

Scotogenic模型における Flavored leptogenesis

関川優梨花 (横浜国立大学)

共同研究者

佐藤丈 (横浜国立大学)、浅井健人(東京大学, ICRR)

山中真人(法政大学)

work in progress

目次

- 標準模型を超えた問題：バリオン数非対称
- Scotogenic模型について
- フレーバー効果
- バリオン数(B-L数)の時間発展の計算結果

標準模型を超えた問題：バリオン数非対称

◆ 標準模型では説明のつかない事柄

例. ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン数非対称、など

標準模型を超えた問題：バリオン数非対称

◆ 標準模型では説明のつかない事柄

例. ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン数非対称、など



矛盾!!

粒子・反粒子が対生成で誕生 @初期宇宙

銀河等の天体は全て粒子からなる @現在の宇宙

…粒子数が反粒子数より多くなった理由は？

標準模型を超えた問題：バリオン数非対称

◆ 標準模型では説明のつかない事柄

例. ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン数非対称、など



矛盾!!

粒子・反粒子が対生成で誕生 @初期宇宙

銀河等の天体は全て粒子からなる @現在の宇宙

…粒子数が反粒子数より多くなった理由は？

◆ バリオン…クォーク3つからなる粒子の総称（陽子、中性子など）

バリオン数 … バリオンと反バリオンの粒子数密度の差

バリオン数の観測値
$$Y_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} \simeq 8 \times 10^{-11}$$

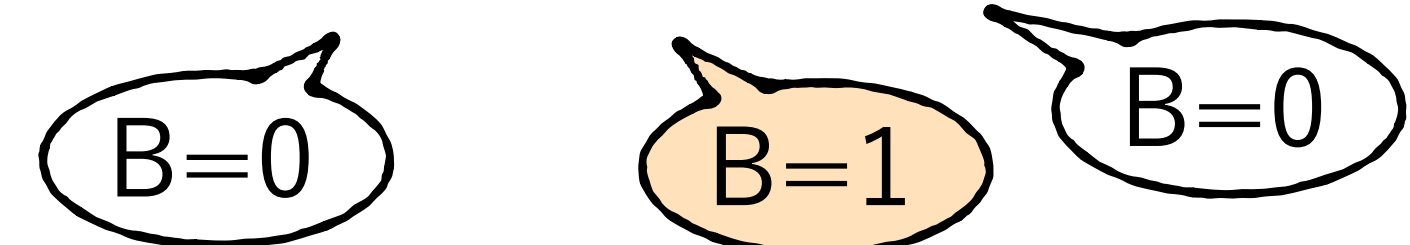
s : 共動体積あたりのエントロピー密度

バリオン数非対称の問題

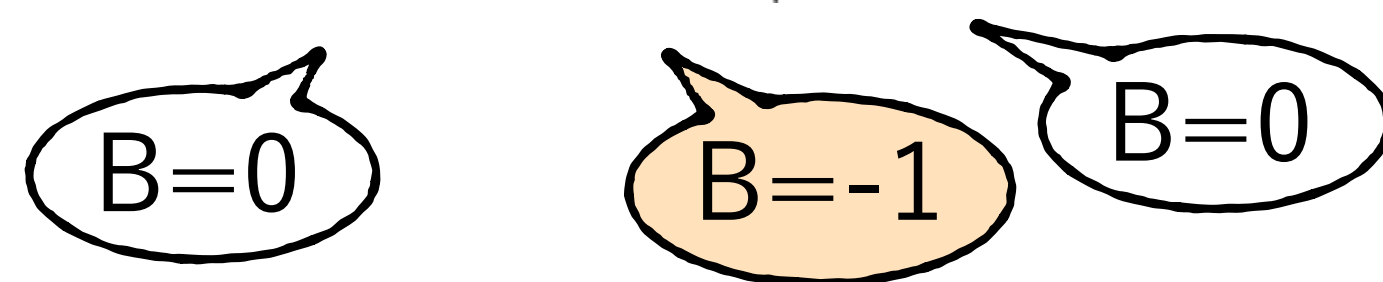
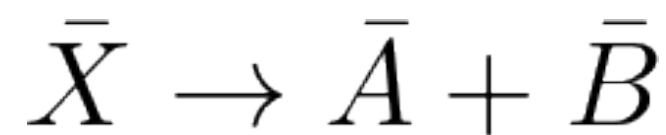
バリオン数を作るには (サハロフの3条件)

- (1) バリオン数を破る反応の存在
- (2) C 及び CP対称性の破れ
- (3) 熱平衡状態からの逸脱

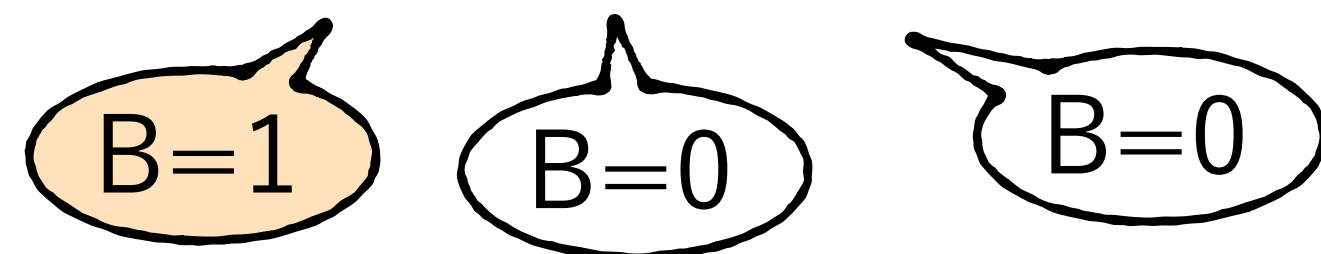
(1) は自明。 $X \rightarrow A + B$



(2)が無いと、(1)をCまたはCP変換した反応が起こり、バリオン数が作られない。



(3)が無いと、(1)の逆反応が同頻度で起こり、バリオン数が作られない。

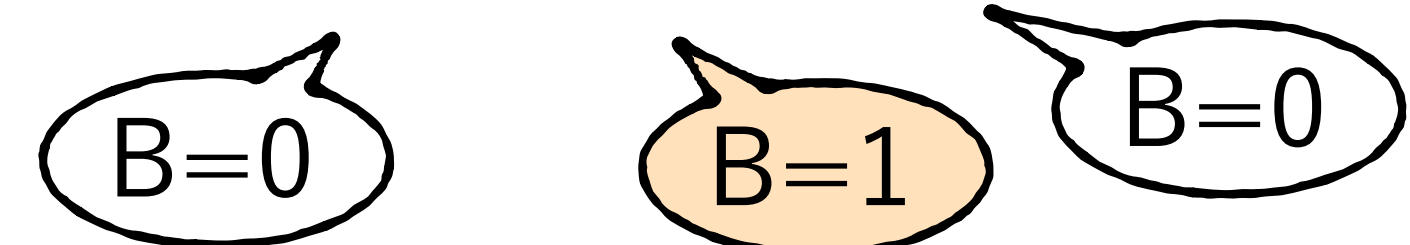


バリオン数非対称の問題

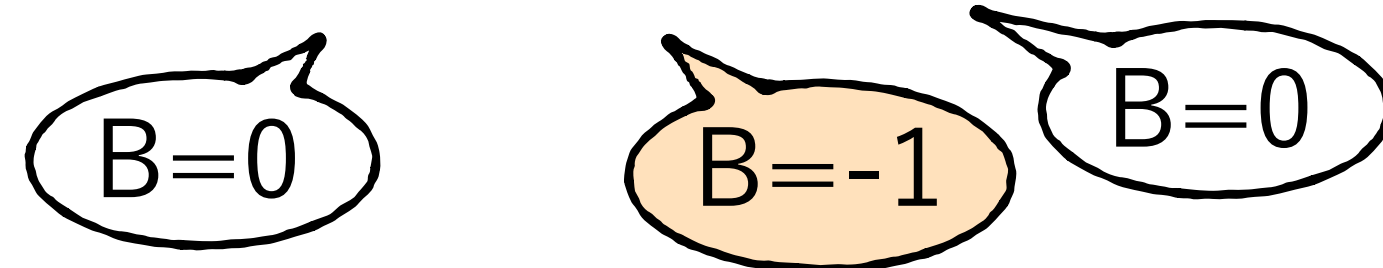
バリオン数を作るには (サハロフの3条件)

- (1) バリオン数を破る反応の存在
- (2) C 及び CP対称性の破れ
- (3) 熱平衡状態からの逸脱

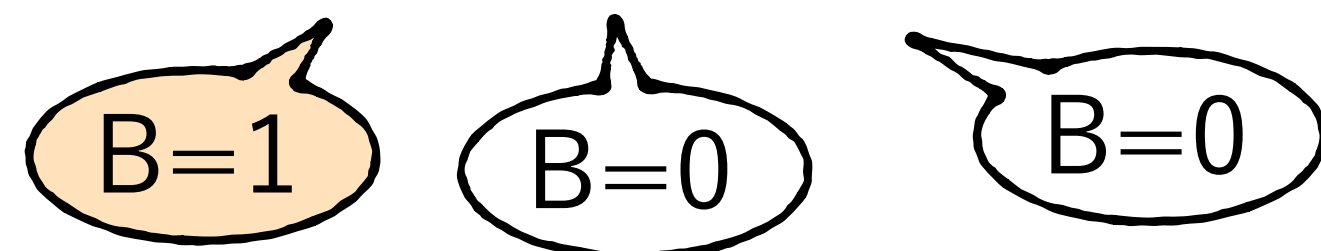
(1) は自明。 $X \rightarrow A + B$



(2)が無いと、(1)をCまたはCP変換した反応が起こり、バリオン数が作られない。



(3)が無いと、(1)の逆反応が同頻度で起こり、バリオン数が作られない。



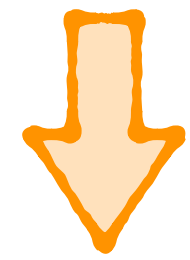
これらを満たして
バリオン数を作る
模型の例



Scotogenic模型

Scotogenic模型

標準模型の未解決問題



解決策の一つ

- ニュートリノ質量の起源
- 暗黒物質の存在
- バリオン数非対称

Scotogenic模型

標準模型の未解決問題



- ニュートリノ質量の起源
- 暗黒物質の存在
- バリオン数非対称

Scotogenic模型

SMの最小限の拡張で、DMセクターから
輻射シーソーでニュートリノ質量を説明

標準模型 (Z₂ even)

+

右巻きニュートリノ (Z₂ odd) : N_i

SU(2)_L 二重項スカラー (Z₂ odd) : $\eta = \begin{pmatrix} \eta^+ \\ \eta^0 \end{pmatrix}$

$$\mathcal{L} \supset (h_{\alpha i} \bar{L}_{\alpha} \tilde{\eta} N_i + \text{h.c.}) - \frac{1}{2} M_i N_i N_i - V$$

$$V = m_{\eta}^2 \eta^{\dagger} \eta + \frac{1}{2} \lambda_2 (\eta^{\dagger} \eta)^2 + \lambda_3 (\Phi^{\dagger} \Phi) (\eta^{\dagger} \eta) \\ + \lambda_4 (\Phi^{\dagger} \eta) (\eta^{\dagger} \Phi) + \frac{1}{2} \lambda_5 \left[(\Phi^{\dagger} \eta)^2 + \text{h.c.} \right]$$

E. Ma, Phys.Rev.D 73 (2006) 077301

Scotogenic模型

標準模型の未解決問題

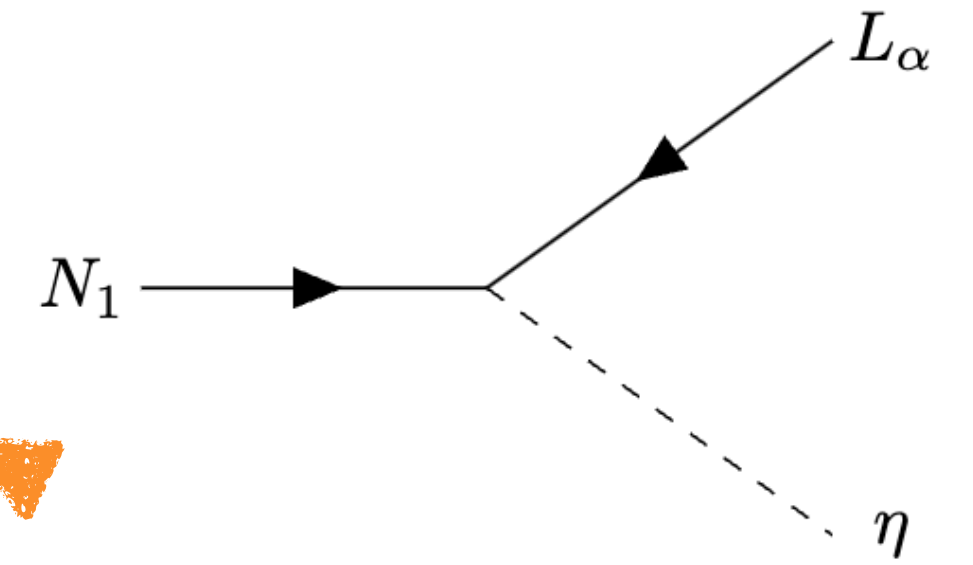


解決策の一つ

- ニュートリノ質量の起源
- 暗黒物質の存在
- バリオン数非対称

Scotogenic模型

SMの最小限の拡張で、DMセクターから
輻射シーソーでニュートリノ質量を説明



標準模型 (Z₂ even)

+

右巻きニュートリノ (Z₂ odd) : N_i

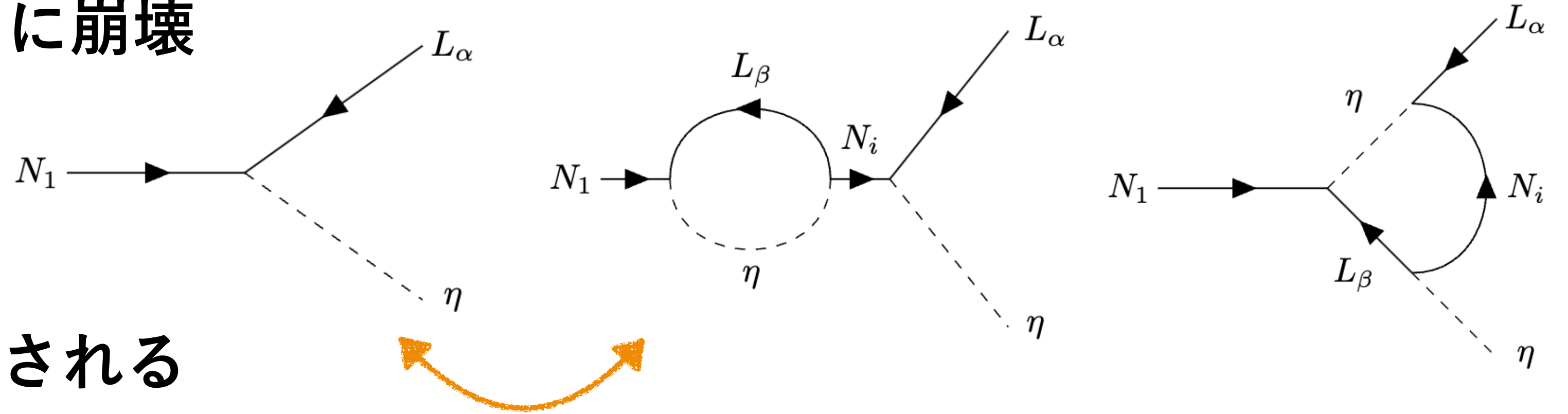
SU(2)_L 二重項スカラー (Z₂ odd) : $\eta = \begin{pmatrix} \eta^+ \\ \eta^0 \end{pmatrix}$

$$\mathcal{L} \supset (h_{\alpha i} \bar{L}_\alpha \tilde{\eta} N_i + \text{h.c.}) - \frac{1}{2} M_i N_i N_i - V$$
$$V = m_\eta^2 \eta^\dagger \eta + \frac{1}{2} \lambda_2 (\eta^\dagger \eta)^2 + \lambda_3 (\Phi^\dagger \Phi) (\eta^\dagger \eta)$$
$$+ \lambda_4 (\Phi^\dagger \eta) (\eta^\dagger \Phi) + \frac{1}{2} \lambda_5 \left[(\Phi^\dagger \eta)^2 + \text{h.c.} \right]$$

E. Ma, Phys.Rev.D 73 (2006) 077301

Scotogenicモデルでのバリオン数生成

右巻きニュートリノがレプトンに崩壊



➡ レプトン数非対称が生成される

CPの破れの大きさ

$$\epsilon_i^\alpha = \frac{\Gamma(N_1 \rightarrow L_\alpha \eta) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{L}_\alpha \eta^\dagger)}{\Gamma(N_1 \rightarrow L_\alpha \eta) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{L}_\alpha \eta^\dagger)}$$

treeと1-loopの干渉項から
CP非対称の部分が現れる

➡ レプトン数非対称を スファレロン過程で バリオン数非対称に転換

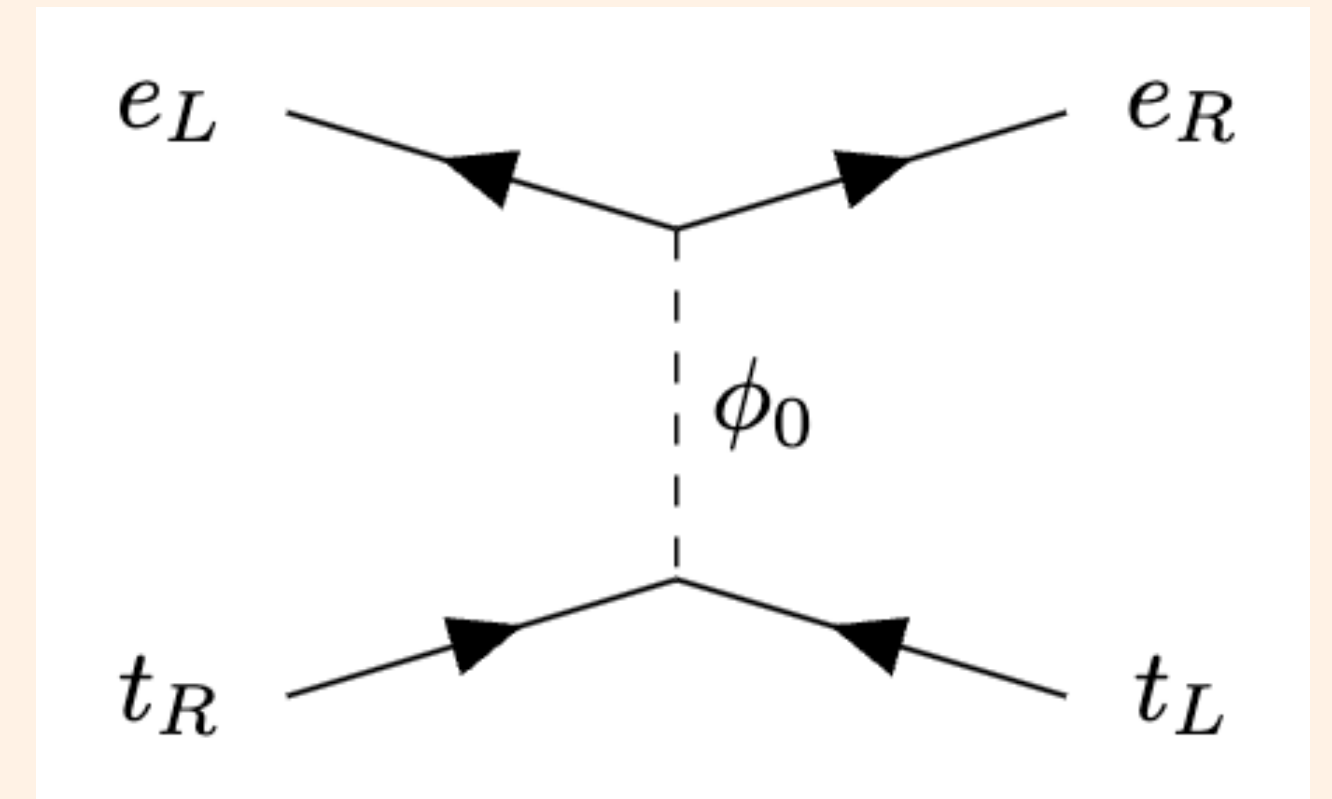
$$B \simeq \frac{28}{79}(B - L)$$

Flavor効果

- ◆ 通常のレプトジェネシス (Flavor効果なし)
 - 全てのレプトンの湯川相互作用が熱平衡であると仮定
- ◆ $T \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$ のとき、Flavor効果を考慮することで最終的なB-L数が桁で変わりうる
E. Nardi et al. JHEP 0601:164 (2006)

- バリオンに転換されるのは左巻きのレプトンのみ
- Higgsとの湯川相互作用があると左巻きの荷電レプトンが右巻きに転換 → バリオン数生成を阻害
- 湯川相互作用の大きさはフレーバーに依存

⇒ フレーバーを区別して、生成されるバリオン数を評価する必要がある



Flavorを区別すべき具体例

$$H = \frac{\dot{R}}{R} = 1.66g_*^{1/2} \frac{T^2}{m_{pl}}$$

反応率とハッブルパラメータとの比 $\Gamma/H(T)$ という指標

R: 宇宙のスケール因子

$\Gamma/H(T) < 1$ \rightarrow 宇宙膨張の効果が反応率よりも大きく、反応は起きない

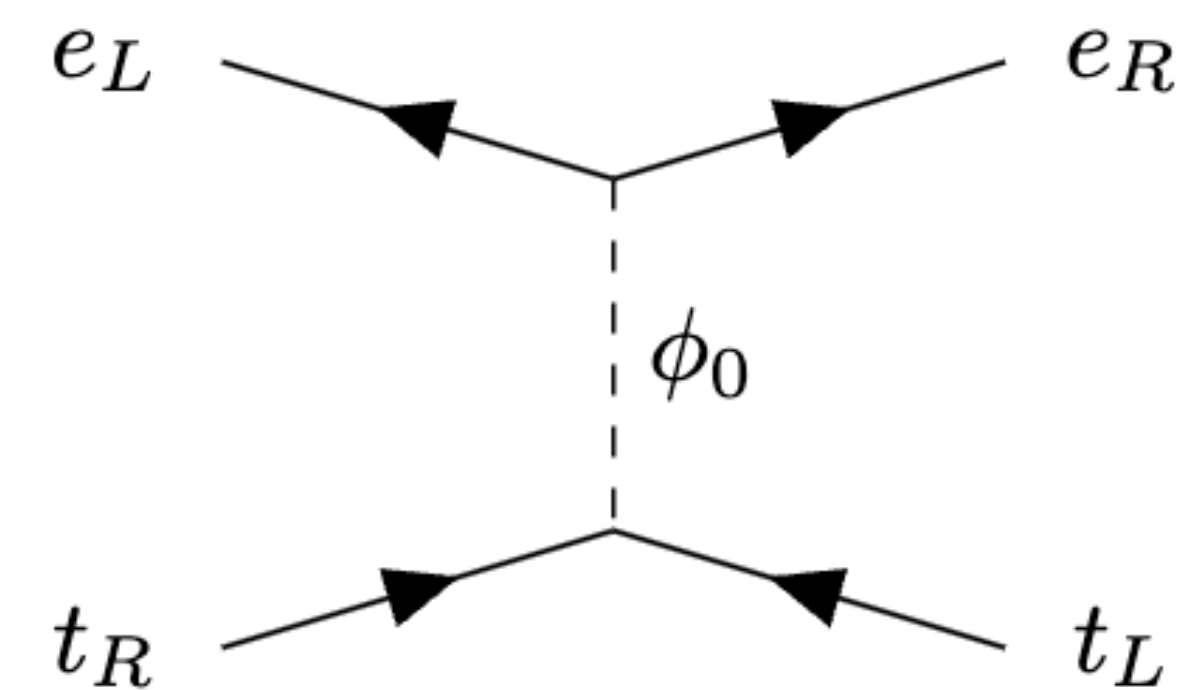
$\Gamma/H(T) > 1$ \rightarrow 宇宙膨張の効果より反応率が大きく、反応が起こる

宇宙が温度Tのとき、ある反応が起こるかどうかの指標となる

例. 宇宙の温度が $10^6 \text{ GeV} \lesssim T \lesssim 10^9 \text{ GeV}$ のとき、

$$\Gamma_e/H < 1, \quad \Gamma_\mu/H > 1, \quad \Gamma_\tau/H > 1$$

τ と μ の湯川相互作用のみが熱平衡状態にある



B-Lの時間発展

以下のパラメータを用いてボルツマン方程式を解き、B-L数の時間発展を追跡

粒子数の時間発展方程式 (L数、B数ではなくB-L数を追います)

右巻きニュートリノとの湯川結合定数

$$h_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 3.12 \times 10^{-4} - 6.65 \times 10^{-7}i & 0.385e + 2.11 \times 10^{-7}i & -0.287 + 8.76i \times 10^{-2} \\ 3.21 \times 10^{-4} + 1.20 \times 10^{-5}i & 0.426 + 1.28 \times 10^{-2}i & 1.51 + 4.43 \times 10^{-7}i \\ -3.02 \times 10^{-4} + 1.10 \times 10^{-5}i & -0.408 + 1.11 \times 10^{-2}i & 1.31 - 4.24 \times 10^{-7}i \end{pmatrix}$$

α : レプトンフレーバーの足
 i : 右巻き ν の世代の足

N_1 の質量 $M_1 = 10^7 \text{ GeV}$
 η の質量 $m_\eta = 10^4 \text{ GeV}$
 ν_L の質量 $m_1 = 10^{-20} \text{ GeV}$

$$\lambda_5 = 10^{-7}$$

$$M_2/M_1 = M_3/M_2 = 1.5$$

左巻きニュートリノのパラメータ (NuFIT5.3)

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.307$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.572$$

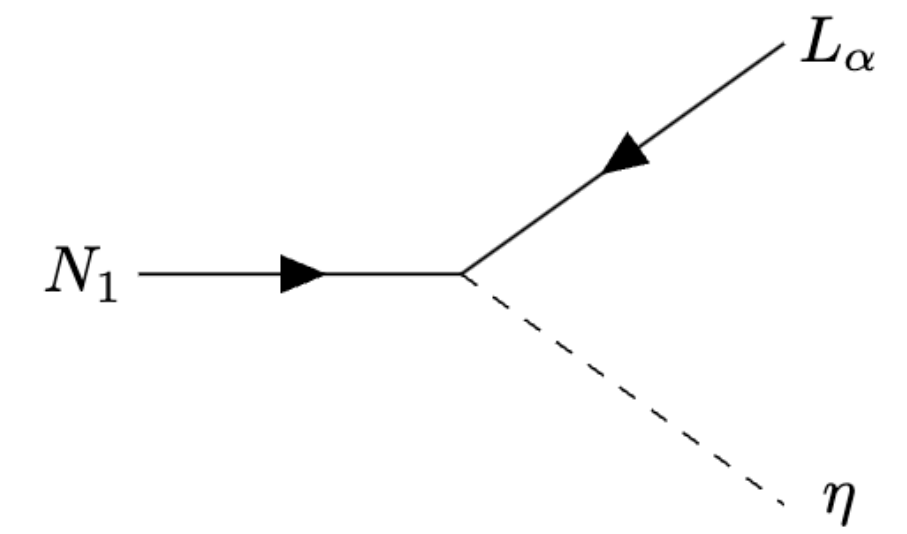
$$\sin^2 \theta_{13} = 0.02203$$

$$\delta_{CP} = 197^\circ$$

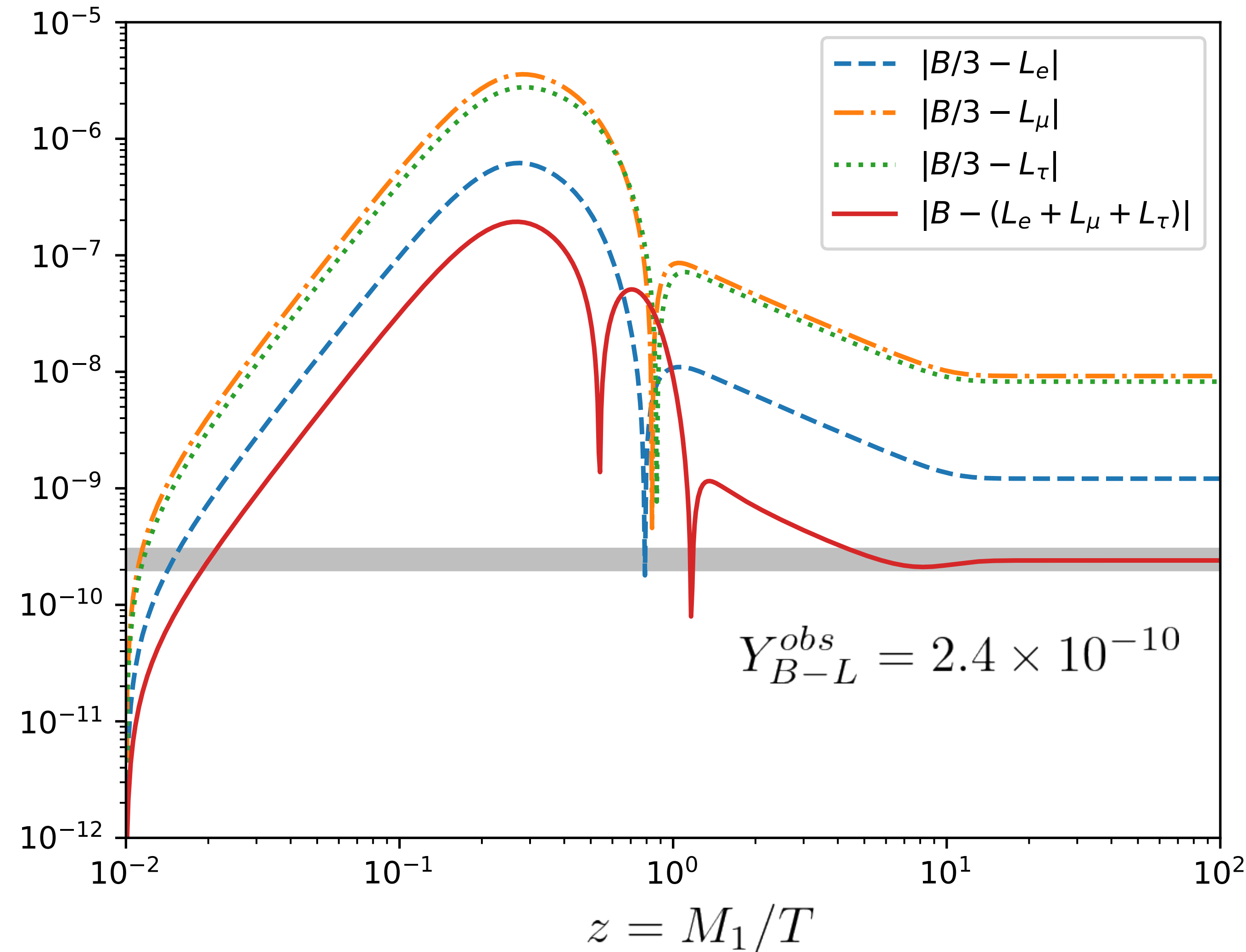
$$\Delta m_{21}^2 = 7.41 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{3\ell}^2 = 2.511 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \text{マヨラナ位相は0とした}$$

B-L数の時間発展



$B/3 - L_\alpha$ 及び $B - L$ 数の絶対値



- ◆ はじめに、 $L_\alpha + \eta \rightarrow N_i$ の反応によって右巻きニュートリノが作られ、同時に負のレプトン数が生じる。
- ◆ その後、 N_i の崩壊反応が大きくなり先ほどのレプトン数は洗い流されて正のレプトン数が残る。
- ◆ $B/3 - L_\tau, B/3 - L_e$ と、 $B/3 - L_\mu$ は逆符号
- ◆ 観測値 $Y_{B-L}^{obs} = 2.4 \times 10^{-10}$ を再現することができた

まとめ

- ◆ バリオンの残存量を計算する際は、flavor効果を入れることで残存量をより正確に評価することができる。
- ◆ Scotogenicモデルでのレプトジェネシスにおいて、 $\Gamma/H(T)$ がフレーバーに依存することを考慮して計算を行った。その結果、観測値 $Y_{B-L}^{obs} = 2.4 \times 10^{-10}$ を再現するパラメータ ($M_1, m_1, m_\eta, \lambda_5, h_{\alpha i}$) が存在することを確認した

今後の展望

- ◆ N_1 の崩壊時に、崩壊先のフレーバーに大きく偏りが生じる場合での、B-L数への影響を調査する
- ◆ M_1 、 λ_5 の値を変えて、第2、第3世代の右巻きニュートリノによるレプトン数生成の可能性を検討する

バックアップ

バリオン数のざっくり評価 (1)

ざっくりとした評価 $\eta_B = -0.01\epsilon_1\kappa_1$

Asymmetry parameter

$$\epsilon_i^\alpha = \frac{[\Gamma(N_1 \rightarrow L_\alpha \eta) - \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{L}_\alpha \eta^\dagger)]}{[\Gamma(N_1 \rightarrow L_\alpha \eta) + \Gamma(N_1 \rightarrow \bar{L}_\alpha \eta^\dagger)]} = \frac{1}{8\pi} \frac{1}{(h^\dagger h)_{ij}} \sum_{j \neq i} \left(\text{Im}[h_{\alpha j} h_{\alpha i}^* (h^\dagger h)_{ij}] \frac{F(r_{ji}, \eta_i)}{\sqrt{r_{ji}}} \right)$$

$$F(r_{ji}, \eta_i) = \sqrt{r_{ji}} \left[f(r_{ji}, \eta_i) - \frac{\sqrt{r_{ji}}}{r_{ji} - 1} (1 - \eta_i)^2 \right]$$

$$f(r_{ji}, \eta_i) = \sqrt{r_{ji}} \left[1 + \frac{(1 - 2\eta_i + r_{ji})}{(1 - \eta_i)^2} \ln \left(\frac{r_{ji} - \eta_i^2}{1 - 2\eta_i + r_{ji}} \right) \right]$$

$$\eta_i = m_\eta^2 / M_i^2 \quad r_{ji} = M_j^2 / M_i^2$$

結果

$$\epsilon_1^e = -5.17 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_1^\mu = -4.31 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_1^\tau = -4.90 \times 10^{-3}$$

バリオン数のざっくり評価 (2)

Efficiency parameter

$$\kappa_1 = \frac{1}{1.2K_1[\ln K_1]^{0.8}}$$

$$K_1 = \frac{\Gamma_1}{H(T = M_1)}$$

$$\Gamma_1 = \frac{M_1}{8\pi} (h^\dagger h)_{11} (1 - \eta_1)^2$$

$$H(T) = \sqrt{\frac{8\pi^3 g_*}{90}} \frac{T^2}{M_{\text{Pl}}}$$

結果 $K_1^e = 0.829$

$$K_1^\mu = 37.7$$

$$K_1^\tau = 5.43$$

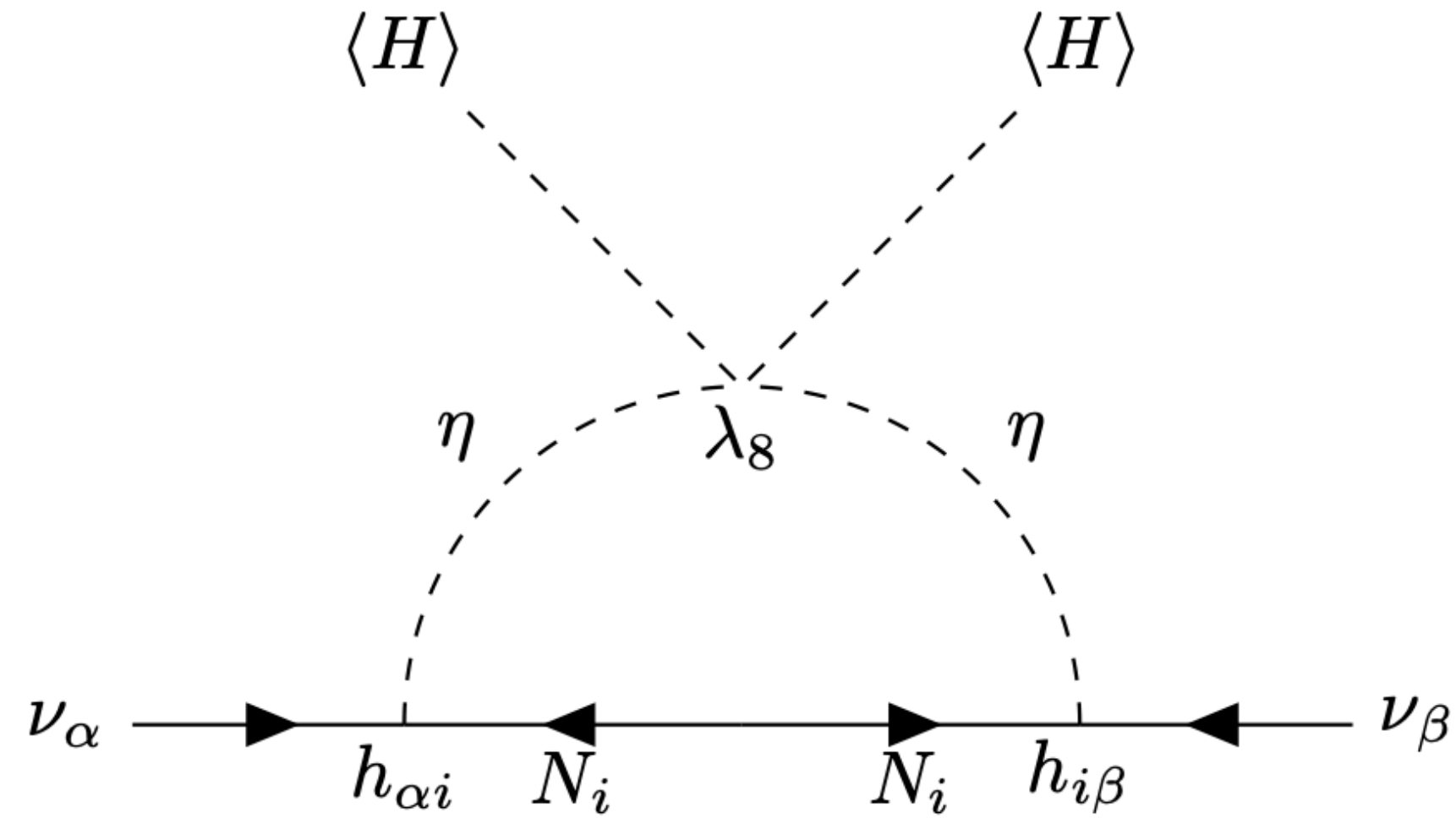
最終的なバリオン数のざっくり見積もり

$$\eta_B = 13.6 \times 10^{-10}$$

フレーバー込み & ボルツマン方程式解くと

$$\begin{aligned} \eta_B &= Y_{B-L}^{\text{obs}} \times \frac{28}{79} \\ &= 2.4 \times 10^{-10} \times \frac{28}{79} \\ &= 0.85 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

Scotogenic模型によるニュートリノ質量生成



$$(\mathcal{M}_\nu)_{\alpha\beta} = \sum_i \frac{h_{\alpha i} h_{\beta i} M_i}{16\pi^2} \left[\frac{m_R^2}{m_R^2 - M_i^2} \ln \frac{m_R^2}{M_i^2} - \frac{m_I^2}{m_I^2 - M_i^2} \ln \frac{m_I^2}{M_i^2} \right]$$