

Leptogenesis in gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model

永島伸多郎 (ICRR)

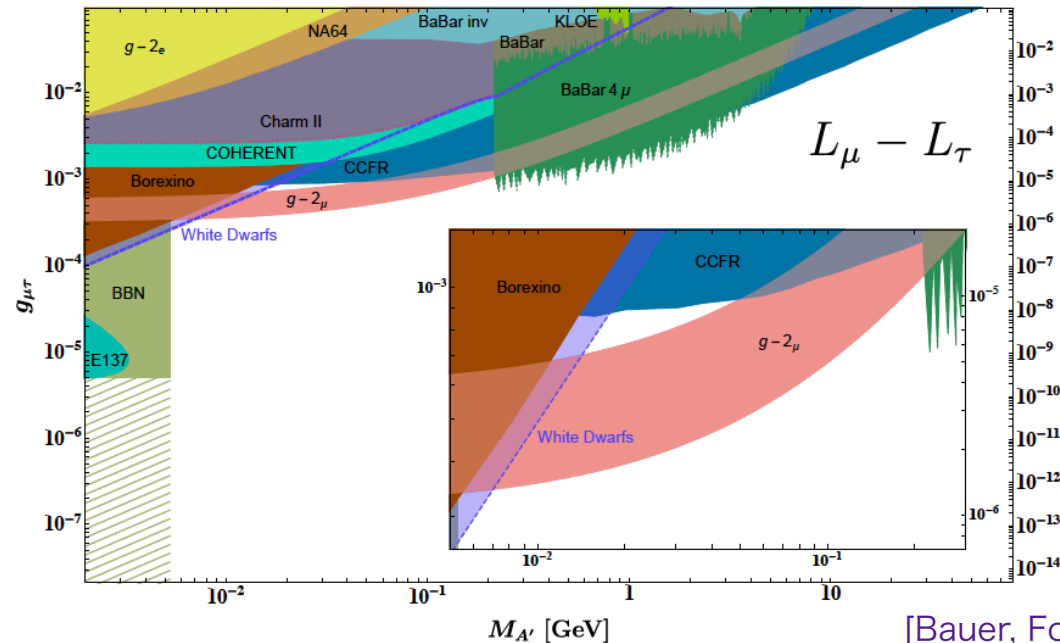
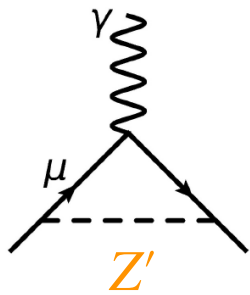
共同研究者：伊部昌宏、村井開 (ICRR)

[arXiv:2303.xxxxx]

ミューオンg-2 と ゲージ化された $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称性

ミューオンg-2アノマリーは新たな中性ゲージボゾン Z' の導入で説明可能

標準模型 (SM) の理論値からのズレ; 4.2σ [The Muon g-2 Collaboration ('21)]



$$\begin{cases} g_{Z'} \approx 10^{-3} \\ m_{Z'} \approx 10 - 100 \text{ MeV} \end{cases}$$

対称性の破れの
のスケール

$$\approx 10 - 100 \text{ GeV}$$

[Bauer, Foldenauer, Jaeckel ('18)]

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 電荷;	SM: L_μ, μ_R	+1	右巻きニュートリノ (N_α): N_μ	+1
	L_τ, τ_R	-1	($\alpha = e, \mu, \tau$) N_τ	-1
	それ以外	0	N_e	0

レプトンフレーバーに関する対称性の下でシーソー機構は機能する?

シーソー機構

右巻きニュートリノの導入によって小さいニュートリノ質量を説明

[Minkowski ('77)] [Yanagida ('79)] [Glashow ('79)] [Gell-Mann, Ramond, Slansky ('79)] [Mohapatra, Senjanovic ('80)]

ν セクターのラグランジアン;

$$\mathcal{L}_\nu = -\lambda_\nu L_\alpha \tilde{\Phi} \bar{N}_\beta - \frac{M_R}{2} \bar{N}_\alpha \bar{N}_\beta + \text{h.c.}$$

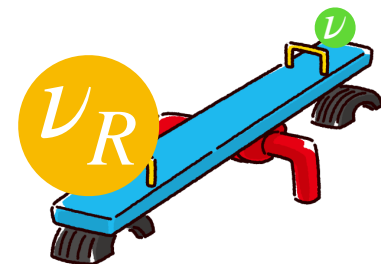
ν 質量行列;

$$\begin{cases} m_\nu = -v_{\text{EW}}^2 [\lambda_\nu M_R^{-1} \lambda_\nu^T] & (v_{\text{EW}} = 174 \text{ GeV}) \\ m_\nu^d = \text{diag}(m_1, m_2, m_3) = U_{\text{PMNS}} m_\nu U_{\text{PMNS}}^T \end{cases}$$

$$U_{\text{PMNS}} : \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta, \eta_1, \eta_2$$

$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ 対称の下では?

e と μ, τ が分離しているので θ_{12}, θ_{13} を説明できない



$$\begin{cases} \lambda_\nu = \text{diag}(\lambda_e, \lambda_\mu, \lambda_\tau) \\ M_R = \begin{pmatrix} M_{ee} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\mu\tau} \\ 0 & M_{\mu\tau} & 0 \end{pmatrix} \end{cases}$$

$$m_\nu \propto \begin{pmatrix} \lambda_e^2 / M_{ee} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_\mu \lambda_\tau / M_{\mu\tau} \\ 0 & \lambda_\mu \lambda_\tau / M_{\mu\tau} & 0 \end{pmatrix}$$

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ の破れとシーソー機構

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ を破るスカラーの導入により、ニュートリノ振動を説明可能に

[Harigaya, Igari, Nojiri, Takeuchi, Tobe ('13)] [Asai, Hamaguchi, Nagata ('17)]

[Asai, Hamaguchi, Nagata, Tseng, Tsumura ('18)]

ラグランジアン:

$$\mathcal{L}_\nu = -\lambda_\nu L_\alpha \tilde{\Phi} \bar{N}_\beta - \frac{M_R}{2} \bar{N}_\alpha \bar{N}_\beta - h_{e\mu} \sigma_1 \bar{N}_e \bar{N}_\mu - h_{e\tau} \sigma_1^* \bar{N}_e \bar{N}_\tau - \frac{1}{2} h_{\mu\mu} \sigma_2 \bar{N}_\mu \bar{N}_\mu - \frac{1}{2} h_{\tau\tau} \sigma_2^* \bar{N}_\tau \bar{N}_\tau + \text{h.c.}$$

スカラー ; Φ (0)
(電荷) σ_1 (+1)
 σ_2 (+2)

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ の自発的対称性の破れによって

少なくとも $\langle \sigma_1 \rangle \neq 0$ で観測値を再現可能

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_\nu = \text{diag}(\lambda_e, \lambda_\mu, \lambda_\tau) \\ M_{R,\text{eff}} = \begin{pmatrix} M_{ee} & h_{e\mu} \langle \sigma_1 \rangle & h_{e\tau} \langle \sigma_1 \rangle \\ h_{e\mu} \langle \sigma_1 \rangle & h_{\mu\mu} \langle \sigma_2 \rangle & M_{\mu\tau} \\ h_{e\tau} \langle \sigma_1 \rangle & M_{\mu\tau} & h_{\tau\tau} \langle \sigma_2 \rangle \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

Dirac湯川 : $\lambda_e, \lambda_\mu, \lambda_\tau$

Majorana湯川 : $h_{e\mu}, h_{e\tau}, h_{\mu\mu}, h_{\tau\tau}$

質量パラメータ : $M_{ee}, M_{\mu\tau}$

$$m_{Z'}^2 = 2g_{Z'}^2 (\langle \sigma_1 \rangle_0^2 + 4\langle \sigma_2 \rangle_0^2)$$

$$\sqrt{\langle \sigma_1 \rangle_0^2 + 4\langle \sigma_2 \rangle_0^2} \approx 10 - 100 \text{ GeV}$$

Q. $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 模型の下でレプトジェネシスはできる？

SM + 3 ν_R + $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ という模型で、ミューオンg-2、ニュートリノ質量に加え、**宇宙バリオン数非対称が同時に説明可能か**を明らかにしたい
レプトジェネシス

1) 右巻きニュートリノによりレプトン数非対称を作る ($n_L \equiv n_l - n_{\bar{l}} \neq 0$)

• ~~CP~~ 崩壊 [Fukugita, Yanagida ('86)] $M_N \gtrsim \Lambda_{EW} \approx 100 \text{ GeV}$
[Pilaftsis ('97)] [Pilaftsis, Underwood ('05)]

• ~~CP~~ 振動 [Akhmedov, Rubakov, Smirnov ('98)] $M_N < \Lambda_{EW}$
[Asaka, Shaposhnikov ('05)]

2) スファレロン過程を通じてバリオン数非対称に転換

$n_B \equiv n_b - n_{\bar{b}} = -(28/79) n_L$ スファレロン脱結合： $T_{sph} \approx 130 \text{ GeV}$
[Khlebnikov, Shaposhnikov ('88)] [D'Onofrio, Rummukainen, Tranberg ('14)]

ゴールとストーリー

初期宇宙で $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ が破れている場合に非熱的レプトジェネシスによって

成功するシナリオを示した

議論の流れ

1. 右巻きニュートリノは重くなれる？

$$M_{R,\text{eff}} = \begin{pmatrix} M_{ee} & h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle_0 & h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle_0 \\ h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle_0 & h_{\mu\mu}\langle\sigma_2\rangle_0 & M_{\mu\tau} \\ h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle_0 & M_{\mu\tau} & h_{\tau\tau}\langle\sigma_2\rangle_0 \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{\langle\sigma_1\rangle_0^2 + 4\langle\sigma_2\rangle_0^2} \approx 10 - 100 \text{ GeV}$$

$M_{ee}, M_{\mu\tau}$ も同程度？

→ **No!** $M_N \sim 10^6 \text{ GeV}$ は可能

2. $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称の下で機能する？破れているべき？

→ **破れていなければならない** → 初期宇宙で実現可能

3. 非熱的レプトジェネシスで十分な非対称が作れるか？

質量パラメータ $M_{ee}, M_{\mu\tau}$ とニュートリノ振動 ①

$M_{ee}, M_{\mu\tau}$ は、ニュートリノ振動から制限される

$$\begin{cases} m_\nu = -v_{\text{EW}}^2 [\lambda_\nu M_R^{-1} \lambda_\nu^T] \\ m_\nu^d = U_{\text{PMNS}} m_\nu U_{\text{PMNS}}^T \end{cases} \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{M_{ee}}{\lambda_e^2} & \frac{h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle_0}{\lambda_e\lambda_\mu} & \frac{h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle_0}{\lambda_e\lambda_\tau} \\ \frac{h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle_0}{\lambda_e\lambda_\mu} & \frac{h_{\mu\mu}\langle\sigma_2\rangle_0}{\lambda_\mu^2} & \frac{M_{\mu\tau}}{\lambda_\mu\lambda_\tau} \\ \frac{h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle_0}{\lambda_e\lambda_\tau} & \frac{M_{\mu\tau}}{\lambda_\mu\lambda_\tau} & \frac{h_{\tau\tau}\langle\sigma_2\rangle_0}{\lambda_\tau^2} \end{pmatrix} = v_{\text{EW}}^2 \underbrace{U_{\text{PMNS}} [m_\nu^d]^{-1} U_{\text{PMNS}}^T}_{\substack{\uparrow \text{観測値と} \\ \text{Majorana位相}}}$$

右辺のゼロでない成分は理論パラメータへの条件式を与える

ニュートリノ質量が非縮退:

$$v_{\text{EW}}^2 \times (U[M_\nu^d]^{-1}U^T)_{\alpha\beta} = \frac{v_{\text{EW}}^2}{m_l} \times \left[U_{\alpha l}U_{\beta l} + \mathcal{O}\left(\frac{m_l}{\sqrt{\Delta m_{\text{sol/atm}}^2}}\right) \right]$$

$$\begin{cases} M_{ee}M_{\mu\tau} \simeq h_{e\mu}h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle_0^2 \\ M_{\mu\tau}^2 \simeq h_{\mu\mu}h_{\tau\tau}\langle\sigma_2\rangle_0^2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} M_{ee} \simeq M_{\mu\tau} \lesssim 10^2 \text{ GeV} \\ M_{ee} \gg 10^2 \text{ GeV} \ \& \ M_{\mu\tau} \ll 10^2 \text{ GeV} \end{cases}$$

$$\langle\sigma_{1,2}\rangle_0|_{\text{max}} \simeq 100 \text{ GeV}$$

レプトジェネシスは困難

質量パラメータ $M_{ee}, M_{\mu\tau}$ とニュートリノ振動 ②

特別な振動パラメータの場合、 $M_{ee}, M_{\mu\tau}$ への制限は緩和

ニュートリノ質量が縮退; 右辺にゼロ成分

$$\begin{aligned}
 m_1 &= m_l, \\
 m_2 &= \sqrt{m_l^2 + \Delta m_{\text{sol}}^2} \\
 m_3 &= \sqrt{m_l^2 + \Delta m_{\text{atm}}^2}
 \end{aligned}
 \quad
 v_{\text{EW}}^2 \times U[M_\nu^d]^{-1} U^T \simeq \frac{v_{\text{EW}}^2}{m_l} \times
 \begin{pmatrix}
 0.99 e^{-0.03i} & 0 & 0.05 e^{1.4i} \\
 0 & 0 & 0.88 e^{3.1i} \\
 0.05 e^{1.4i} & 0.88 e^{3.1i} & 0.22 e^{-0.05i}
 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 m_l &= 0.06 \text{ eV}, \\
 &\uparrow \\
 (\sum m_i &< 0.26 \text{ eV})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta m_{\text{sol}}^2 &= 7.42 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \Delta m_{\text{atm}}^2 = 2.510 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\
 \sin^2 \theta_{12} &= 0.304, \quad \sin^2 \theta_{13} = 0.02246. \\
 \sin^2 \theta_{23} &\simeq 0.565, \quad \delta \simeq 268^\circ, \quad \eta_1 \simeq 355^\circ, \quad \eta_2 \simeq 177^\circ
 \end{aligned}$$

観測の 2σ 内

CP位相決定

$$\rightarrow h_{e\mu} = h_{\mu\mu} = 0 \quad \& \quad \frac{M_{ee}}{\lambda_e^2} \sim \frac{M_{\mu\tau}}{\lambda_\mu \lambda_\tau} \sim \frac{h_{e\tau} \langle \sigma_1 \rangle_0}{\lambda_e \lambda_\tau} \sim \frac{h_{\tau\tau} \langle \sigma_2 \rangle_0}{\lambda_\tau^2} \sim \frac{v_{\text{EW}}^2}{m_l}$$

$\lambda_\mu \simeq 1, h_{e\tau} \simeq 1, \langle \sigma_1 \rangle_0 \simeq 10 \text{ GeV}$ のとき

$$M_{\mu\tau} \sim 10^5 \text{ GeV} \left(\frac{M_{ee}}{5 \times 10^6 \text{ GeV}} \right)^{-1/2}$$

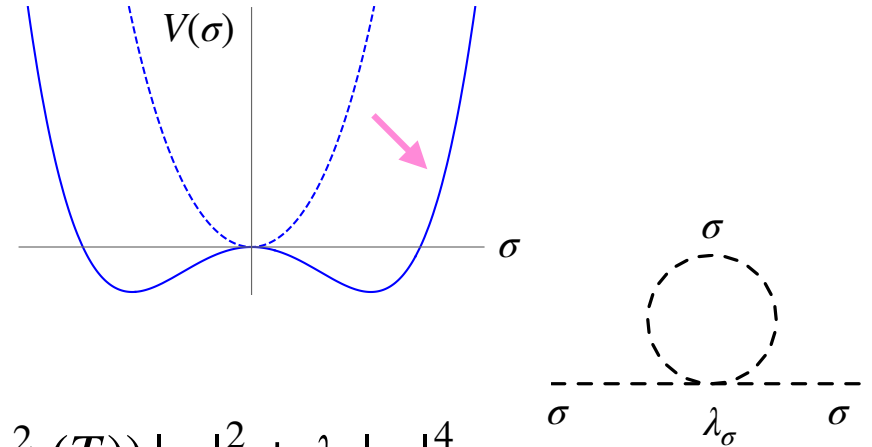
$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ の破れ -電弱対称性的な場合-

温度依存する質量補正によって高温で対称性が保たれている

スカラーポテンシャル;

$$V(\sigma, \Phi) = -\mu_\sigma^2 |\sigma|^2 - \mu_\Phi^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda_\sigma |\sigma|^4 + \lambda_\Phi (\Phi^\dagger \Phi)^2 + \lambda_{\Phi\sigma} |\sigma|^2 (\Phi^\dagger \Phi)$$

$$(\mu_\sigma, \mu_\Phi, \lambda_\sigma, \lambda_\Phi, \lambda_{\Phi\sigma}) > 0$$



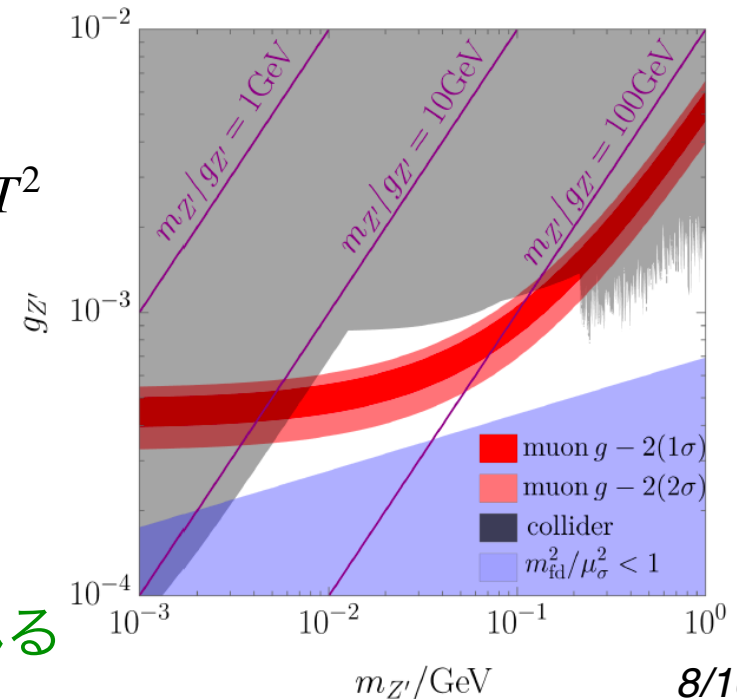
熱的・有限密度効果 $m_{\text{eff}}^2(T)$; $V(\sigma) = (-\mu_\sigma^2 + m_{\text{eff}}^2(T)) |\sigma|^2 + \lambda_\sigma |\sigma|^4$

$$\bullet T \leq T_{\text{th}} = 6 \times 10^4 \text{ GeV} (g_{Z'} / 10^{-3})^4$$

$$m_{\text{eff}}^2(T) = \left(\frac{\lambda_\sigma}{6} + \frac{\lambda_{\Phi\sigma}}{24} + \frac{g_{Z'}^2}{8} + \dots \right) T^2$$

$$\bullet T > T_{\text{th}}; m_{\text{fd}}^2(T) = \sum_X C_X n_X \langle p_{X,0}^{-1} \rangle$$

$$\text{e.g. } m_{\text{eff}}^2(T)|_{\lambda_\sigma} = m_{\text{fd}}^2(T)|_{\lambda_\sigma} \simeq c \frac{\lambda_\sigma g_{Z'}^4}{4\pi} M_P T$$



$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ は $T \lesssim \langle \sigma \rangle_0 = 10 - 100 \text{ GeV} < T_{\text{sph}}$ で破れる

$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ の破れ -初期宇宙で破れている場合-

$\lambda_{\Phi\sigma}$ が負で、その相互作用が σ を熱化する場合、高温で $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ は破れる
スカラーポテンシャル;

$$V(\sigma, \Phi) = -\mu_\sigma^2 |\sigma|^2 - \mu_\Phi^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda_\sigma |\sigma|^4 + \lambda_\Phi (\Phi^\dagger \Phi)^2 + \lambda_{\Phi\sigma} |\sigma|^2 (\Phi^\dagger \Phi)$$

$$(\mu_\sigma, \mu_\Phi, \lambda_\sigma, \lambda_\Phi) > 0 \quad \lambda_{\Phi\sigma} < 0$$

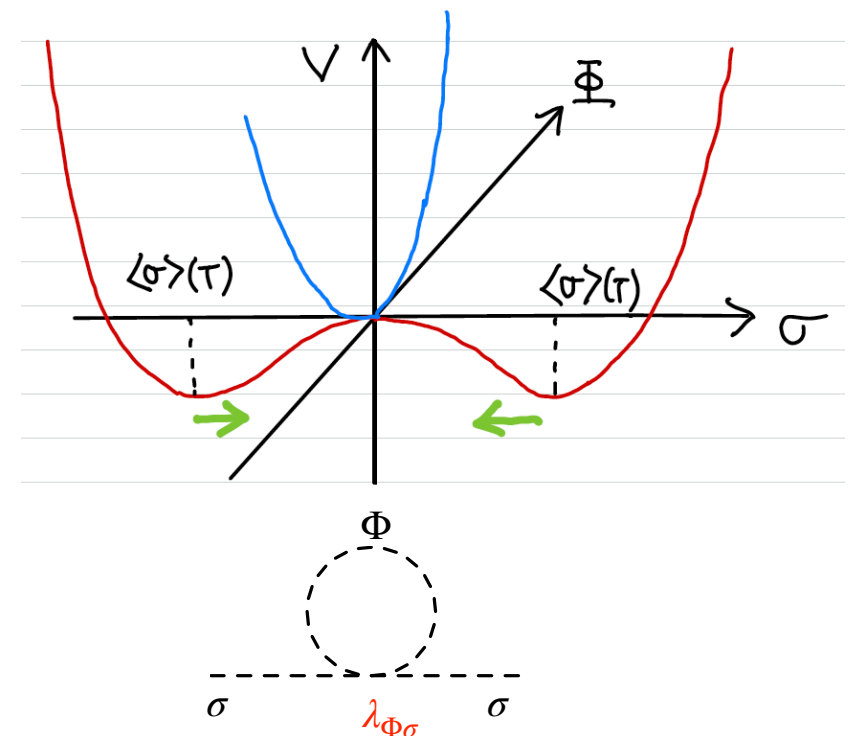
$$V(\sigma) = \underbrace{(-\mu_\sigma^2 + m_{\text{eff}}^2(T))}_{< 0} |\sigma|^2 + \lambda_\sigma |\sigma|^4$$

$$m_{\text{eff}}^2(T) = \left(\frac{\lambda_\sigma}{6} + \frac{\lambda_{\Phi\sigma}}{24} + \frac{g_{Z'}^2}{8} + \dots \right) T^2$$

$$T > T_{\text{EW}} \text{ で } \langle \sigma \rangle(T) \simeq \sqrt{|\lambda_{\Phi\sigma}| / \lambda_\sigma} T$$

$\langle \sigma \rangle_0 = 10 - 100 \text{ GeV}$ でありながら、高温で対称性の破れを実現

→ レプトジェネシスが議論できる



$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称の下でレプトジェネシスがダメな理由

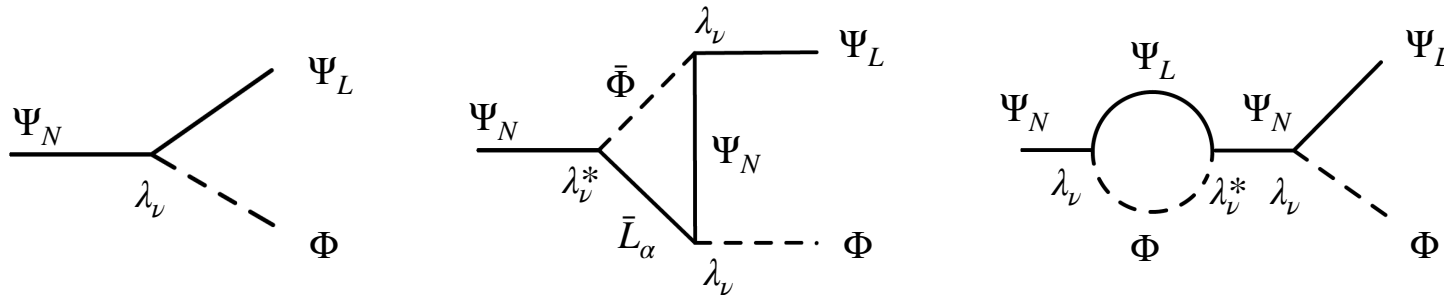
$U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 対称の下では、そのフレーバー電荷によって機能しない

崩壊を用いたレプトジェネシス；

$$\Psi_e \equiv \begin{pmatrix} \bar{N}_e \\ \bar{N}_e^\dagger \end{pmatrix} \quad \Psi_{\mu\tau} \equiv \begin{pmatrix} \bar{N}_\mu \\ \bar{N}_\tau^\dagger \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_e = \frac{1}{2} \bar{\Psi}_e i \not{\partial} \Psi_e - \frac{M_{ee}}{2} \bar{\Psi}_e \Psi_e - (\lambda_e \bar{\Psi}_e \tilde{\Phi} P_L \Psi_{L_e} + \text{h.c.})$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\mu\tau} = & \bar{\Psi}_{\mu\tau} i \not{\partial} \Psi_{\mu\tau} - M_{\mu\tau} \bar{\Psi}_{\mu\tau} \Psi_{\mu\tau} - \left(\lambda_\mu \bar{\Psi}_{\mu\tau}^c \tilde{\Phi} P_L \Psi_{L_\mu} + \lambda_\tau \bar{\Psi}_{\mu\tau} \tilde{\Phi} P_L \Psi_{L_\tau} + \text{h.c.} \right) \\ & - \left(h_{e\mu} \sigma_1 \bar{\Psi}_e P_L \Psi_{\mu\tau} + h_{e\tau} \sigma_1^* \bar{\Psi}_e P_L \Psi_{\mu\tau}^c + \frac{1}{2} h_{\mu\mu} \sigma_2 \bar{\Psi}_{\mu\tau}^c P_L \Psi_{\mu\tau} + \frac{1}{2} h_{\tau\tau} \sigma_2^* \bar{\Psi}_{\mu\tau} P_L \Psi_{\mu\tau}^c + \text{h.c.} \right) \end{aligned}$$



$$Y_L = \epsilon Y_N \quad ; \quad \text{非対称パラメータ}$$

$$(Y_X = n_X/s)$$

$$\epsilon \equiv \frac{\Gamma(N \rightarrow L\Phi) - \Gamma(N \rightarrow \bar{L}\bar{\Phi})}{\Gamma(N \rightarrow L\Phi) + \Gamma(N \rightarrow \bar{L}\bar{\Phi})}$$

$$\epsilon \propto \text{Im}[|\lambda_e|^4] \text{ or } \text{Im}[|\lambda_\mu|^2 |\lambda_\tau|^2] = 0$$

振動を通じたレプトジェネシス； N_e, N_μ, N_τ 間の振動は起きない

初期宇宙で $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ が破れている場合の困難

$\lambda_{\Phi\sigma} < 0$ の場合に得られた $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ が破れている真空中で、右巻きニュートリノの質量と結合定数は温度依存性を持つ； $\langle\sigma\rangle(T) \simeq \sqrt{|\lambda_{\Phi\sigma}|/\lambda_\sigma} T$

$$M_{R,\text{eff}} = \begin{pmatrix} M_{ee} & h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle(T) & h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle(T) \\ h_{e\mu}\langle\sigma_1\rangle(T) & h_{\mu\mu}\langle\sigma_2\rangle(T) & M_{\mu\tau} \\ h_{e\tau}\langle\sigma_1\rangle(T) & M_{\mu\tau} & h_{\tau\tau}\langle\sigma_2\rangle(T) \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{cases} M'_{R,\text{eff}}(T) = \Omega(T) M_{R,\text{eff}}(T) \Omega^T(T) = \text{diag}(M_1(T), M_2(T), M_3(T)) \\ [\lambda'_\nu]_{\alpha I}(T) = \lambda_\nu \Omega^*(T) \\ [h']_{IJ}(T) = \Omega(T) h_{\alpha\beta} \Omega^*(T) \end{cases}$$

成功するシナリオを見つけるために、非熱的レプトジェネシスを考える

- $T = T_R$ でのパラメータを用いて議論できる
- $M_{ee} \simeq M_{\mu\tau} \simeq 10^6 \text{ GeV}$ の右巻きニュートリノが排他されない

非熱的レプトジェネシス

インフラトンの崩壊によって作られた $M_N \gg T_R$ 右巻きニュートリノの崩壊によって引き起こすレプトジェネシス [Kumekawa, Moroi, Yanagida ('94)]

[Asaka, Hamaguchi, Kawasaki, Yanagida ('99)]

右巻きニュートリノの生成量 ; $n_I \simeq n_{\text{inf}} f_I$ f_I : インフラトン一個からできる右巻きニュートリノの数

$$\frac{n_I}{s} \simeq \left(\frac{\rho_R}{s} \times \frac{n_{\text{inf}}}{\rho_{\text{inf}}} \right) \Big|_{T=T_R} \times f_I \simeq \frac{T_R}{m_{\text{inf}}} \times f_I \quad (I=1,2,3)$$

T_R の定義 : $\rho_R = \rho_{\text{inf}}$

生成されるレプトン数非対称 ; (観測から要請 : $n_L/s \simeq -2.5 \times 10^{-10}$)

$$\frac{n_L}{s} = \sum_I \tilde{\epsilon}_I \times \frac{n_I}{s} = \frac{T_R}{m_{\text{inf}}} \sum_I \tilde{\epsilon}_I f_I \quad \tilde{\epsilon}_I \equiv \epsilon_I \times \text{Br}(\Psi'_I \rightarrow L^{(c)} + \tilde{\Phi}^{(\dagger)})$$
$$\epsilon_I = \frac{\sum_\alpha [\Gamma(\Psi'_I \rightarrow L_\alpha + \tilde{\Phi}) - \Gamma(\Psi'_I \rightarrow L_\alpha^c + \tilde{\Phi}^\dagger)]}{\sum_\alpha [\Gamma(\Psi'_I \rightarrow L_\alpha + \tilde{\Phi}) + \Gamma(\Psi'_I \rightarrow L_\alpha^c + \tilde{\Phi}^\dagger)]}$$

普通の場合との違い ;

- $M_N \gg T_R$ によって Wash-out が抑制される
- 全ての右巻きニュートリノが寄与する

ベンチマークポイント

以下のセットアップで数値的に評価

低エネルギーの物理；

$$\text{ミューオン } g-2 \quad \rightarrow \quad \langle \sigma_1 \rangle_0 = 80 \text{ GeV} , \quad \langle \sigma_2 \rangle_0 = 50 \text{ GeV}$$

$$\text{ニュートリノ振動 (シーソー)} \quad \rightarrow \quad |M_{ee}| = 5 \times 10^6 \text{ GeV} , \quad \lambda_\mu = 1 , \quad |h_{e\tau}| = 1$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} |M_{\mu\tau}| \simeq 10^7 \text{ GeV} \\ \lambda_e, \lambda_\tau \ll \lambda_\mu \\ h_{e\mu} \approx 0, h_{\mu\mu} \approx 0 \quad \quad h_{\tau\tau} \ll h_{e\tau} \sim \mathcal{O}(1) \end{array} \right.$$

高温の物理；

$$T_R \simeq 3 \times 10^4 \text{ GeV} \quad \rightarrow \quad \langle \sigma_{1,2} \rangle_{T_R} = 10^5 \text{ GeV}$$

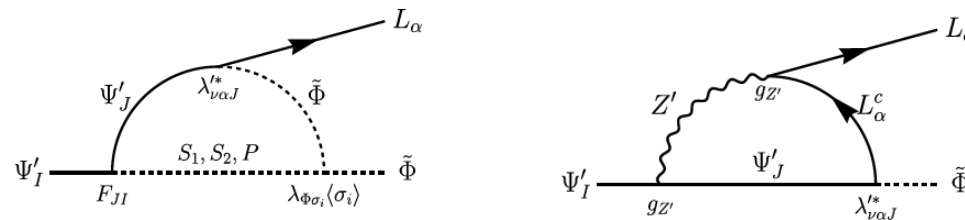
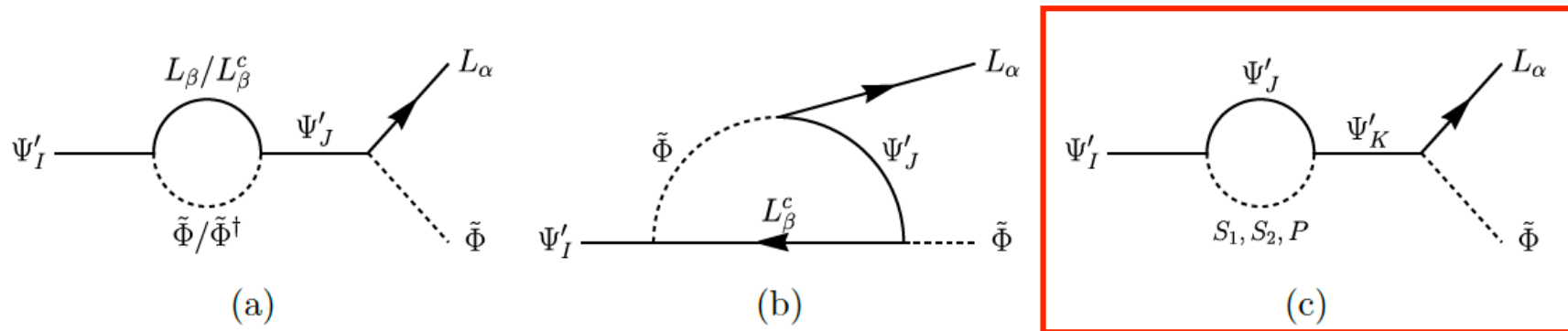
$$(\lambda_{\sigma_1} = \lambda_{\sigma_2} = 3 \times 10^{-4} , \quad \lambda_{\Phi\sigma_1} = \lambda_{\Phi\sigma_2} = -3 \times 10^{-3})$$

$$\rightarrow \quad M_1 \simeq 5.0 \times 10^6 \text{ GeV} , \quad M_2 \simeq M_3 \simeq 1.4 \times 10^7 \text{ GeV}$$

$$(M_3 - M_2 \simeq 1.2 \times 10^3 \text{ GeV})$$

結果：非対称パラメータ

この模型特有のダイアグラムを考えなければならない



		Diagrams			Total ϵ
		(a)	(b)	(c)	
Normal Ordering	ϵ_1	7×10^{-8}	3×10^{-8}	0	1×10^{-7}
	ϵ_2	5×10^{-7}	-4×10^{-7}	-6×10^{-6}	-6×10^{-6}
	ϵ_3	-5×10^{-7}	4×10^{-7}	-6×10^{-6}	-6×10^{-6}
Inverted Ordering	ϵ_1	-5×10^{-8}	-2×10^{-8}	0	-6×10^{-8}
	ϵ_2	-8×10^{-8}	7×10^{-8}	4×10^{-6}	4×10^{-6}
	ϵ_3	6×10^{-8}	-7×10^{-8}	4×10^{-6}	4×10^{-6}

結果：生成されるレプトン数非対称

宇宙バリオン数非対称を説明できる！

$$n_B/s \simeq 8.7 \times 10^{-11} \quad \rightarrow \quad n_L/s \simeq -2.5 \times 10^{-10}$$

N_1 の崩壊； $f_1 = 2$ and $f_2 = f_3 = 0$

$$\frac{n_L}{s} \simeq \frac{2T_R}{m_{\text{inf}}} \epsilon_1 \xrightarrow{m_{\text{inf}} > 2M_1} \frac{n_L}{s} \lesssim \frac{T_R}{M_1} \epsilon_1 \simeq \begin{cases} 6 \times 10^{-10} & \text{(Normal Ordering)} \\ -4 \times 10^{-10} & \text{(Inverted Ordering)} \end{cases}$$

$N_{2,3}$ の崩壊； $f_2 = f_3 = 1$

$$\frac{n_L}{s} \lesssim \frac{T_R}{2M_3} \sum_I \tilde{\epsilon}_I f_I \simeq \begin{cases} -1 \times 10^{-8} & \text{(Normal Ordering)} \\ 7 \times 10^{-9} & \text{(Inverted Ordering)} \end{cases}$$

まとめ

ゲージ化された $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 拡張において、非熱的レプトジェネシスを考察した。結果として、この模型が、ミューオンg-2、ニュートリノ振動、宇宙バリオン数非対称を同時説明できることを示した。

このシナリオの検証について

1. NA64実験によって Z' のパラメータ領域が探索される

2. CMB観測精度の向上；ニュートリノ質量和

$$m_{\text{lightest}} = 0.06 \text{ eV} \longrightarrow \Sigma m_i = 0.2 \text{ eV} \iff \Sigma m_i < 0.24 \text{ eV}$$

[Planck Collaboration ('18)]

3. ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊；有効質量 $m_{\beta\beta}$

$$m_{\beta\beta} \approx 61 \text{ meV} \iff m_{\beta\beta} < 36 - 156 \text{ meV} \quad [\text{KamLAND-Zen Collaboration ('22)}]$$

Backup

質量パラメータ $M_{ee}, M_{\mu\tau}$ とニュートリノ振動(逆階層)

特別な振動パラメータの場合、 $M_{ee}, M_{\mu\tau}$ への制限は緩和

ニュートリノ質量が縮退; 右辺にゼロ成分

$$\begin{aligned}
 m_1 &= \sqrt{m_l^2 + \Delta m_{\text{atm}}^2 - \Delta m_{\text{sol}}^2} \\
 m_2 &= \sqrt{m_l^2 + \Delta m_{\text{atm}}^2}, \\
 m_3 &= m_l.
 \end{aligned}
 \quad
 v_{\text{EW}}^2 \times U[M_\nu^d]^{-1} U^T \simeq \frac{v_{\text{EW}}^2}{m_l} \times \begin{pmatrix} 0.78 e^{-0.03i} & 0.05 e^{-1.7i} & 0 \\ 0.05 e^{-1.7i} & 0.23 e^{3.1i} & 0.88 e^{3.1i} \\ 0 & 0.88 e^{3.1i} & 0 \end{pmatrix}$$

$$m_l = 0.06 \text{ eV},$$

↑

$$(\sum m_i < 0.26 \text{ eV})$$

$$\Delta m_{\text{sol}}^2 = 7.42 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \Delta m_{\text{atm}}^2 = 2.490 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.304, \quad \sin^2 \theta_{13} = 0.02241.$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.566, \quad \delta \simeq 270^\circ, \quad \eta_1 \simeq 355^\circ, \quad \eta_2 \simeq 177^\circ$$

観測の1σ内

CP位相決定

$$\begin{aligned}
 \rightarrow \quad h_{e\tau} = h_{\tau\tau} = 0 \quad &\& \quad M_{\mu\tau} \sim \lambda_\mu h_{e\mu} \langle \sigma_1 \rangle_0 \sqrt{\frac{M_s}{M_{ee}}} \\
 & & & \frac{v_{\text{EW}}^2}{m_l} \equiv M_s \simeq 5 \times 10^{14} \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

$\lambda_\tau \simeq 1, h_{e\mu} \simeq 1, \langle \sigma_1 \rangle_0 \simeq 10 \text{ GeV}$ のとき順階層と同様

ニュートリノ振動パラメータの観測値

NuFIT 5.1 (2021)

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 2.6$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
without SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.86	$33.45^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 → 35.87
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.573^{+0.018}_{-0.023}$	0.405 → 0.620	$0.578^{+0.017}_{-0.021}$	0.410 → 0.623
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.2^{+1.0}_{-1.3}$	39.5 → 52.0	$49.5^{+1.0}_{-1.2}$	39.8 → 52.1
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02220^{+0.00068}_{-0.00062}$	0.02034 → 0.02430	$0.02238^{+0.00064}_{-0.00062}$	0.02053 → 0.02434
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	8.20 → 8.97	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 → 8.98
	$\delta_{CP}/^\circ$	194^{+52}_{-25}	105 → 405	287^{+27}_{-32}	192 → 361
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.515^{+0.028}_{-0.028}$	+2.431 → +2.599	$-2.498^{+0.028}_{-0.029}$	-2.584 → -2.413	
with SK atmospheric data		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 7.0$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 → 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 → 0.343
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.45^{+0.77}_{-0.75}$	31.27 → 35.87	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 → 35.87
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.450^{+0.019}_{-0.016}$	0.408 → 0.603	$0.570^{+0.016}_{-0.022}$	0.410 → 0.613
	$\theta_{23}/^\circ$	$42.1^{+1.1}_{-0.9}$	39.7 → 50.9	$49.0^{+0.9}_{-1.3}$	39.8 → 51.6
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02246^{+0.00062}_{-0.00062}$	0.02060 → 0.02435	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$	0.02055 → 0.02457
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.62^{+0.12}_{-0.12}$	8.25 → 8.98	$8.61^{+0.14}_{-0.12}$	8.24 → 9.02
	$\delta_{CP}/^\circ$	230^{+36}_{-25}	144 → 350	278^{+22}_{-30}	194 → 345
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 → 8.04	
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.510^{+0.027}_{-0.027}$	+2.430 → +2.593	$-2.490^{+0.026}_{-0.028}$	-2.574 → -2.410	

[Esteban, Gonzalez-Garcia, Maltoni, Schwetz, Zhou ('20); NuFIT 5.1 (2021), www.nu-fit.org]

$\lambda_{\Phi\sigma}$ への制限

1. Unbounded from below constraint $|\lambda_{\Phi\sigma}| < 2\sqrt{\lambda_{\Phi}\lambda_{\sigma}}$

2. 実験的な制限 $\text{Br}(H \rightarrow \text{invisible}) < 0.11$

$$(|\lambda_{\Phi\sigma_1}|^2 + |\lambda_{\Phi\sigma_2}|^2)^{1/2} < 7 \times 10^{-3}$$

Wash-out 効果

Inverse decay

$$M_I/T_R (\equiv z_I)$$

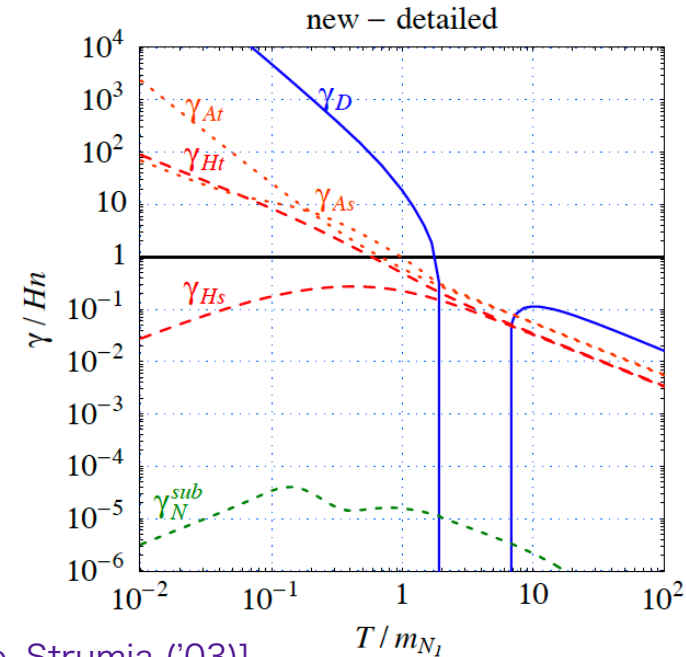
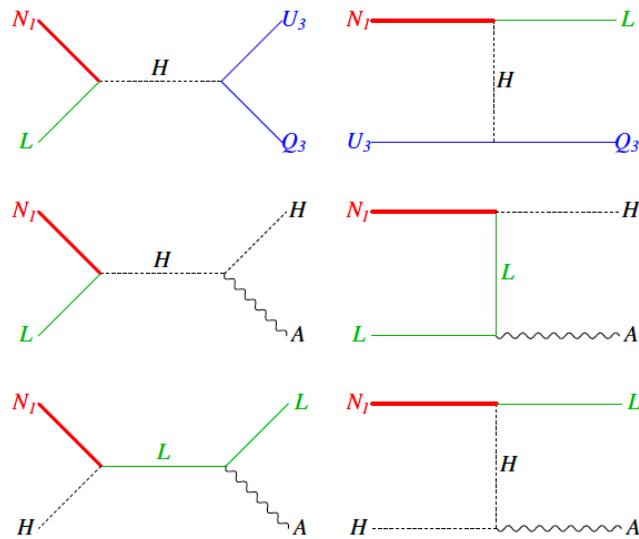
$$\frac{\Gamma_{\text{ID},I}(z_I)}{H(T_R)} = 8 \times 10^9 \sum_{\alpha} |\lambda'_{\alpha I}|^2 \left(\frac{5 \times 10^6 \text{ GeV}}{M_I} \right) z_I^{7/2} e^{-z_I}$$

$$\Gamma_{\text{ID},I}(z_I)/H(T_R) < 1 \quad T_R < 1.4 \times 10^5 \text{ GeV}$$

$$M_1 \simeq 5 \times 10^6 \text{ GeV} \text{ and } M_{2,3} \simeq 1.4 \times 10^7 \text{ GeV}$$

Wash-out 効果

$\Delta L = 1$ scattering



[Giudice, Notari, Raidal, Riotto, Strumia ('03)]

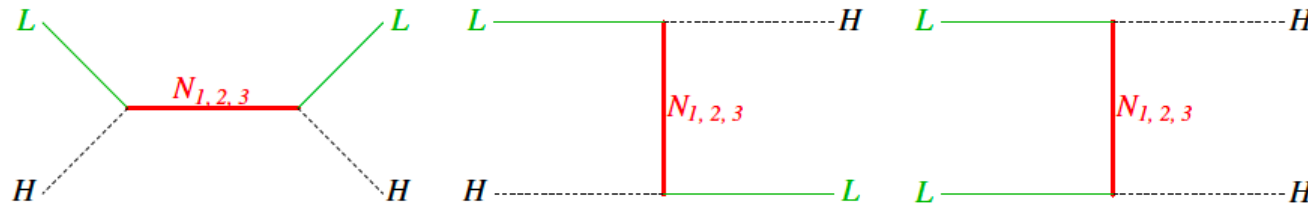
$$\dot{Y}_L \simeq \sum_I (\tilde{\epsilon}_I \Gamma_{D,I} - \Gamma_{\Delta L=1,I} Y_L) Y_I$$

$$\dot{Y}_L \simeq \left(\tilde{\epsilon}_I \Gamma_{D,I} - \Gamma_{\Delta L=1,I} \tilde{\epsilon}_I f_I \frac{T_R}{m_{\text{inf}}} \right) Y_I$$

$$= \left(\Gamma_{D,I} - \Gamma_{\Delta L=1,I} f_I \frac{T_R}{m_{\text{inf}}} \right) \tilde{\epsilon}_I Y_I .$$

Wash-out 効果

$\Delta L = 2$ scattering



[Giudice, Notari, Raidal, Riotto, Strumia ('03)]