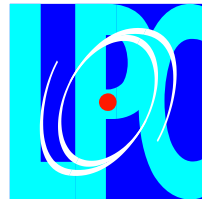


# Baryogénèse, Leptogénèse et Violation de CP

Jean Orloff

Laboratoire de Physique Corpusculaire  
de Clermont-Ferrand



École de GIF

*15-16 Septembre 2003*

CEA Saclay

## Plan

### ★ Cosmologie: faits

- Introduction et notations
- Rappels thermodynamiques
- Asymétrie matière/anti-matière: observations

### ★ Baryogénèse: souhaits

- Pourquoi? *nécess. mécan. dyn. et subatomique*
- Comment? *3 Conds. Sakharov , ex. GUT*
- Approche bas ↗ haut *grâce anomalies du M.S.*
- Échec du M.S. *rôle  $\mathcal{CP}$*
- Échec SUSY : *2de session échelle É-Faible*

### ★ Leptogénèse: réalisation?

- Motivations *oscillations des neutrinos*
- Paramètres de See-Saw
- Idée générale *paramètres clés*
- Indéterminations *argument de scaling*
- Borne inférieure générique ( $\subset \mathcal{CP}$ )

# Expansion de l'Univers: Modèle Newtonien

c.f. e.g. Peacock,  
"Physical Cosmology"

★ **Hypothèse cosmo**  $\equiv$  distrib. de masse  $\rho$ :

- isotrope sym. sphér. autour  $x_0 = 0$  **expérim.✓**
- homogène  $\rightarrow \infty$ , indép.  $x_0$  **idéalisat.  $\pm\checkmark$**   $\rightarrow$

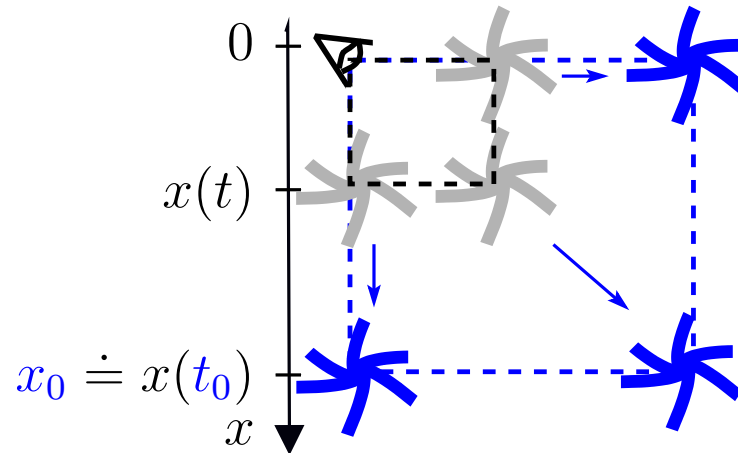
★ **Coordonnées comouvantes**  $x_0$  naturelles:

$$x(t) = x_0 \cdot a(t); \quad a(t) < a(t_0) \doteq a_0 \doteq 1$$

$\forall$  Objets en comvt:  $x_0 \doteq cte$

$$\Rightarrow \dot{x}(t) = x_0 \cdot \dot{a}(t);$$

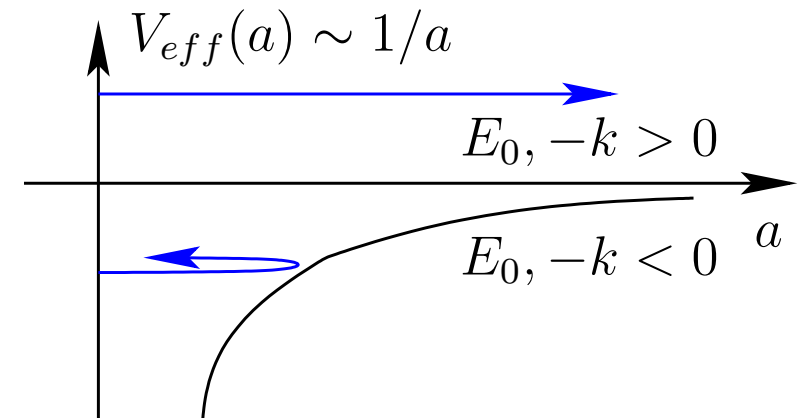
$$\Rightarrow \frac{\dot{x}(t)}{x(t)} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \doteq H(t) \text{ loi Hubble}$$



★ Mvt. petite masse comouvante  $m$ :  $\neq$  trivial

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{m}{2} \dot{x}^2 - mG \frac{M(x)}{x} \\ &= \frac{m}{2} x_0^2 \dot{a}^2 - mG \frac{4\pi}{3} x_0^2 \frac{\rho_0^M}{a} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 = \frac{8\pi G}{3} \frac{\rho_0^M}{a^3} - \frac{k}{a^2}; \quad k \doteq \frac{-2E_0}{m x_0^2}$$





Défs:  $H_0 = h[100\text{km/s/Mpc}] = h[10^{10}\text{ans}]^{-1}$ ;  $h = 0.7 \pm 0.1$

$$\rightarrow \rho_0^c \doteq 3H_0^2/8\pi G = h^2[10m_p/\text{m}^3]$$

✳Exo✳ vérifier

# Effets relativistes ( $\Leftarrow$ rel. générale Einstein)

★ **Courbure spatiale**  $= \frac{k}{a^2}$  :  $k > 0$ : univ. fermé (sphère)   $> 180^\circ$   
 $k < 0$ : univ. ouvert (selle)   $< 180^\circ$

★ **Décalage vers le rouge** :  $\left\{ \begin{array}{l} \lambda(t) = \lambda_0 a(t) \\ \nu(t) = \nu_0 / a(t) \doteq \nu_0 (1 + z(t)) (> \nu_0) \\ \rightarrow \rho^R(t) = \rho_0^R / a^4(t) \text{ (densité radiation } \sim T^4 \rightarrow a(t)T(t) = cte) \\ p = \rho^R / 3 \rightarrow dQ = d(\rho^R a^3) - p d(a^3) = 0 \text{ (système isolé)} \end{array} \right.$   
 ( $\rightarrow$  futur)

$$\Rightarrow H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = H_0^2 \left( \frac{\Omega^R}{a^4} + \frac{\Omega^M}{a^3} + \frac{1 - \sum_{i=R,M,\Lambda} \Omega^i}{a^2} + \Omega^\Lambda \right)$$

$\Omega^\Lambda \approx 0.7$  cte cosmologique; domination pour  $a \gtrsim 1$   $a(t) \sim \exp(\sqrt{\Omega^\Lambda} H_0 t)$

$\Omega^M \doteq \rho_0^M / \rho_0^c \approx 0.3$  " matière:  $a < \Omega^M / \Omega^\Lambda$   $a(t) \sim t^{2/3}$

$\Omega^R \doteq \rho_0^R / \rho_0^c \approx 4.2 \times 10^{-5} h^{-2}$  " radiation:  $a < \Omega^R / \Omega^M$   $a(t) \sim 10^{-10} \left( \frac{t}{1s} \right)^{1/2} = \frac{1MeV}{T(t)}$   
 $H(t) = 1.6 g_*^{1/2} \frac{T^2(t)}{m_{Pl}}$

★ Distribution à l'équilibre d'une particule X à température  $T_X$ , pot. chimique  $\mu_X$  et  $g_X$  polarisations:

$$f_X^{equ}(\vec{p}; T_X, \mu_X) \doteq \left( e^{-\frac{\mu_X}{T_X} - \sqrt{\vec{p}^2 + m_X^2}/T_X} \mp 1 \right)^{-1}$$

– bosons  
+ fermions

$$n_X(T, \mu) \doteq \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} g_X f_X(\vec{p}; T, \mu) \rightarrow g_X \left[ \begin{matrix} 0.12 \\ 0.09 \end{matrix} T^3 + \begin{matrix} 2 \\ 1 \end{matrix} T^2 \frac{\mu}{6} \right] \quad T \gg m_X, \mu \text{ (Relativiste)}$$

(densité)

$$\rightarrow g_X \left[ \frac{m_X T}{2\pi} \right]^{3/2} e^{(\mu - m_X)/T} \quad T \ll m_X, \mu \text{ (Non-rel.)}$$

$$\rho_X(T, \mu) \doteq \int \cdot g_X f_X \cdot \sqrt{\vec{p}^2 + m_X^2} \rightarrow \begin{matrix} 0.3 \\ 0.25 \end{matrix} g_X T^4 \quad \text{densité d'énergie rel.}$$

$$p_X(T, \mu) \doteq \int \cdot g_X f_X \cdot \frac{\vec{p}^2}{\sqrt{\vec{p}^2 + m_X^2}} \rightarrow \begin{matrix} 0.1 \\ 0.08 \end{matrix} g_X T^4 \quad \text{pression partielle rel.}$$

$$\rightarrow s_X(T, \mu) \doteq \frac{1}{T} (\rho_X + p_X - \mu n_X) \rightarrow \begin{matrix} 0.4 \\ 0.35 \end{matrix} g_X T^3 \quad \text{densité d'entropie}$$

★ Variation d'entropie dans vol. en comvt.  $d(\underbrace{s_X a^3}_{\doteq S_X}) = \frac{\mu}{T} d(\underbrace{n_X a^3}_{\doteq N_X}) + \underbrace{d(\rho a^3) + p d(a^3)}_{\equiv 0 \text{ (cons. énergie)}} \text{ SSI:}$

- $\mu/T$  grand gaz dégénéré et
- $N_X$  varie  $\Leftrightarrow$  désintégration ou création de particules e.g. reheat après inflation

★ **X en équilibre thermique**  $\Leftrightarrow T_X$  est fixé par échanges d'énergie avec autres espèces

(collisions élastiques  $X + Y \rightarrow X' + Y'$ )  $\Rightarrow T_X = T_Y = \dots T$

contre-ex.:  $T_{0\gamma} = 2.728 \pm .002^\circ K > T_{0\nu}$  car: ●  $\nu$ 's et  $\gamma$ 's actuellement découplés

✳️ Exo ✳️ calculer  $T_{0\nu}$  ● photons réchauffés par annihilations  $e^+e^-$

★ **X en équilibre chimique**  $\Leftrightarrow \mu_X$  (potentiel chimique  $\doteq$  gain d'én. pour  $N_X \rightarrow N_X + 1$ ;  $\Leftrightarrow \langle N_X \rangle$ )

est fixé par collisions inélastiques: si  $X + A \rightleftharpoons B + C$  est "rapide", alors

$\mu_X + \mu_A \equiv \mu_B + \mu_C \rightarrow$  fixe  $\mu_X$

✳️ Exo ✳️ montrer dans limite non rel. qu'à l'équ. chim. + therm.:  $\frac{n_X n_A}{n_B n_C} \sim e^{-\Delta m/T}$

avec  $\Delta m = m_X + m_A - m_B - m_C$  (défaut de masse)

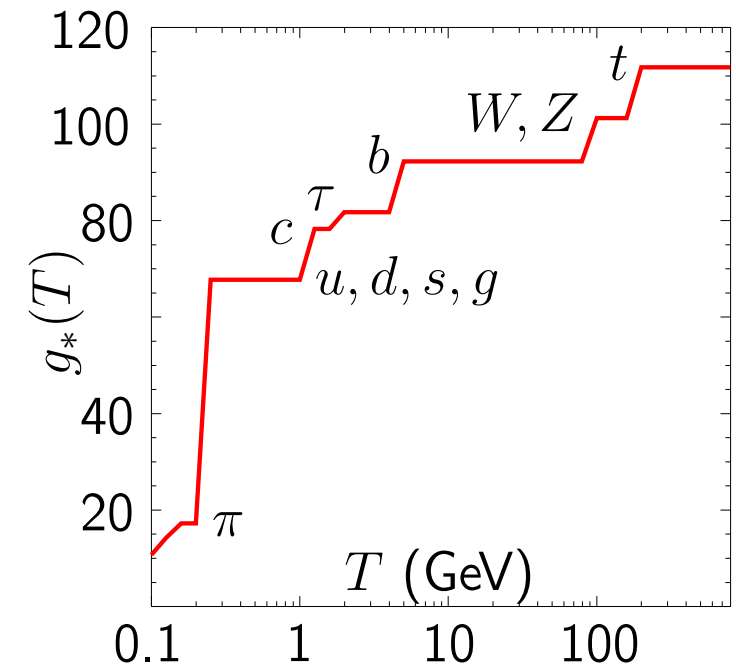
★ **Degrés de lib. effectifs  $g^*$**  : si  $T_X \neq T_Y$ ,

$$\begin{cases} \rho^R(T) = 0.3 g_*(T) T^4 \\ s^R(T) = 0.4 g_*^s(T) T^3 \end{cases} \text{ avec}$$

$$g_*^{(s)}(T) \approx \sum_{B:m_B < T} g_B \left(\frac{T_B}{T}\right)^{4(3)} + \frac{7}{8} \sum_{F:m_F < T} g_F \left(\frac{T_F}{T}\right)^{4(3)}$$

$$\rightarrow g_*(10\text{MeV} \Leftrightarrow 3\nu, \gamma, e^\pm) = 10.75 \approx g_*^s$$

$$\rightarrow g_*(T_\gamma = 0.1\text{MeV} \Leftrightarrow 3\nu, \gamma) = 3.36 < g_*^s = 3.91$$



# Équation de Boltzmann

- ★ Dicte dynamique vers (hors de) l'équilibre;    ★ phys. des particules entre en scène!!!

$$\frac{1}{a^3} \frac{dN_X}{dt} = \frac{dn_X}{dt} + 3Hn_X = \sum_{\text{canaux } A,B,C} \text{Coll}(X + A \rightleftharpoons B + C)$$

$$\text{Coll} \doteq \int \underbrace{\left( \frac{d^3 p_X g_X}{(2\pi)^3 2E_X} \right)}_{\doteq dX} \cdot dA \cdot dB \cdot dC \cdot \delta^4 \cdot \left[ \begin{array}{l} f_B f_C (1 + f_X)(1 + f_A) \cdot |\mathcal{M}(B + C \rightarrow X + A)|^2 \\ - f_X f_A (1 + f_B)(1 + f_C) \cdot |\mathcal{M}(X + A \rightarrow B + C)|^2 \end{array} \right]$$

$$\underset{CP, f \ll 1}{\approx} \int dX \cdot dA \cdot dB \cdot dC \cdot \delta^4 (\sum p) \cdot \underbrace{[f_B f_C - f_X f_A]}_{\equiv 0 \text{ à l'équil (balance dét.)}} \cdot |\mathcal{M}(X + A \rightarrow B + C)|^2$$

$$\underset{A,B,C:\text{équil.}}{\approx} \int (2E_X dX) \cdot (2E_A dA) \cdot [f_X^{\text{equ}} f_A^{\text{equ}} - f_X f_A^{\text{equ}}] \cdot \sigma(X + A \rightarrow B + C) \cdot v$$

$$\approx (n_X^{\text{equ}} - n_X) \cdot \underbrace{n_A^{\text{equ}} \cdot \langle \sigma(X + A \rightarrow B + C) \cdot v \rangle_{\text{equ}}}_{\doteq \Gamma_X \text{ taux moyen à l'équil.}}$$

$$\rightarrow \frac{dn_X}{dt} + 3Hn_X = \Gamma_X (n_X^{\text{equ}} - n_X)$$

approximation de relaxation

- ★ Raffinements: inhomogénéités spatiales  $f(p, x)$ ; particules hors-couche TQC hors équil.!!!

# Découplage de X

★  $\Gamma_X < H$  : collisions négligeables devant l'expansion  $\rightarrow$  déf.  $T_d$ :

$$\Gamma_X(T_d) = H(T_d) \underset{Rel.}{=} 1.6g_*^{1/2} \frac{T_d^2}{m_{Pl}}$$

★  $T \leq T_d$  :  $\Gamma_X(T) \overset{Rel.}{\sim} T^3 \langle \sigma v \rangle$  décroît plus vite que  $H(T) \sim T^2 \rightarrow N_X = n_X a^3 = cte$ :

$X \doteq$  relique  $\left\{ \begin{array}{l} \text{chaude si } T_d > m_X, \\ \text{froide si } T_d < m_X \end{array} \right.$

$Y_X \doteq \frac{n_X}{s_{tot}} = cte$

invariant adiabatique si  $S = (sa^3) = cte$ 
  
 $\Leftrightarrow \eta_X \doteq \frac{n_X}{n_\gamma} = \frac{s}{n_\gamma} \cdot Y_X \approx 7.04 Y_X$  aujourd'hui; mesurable

## ★ Exemples de reliques

\*Exo\*

 dériver valeurs  $T_{d\gamma, \nu, N}$ 

$\gamma$   $\Gamma(p + \gamma \rightarrow p' + \gamma') \approx 0$  pour  $\frac{n_p}{n_H} < 0.1$  (frac. ionisation)  $\Leftrightarrow T < T_{d\gamma} \approx 0.3eV$

$\rightarrow$  CMB = photo prise quand univers  $T_{d\gamma}/T_0 = 1100\times$  plus petit

$\nu$   $\Gamma_\nu(T) = n_\nu \cdot \langle \sigma(\nu + n \rightarrow p + e) \cdot v \rangle$   
 $\approx T^3 \cdot G_F^2 T^2$

$\rightarrow T_{d\nu} = (1.6g_*^{1/2} / G_F^2 m_{Pl})^{1/3} \approx 1MeV$

Nucléons  $\Gamma_N = n_{\bar{N}} \cdot \langle \sigma(N + \bar{N} \rightarrow \dots) \cdot v \rangle$   
 $\approx (m_N T)^{3/2} e^{-m_N/T} \cdot m_\pi^{-2}$

$\rightarrow T_{dN} \approx m_N / 42 \approx 20MeV$ ;  $\ln(\frac{m_N m_{Pl}}{m_\pi^2}) \approx 42$

$\rightarrow Y_N = Y_{\bar{N}} \approx 10^{-20}$



# Asymétrie Baryonique: mais où est donc passée l'anti-matière?

★ **Sur terre:** matière ( $\doteq p^+, e^-, n$ ) seule  $\rightarrow$  asym. complète (sauf élevage en accél...)

★ **Syst. solaire:** ( $\sim 10^{-5}$  pc;  $1M_\odot$ ) tjs matière seule NASA a survécu (!?)

★ **Voie lactée** ( $\sim 10$  kpc;  $\sim 10^{12}M_\odot$ ) rayons cosmiques, produits par SN dans disque:

Q:  $\frac{\bar{p}}{p} \approx 10^{-4} \stackrel{?}{\Rightarrow} \frac{\overline{SN}}{SN} \approx 10^{-4}??$  R: **NON!!**  $\exists : p_{primaire} + p_{gaz} \rightarrow 3p + \bar{p}$  avec

$\Phi(p_{primaire})$  bien mesuré et modélisé (flux, spectre);  $n(p_{gaz})$  interstellaire déduit des  $\gamma$  de

$p_{prim} + p_{gaz} \rightarrow X + [\pi_0 \rightarrow 2\gamma(70MeV)]$ ;  $\bar{p}$  compris sans  $\overline{SN} \rightarrow \frac{\overline{SN}}{SN} < 10^{-4}$

meilleures limites avec  $\bar{D}$  et  $\bar{H}e^3$  Chardonnet astro-ph/9705110

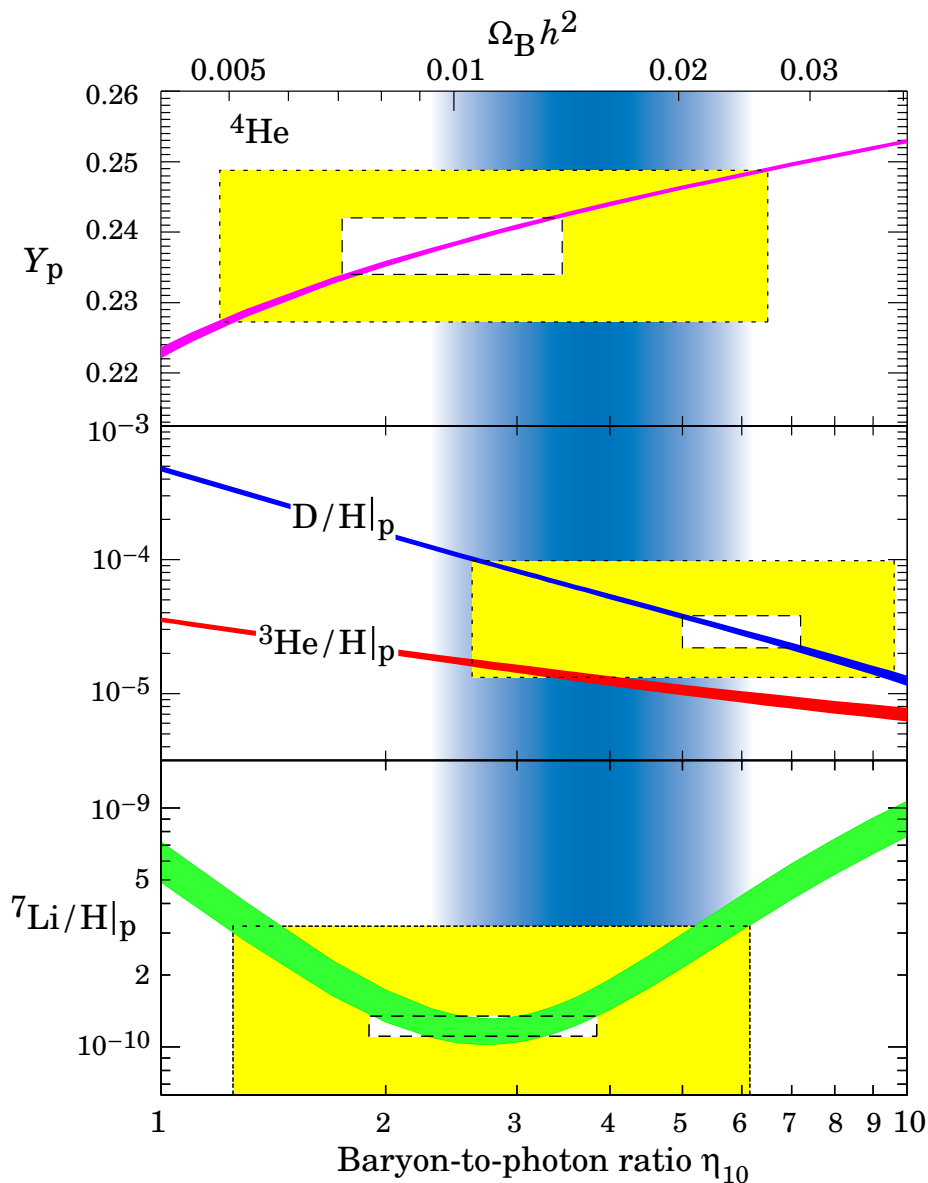
$\rightarrow$  pas d'anti-matière cosmologique décelable (existait pourtant avant annihil...) Combien reste?

★ **Déf. asymétrie** # baryonique net  $(N_N - N_{\bar{N}}) = cte$  dans volume en comvt. si  $B$  conservé

$\rightarrow$   $ABU \doteq Y_B \doteq \frac{N_N - N_{\bar{N}}}{S}$  aussi;  $Y_B > 0 \Leftrightarrow Y_N > 10^{-20} > Y_{\bar{N}}$

Valeur  $Y_B$ ?  $\rightarrow$

# Asymétrie Baryonique: Nucleosynthèse primordiale



★ Prix entropie pour fusion nucléons dépend de la densité baryonique  $\Leftrightarrow$  rapport baryon / photon:

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \stackrel{\text{auj.}}{\approx} 7 \times \underbrace{\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s}}_{\doteq Y_B}$$

- ★  $^4\text{He}$ : tire  $\eta$  vers le bas (primordial??);
- ★ D: + propre, + sensible, tire  $\eta$  vers le haut
- ★ D/H,  $^4\text{He}/\text{H}$  mesurés par raies d'absorption de quasars  $z = 0.1 \rightarrow 3.5$  par nuages interstellaires

Asymétrie baryonique **total** actuelle

$\Leftrightarrow$  **minuscule** asymétrie initiale:

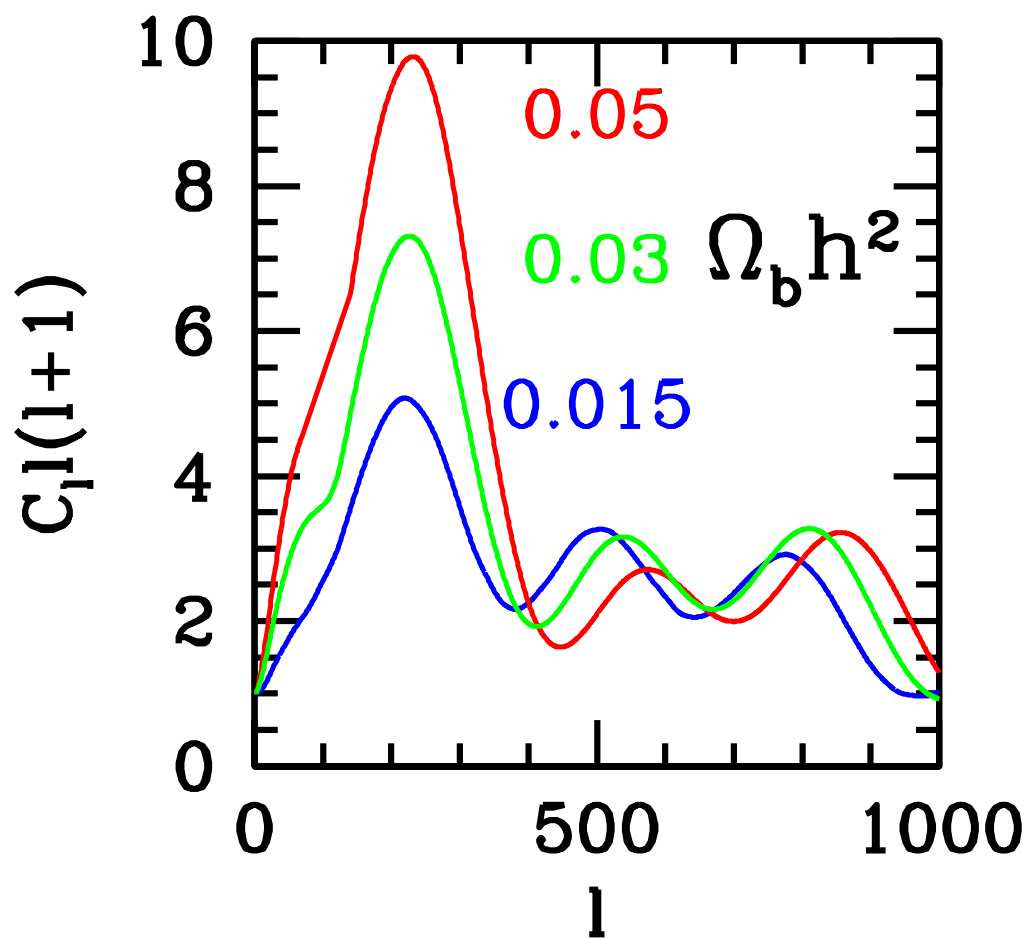
$$Y_{B10} \doteq 10^{10} Y_B \stackrel{\text{auj.}}{\approx} \frac{\eta_{10}}{7} \simeq 0.8$$

= **invariant adiabatique**

sauf si production entropie, *eg.* réchauffage post-inflation

# Asymétrie Baryonique: Fond Micro-onde Cosmologique (CMB)

Kamionkowski astro-ph/9904108



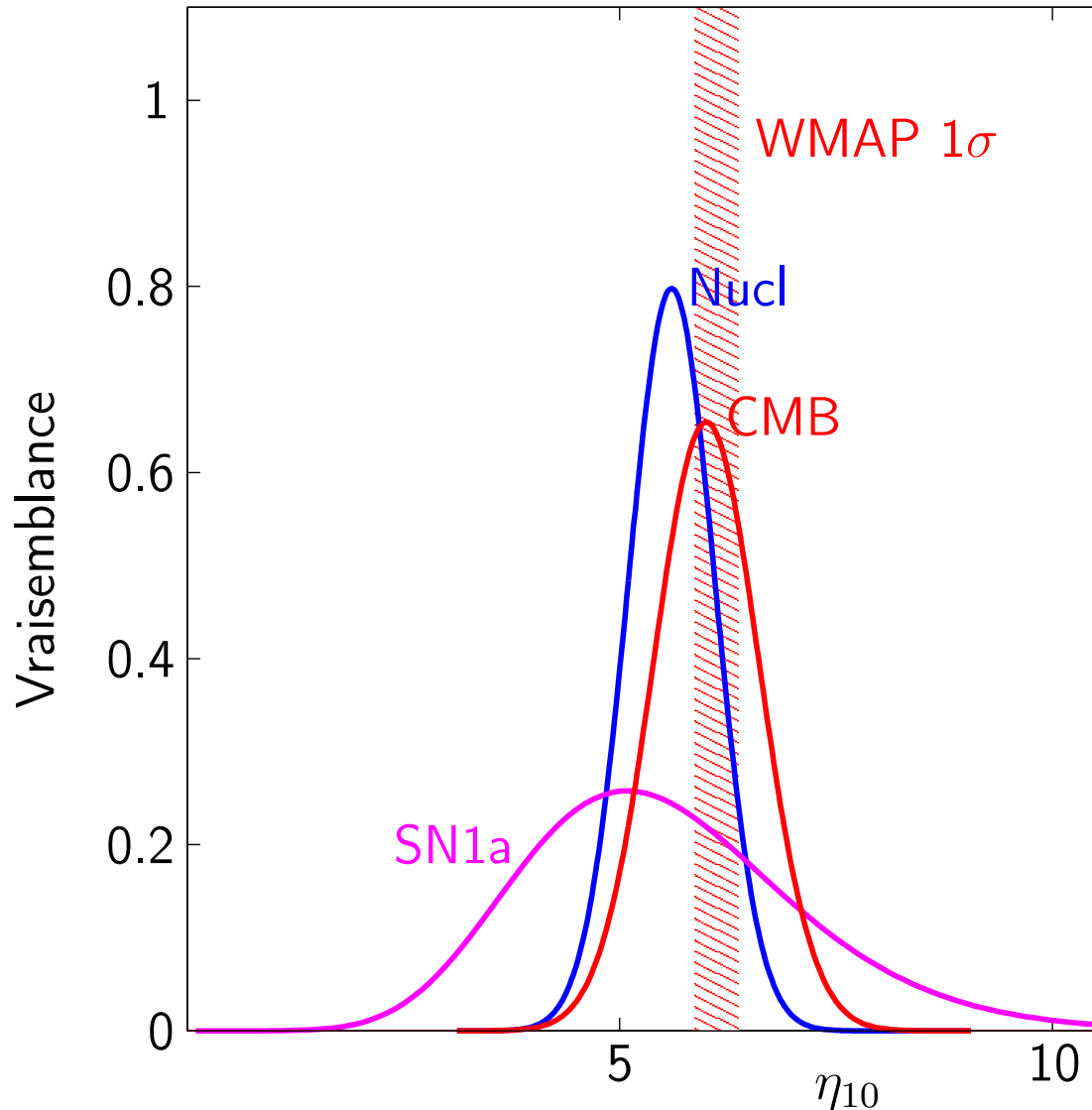
- ★ Auto-gravité baryons:  $m_{p^+} \gg m_{e^-}$ 
  - renforce pics compression (1<sup>st</sup>, 3<sup>rd</sup>) et
  - diminue pics expansion (2<sup>d</sup>)
- ★ Baryons diminue vitesse son dans plasma  
 $\Rightarrow$  augmente séparation entre pics  
 $\Rightarrow$  pics CMB sentent (l'amplitude, pas le signe!)

$$|\eta_{10}| = 274 \Omega_b h^2$$

moyenné sur surface dernière diffusion @  $T_{d\gamma}$

# Asymétrie Baryonique à travers les âges

Steigman astro-ph/0202187



★  $T(\text{Nucl}) \approx 1\text{MeV}$ :  $\eta_{10} = 5.6 \pm 0.5$   
(seulement Deutérium)

★  $T(\text{CMB}) \approx 0.1\text{eV}$ :  $\eta_{10} = 6.0 \pm 0.6$   
WMAP astro-ph/0302209:  $\eta_{10} = 6.1^{+0.3}_{-0.2}$

★  $T(\text{SN1a}) \approx 0.1\text{meV}$ :  $\eta_{10} = 5.1 \pm 1.6$   
 $\Omega_b = \frac{n_b}{n_{DM}} \Big|_{X \text{ clus.}} \Omega_{DM, \text{SN1a}}$

⇒ jolie convergence 10 ordres gr.!!

Depuis,  $\eta$  = bon invariant adiabatique;  
avant, + chaud: utiliser  $Y_B$

# Baryogénèse: pourquoi un mécanisme dynamique?

★ **Conditions initiales?** OK, mais  $Y_B \approx 0.8 \times 10^{-10} \Leftrightarrow (T > 200 \text{ MeV})$  plasma quark-gluons avec  $(10\ 000\ 000\ 014\ q)$  pour  $(10\ 000\ 000\ 000\ \bar{q}) \Rightarrow$  **ajustement trop fin!**  $\Leftrightarrow 0.3 \text{ sec/vie!!!}$

★ **Séparation spatiale?**  $\Leftrightarrow$  île(s) de matière dans univers

symétrique à grde échelle? Doit être formée à

$T_{sep} > 20 \text{ MeV}$  (avant annihilation  $p + \bar{p}$ )

$\Rightarrow$  horizon causal  $H^{-1}(T_{sep}) < H^{-1}(20 \text{ MeV})$

$\Rightarrow$  nombre baryonique dans horizon causal:

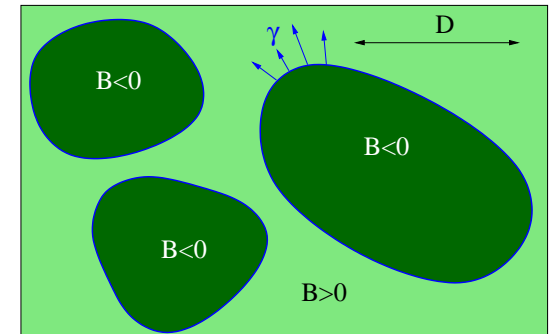
$$B_{caus} < Y_B s H^{-3}|_{20 \text{ MeV}} \approx 10^{-10} (m_{Pl}/20 \text{ MeV})^3$$

$$\approx 10^{52} \approx M_{\oplus}/m_p$$

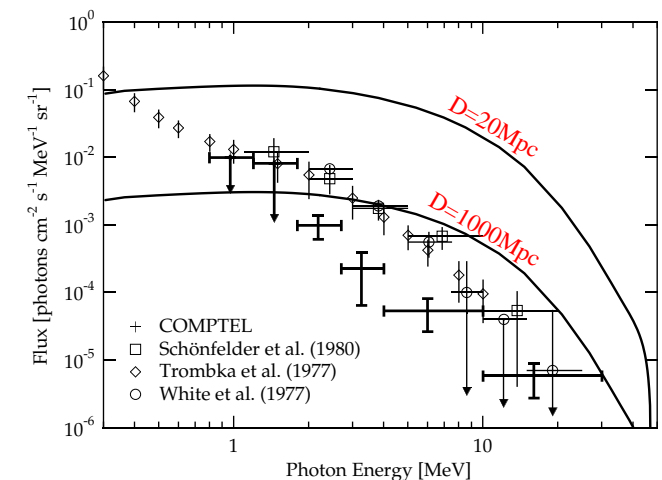
$\Rightarrow$  **beaucoup trop petite échelle:**

en fait, notre île matière  $\approx$  univers visible  $H_0^{-1}$

$\gamma$  durs des annihilations  $p - \bar{p}$  aux frontières [Cohen astro-ph/9707087](#)



$$D \doteq 1/\langle Surf/Vol \rangle; Vol[B > 0] = Vol[B < 0]$$



$\Rightarrow$  besoin de **baryogénèse**  $\doteq$  mécanisme dynamique entraînant  $Y_B = 0 \rightarrow Y_B \neq 0$ ;

*“expliquant pourquoi qqchse plutôt que rien”* après annihilations  $p - \bar{p}$

# Baryogénèse: 3 Conditions de Sakharov

1967: ni  $\mathcal{B}$  ni GUT; cherche lien. avec  $\Gamma_p$  et  $K_0 - \bar{K}_0$   $\mathcal{CP}$  (64!)

## SC.I Écart à l'équilibre sinon

★  $n_B = \int d^3p (e^{-\sqrt{p^2+m_B^2}} + 1)^{-1} = n_{\bar{B}}$

$m_B = m_{\bar{B}}$  par CPT

★ équilibre  $\doteq \forall$  processus,  $\overrightarrow{\text{taux}} = \overleftarrow{\text{taux}} \Rightarrow$  ne peut changer  $Y_B$  micro-réversibilité; c-ex: B. spontanée

## SC.II Violation C and CP au-dessus $T_{\text{QCD}} \approx 200$ MeV:

flèche: matière ou anti-matière?

$$n_B = \frac{1}{3} \left( \underbrace{n_{q_L} - n_{\bar{q}_L}}_{\text{doublets } SU(2)} + \underbrace{n_{q_R} - n_{\bar{q}_R}}_{\text{singlets } SU(2)} \right) \Rightarrow \begin{cases} \text{CP : } q_L \leftrightarrow \bar{q}_L; & B \leftrightarrow -B & \text{brisé par } \delta_{CKM} \text{ in } m_q \\ \text{C : } q_L \leftrightarrow \bar{q}_R; & B \leftrightarrow -B & \text{max. brisé comme P dans SM} \end{cases}$$

## SC.III B violation

processus violant  $B$  nécessaires pour aller de  $Y_B = 0$  à  $Y_B \neq 0$

$\Rightarrow$  Baryogénèse EXIGE physique des particules !

× sursauts  $\gamma$ , explos. SN ou autres pb. astrophysiques

# Prototype GUT: Désintégration de lepto-quarks $X$ hors équilibre

**SC.I** Soit relique chaude  $T_{dX} > M_X \sim 10^{15} \text{ GeV}$ ; quand  $T \ll M_X$ ,  $\exists X$  hors équilibre:

$$\frac{n_X}{n_\gamma} = \frac{n_{\bar{X}}}{n_\gamma} = \frac{g_X}{g_\gamma} \sim 1 \gg \left. \frac{n_X}{n_\gamma} \right|_{\text{equ}} \approx e^{-M_X/T}$$

**SC.III, II** Désintégration des  $X$  viole  $B$  (et  $L$ ) et  $CP$ :

	$B$	$L$	$BR$
$X \rightarrow \bar{q}\bar{q}$	$-2/3$	$0$	$r$
$\searrow ql$	$1/3$	$1$	$1 - r$
	$\Delta B = 1$	$\Delta L = 1 :$	$\rightarrow SC.III$
$\bar{X} \rightarrow qq$	$2/3$	$0$	$\bar{r} \neq r \rightarrow SC.II$
$\searrow \bar{q}\bar{l}$	$-1/3$	$-1$	$1 - \bar{r}$

$\rightarrow$  après désintégr. paires  $(X, \bar{X})$ :

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = (\bar{r} - r) \cdot \left. \frac{n_X}{n_\gamma} \right|_{\text{init}}$$

**\*Exo\*** montrer nécess. des 3 CS

**Problèmes:**

- (1)  $CP$  trop faible  $|r - \bar{r}| < 10^{-15}$
- (2) Baryo. après inflation  
 $\rightarrow T_{rchauff} > 10^{15} \text{ GeV} \rightarrow \text{preheating}$

(3)  $\Delta B = \Delta L \rightarrow \Delta(B - L) = 0 \rightarrow$  processus anomaux effacent asym.

## Révolution russe de '85

V. Kuzmin, V. Rubakov, M. Shaposhnikov; Revue: 9603208

“Violation de  $(B + L)$  anormale est active au-dessus de  $T > T_{E-F} \approx 100\text{GeV}$ ”

$\Rightarrow B$  et  $L$  ne sont pas séparément conservés; seul  $(B - L)$

### Conséquences

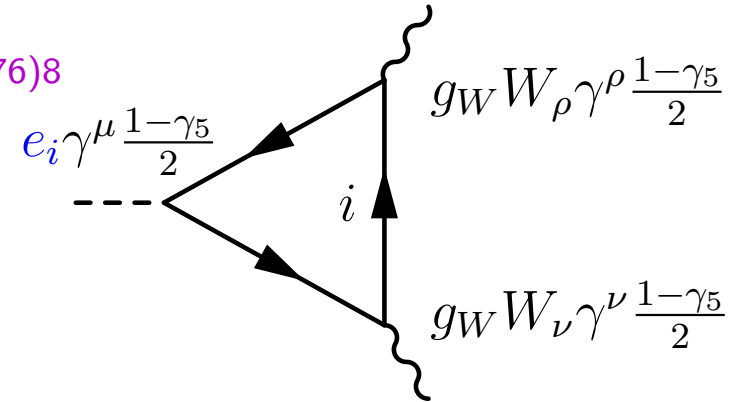
- [1] G.U. n'est plus source naturelle unique de  $\mathcal{B}$
- [2] Baryogénèse G.U. [ou trop précoce] effacée si  $B - L \equiv 0$  (c.f.  $SU(5)$ )
- [3]  $T_{E-F} \approx 100\text{GeV}$  = dernière chance de baryogénèse  $\Rightarrow$  intérêt baryogénèse É-Faible
- [4] Ouvre approche “de bas en haut” pour la baryogénèse:  
Physique testée (M.S.)  $\implies \oplus$  ingrédients suppl. au besoin  
[ $\times$  Sakharov: JETP(67) p.24: invente modèle  $\mathcal{B}, \mathcal{CP}$  pour baryogénèse; p.27: implications pour  $K_0 - \bar{K}_0$ ]
- [5] K.R.S.  $\rightarrow$  top 20 hit-parade citations...



# Violation de $B$ dans le M.S.

★ **Anomalie Triangle** pour  $SU(2)_L$  c.f.  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ : 't Hooft PRL37,1(76)8

$$\partial_\mu J_L^\mu \doteq \sum_{i \in \text{doublets}} \partial_\mu [\bar{\psi}_L^i e_i \gamma^\mu \psi_L^i] = \left( \sum_i e_i \right) \frac{g_W^2}{16\pi^2} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



★ **Instantons**  $\doteq$  solutions tunnel champs  $W$  entre vides topologiques: c.f. problème  $U(1)$ ,  $\mathcal{CP}$  fort

$$\int d^4x \frac{g_W^2}{32\pi^2} F \tilde{F} = N \Leftrightarrow \Delta Q_L \doteq \Delta \left[ \int d^3x J_L^0 \right] = 2N \sum_i e_i$$

$\Rightarrow$  modifient toute charge gauche, e.g.

- $Q_L = B_L$ :  $e_i \equiv 0$  sauf  $e_{u_L} = e_{d_L} = \frac{1}{3} \rightarrow \Delta B_L = n_{gen} N \Rightarrow$   ~~$B$~~  **existe dans le SM!**
- $Q_L = L_L$ :  $e_i \equiv 0$  sauf  $e_{\nu_L} = e_{e_L} = 1 \rightarrow \Delta B_L = n_{gen} N$

★ **Taux**:  $\Gamma_{tunnel} \propto e^{-cN/g^2}$  (proton stable pour tunnel "sous la barrière"), mais à  $T$  (ou  $E$ ) finie:

$$\Gamma_{class.dessus}(T) \propto \begin{cases} e^{-10M_W/T} & \text{dans phase É-F brisée quand } v = \langle h \rangle \neq 0 \text{ et} \\ \alpha_W^5 T^4 & \text{dans phase non-brisée } v = 0 \text{ Kuzmin,Rubakov,Shaposhnikov 85} \end{cases}$$

$\Rightarrow$  non supprimé au-dessus de tr. phase É-F  $\Leftrightarrow T > 100\text{GeV}$

# Mécanisme de transport de charge: archétype Baryogénèse É-F

Cohen, Kaplan &  
Nelson 91

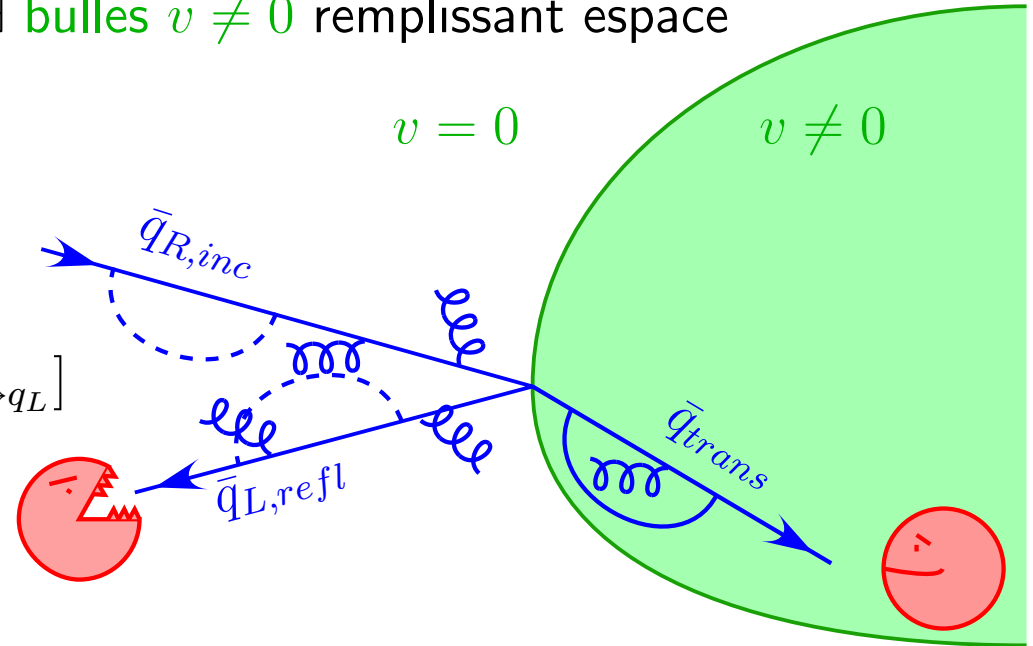
- ★ **Non-équilibre** Si tr. phase É-F 1er ordre,  $\exists$  bulles  $v \neq 0$  remplissant espace  
 $\Rightarrow$  quarks choqués par le passage interface

- ★ **CP** asymétrie de réflexion sur l'interface  
sépare les charges (pas de création!)

$$\Delta_{CP}(R \rightarrow L) = \text{Tr}_{\text{saveurs}} [\bar{r}^\dagger \bar{r}_{\bar{q}_R \rightarrow \bar{q}_L} - r^\dagger r_{q_R \rightarrow q_L}]$$

$$= -\Delta_{CP}(L \rightarrow R)$$

avec  $\bar{r}_{ij} \neq r_{ij} =$  coeff. réflexion  
 $=$  matrice de saveur (e.g.  $\bar{r}_{\bar{s}_R \rightarrow \bar{d}_L}$ )



- ★ **C, B** processus anomaux  $SU(2)_L$  éliminent excès  $\bar{q}_L$  dans phase  $v = 0$ , et pas dans phase brisée

$$\Rightarrow Y_{B,final} = f_{dilut.} \times \Delta_{CP} ; f \lesssim 1$$

✳ Exo ✳ montrer conserv.  $C$  ou  $P \Rightarrow \eta \equiv 0$

1er échec M.S:  $\Delta_{CP} \ll 10^{10}$

$\Delta_{CP}, r$  calculés dans équ. Dirac eff. pour quarks "mous" ( $p < g_s T$ )

$$\begin{pmatrix} i\partial_t - \frac{i}{3}s_z\partial_z - \omega_L & \frac{1}{2}m_d\frac{v(z)}{v_0} \\ \frac{1}{2}m_d\frac{v(z)}{v_0} & i\partial_t - \frac{i}{3}s_z\partial_z - \omega_R \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \\ d_R \\ s_R \\ b_R \end{pmatrix} = 0 ; \quad v(z \ll 0) = 0; v(z \gg 0) = v_T \neq 0$$

$$[\omega_{\begin{matrix} L \\ R \end{matrix}}] = \underbrace{\frac{2\pi}{3}\alpha_s T^2}_{SU(3)} + \frac{\pi}{8}\alpha_W T^2 \left[ \underbrace{3}_{SU(2)} + \underbrace{\frac{1}{9}}_{U(1)} \tan^2 \theta_W + \left( \underbrace{V^\dagger m_u^2 V}_{h^\pm} + \underbrace{m_d^2}_{h^0} \right) 1/M_W^2 \right] \quad (\text{fréq. plasma})$$

$CP$  :  $\bar{q}$  obéissent  $\hat{m}$  équ. avec  $V_{CKM} \rightarrow V_{CKM}^* \Rightarrow$  Résultats :

★  $\Delta_{CP} \approx 10^{-5}$  Farrar & Shaposhnikov 93 ( $\gg Y_B \rightarrow$  OK dilution) mais négligent collisions; en incluant  $\Gamma(q + g \rightarrow q' + g') = \text{Im}(\omega_{L,R}) \sim g_s^2 T \approx 20\text{GeV}$  on trouve:

★  $\Delta_{CP} \approx 10^{-22}$  Gavela, Hernandez, Orloff, Pène 93 ( $\ll Y_B \rightarrow$  trop peu!!!)

**Interprétation** Cohérence quantique nécessaire à exploiter  $\delta_{CKM}$  difficile à maintenir dans plasma en interactions fortes  $\Rightarrow$  fortes suppressions de GIM.

$\Rightarrow \exists$  source de violation de CP autre que  $V_{CKM}$

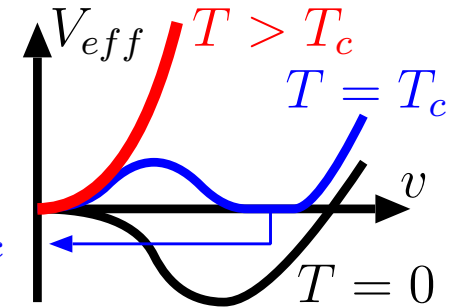
## 2e échec M.S: non-équilibre demande petit $m_h$

$$V_{eff}^{1-loop}(v, T) \stackrel{T \gg m_i}{\approx} \sum_i \left[ \frac{1}{2} \frac{1}{48} m_i^2(v) T^2 - \frac{1}{12\pi} m_i^3(v) T + \frac{1}{64\pi^2} (\ln \frac{T^2}{\mu^2} + c_i) + \dots T^{-\dots} \right]$$

$$= A v^2 T^2 - B v^3 T + \lambda v^4$$

$A$ : restore à grand  $T$  la symétrie (brisée par terme  $-\mu^2 v^2$  à  $T=0$ )

$B$ : introduit 2e minimum  $\Rightarrow$  possibilité tr. 1er ordre:  $v_c = \frac{2B}{\lambda} T_c \approx \frac{m_W^2}{m_h^2} g_W T_c$



Au plus  $m_h$  augmente, plus  $v_c = v(T_c)$  diminue, et plus la transition du 1er ordre est faible (quarks moins réfléchis par la bulle); pour  $m_h > 75\text{GeV}$ , transition 1er ordre disparaît

$$m_h|_{MS} > 113\text{GeV (LEP II)} \Rightarrow \text{CS.II non satisfaite}$$

Pour sauver baryogénèse É-Faible, il faut

- ★ Bosons supplémentaires pour augmenter  $B$  et renforcer tr. de phase
  - ★  $\mathcal{CP}$  hors CKM
- }  $\Rightarrow$  SUSY?!!!

# Baryogénèse MSSM: non-équilibre

Carena 9603420, Riotto: 9807464

Cline: 0003029, 0201286

- ★ Nouveaux scalaires:
  - $h \rightarrow H_1, H_2$  (peu d'effet)
  - $\tilde{t}_L, \tilde{t}_R$  bien couplés à  $h$ :

$$m_{\tilde{t}}^2 = \begin{pmatrix} m_Q^2 + y^2 H_2^2 & y \cdot (A_t H_2 - \mu H_1) \\ \text{herm} & m_U^2 + y^2 H_2^2 \end{pmatrix}$$

- ★  $\tilde{t}_R$  contribue efficacement à  $m_i^3(v)T \sim v^3 T$  si:

- $m_U^2$  petit  $\rightarrow 120\text{GeV} < m_{\tilde{t}_R} < m_t$  ( $\Delta\rho$  interdit  $\tilde{t}_L$ )
- mélanges faibles  $\tilde{t}_L - \tilde{t}_R$
- $m_{\tilde{t}_L} \geq 265\text{GeV} e^{(m_h - 95\text{GeV})/9.2}$  car  $m_h^2 \approx m_Z^2 + \frac{m_t^4}{v^2} \ln \frac{m_{\tilde{t}_L} m_{\tilde{t}_R}}{m_t^2}$

Rem:  $m_{\tilde{t}_R}^2 = m_U^2 + m_t^2 < m_t^2 \Rightarrow m_U^2 < 0$ ; or  $\exists$  instab. vide É-F vers brisure  $SU(3)_c$  ( $\Rightarrow$  gluons massifs!!!) si  $m_U^2 < -(70\text{GeV})^2 \Rightarrow$  borne inférieure 120GeV

Reste petite fenêtre, très contrainte

## Baryogénèse MSSM: $\mathcal{CP}$

★ si masse de fermion  $f$  complexe  $m(z) = |m(z)|e^{i\phi(z)}$ ,

$$\psi_{refl}^f \approx e^{-ikz} \left[ r_a e^{i\phi(a)} + r_b e^{i\phi(b)} e^{2ik'(a-b)} \right]$$

$$\psi_{refl}^{\bar{f}} \approx \text{"} \left[ \phi \rightarrow -\phi; k' \rightarrow k' \right]$$

$$\rightarrow \Delta_{CP} = |\psi_{refl}^f|^2 - |\psi_{refl}^{\bar{f}}|^2 \rightarrow 0 \text{ si } \begin{cases} b - a \rightarrow 0 \\ \phi(z) = cte \end{cases}$$

★ MSSM: pour  $q, l$   $\phi(z) \equiv 0$  par choix de jauge; mais  $\Delta_{CP}(\text{charginos}) \neq 0$  si  $\text{Im}(M_2\mu) \neq 0$ ; asymétrie charginos  $\Rightarrow$  asym. (charge, hyper-)  $\Rightarrow$  processus anomaux  $\Rightarrow B$

★  $\text{Im}(M_2\mu)$ : peu d'effet sur  $B_0 - \bar{B}_0$  ou  $K$  mais effet sur EDM via boucle chargino:

$$\text{EDM}(e^-) \sim \frac{200\text{GeV}}{m_{\chi^+}} \frac{\tan\beta}{3} 10^{-26} \gg 0.16 \times 10^{-26} (90\% \text{C.L.}), \text{ si phase } \mathcal{CP}_{\text{max}} \text{ Chang}^2 \ \& \ \text{Keung 0205084}$$

or baryo(MSSM) demande  $M_2 \approx \mu \approx m_{\chi^+} \lesssim 170\text{GeV}$  Cline 0201286

$\Rightarrow$  Echec MSSM par insuffisance  $\mathcal{CP}$

## Baryogénèse de bas en haut: $MS \rightarrow MSSM \rightarrow \dots m_\nu$ ?

Avant [K.R.S.85](#), baryogénèse nécessitait  $\not\propto$  GUT; après,  $T_{TPEF}$  devient “*température de la dernière chance*”  $\Rightarrow$  naturel de monter à partir de là.

★ **Modèle Standard** possède  $\not\propto$  (CS.III  $\checkmark$ ), mais:

- Suppressions GIM  $\not\propto$  dans plasma  $\rightarrow Y_{B10} \approx 10^{-12} \lll 1$  (CS.II trop faible) [Gavela 93](#)
- Choc hors-équil. par TPÉF trop timide si  $m_h > 114$  GeV (CS.I trop faible) [Shaposhnikov 91-95](#)

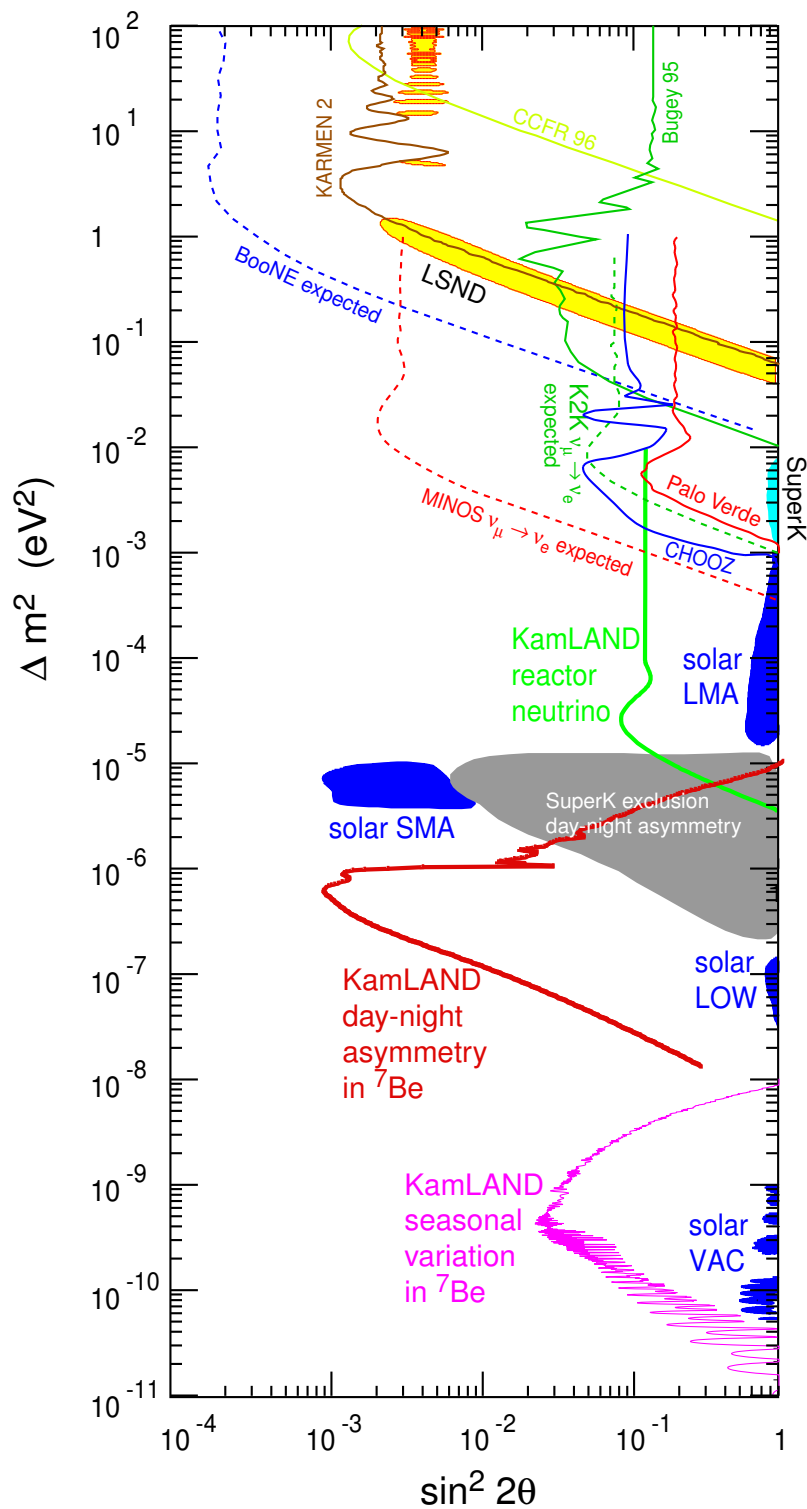
★ **MS Susy Min.** scalaires suppl. peuvent renforcer TPÉF pour  $\tilde{t}_R$  légers (CS.I  $\nearrow$ , [Carena 96](#)) probablement pas assez pour limite  $m_h$  actuelle;  $\not\propto$  charginos sans suppr. GIM, mais limitée par EDM( $e^-$ ) [Cline 0201286](#)

★ **Masses de neutrinos** [Fukugita, Yanagida 86](#): processus anomaux conservent  $B_L - L_L$ , mais transforment ( $L_L = -1, B_L = 0$ ) en ( $L_L = -2/3, B_L = 1/3$ )

$\Rightarrow$  suffit de générer pure asym. leptonique  $Y_{L_L} \approx -3 \cdot 10^{-10}$  avant  $T_{TPEF}$   $\doteq$  **Leptogénèse**

Rem: besoin  $\not\propto \rightarrow m_\nu$  Majorana OK, mais  $m_\nu$  Dirac ( $\not\propto_L$ ) suffit [Murayama hep-ph/0206177](#), [Lindner hep-ph/9907562](#)

# Masses et mélanges de neutrinos



Neutrinos atmosphériques (SuperK) et de réacteurs nucléaires (CHOOZ, KamLAND)

$\Delta m_a^2 (\text{eV}^2)$	$\tan^2 \theta_a$	$U_{e3}$
$3 \times 10^{-3}$	1.4	$< 0.2$

Neutrinos solaires

	$\Delta m_\odot^2 (\text{eV}^2)$	$\tan^2 \theta_\odot$	$\sin \theta_\odot$
<b>LMA</b> ✓	$5 \times 10^{-5}$	0.4	0.54
<b>SMA</b> ✗	$5 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-3}$	0.039
<b>LOW</b> ✗	$8 \times 10^{-8}$	0.61	0.62
<b>VAC</b> ✗	$4.6 \times 10^{-10}$	1.8	0.8

Rem:  $\Delta m_\nu^2 \ll \Delta m_{q,l}^2 \Rightarrow$



# Bascule (see-saw)

Gell-Mann, Ramond, Slansky 79; Yanagida 80; Mohapatra, Senjanovic 80 → 25 ans @ ν04, Paris

Sauf scalaire triplet de  $SU(2)$ ,  $m_\nu$  nécessitent singlets  $N$ , déconnectés de l'échelle É-F

$$\mathcal{L}_{mass} = \bar{L}H \cdot \frac{1}{v} \text{diag}(m_{e,\mu,\tau}) \cdot l_R + \frac{1}{2} \bar{N}^c \cdot \text{diag}(M_{1,2,3}) \cdot N + \underbrace{\bar{L}\tilde{H} \cdot V_{CKM}^\dagger \cdot \frac{1}{v} \text{diag}(m_{1,2,3}^D) \cdot U_R \cdot N}_{\doteq Y_{li}}$$

$$V_{CKM}(\vec{\theta}_L, \delta_L) = V_{23}(\theta_L^{23}) \cdot V_{13}(\theta_L^{13}, \delta_L) \cdot V_{12}(\theta_L^{12}) \in SU(3)/U(1)^4 \rightarrow \text{3 angles, 1 phase}$$

$$U_R = \text{diag}(e^{i\psi_R^1}, e^{i\psi_R^2}, e^{i\psi_R^3}) \cdot V(\vec{\theta}_R, \delta_R) \cdot \text{diag}(e^{i\phi_R}) \in SU(3) \rightarrow \text{3 angles, 5 phases}$$

A la limite de découplage des  $N$  ( $M \rightarrow \infty$ ):

$$\mathcal{L}_{mass} \approx \bar{l}_L \cdot \text{diag}(m_{e,\mu,\tau}) \cdot l_R + \frac{1}{2} \bar{\nu}^c \cdot \mathcal{M} \cdot \nu$$

$$\mathcal{M} \doteq U_{MNS} \cdot \text{diag}(m_{1,2,3}) \cdot U_{MNS}^T \approx v^2 Y \cdot M^{-1} \cdot Y^T; U_{eff} \doteq V_{CKM} \cdot U_{MNS} = 1 \text{ ssi } U_R = 1$$

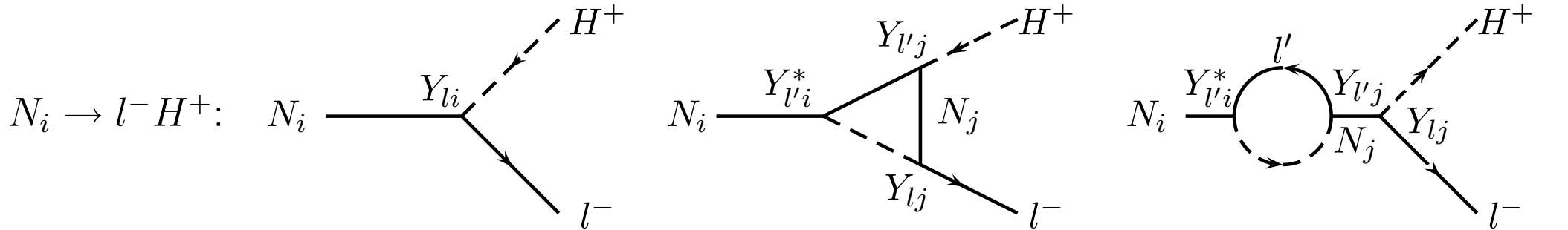
$$U_{MNS} \doteq V(\theta_{atm}, \theta_{chooz}, \theta_{sun}, \delta) \cdot \text{diag}(e^{i\phi_L}) \rightarrow \text{3 angles, 3 phases } \psi_L = 0 \text{ avec redéf. } l_L, l_R$$

⇒ νs légers grâce à Ns lourds (bascule)

effets au-dessus découplage?

# Leptogénèse: $\not{L}, \not{CP}$

Chaque désintégr.  $N_i$  engendre asym. CP leptonique  $\delta_i$  (2 canaux avec  $\neq L \rightarrow$  CS.III; si  $Y \neq Y^* \rightarrow$  XS.II):



$$N_i \rightarrow l^+ H^-: \quad Y_{li}^* \quad \sum_{l',j} Y_{l'i} Y_{l'j}^* Y_{lj}^* \quad \sum_{l',j} (Y_{l'i} Y_{l'j}^* + i \leftrightarrow j) Y_{lj}^*$$

$$\rightarrow \frac{\sum_l \Gamma(N_i \rightarrow l + H) - \Gamma(N_i \rightarrow \bar{l} + H^\dagger)}{\quad \quad \quad + \quad \quad \quad} = \delta_i = \underset{\approx}{\overset{M_i \ll M_j}{\approx}} - \frac{3}{16\pi} \frac{\text{Im}(A_{ij}^2)}{A_{ii}} \frac{M_i}{M_j}$$

avec  $A_{ij} = (Y^\dagger Y)_{ij} = U_R^\dagger \cdot \text{diag}(m_{1,2,3}^D)^2 \cdot U_R$  une matrice cruciale:

★ Termes diagonaux:  $\Gamma_i \propto A_{ii} M_i$ ; ★ termes hors-diag. portent asym. CP

Rem: Si  $M_i \approx M_j$ , self-énergies augmentent  $\propto 1/(M_j - M_i)$  jusque  $\Delta M \approx \Gamma$

Pilaftsis hep-ph/9812256, Frere hep-ph/9901337

## Leptogénèse thermique: écart à l'équilibre CS.I...

Asym. de désintégration  $\delta_i$  calculée dans le vide, mais dans plasma chaud, désintégrations inverses peuvent défaire cette asym. pour des grands rapports:  $\Leftrightarrow$  local équil. local  $\Leftrightarrow$  échec CS.I

$$K_i = \frac{\Gamma_{N_i}(T = M_i)}{H(T = M_i)} \approx \frac{1}{1.66 \cdot 8\pi \sqrt{g^*}} A_{ii} \frac{M_{pl}}{M_i} = \text{taux désint. (inv.) / expansion}$$

**Asymétrie leptonique**  $Y_i$  venant de  $N_i$ 's initialement à l'équil. est alors diluée par  $d \propto 1/K$ :

$$Y_i = \frac{1}{g^*} d(K_i, M_i) \delta_i$$

et stimule la production anormale d'une **asymétrie baryonique gauche**  $Y_B \approx -Y_i/3$ :

$$Y_{B10} \doteq 10^{10} Y_B \approx \frac{10^{10}}{16\pi g^*} d(\tilde{K}_1, M_1) \frac{M_1}{A_{11}} \sum_{j=2,3} \frac{\text{Im}(A_{1j}^2)}{M_j} \approx 0.8$$

**Rem 1:** Le plus léger  $M_1$  domine

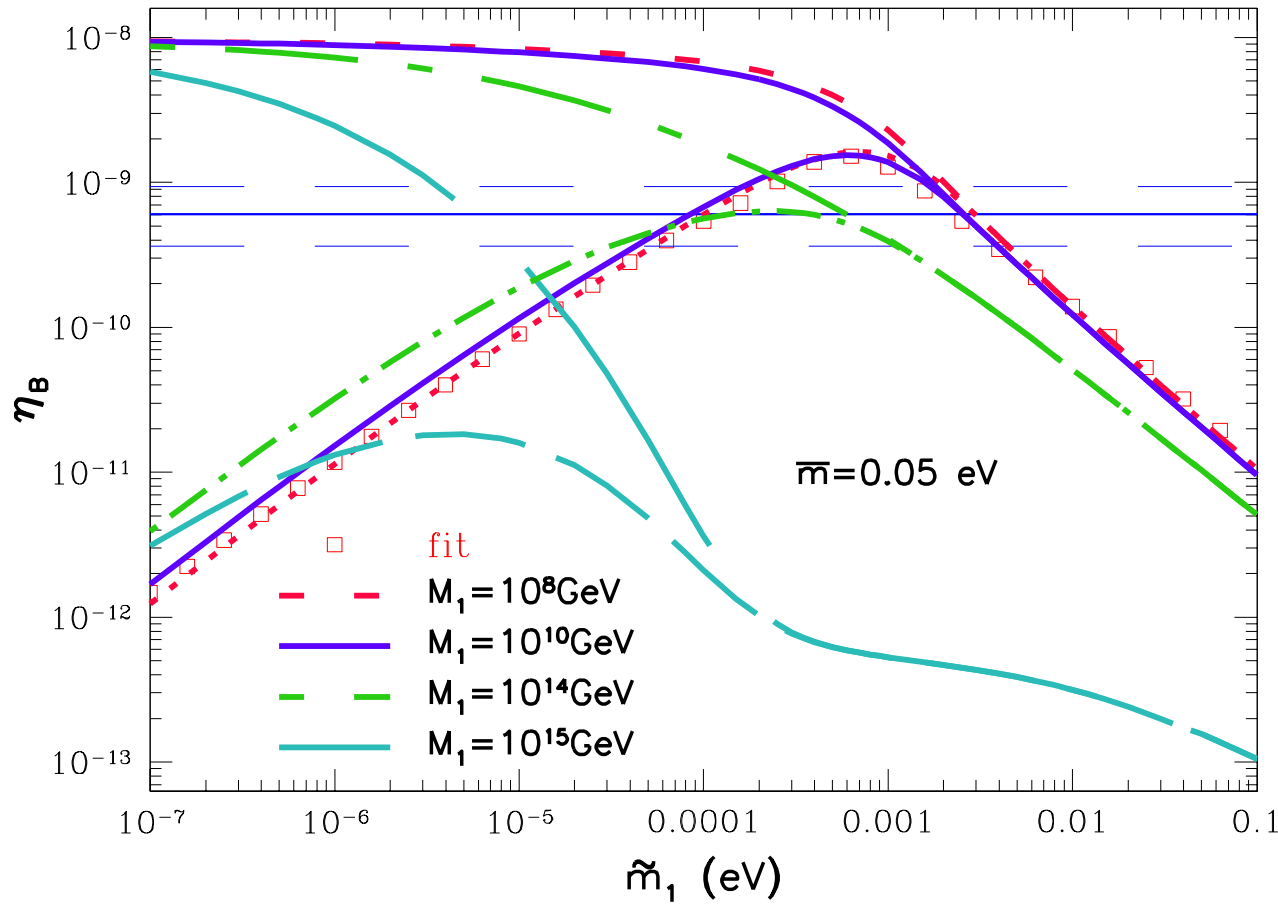
**Rem 2:**  $K_i \Leftrightarrow \tilde{m}_i \doteq \frac{v^2 A_{ii}}{M_i} = K_i \tilde{m}^*$  with  $\tilde{m}^* = \sqrt{512 g^* \pi^5 / 90} v^2 / M_{pl} = 1.08 \cdot 10^{-3} \text{eV (MS)}$

... et facteur de dilution  $d$

Buchmuller 97..03 a résolu numériquement équs. Boltzman: derniers résultats pour

$$\delta_1 = 10^{-6} \rightarrow \eta_B = 10^{-8} d \text{ di Bari hep-ph/0205349}$$

figure 5a



★  $d(K > 1, M_1 < 10^{15}) \propto 1/K$ : dilution par désint. inverse

★  $d(K < 1) \propto K$ : peupler distr.  $N_1$  d'équil. (ou haut: équil. donné)

★ dépendance  $M_1$ : vient de collisions 2-2, augmentent à  $m_\nu, \tilde{m}_1$  fixés

## Argument d'échelle

**Lien** entre  $Y_{B10}$  et oscillations impossible si  $Y$ 's libres:

$$\forall(Y, M) \rightarrow \begin{cases} \text{oscillations OK} \\ \text{mauvais } Y_{B10} \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} Y \rightarrow Y' = Y/\sqrt{Y_{B10}} \\ M \rightarrow M' = M/Y_{B10} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{cases} \text{mêmes neutrinos légers} \\ \text{(et } K \propto \tilde{m}) \\ Y' \approx 1 \end{cases}$$

**Phase CP** de leptogénèse dans  $U_R$  correspond à phase dans  $U_{eff} = V_{CKM} \cdot U_{MNS}$

$$\rightarrow \text{Im}(U_{MNS}) \neq 0 \text{ (CP osc., } 2\beta\nu) \Leftrightarrow \text{Im}(U_R) \neq 0 \text{ (CP lept.) ssi } \text{Im}(V_{CKM}) = 0$$

**Échelle  $M_1$**  (si  $d(1 < K < 10^3) \approx 0.1/K$  et  $N_1$  domine via boucle  $N_2$ ):

$$Y_{B10} \approx \frac{0.7 \times 10^{-10} \text{Im}(A_{12}^2)}{\sqrt{g^*}} \frac{M_1}{A_{11}^2} \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{M_1}{10^{10} \text{GeV}} \approx 0.8$$

$\rightarrow M_1 \approx 10^{10} \text{GeV} = \text{échelle naturelle}$

plus rigoureux  $\rightarrow$

## Borne générique ( $\pm$ indép. modèle)

Grâce à paramétrisation de  $Y_\nu = v^{-1} \text{diag}(\sqrt{M}) R \text{diag}(\sqrt{m^D}) U_{MNS}^\dagger$ , avec une matrice complexe orthogonale  $R$  Casas hep-ph/0103065, on peut dériver: Davidson hep-ph/0202239

$$\delta_1 = \frac{-3 M_1}{8\pi} \frac{1}{v^2} \frac{1}{A_{11}} \text{Im}(Y \mathcal{M}^\dagger Y^T)_{11} = \frac{-3 M_1}{8\pi} \frac{\sum_j m_j^2 \text{Im}(R_{1j}^2)}{v^2 \sum_j m_j |R_{1j}|^2} \rightarrow |\delta_1| \leq \frac{3 M_1}{8\pi} \frac{1}{v^2} (m_3 - m_1)$$

Comme dilution  $d < 0.2$ , la connaissance de  $Y_B$  se traduit en

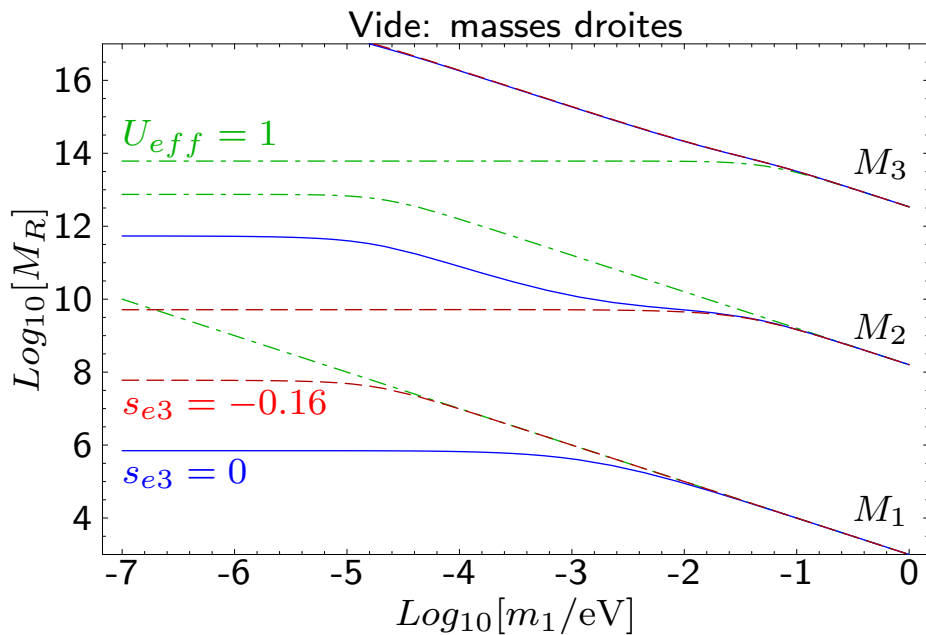
$$M_1 > \frac{0.06 \text{eV}}{m_3} 10^9 \text{GeV}$$

et donc  $T_{reh} > 10^{8 \rightarrow 10}$  GeV après inflation. Dans modèles SUSY-sugra, la surproduction de gravitinos instables pouvant détruire nucléosynth. demande  $T_{reh, sugra} < 10^{9 \rightarrow 12} \text{GeV}$ . Trop proche? Echappatoires:

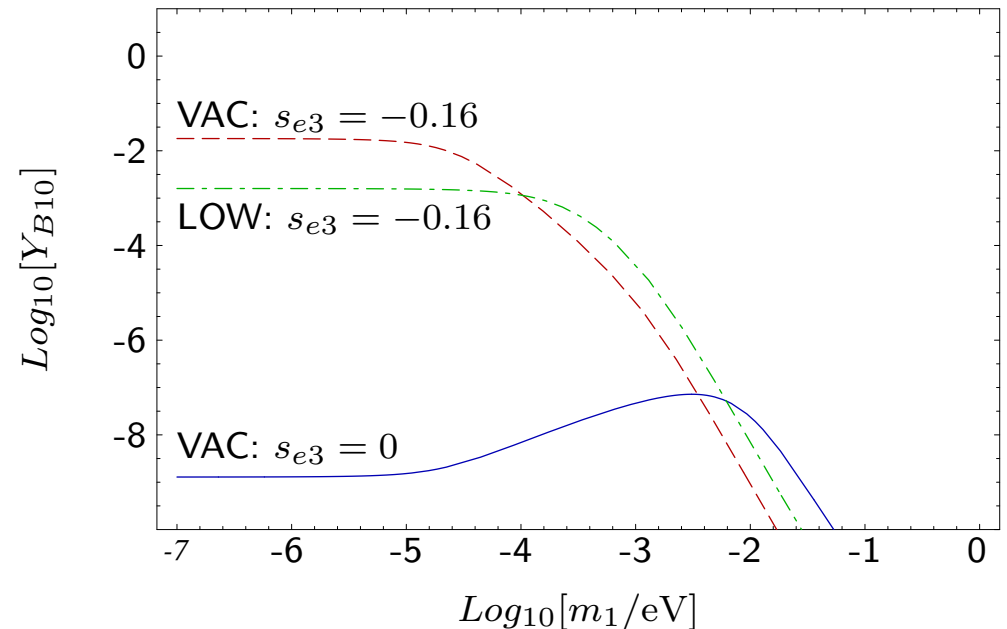
- ★  $\delta_1 \nearrow$  quand  $|M_2 - M_1| \searrow$  (self-énergies):  $N_i$  partiellement dégénérés peuvent violer la borne e.g. Ellis, Raidal, Yanagida hep-ph/0206174
- ★ Médiation de jauge au lieu de gravité évite le problème Yanagida 0309064

# Puissance de la borne: symétrie quark-lepton "à la $SO(10)$ "

Étend unification  $b - \tau$  à  $m_\nu^D = m_u/3$  (naturel dans  $SO(10)$ , père de la bascule); détermine  $M, U_R$  à partir de  $\mathcal{M} \rightarrow$  paramètres libres:  $m_1, 5$  phases; Est-ce possible? [Nezri hep-ph/0004135](#)

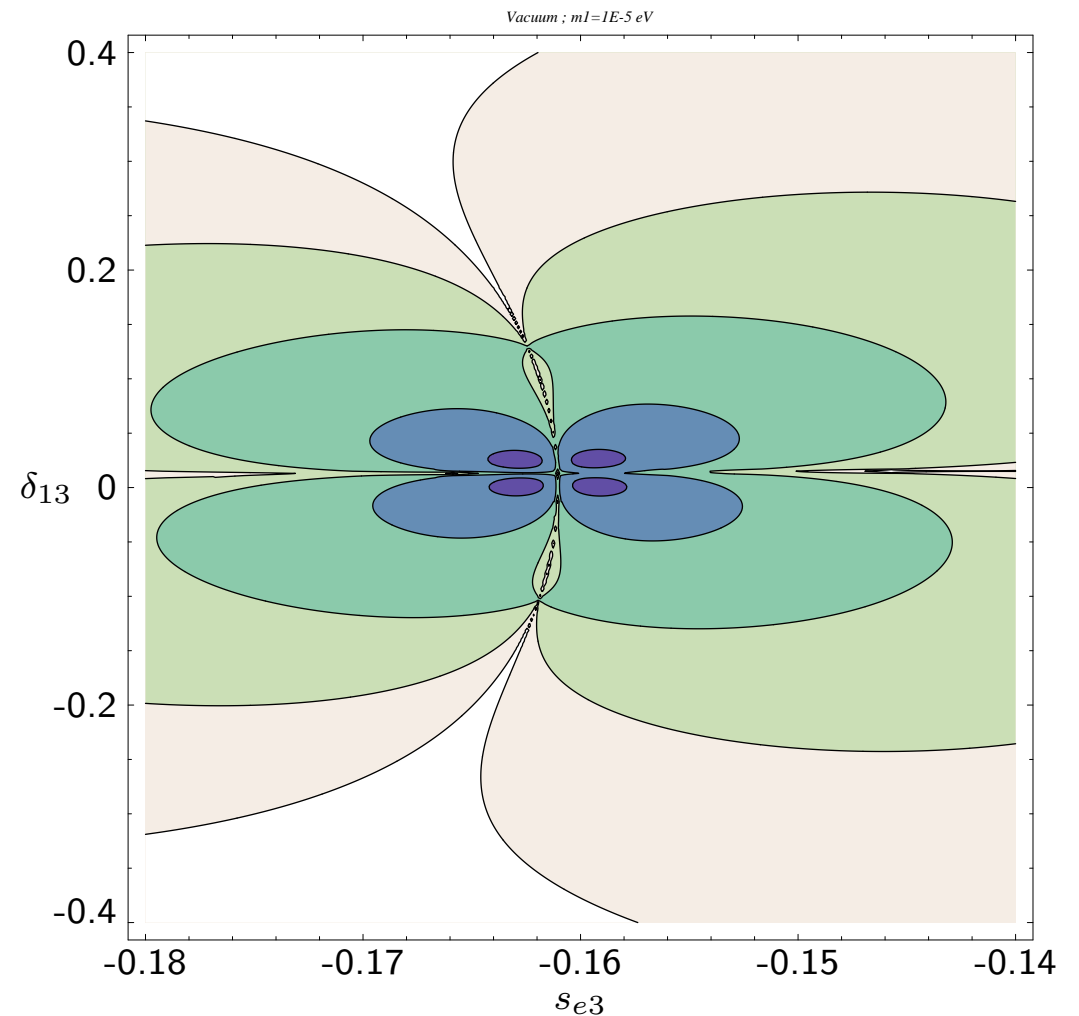
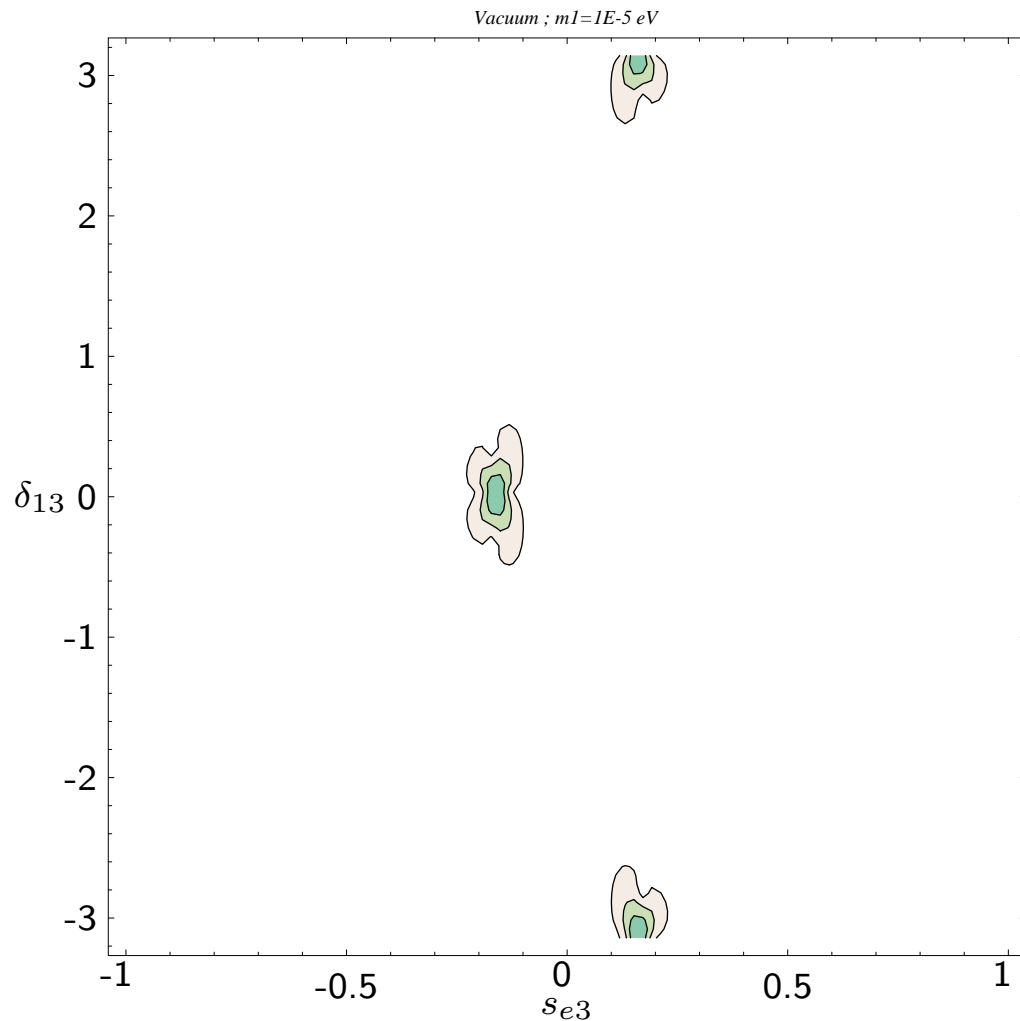


$M_1, M_2, M_3$   
Masses droites:  
non-dég:  $\Rightarrow$  borne fonctionne



Asymétrie  $Y_{B10}$  : VAC & LOW  
bien trop petites, sauf...  $s_{e3} \rightarrow$

# Effet de $U_{e3} = s_{e3}e^{i\delta_{13}}$ dans le vide

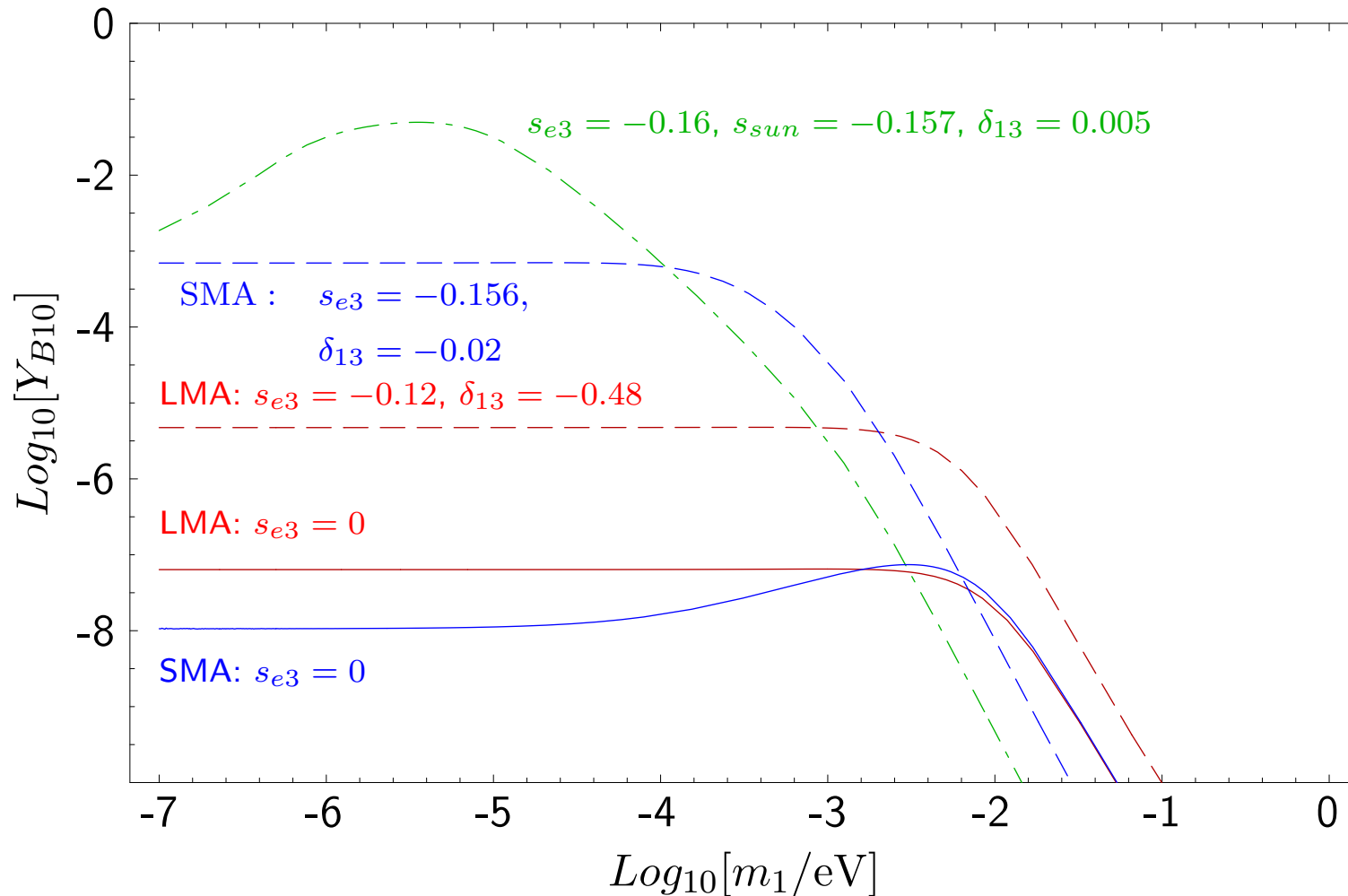


Forte dépendance  $s_{e3}$  qui peut compenser le plus grand des mélanges (Cabbibo):

$$s_{e3} \approx -s_{atm}s_{Cabibbo} \text{ dans } U_{eff}$$



# Résultats MSW



Encore + petit  $\Rightarrow SO(10)$  ne marche pas

(masses Dirac trop hiérarchiques  $\rightarrow$  pas de dégén.  $M_1 - M_2$  possible).

## Conclusions

- ★ **Baryogénèse** = importante question de physique des particules: offre lien ultime micro/macro (même si 1 seul nombre dans exp. non-reproductible)
- ★ Vieux héraut de nouvelle physique (en particulier  $\mathcal{CP}$ )
- ★ **Leptogénèse** thermique + bascule = solution prédictive minimale non-exclue: domaine très actif (beaucoup rejoignent cause plaidée par Yanagida depuis 1980)
- ★ Tranche non-triviale dans l'espace des paramètres de la bascule, grâce à borne sup  $\mathcal{CP}$
- ★ Non prédictif et difficile à recouper:  $N_R$  parfois manifeste dans LFV (c.f. Lavignac)