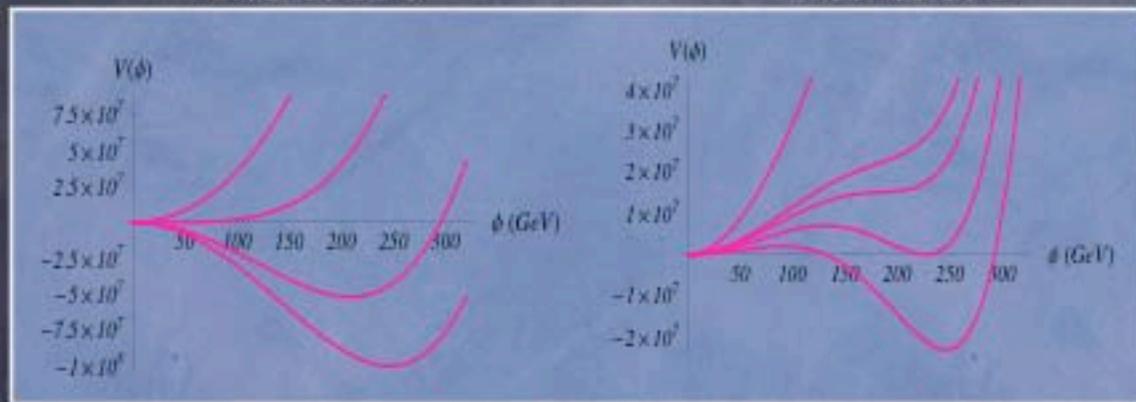
$\epsilon_{CP} \propto \det \left(-i[Y_u Y_u^\dagger, Y_d Y_d^\dagger] \right)$ trop faible violation de CP

0 transition de phase:

$$V = \frac{-\mu^2 + cT^2}{2} h^2 - \underbrace{\frac{T}{12\pi} \sum_{\text{boson}} m^3(h)}_{-ETh^3} - \frac{\lambda}{4} h^4$$

2nd ordre

1er ordre



MS : $E \sim 10^{-3}$

2nd ordre si $m_h > 70 \text{ GeV}$

1er ordre $\frac{v_c}{T_c} = \frac{4Ev^2}{m_h^2}$

0 Condition hors d'équilibre :

$$\frac{\Gamma_{\text{broken}}}{T^3} < H \implies \frac{v_c}{T_c} > 1 \implies m_h < 35 \text{ GeV}$$

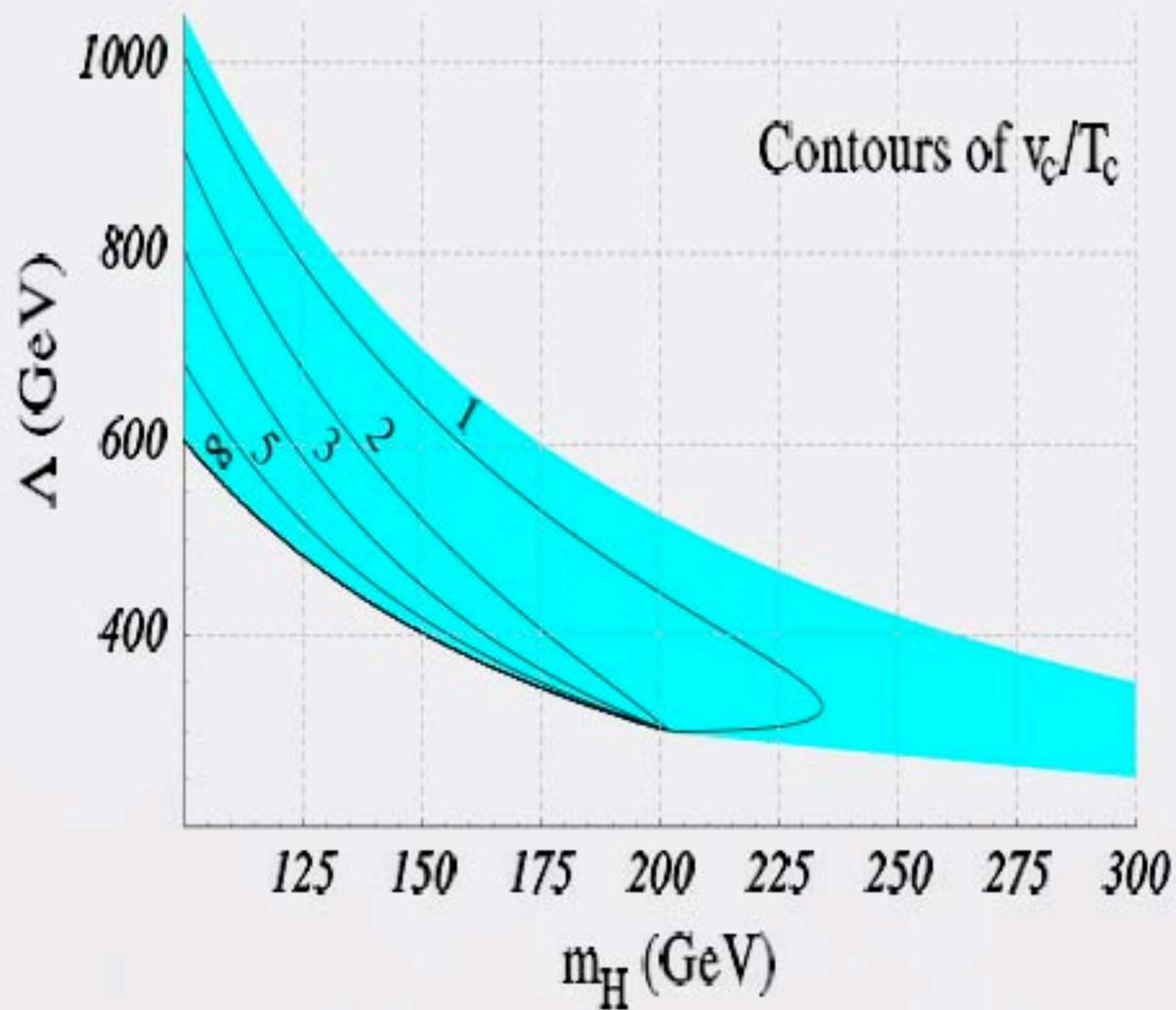
Baryogénèse et nouvelle physique

nouvelles particules { sources supplémentaires de violation de CP
 } changent la dynamique de la transition de phase

approche habituelle : MSSM (le stop contribue au couplage $T h^3$)

autre approche : théorie effective des couplages de Higgs

$$V = -\frac{\mu^2}{2} h^2 + \frac{\lambda}{4} h^4 + \frac{1}{\Lambda^2} h^6$$

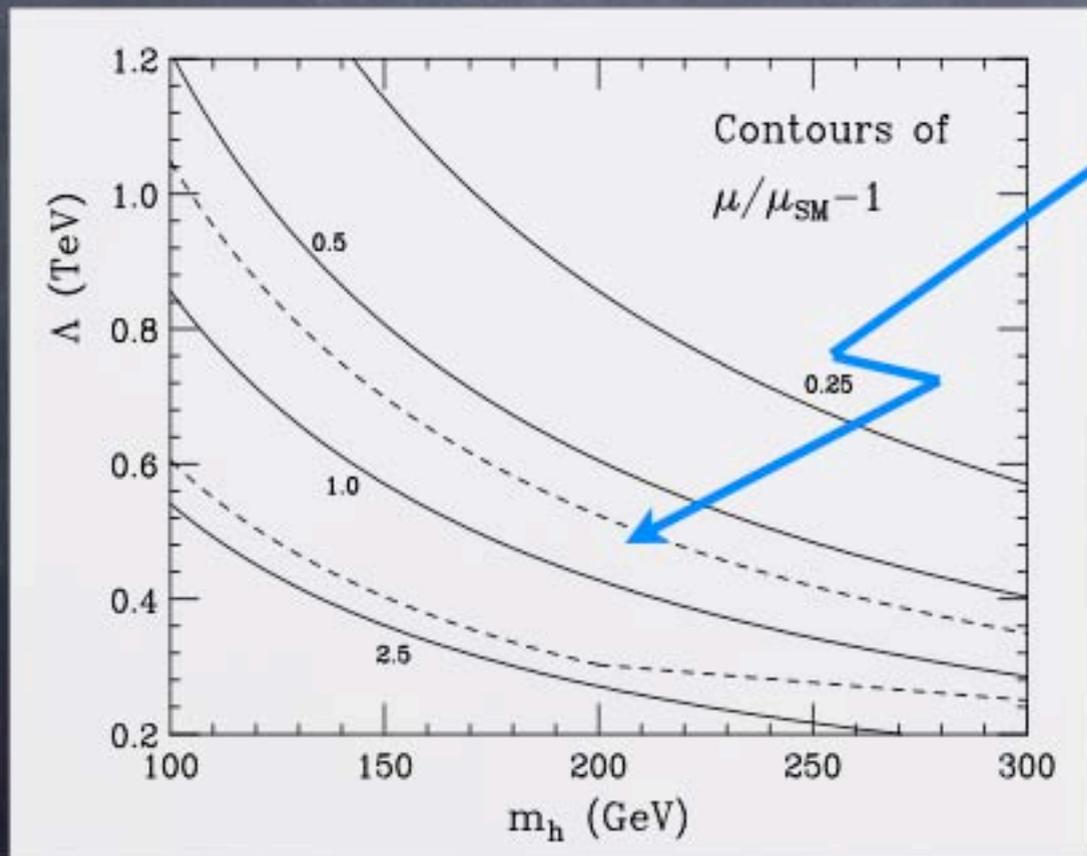


Baryogénèse et LC

Higgs self-coupling : $\mathcal{L} = \frac{m_h^2}{2} h^2 + \frac{\mu}{6} h^3 + \frac{\eta}{24} h^4 + \dots$

$$\mu = 3 \frac{m_h^2}{v} + 6 \frac{v^3}{\Lambda^2}$$

$$\eta = 3 \frac{m_h^2}{v^2} + 36 \frac{v^2}{\Lambda^2}$$



70%-200% déviations

LHC (300/fb) :
sensible à des déviations d'ordre 1

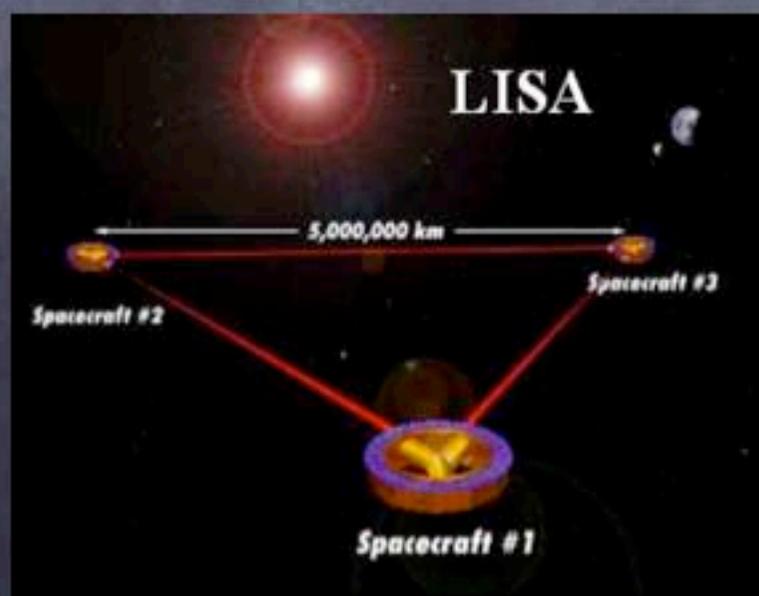
LC (1/ab) :
sensible à des déviations d'ordre 20%

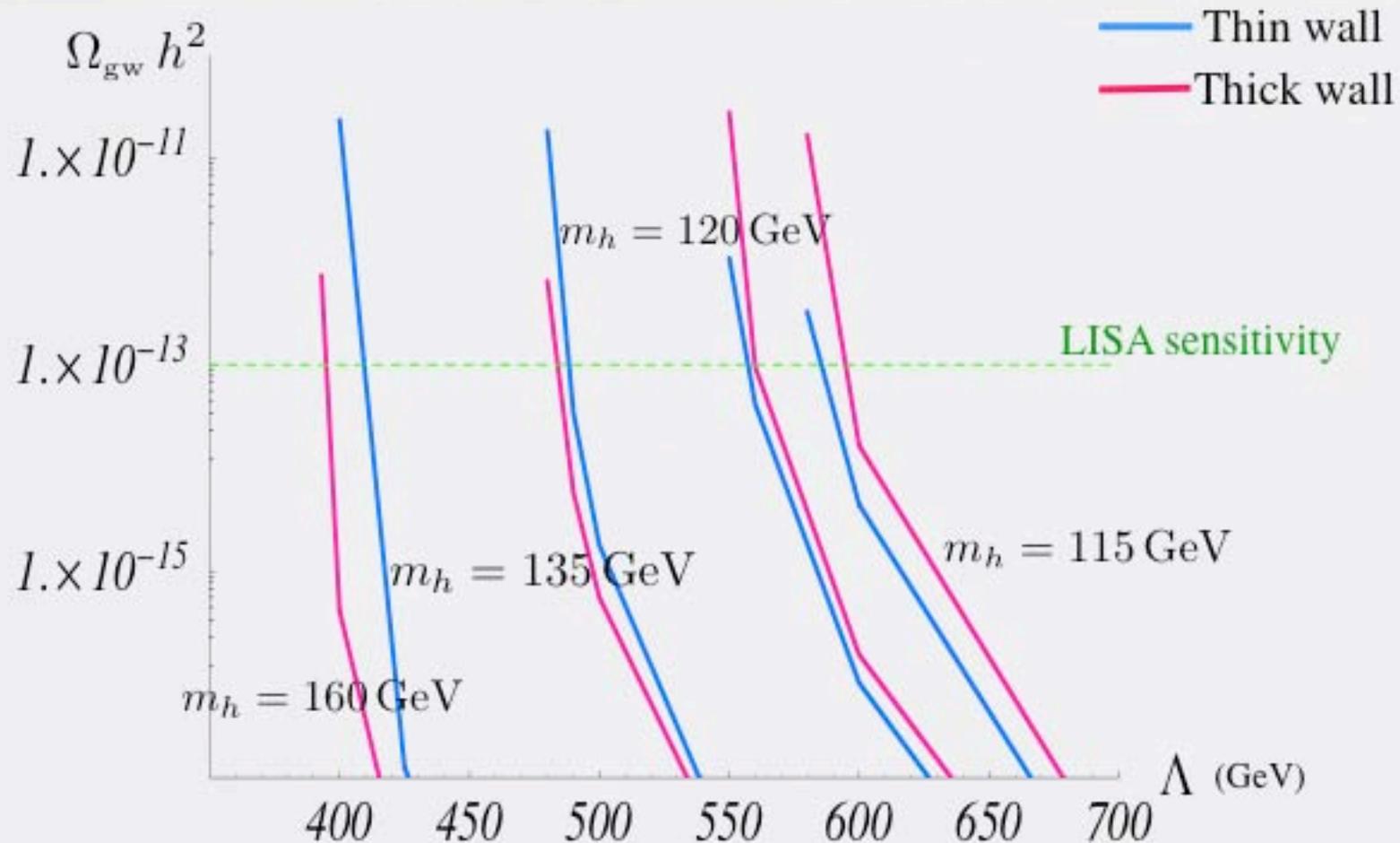
CLIC (3 TeV, 5/ab) :
sensible à des déviations d'ordre 1%

scénario de baryogénèse **testable** dans les futures accélérateurs
(baryogénèse GUT, leptogénèse... sont des alternatives
mais plus difficilement vérifiables)

Ce scénario peut aussi être validé indépendamment par LISA ...

EWPT du premier ordre est source d'un fond d'**ondes gravitationnelles** avec un spectre piqué dans le domaine du mHz...
domaine de fréquence du futur interféromètre spatial LISA





Remarquable exemple de complémentarité
 entre les recherches en physique des particules
 et en astrophysique/cosmologie

Conclusions

Nous vivons une coïncidence heureuse entre des projets expérimentaux variés dans différents domaines de la physique :

- 🌀 observations astrophysiques (Planck, Lisa, Hess, ...)
- 🌀 physique des particules produites par les rayons cosmiques (Auger)
- 🌀 physique des neutrinos (espace, solaires, atmosphère, réacteurs, accélérateurs)
- 🌀 accélérateur e^+e^- de grande luminosité (LC)
- 🌀 collisionneur hadronique à très énergie (LHC)

La physique des hautes énergies a de beaux jours devant elle.
Rendez-vous dans 10 ans !