

Maxion: Majoron as QCD axion in a radiative seesaw model

京都大学 理学研究科 物理学第二教室 素粒子論研究室 M2

大畠 隆弘

Ernest Ma 氏(カリフォルニア大), 津村浩二氏(京都大) との共同研究(Phys. Rev. D 96, 075039)に基づく

目次

1. 導入

2. 模型の紹介

目次

1. 導入

2. 模型の紹介

今回解決できる問題

- 強いCP 問題

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L}_\theta = -\frac{g^2}{32\pi^2} \theta \tilde{G}^{A\mu\nu} G_{\mu\nu}^A \\ \theta \lesssim 10^{-11} \end{array} \right. \quad [1] \text{ C. A. Baker et al. (2006)}$$

- 暗黒物質の存在

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim 0.12 \quad [2] \text{ P. A. R. Ade et al. (2016)}$$

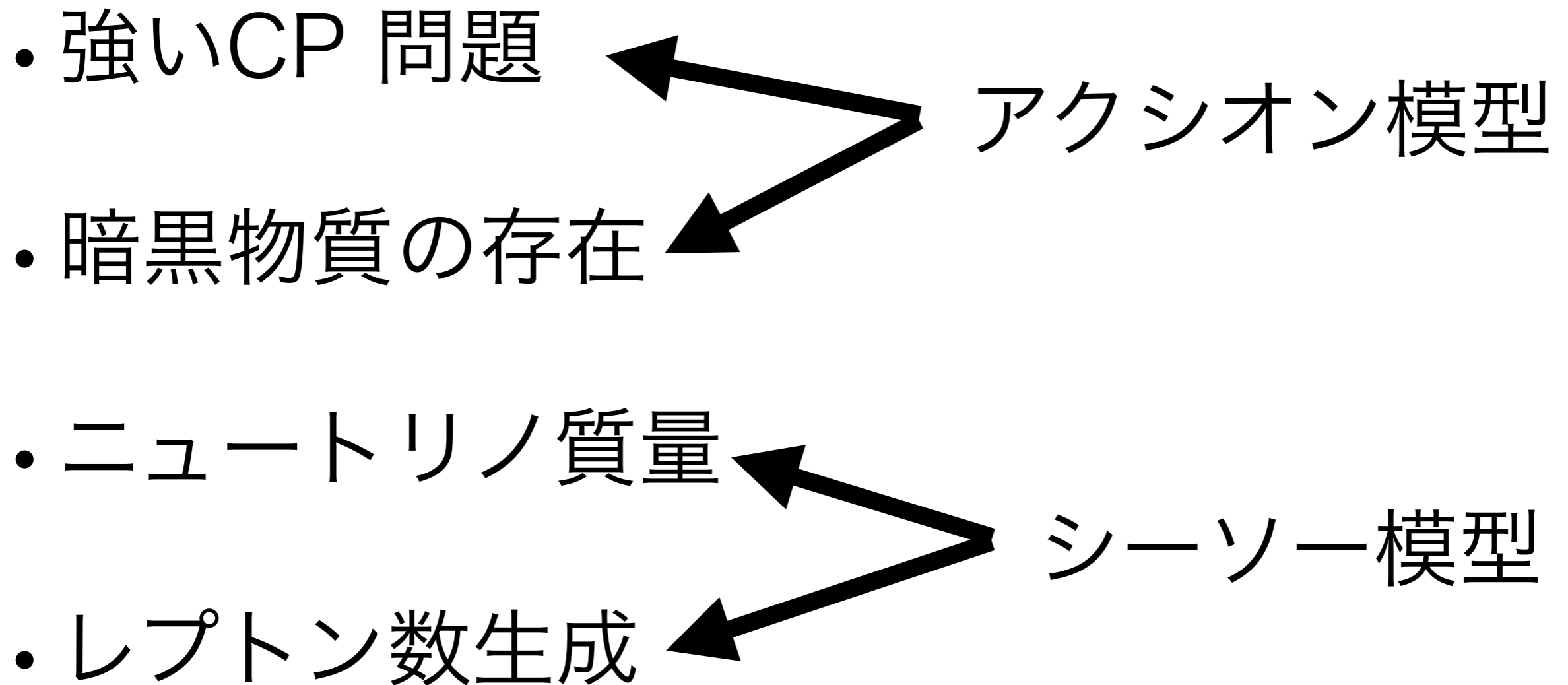
- ニュートリノ質量

$$\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2 \neq 0 \quad [3] \text{ C. Patrignani et al. (2016)}$$

- レプトン数生成

$$Y_{\Delta B} \sim 10^{-10} \quad [4] \text{ Particle Data Group (2016)}$$

よく知られたモデル(紹介)



アクシオン模型

例) KSVZ axion 模型

- PQ対称性とは, Ψ に関するカイラル対称性.
- $T \simeq f_a$ でPQ 対称性は自発的に破れる.

	S	Ψ_R^A	Ψ_L^A
$SU(3)_C$	1	3	3
$SU(2)_L$	1	1	1
$U(1)_Y$	0	-1/3	-1/3
$U(1)_{PQ}$	-2	1	-1
spin	0	1/2	1/2

- $\Psi \rightarrow e^{-i \frac{a(x)}{2v_a} \gamma_5} \Psi$ の再定義で, アクシオンポテンシャル

$$\mathcal{V}_a = f_a^2 m_a^2 \left(1 - \cos \left(a/f_a - \theta \right) \right)$$

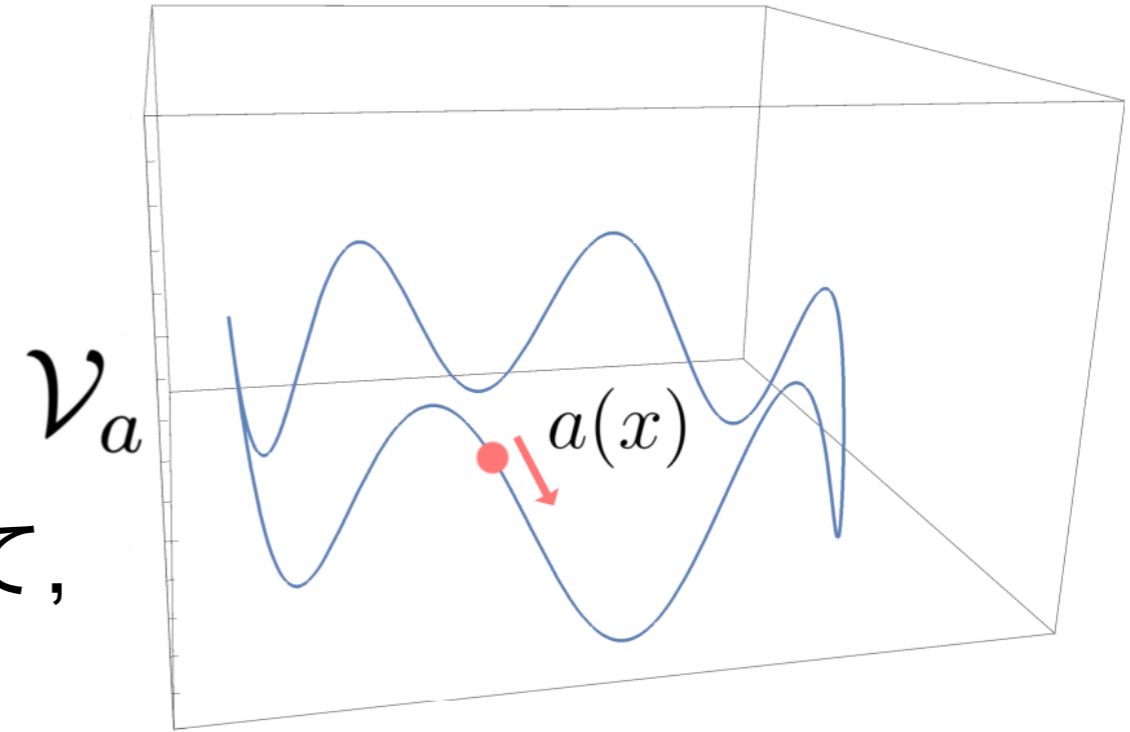
が出てくる

$$S(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} (f_a + \sigma(x)) e^{i a(x)/f_a} - \frac{1}{2} y_\Psi^i S (\Psi_{iR}^A)^c \Psi_{iR} + \text{H.c.}$$

強いCP 問題

アクシオンが $\frac{a(x)}{f_a} \rightarrow \theta$

とポテンシャルの底に転がり落ちて、



QCD の表面項が消える:

$$V_a = f_a^2 m_a^2 \left(1 - \cos \left(a/f_a - \theta \right) \right)$$

$$\mathcal{L}_{\text{surf}} = - \frac{g^2}{32\pi^2} \left(\theta - \frac{a(x)}{f_a} \right) \tilde{G}^{A\mu\nu} G_{\mu\nu}^A$$
$$\rightarrow 0$$

アクシオン暗黒物質

Axion のエネルギー密度は,

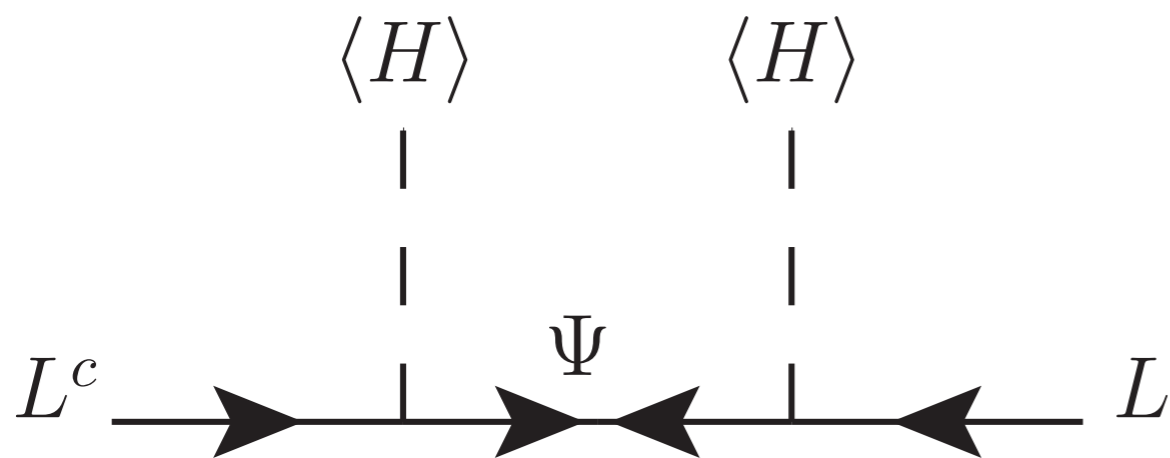
$$\Omega_a h^2 \approx 0.18 \theta_i^2 \left(\frac{f_a / (3 n_\Psi)}{10^{12} \text{GeV}} \right)^{1.19} .$$

[5] M. S. Turner (1986) [6] K. J. Bae, J. H. Huh and J. E. Kim (2008).

これにより, 現在の暗黒物質残存量が出る:

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 \sim 0.12$$

シーソーモデル(ν の質量)



	Ψ_R
$SU(3)_C$	1
$SU(2)_L$	1
$U(1)_Y$	0
spin	1/2

$$\mathcal{M}_{\nu ij} = \sum_k \frac{h_{ik} h_{jk} v^2}{2M_{Mk}} = \sum_k \frac{M_{Dik} M_{Djk}}{M_{Mk}}$$

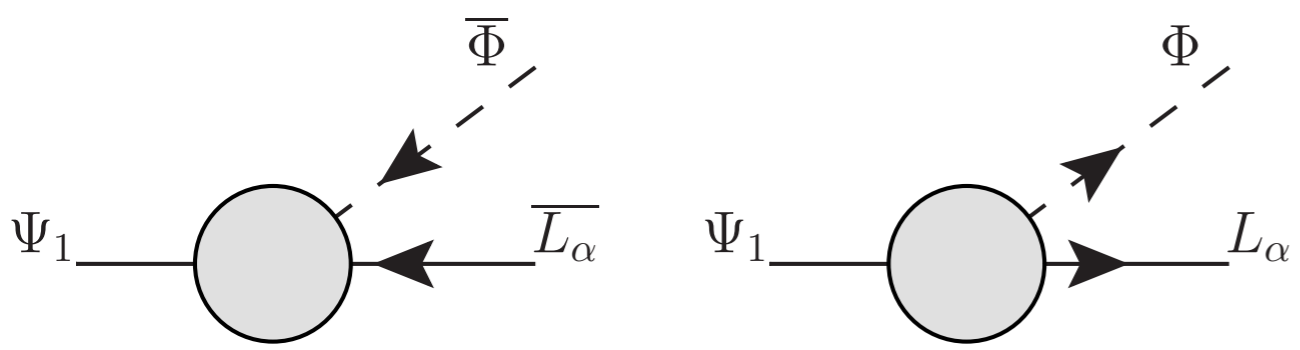
$\frac{M_D}{M_M} \ll 1 \longrightarrow \mathcal{M}_\nu$ がWeak scale より十分小さいことを説明

シーソーモデル(レプトン数生成)

サハロフの三条件

- レプトン数の破れ \longrightarrow 宇宙のレプトンが増減する相互作用
- 非平衡過程 \longrightarrow 増えたレプトンが逆過程で減らない
- CP の破れ \longrightarrow 反レプトンよりレプトンが多くなる

$$10^{-6} \lesssim \epsilon = \sum_{\alpha} \epsilon_{\alpha\alpha} \lesssim \frac{3M_{\Psi_1}}{16\pi v^2} m_{\nu\text{max}}$$



$$\epsilon_{\alpha\alpha} = \frac{\Gamma(\Psi_1 \rightarrow L_{\alpha}\Phi) - \Gamma(\Psi_1 \rightarrow \bar{L}_{\alpha}\bar{\Phi})}{\Gamma(\Psi_1 \rightarrow L\Phi) + \Gamma(\Psi_1 \rightarrow \bar{L}\bar{\Phi})}$$

(我々のモデルでもほぼ同様のことが起こる)

我々の模型でやったこと

模型	アクション模型	シーソー模型
破れる対称性	PQ 対称性の破れ	レプトン数の破れ
追加のフェルミオン	colored フェルミオン	右巻きニュートリノ (RHv)
追加のスケール	PQ スケール	RHv のmass

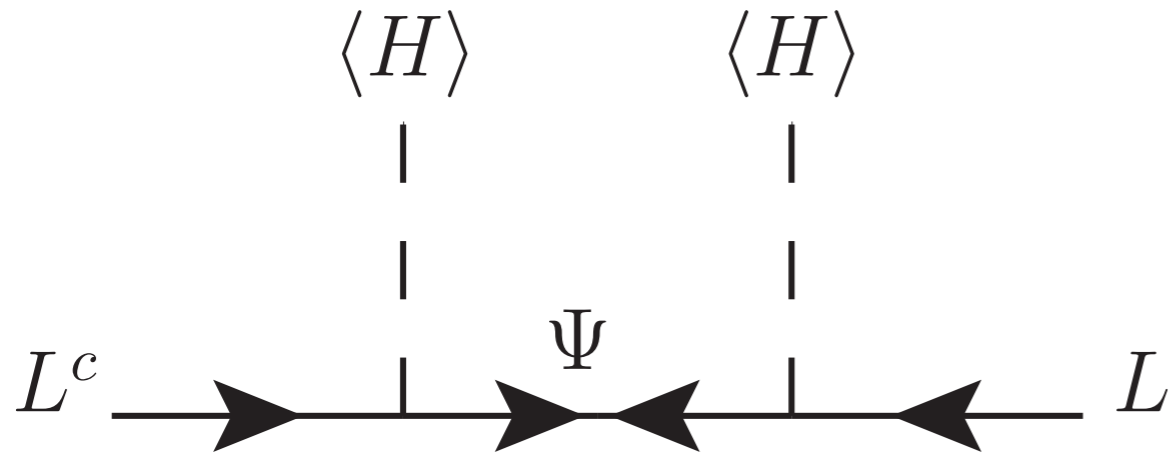
この二つの模型のminimal な統合

目次

1. 導入

2. 模型の紹介

Type I Seesaw

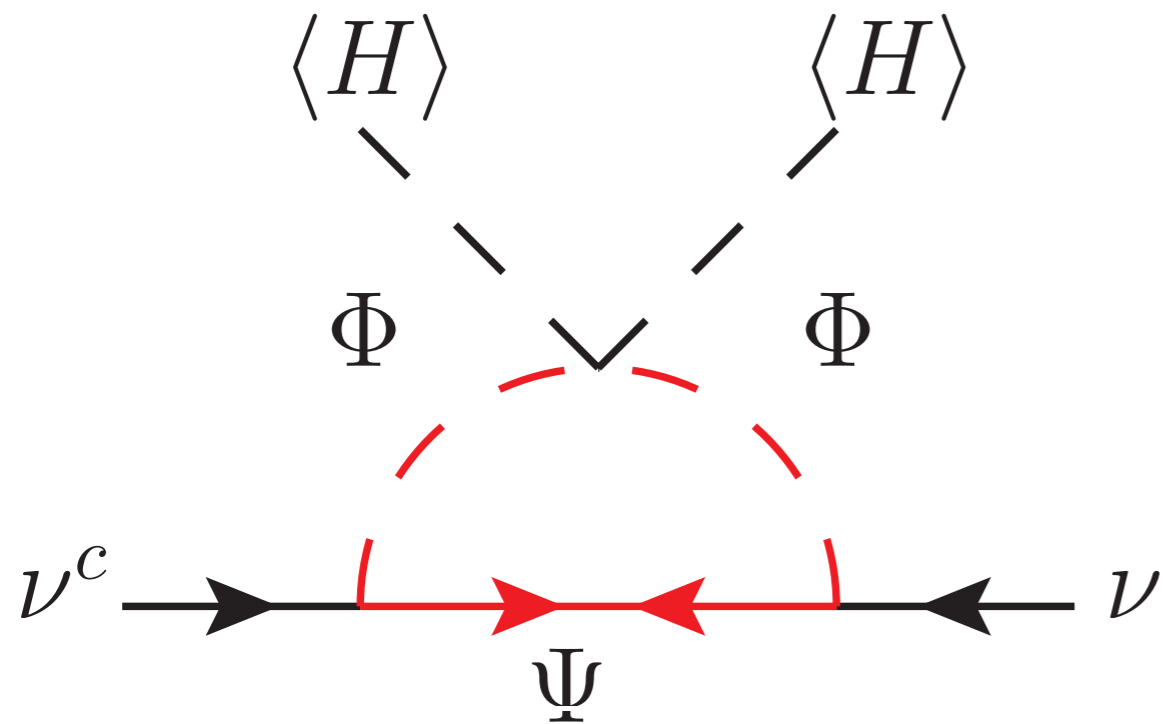


	Ψ_R
$SU(3)_C$	1
$SU(2)_L$	1
$U(1)_Y$	0
spin	1/2

axion 模型にするために、
 Ψ_R を colored にしたい。

$$\mathcal{M}_{\nu ij} = \sum_k \frac{h_{ik} h_{jk} v^2}{2M_{Mk}} = \sum_k \frac{M_{Dik} M_{Djk}}{M_{Mk}}$$

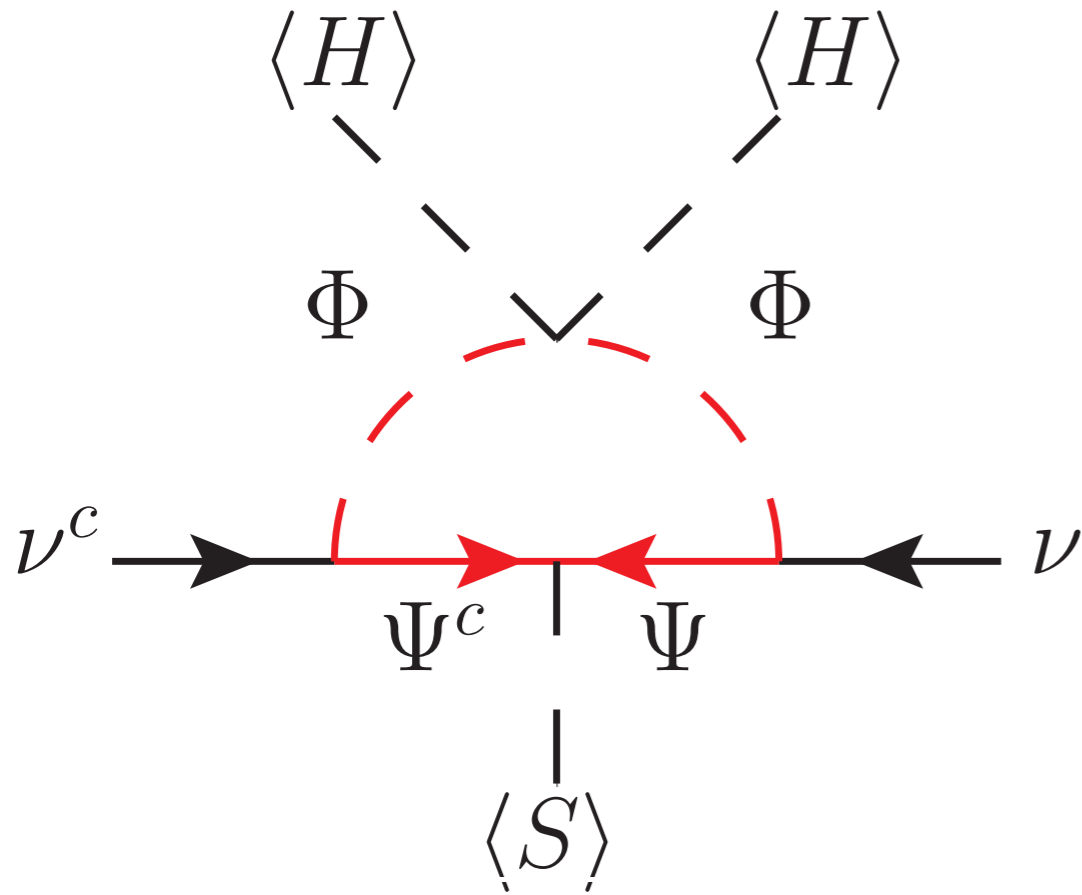
カラー化 & loop化



	Ψ_R^A	Φ^A
$SU(3)_C$	8	8
$SU(2)_L$	1	2
$U(1)_Y$	0	1/2
spin	1/2	0

- マヨラナ場なので, カラー8表現にした
- カラーが外に出ないように, 新しい場 Φ^A を導入し, loop にした.

アクシオンモデル化

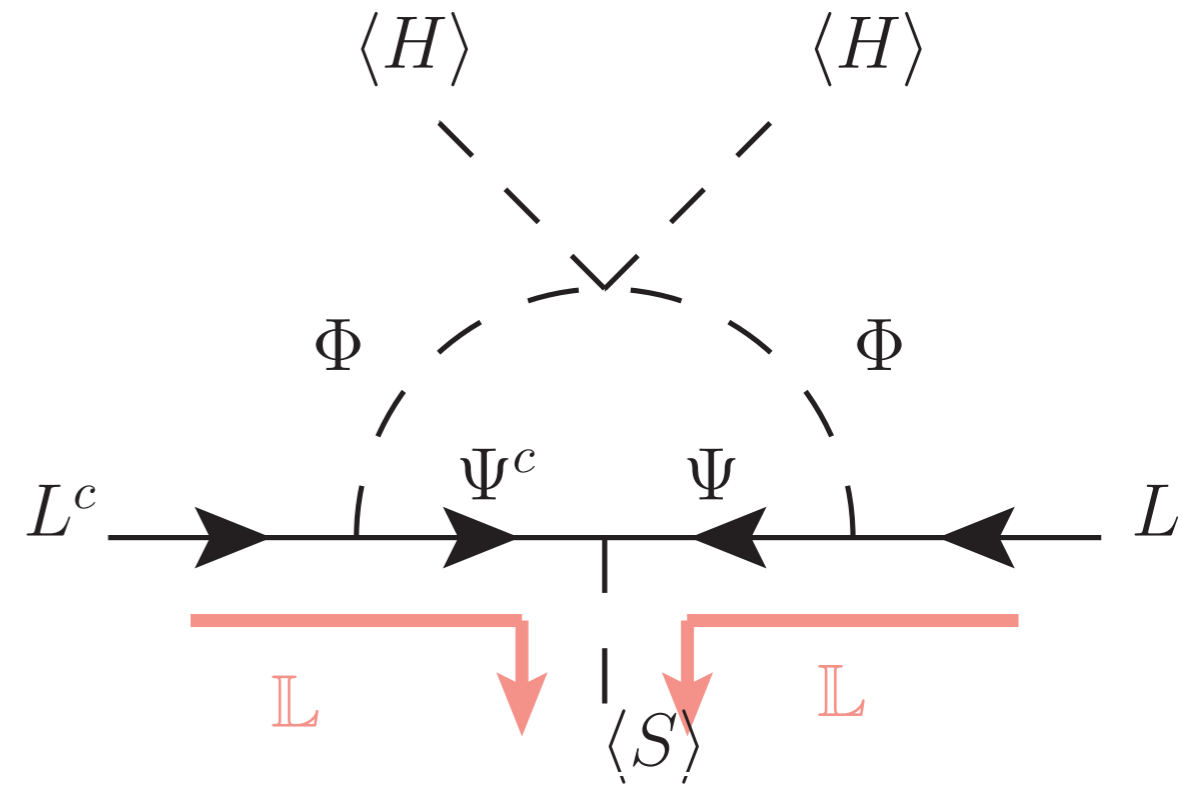


	S	Ψ_R^A	Φ^A
$SU(3)_C$	1	8	8
$SU(2)_L$	1	1	2
$U(1)_Y$	0	0	1/2
$U(1)_{PQ} = U(1)_L$	-2	1	0
spin	0	1/2	0

- additional な対称性 $U(1)_{PQ}$ をレプトン数の拡張として手で課す
- $U(1)_{PQ}$ は $\Psi^A = (\Psi_R^A)^c + \Psi_R^A$ に対するカイラル対称性となっている

アクシオンとシーソーの統一

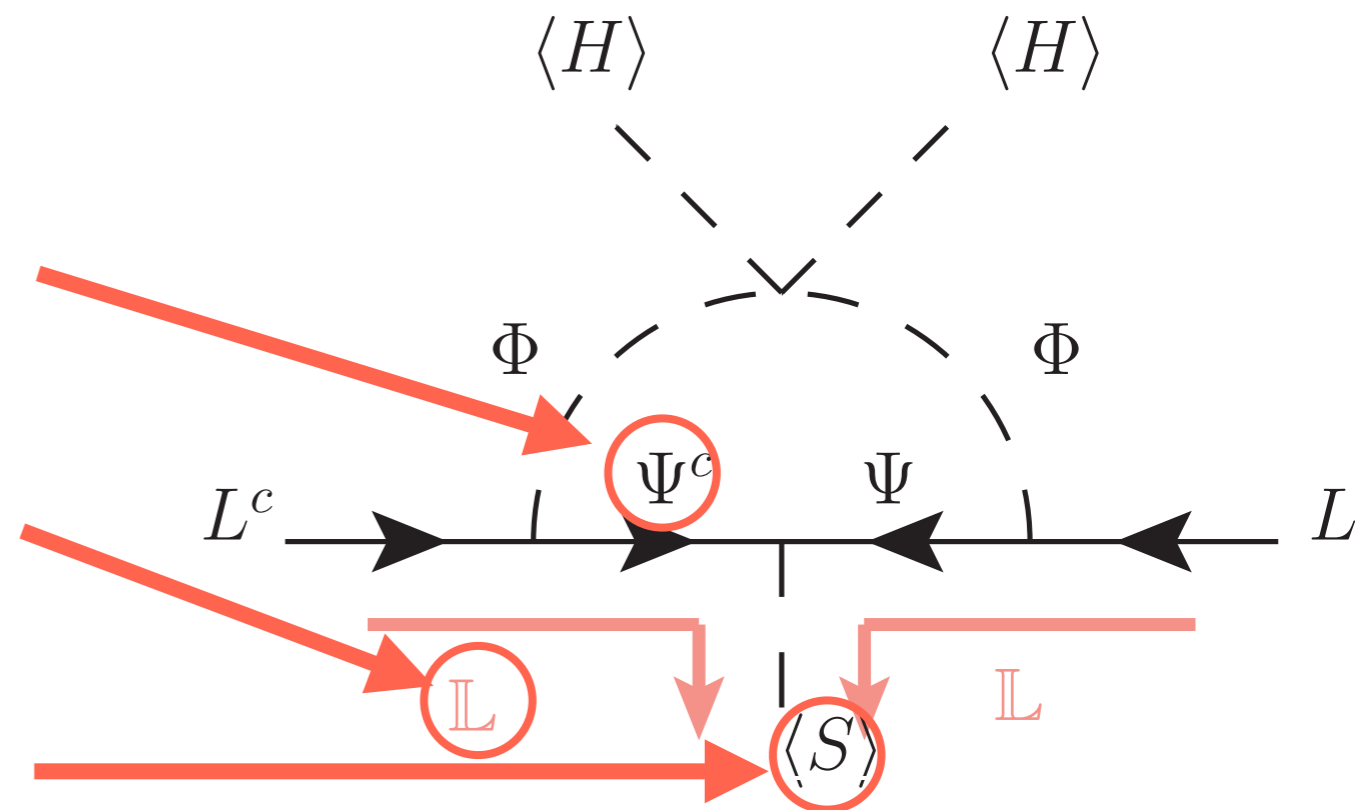
モデル	アクシオンモデル	シーソーモデル
追加のフェルミオン	colored フェルミオン	右巻きニュートリノ (RHv)
破れる対称性	PQ 対称性の破れ	レプトン数の破れ
追加のスケール	PQ スケール	RHv のmass



	S	Ψ_R^A	Φ^A
$SU(3)_C$	1	8	8
$SU(2)_L$	1	1	2
$U(1)_Y$	0	0	1/2
$U(1)_{PQ} = U(1)_L$	-2	1	0
spin	0	1/2	0

アクシオンとシーソーの統一

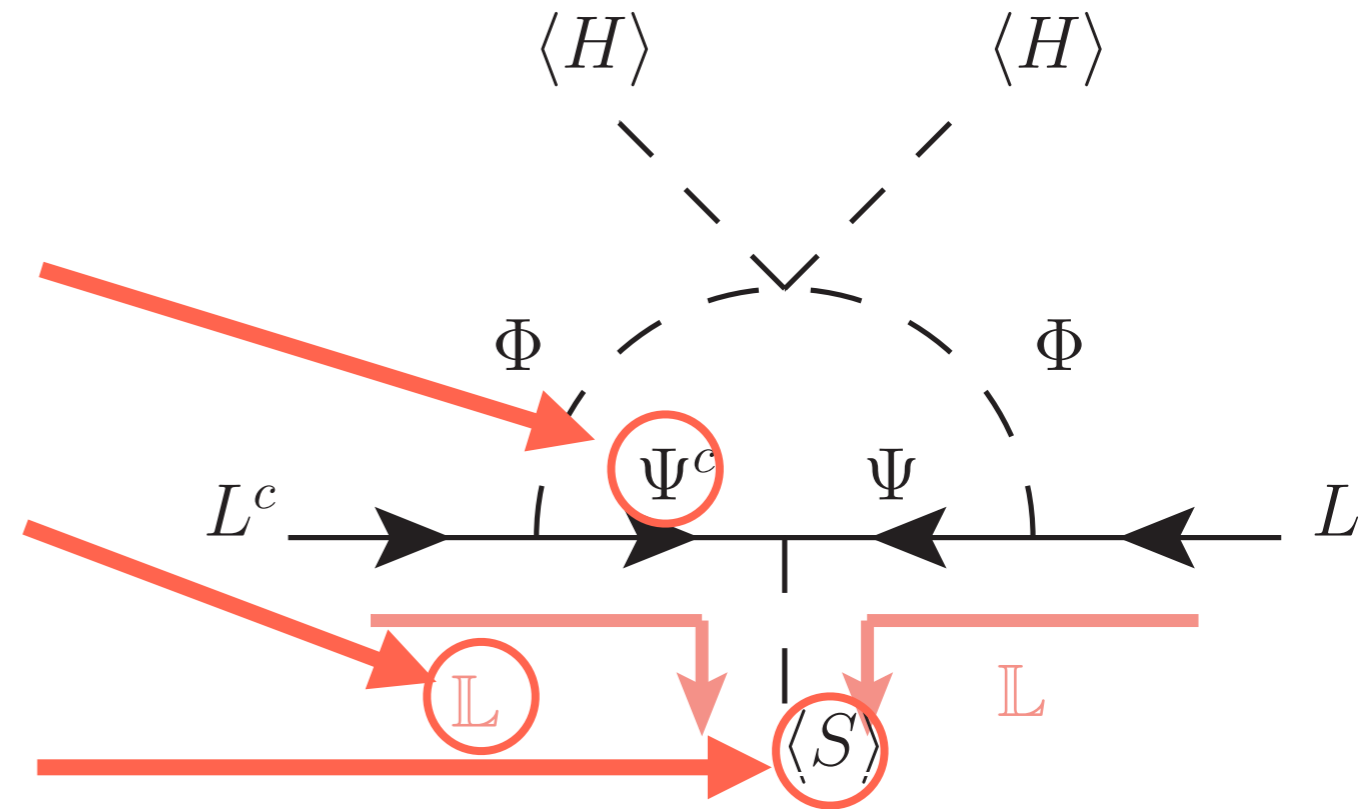
モデル	アクシオンモデル	シーソーモデル
追加のフェルミオン	colored フェルミオン	右巻きニュートリノ (RHv)
破れる対称性	PQ 対称性の破れ	レプトン数の破れ
追加のスケール	PQ スケール	RHv のmass



	S	Ψ_R^A	Φ^A
$SU(3)_C$	1	8	8
$SU(2)_L$	1	1	2
$U(1)_Y$	0	0	1/2
$U(1)_{PQ} = U(1)_L$	-2	1	0
spin	0	1/2	0

アクシオンとシーソーの統一

モデル	アクシオンモデル	シーソーモデル
追加のフェルミオン	colored フェルミオン	右巻きニュートリノ (RHv)
破れる対称性	PQ 対称性の破れ	レプトン数の破れ
追加のスケール	PQ スケール	RHv のmass



	S	Ψ_R^A	Φ^A
$SU(3)_C$	1	8	8
$SU(2)_L$	1	1	2
$U(1)_Y$	0	0	1/2
$U(1)_{PQ} = U(1)_L$	-2	1	0
spin	0	1/2	0

Ma-xion 模型

まとめ

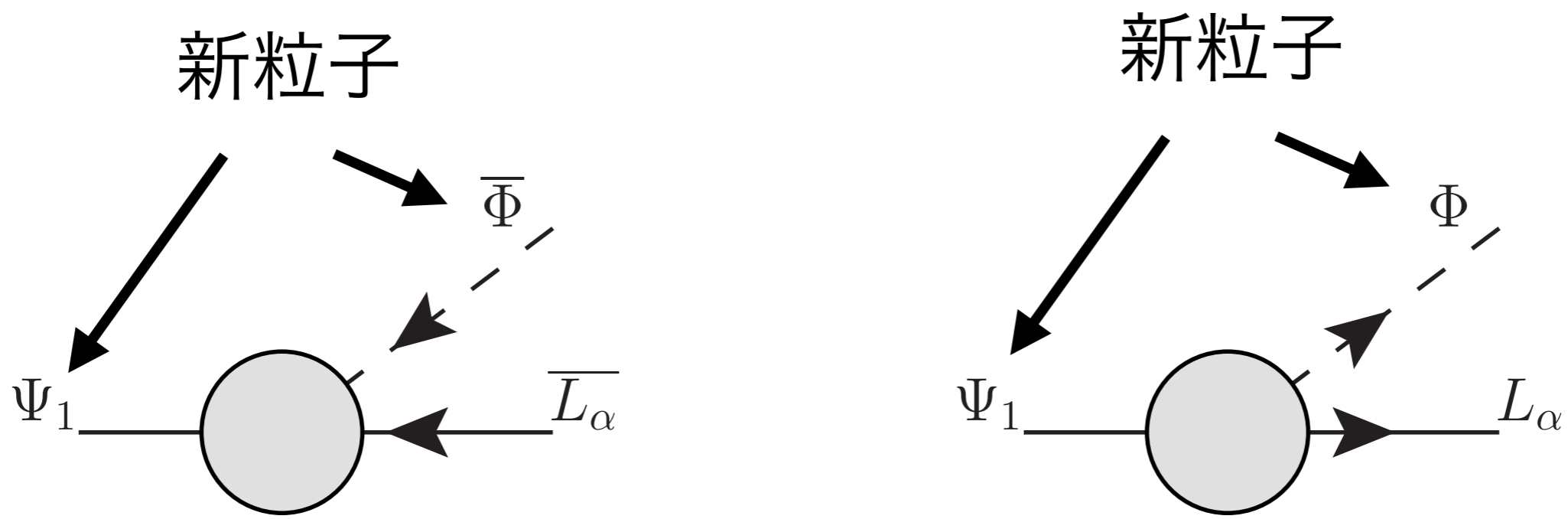
- シーソー模型とアクシオン模型のminimal な統一ができた.
- この模型は, 暗黒物質問題, ニュートリノ質量, 強いCP 問題, レプトン数生成の問題を解決得る.

今後の展望

- $\mu \rightarrow e\gamma$, FCNC 等に関する定量的な解析.
- インフレーションとの関係性を探る(ドメインウォール問題, Sのインフラトンとしての働き等)

Backup

我々のモデルでのレプトン数生成



レプトン数が生成されるためのパラメタの範囲

$$10^{-6} \lesssim |\epsilon| \lesssim \frac{3\pi M_{\Psi_1}}{4\lambda_5 v^2} (m_{\nu 1} - m_{\nu 3})$$

ニュートリノ質量(差)

$$(\mathcal{M}_\nu)_{ij} = -\frac{1}{4\pi^2} \sum_k h_\Psi^{ik} h_\Psi^{jk} M_{\Psi k} \left(\frac{M_H^2}{M_{\Psi k}^2 - M_H^2} \ln \frac{M_H^2}{M_{\Psi k}^2} - \frac{M_A^2}{M_{\Psi k}^2 - M_A^2} \ln \frac{M_A^2}{M_{\Psi k}^2} \right)$$

例えば

$$2\lambda_5 v^2 \ll m_0^2 \ll M_{\Psi k}^2$$

$$\lambda_5 \simeq 10^{-3}, h_\Psi^{ik} \simeq 0.1, y_\Psi^i \simeq 10^{-3} \text{ and } f_a \simeq 10^{12} \text{ GeV}$$

という条件のもとで,

$$\mathcal{M}_\nu \simeq \mathcal{O}(10) \text{ meV}$$

くらいになる

$$m_0^2 = (M_H^2 + M_A^2)/2$$

$$M_{\Psi i} = y_\Psi^i \langle S \rangle = y_\Psi^i \frac{f_a}{\sqrt{2}}$$

$$\frac{1}{2} \{ \lambda_5 (H^\dagger \Phi^A)^2 + \text{H.c.} \}$$

“*gluino*” axion 模型

$$-\frac{1}{2} y_{\Psi}^i S \overline{(\Psi_{iR}^A)^c} \Psi_{iR} + \text{H.c.}$$

1. gluino-like なフェルミオン
2. gauge-singlet 複素スカラー場
3. PQ-charge を手で課す

	S	Ψ_R^A
$SU(3)_C$	1	8
$SU(2)_L$	1	1
$U(1)_Y$	0	0
$U(1)_{PQ}$	-2	1
spin	0	1/2

→ PQ-変換 がカイラル対称性になり,
axion 模型に.

何で見えそうか(フレーバー物理との関係)

基本的に新粒子を重くしちゃえば制限避けられるが、
例えば Φ^A が軽い場合は、

- FCNC
- $\mu \rightarrow e\gamma$ 等のLFV の上限
- ミューオン $g-2$

などから制限がかけられる。

New Yukawa coupling

$$\mathcal{L}_{Q\Phi q_R} = g_u^{ij} \overline{Q}_i \widetilde{\Phi}^A T^A u_{jR} + g_d^{ij} \overline{Q}_i \Phi^A T^A d_{jR} + \text{H.c.}$$

- カラーを持つ新粒子はこれで崩壊
- 新粒子を軽くしすぎるとこの相互作用によるFCNC が問題に

$$\mathcal{L}_{L\Phi\Psi_R} = h_{\Psi}^{ij} \widetilde{\Phi}^{A\dagger} \overline{\Psi}_{jR}^A L_i + \text{H.c.}$$

- この項で(軽い)ニュートリノに質量が与えられる

$$\mathcal{L}_{S\Psi_R\Psi_R} = -\frac{1}{2} y_{\Psi}^i S \overline{(\Psi_{iR}^A)^c} \Psi_{iR} + \text{H.c.}$$

- 右巻きニュートリノに質量を与える項
- S の角度部分がaxion に

スケール

温度



← PQ scale $f_a \gtrsim (3n_\Psi) \times 4 \times 10^8 \text{ GeV}$

← reheating scale, PQ scale より低い

← 右巻きニュートリノの質量.
この温度より低くなると右巻きニュートリノが崩壊しレプトン数が生成される