

Asymmetric Mediator in Scotogenic Model



埼玉大学理工学研究科 M2

酒井裕平

Physics Letters B **836** 13762 (2023)

共同研究者

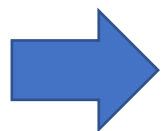
浅井健人氏 (東大宇宙線研) 佐藤丈氏 高西康敬氏 山中真人氏 (横国大)

1. 導入

現在の宇宙の残存量

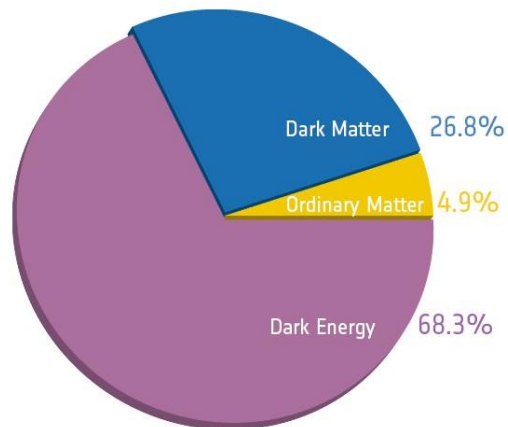
$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.120 \pm 0.001$$

$$\Omega_{\text{B}} h^2 = 0.0224 \pm 0.0001$$



$$\Omega_{\text{DM}} / \Omega_{\text{B}} \simeq 5$$

この関係は偶然？



現在の宇宙の構成要素

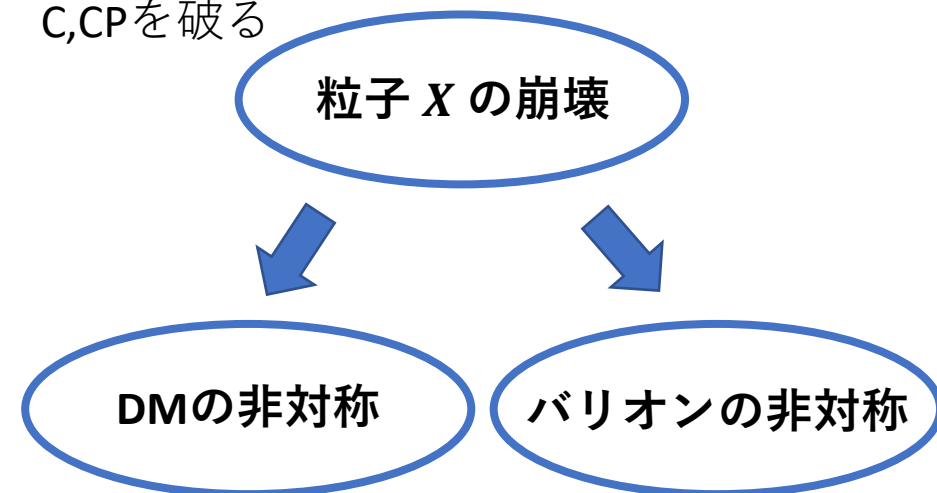
<https://sci.esa.int/s/8o9qj0w>より引用

ダークマターとバリオンの起源を結びつける

Asymmetric Dark Matter (ADM)

ADM の cogenesis シナリオ

C,CPを破る



それぞれの非対称を同時に生成

DMとバリオンの起源が同じ

1. 本研究の目的

• ダークマターの存在

• ニュートリノ振動

• 宇宙のバリオン数非対称性

• $\Omega_{DM} / \Omega_B \simeq 5$

Scotogenic Model

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

Leptogenesis

M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B **174** (1986)45-47

Asymmetric Dark Mater

David E. Kaplan, Markus A. Luty, and Kathryn M. Zurek, Phys. Rev. D **79**. (2009) 115016

T. Hugle, M. Platscher, and K. Schmitz,
Phys. Rev. D **98** (2018) 023020

目的

Scotogenic Model

+

ADM のシナリオ



上記の四つの物理現象を
同時に説明する模型の構築

2. モデルの説明

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

標準模型粒子
 + $N_i (i = 1, 2, 3)$ (右巻きニュートリノ)
 + η ($SU(2)_L$ 二重項スカラー)



本研究で扱う模型

Scotogenic Model
 + σ (実スカラー場: ダークマター)

・ 対称性

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times \mathbb{Z}_2$$

\mathbb{Z}_2 : ダークマター σ の安定性
 輻射シーソー機構

場	フェルミオン場			スカラー場		
	L	e_R	N	H	η	σ
$SU(2)_L$	2	1	1	2	2	1
Z_2	+	+	-	+	-	-

・ ラグランジアン

σ の質量は数 GeV 程度

$$\mathcal{L} \supset \underbrace{-h_{\alpha i} \bar{L}_\alpha \tilde{\eta} N_i}_{\text{湯川相互作用項}} + \underbrace{\frac{1}{2} M_i \bar{N}_i N_i^c}_{\text{マヨラナ質量項}}$$

湯川相互作用項

マヨラナ質量項

$$V(H, \eta, \sigma) \supset \underbrace{\frac{\lambda_8}{2} [(H^\dagger \eta)^2 + h.c.]}_{\text{輻射シーソー機構}} + \underbrace{\frac{\mu}{\sqrt{2}} [\sigma (H^\dagger \eta) + h.c.]}_{\text{ダークマター生成}}$$

輻射シーソー機構

ダークマター生成

2. モデルの説明

\mathbb{Z}_2 によりディラック質量項が組めない

$$\times : h_{\alpha i} \bar{L}_\alpha \tilde{H} N_i \longrightarrow \circ : h_{\alpha i} \bar{L}_\alpha \tilde{\eta} N_i$$

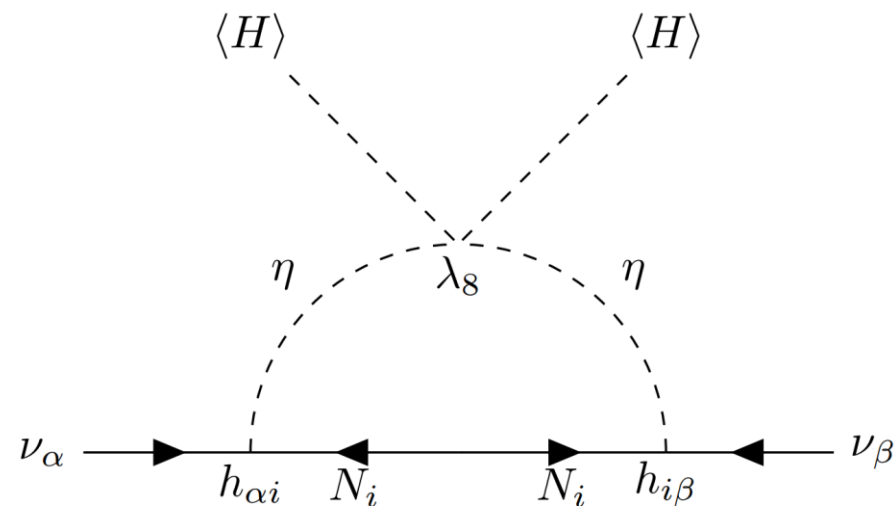


1-loop で質量生成
輻射シーソー機構

・ニュートリノ質量行列

$$(\mathcal{M}_\nu)_{\alpha\beta} \simeq \frac{\lambda_8 v^2}{32\pi^2} \sum_i \frac{h_{\alpha i}^* h_{\beta i}^*}{M_i} \left[\ln \frac{M_i^2}{m_\eta^2} - 1 \right]$$

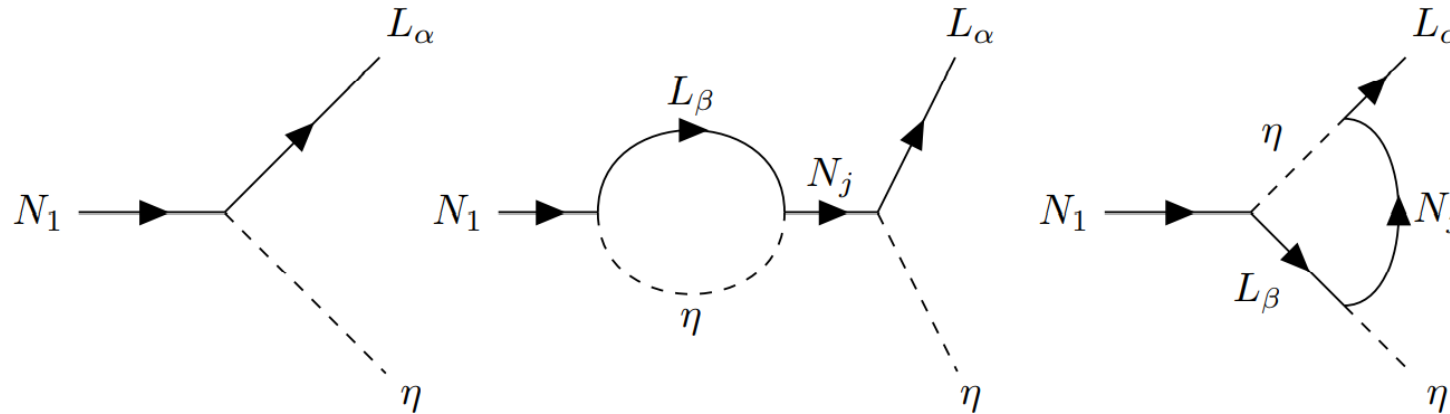
M_i : 右巻きニュートリノの質量
 m_η : $SU(2)_L$ 二重項スカラーの質量
 v : ヒッグスの真空期待値



λ_8 がニュートリノの質量に関わっている

2. モデルの説明

レプトジェネシス：重い右巻きニュートリノの崩壊でレプトン数非対称を生成



$$\mathcal{L} \supset -h_{\alpha i} \bar{L}_{\alpha} \tilde{\eta} N_i + \frac{1}{2} M_i \bar{N}_i N_i^c$$

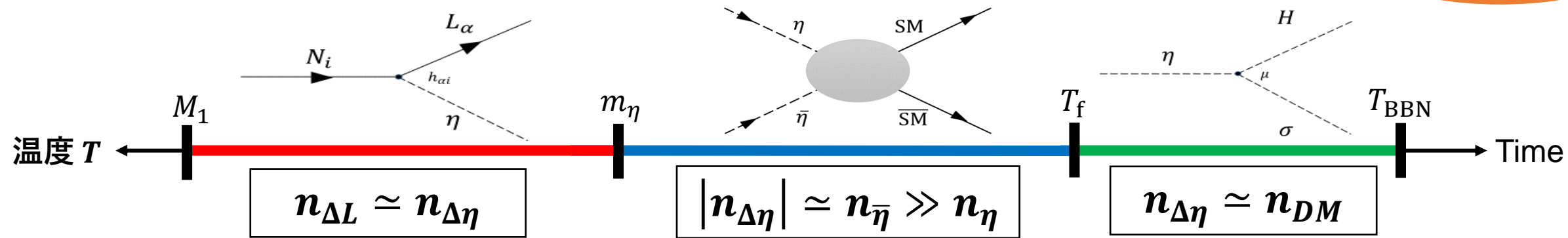


L (もしくは η) 数が破れている!

$$V(H, \eta, \sigma) \supset \frac{\lambda_8}{2} [(H^\dagger \eta)^2 + h.c.] + \frac{\mu}{\sqrt{2}} [\sigma (H^\dagger \eta) + h.c.]$$

3. ダークマターが生成されるまでの流れ

ここが重要!



$$n_{\Delta L} \simeq n_{\Delta \eta}$$

$$|n_{\Delta \eta}| \simeq n_{\bar{\eta}} \gg n_{\eta}$$

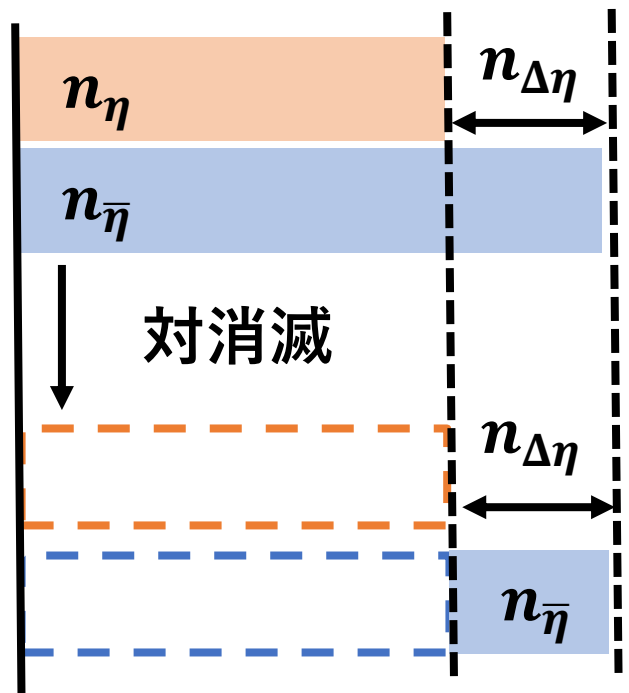
$$n_{\Delta \eta} \simeq n_{DM}$$

$$n_{\Delta \eta} \equiv n_{\eta} - n_{\bar{\eta}}$$

$$n_{\Delta \eta} \simeq n_{\bar{\eta}} \simeq n_{DM}$$

N_1 の崩壊 非対称が同時に生成

$$n_{\Delta L} \equiv n_L - n_{\bar{L}}$$



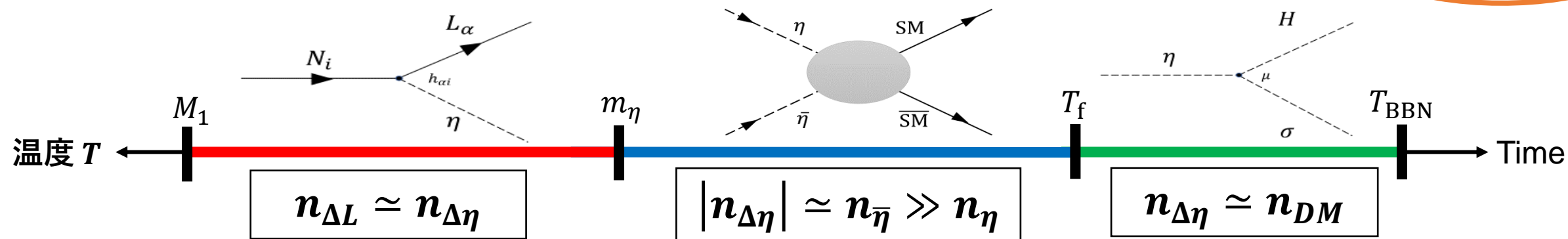
η が σ (DM) に崩壊

スファレロン過程

$$n_{\Delta L} \simeq n_{\Delta B}$$

3. ダークマターが生成されるまでの流れ

ここが重要!



最終的には

$$n_{\Delta B} \simeq \underline{n_{\Delta L} \simeq n_{\Delta \eta} \simeq n_{\bar{\eta}}} \simeq n_{DM}$$

となる

$\Delta\eta$ を介してバリオン数とDM数を結びつける!

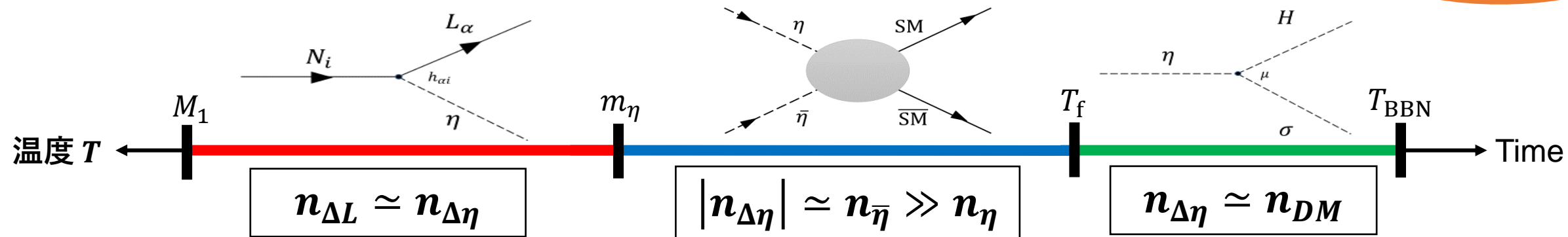


Asymmetric Mediator

σ の質量は数 GeV 程度

3. ダークマターが生成されるまでの流れ

ここが重要!



最終的には

$$n_{\Delta B} \approx \underline{n_{\Delta L}} \approx n_{\Delta \eta} \approx n_{\bar{\eta}} \approx n_{DM} \quad \text{となる}$$

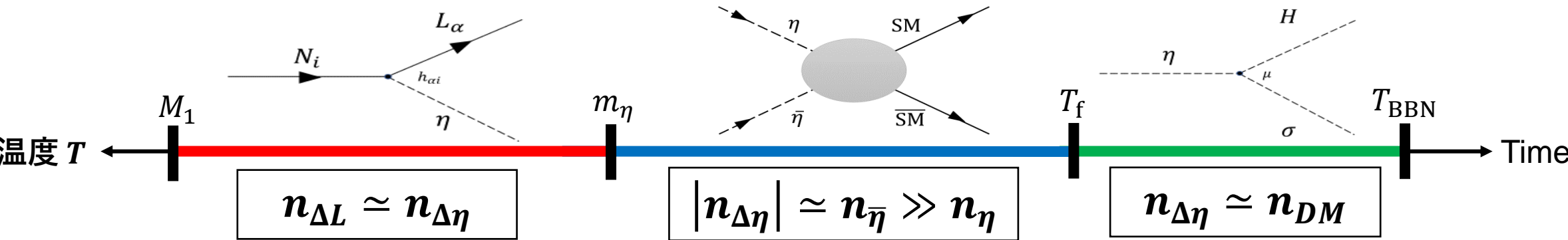
重要なのは $n_{\Delta L} \approx n_{\Delta \eta}$ を保つこと

Interactions	M_1	m_η	T_f	T_{dec}	T_{BBN}
$N_i \rightarrow \eta L_\alpha, \bar{\eta} \bar{L}_\alpha$	○	○	×	×	×
$\bar{\eta} \eta \rightarrow \bar{SM} SM$	○	○	○	×	×
$\eta \rightarrow \sigma H, \bar{\eta} \rightarrow \sigma \bar{H}$	×	×	×	×	○
$\eta\eta \rightarrow HH, \bar{\eta}\bar{\eta} \rightarrow \bar{H}\bar{H}$	×	×	×	×	×

$n_{\Delta \eta}$ を変化させる相互作用

$\eta\eta \rightarrow HH$ は常に起きない

3. 模型が成立するために



- ① $\eta\eta \rightarrow HH$ が常に起きない
- ② η が十分に対消滅する
- ③ σ は最後に生成される

$$\lambda_8 < 3.9 \times 10^{-8} \sqrt{m_\eta / \text{GeV}}$$



λ_8 はバリオン数生成に関係

$$\eta_B = \eta_B^{\text{obs}}$$

$$Y_\eta^f \ll Y_{\Delta\eta}$$

$$T_f > T > T_{\text{BBN}}$$

Y_η^f : 対消滅後の η の粒子数とエントロピー比

T_f : 対消滅が終わる温度

T_{BBN} : ビックバン元素合成の温度

①から③が成立しているのかを検証

4. 結果(バリオン数の検証)

バリオン数の計算

$$\eta_B \simeq -0.01 \epsilon_1 \kappa_1$$

ϵ_1 : asymmetry parameter

κ_1 : efficiency factor

ϵ_1 も κ_1 も湯川行列で表せる

Casas-Ibarra parametrization

$$h_{\alpha i} = \left(U D_\nu^{\frac{1}{2}} R^\dagger D_\Lambda^{\frac{1}{2}} \right)_{\alpha i} \quad (\mathcal{D}_\Lambda)_{ii} = \frac{2\pi^2}{\lambda_8} \xi_i \frac{2M_i}{v^2}$$

複素直行行列 R でパラメタ化

ϵ_1 の式 $(r_{ij} = M_j/M_i, \eta_i = m_\eta/M_i)$

$$\epsilon_i = \frac{1}{8\pi} \frac{1}{(h^\dagger h)_{ii}} \sum_{j \neq i} \text{Im} \left[\left\{ (h^\dagger h)_{ij} \right\}^2 \right] \frac{1}{\sqrt{r_{ji}}} F(r_{ji}, \eta_i)$$

κ_1 の式

$$\kappa_1(K_1) \simeq \frac{1}{1.2K_1 [\ln K_1]^{0.8}}$$

$$K_1 = \frac{1}{8\pi} \sqrt{\frac{90}{8\pi^3 g_*}} \frac{M_{\text{Pl}}}{M_1} (h^\dagger h)_{11} (1 - \eta_1)^2$$

$K_1 > 1$ のときこの近似式が成り立つ

4. 結果(バリオン数の検証)

① $\eta\eta \rightarrow HH$ が常に起きない

Decouple 条件: $\Gamma_{\eta\eta \rightarrow HH} < H(T = m_\eta)$

$$\therefore \lambda_8 < 3.9 \times 10^{-8} \sqrt{m_\eta / \text{GeV}}$$

λ_8 はニュートリノの質量に関係

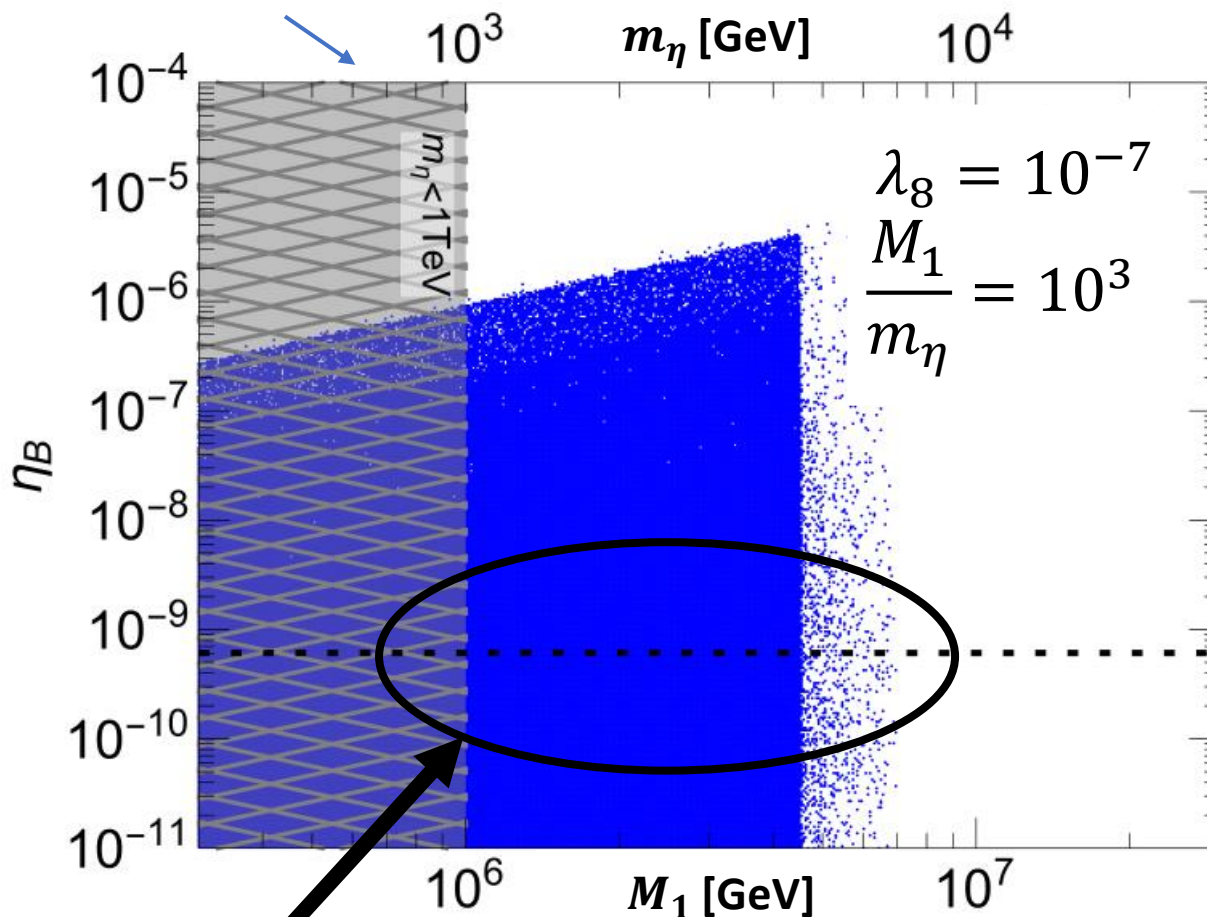
$$(\mathcal{M}_\nu)_{\alpha\beta} \simeq \frac{\lambda_8 v^2}{32\pi^2} \sum_i \frac{h_{\alpha i}^* h_{\beta i}^*}{M_i} \left[\ln \frac{M_i^2}{m_\eta^2} - 1 \right]$$

ニュートリノ振動実験の結果を使う

青い点: 計算した η_B

黒点線: $\eta_B^{\text{obs}} = 6.1 \times 10^{-10}$

加速器実験の制限を回避



$\eta_B = \eta_B^{\text{obs}}$ となるパラメータが存在する!

4. 結果(η の対消滅の検証)

② η が十分に対消滅する

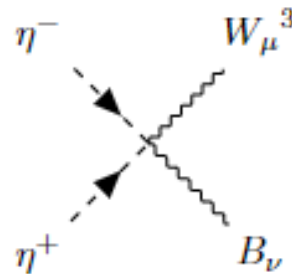
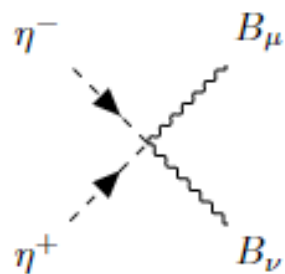
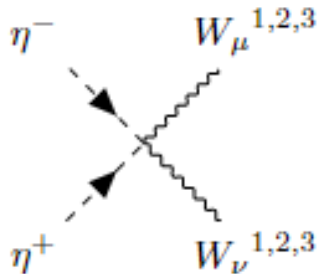
$$Y_{\eta}^f \ll Y_{\Delta\eta}$$

Y_{η}^f : 対消滅後の η の粒子数
とエントロピー比

以下の近似式で評価

$$Y_{\eta}^f \equiv \frac{n_{\eta}^f}{s} = 2 \times \frac{3.80 x_f}{\left(g_{*s}/g_*^{1/2}\right) M_{\text{Pl}} m_{\eta} \langle \sigma_g v_{\text{rel}} \rangle}$$

$$x_f \equiv \frac{m_{\eta}}{T_f} = \ln \left[0.038 \left(g/g_*^{1/2}\right) M_{\text{Pl}} m_{\eta} \langle \sigma_g v_{\text{rel}} \rangle \right] - \frac{1}{2} \ln \left\{ \ln \left[0.038 \left(g/g_*^{1/2}\right) M_{\text{Pl}} m_{\eta} \langle \sigma_g v_{\text{rel}} \rangle \right] \right\}$$



$$\langle \sigma_g v_{\text{rel}} \rangle \simeq \frac{(g_1)^4 + 6 \cdot (g_1 g_2)^2 + 3 \cdot (g_2)^4}{256 \pi m_{\eta}^2}$$

4. 結果(η の対消滅の検証)

② η が十分に対消滅する

$$Y_{\eta}^f \ll Y_{\Delta\eta}$$

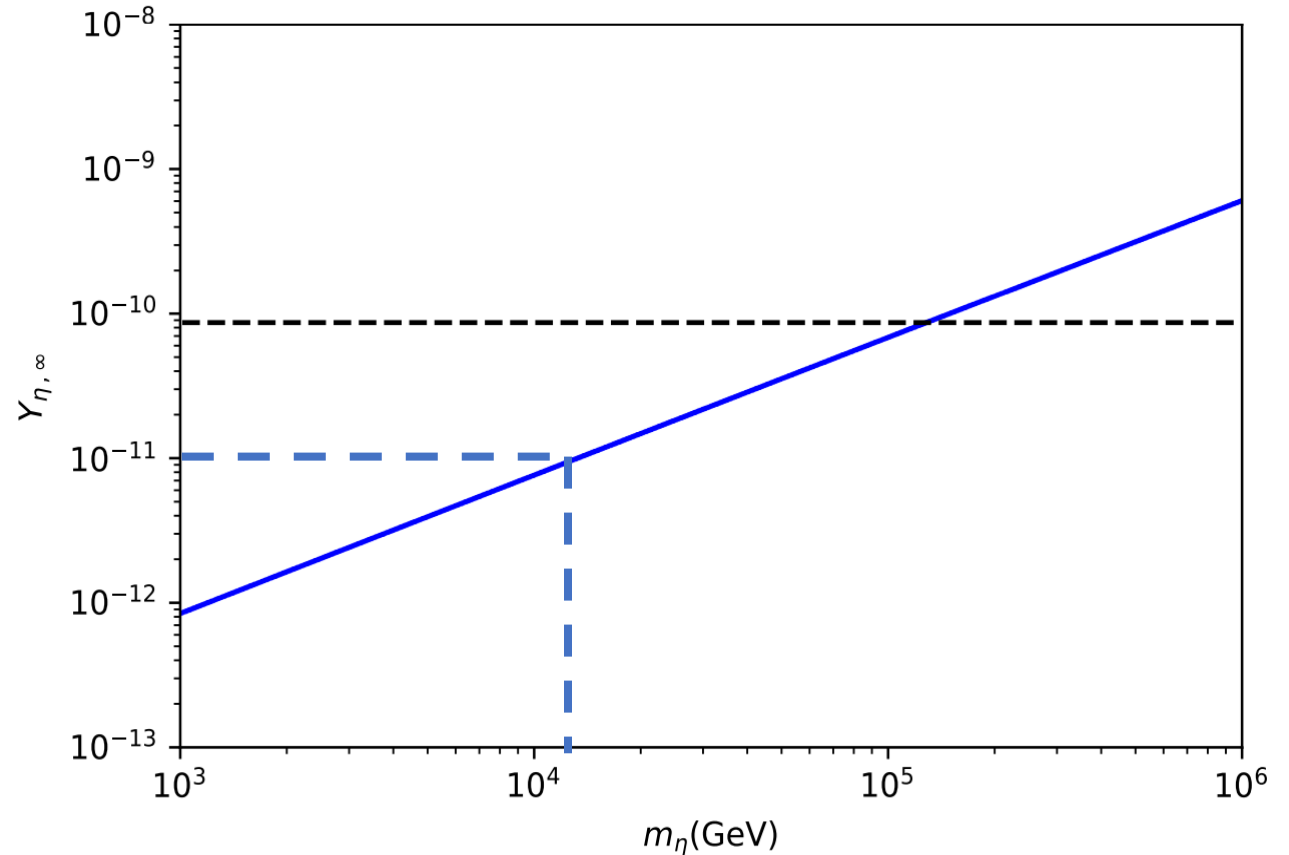
Y_{η}^f : 対消滅後の η の粒子数
とエントロピー比

最終的には $n_{\Delta\eta}$ は $n_{\Delta B}$ となる

➡ $Y_{\eta}^f \ll Y_B^{\text{obs}}$

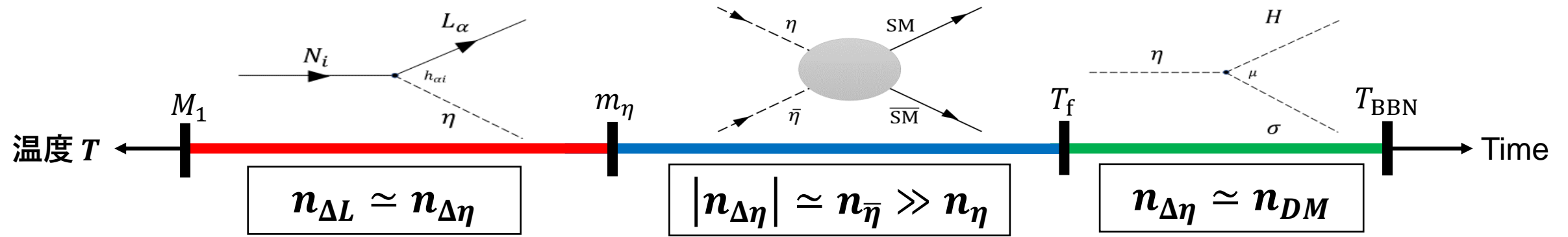
青い点 : 計算した Y_{η}^f

黒点線 : $Y_B^{\text{obs}} = 8.7 \times 10^{-11}$



$m_{\eta} \sim 10^4$ GeVで十分に対消滅する!

4. 結果(ダークマター σ 生成の検証)



③ σ は最後に生成される

$$T_f > T > T_{\text{BBN}}$$

$$\rightarrow 8.4 \times 10^{-12} \sqrt{\frac{m_\eta}{[\text{GeV}]}} < \frac{\mu}{\text{Gev}} < 3.8 \times 10^{-10} \frac{T_f}{m_\eta / 22} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

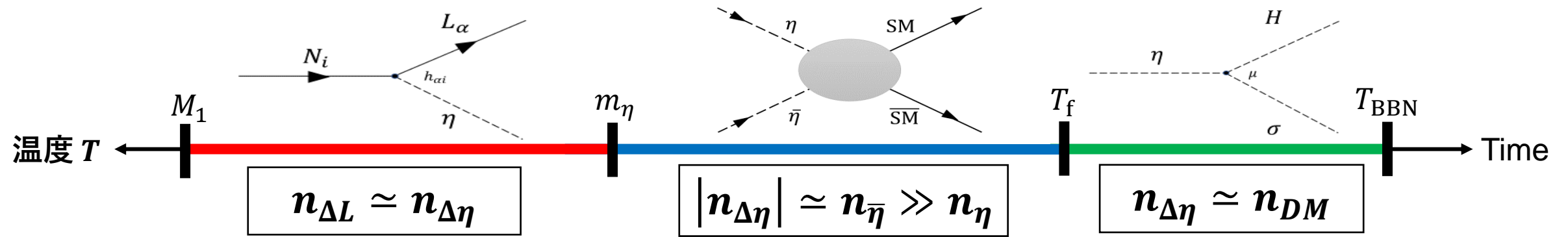
T_f : 対消滅が終わる温度
 T_{BBN} : ビックバン元素合成の温度

結論

$$m_\eta \sim 10^4 \text{ GeV}, \quad \lambda_8 < 10^{-8} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad 10^{-11} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}}\right)^{\frac{1}{2}} < \frac{\mu}{\text{Gev}} < 10^{-10} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

でシナリオが成立する

5. まとめ



Scotogenic Model に新たに実スカラー場を追加した模型を考えた

- ① 右巻きニュートリノ N_1 の崩壊でレプトン数を生成
- ② 媒介粒子 η が非対称 $n_{\Delta \eta}$ を保ちつつ対消滅
- ③ ダークマター σ が η の崩壊により生成

まとめ

「ダークマター」 「ニュートリノ振動」 「バリオン数非対称性」 「 $\Omega_{DM} / \Omega_B \simeq 5$ 」
 という四つの物理現象を説明する模型が存在することが確かめられた

5. 今後の展望

- ・ 近似式のみ用いて評価

ボルツマン方程式を解いて詳細なパラメータ領域を得る

- ・ 荷電粒子 η^+ の寿命

η^+ の寿命に応じてスカラー 3 点結合 μ の範囲が変わる

- ・ フレーバー効果の評価

フレーバー効果を入れると得られるバリオン数が変わる

ありがとうございました

Back Up

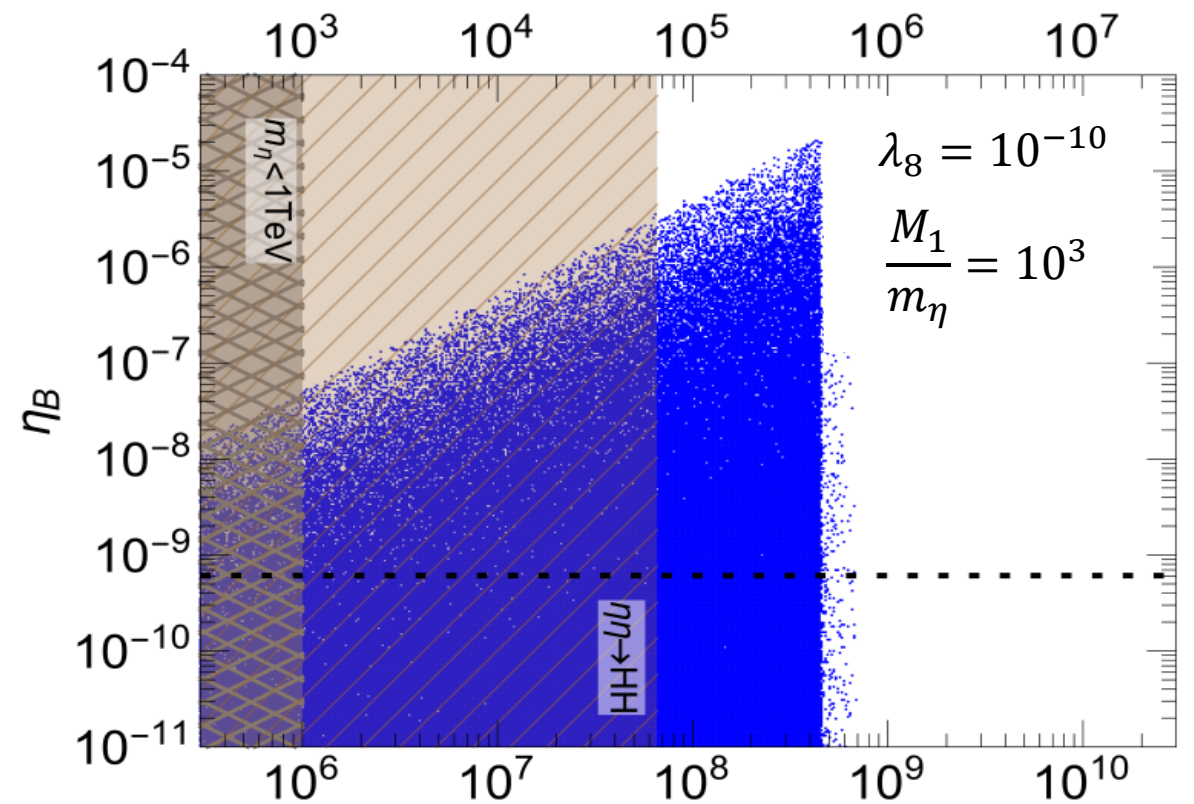
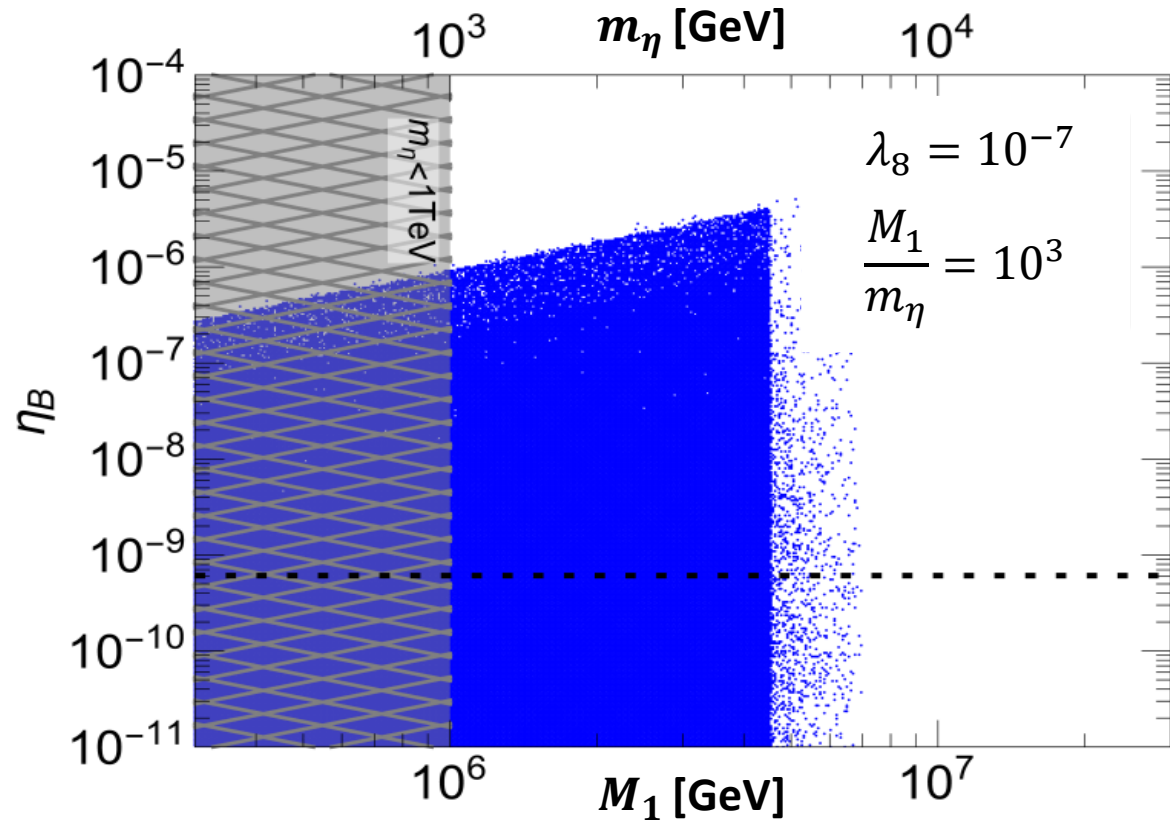
2. モデルの説明

- ・ ラグランジアンとポテンシャル項

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

$$\begin{aligned} V(H, \eta, \sigma) = & \mu_H^2 |H|^2 + m_\eta^2 |\eta|^2 + \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 \\ & + \frac{1}{2} \lambda_1 |H|^4 + \frac{1}{2} \lambda_2 |\eta|^4 + \frac{1}{2} \lambda_3 \sigma^4 \\ & + \lambda_4 |H|^2 |\eta|^2 + \lambda_5 |H^\dagger \eta|^2 + \lambda_6 |H|^2 \sigma^2 + \lambda_7 |\eta|^2 \sigma^2 \\ & + \frac{\lambda_8}{2} [(H^\dagger \eta)^2 + \text{h.c.}] + \frac{\mu}{\sqrt{2}} [\sigma (H^\dagger \eta) + \text{h.c.}] \end{aligned}$$

4. 結果(バリオン数の検証)



ニュートリノ振動実験の結果を満たしつつ、バリオン数を生成することはできる

5. まとめ(ダークマター探索)

・スカラー 3点結合 μ

$$10^{-11} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}} \right)^{\frac{1}{2}} < \frac{\mu}{\text{GeV}} < 10^{-10} \left(\frac{m_\eta}{\text{GeV}} \right)^{\frac{3}{2}}$$



結合定数が小さいので
ダークマターを直接
検出するのは難しい

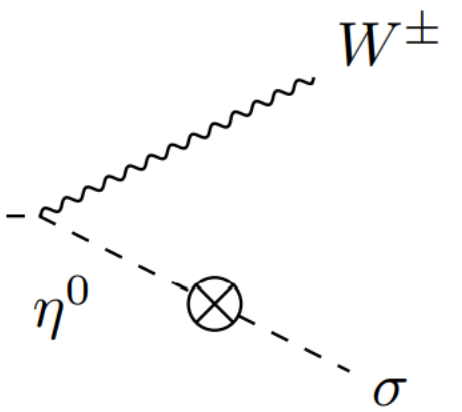
$$\frac{\mu}{\sqrt{2}} [\sigma(H^\dagger \eta) + h.c.]$$



η の荷電成分 η^+ を検出？

・ η^+ の寿命

$$\tau \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ s} \left(\frac{10^{-8} \text{ GeV}}{\mu} \right)^2 \left(\frac{m_\eta}{10^4 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{m_W}{80 \text{ GeV}} \right)^2 \eta^\pm$$



長寿命荷電粒子の崩壊として観測されるかもしれない