

ミニマルなNelson-Barr模型の再検討

Revisiting the minimal Nelson-Barr model

村井 開 (東北大学)

中山和則氏との共同研究に基づく
JHEP 11 098 (2024), arXiv: 2407.16202

Accepted in JHEP, arXiv: 2412.19456



まとめ

強いCP問題の解決策であるNelson-Barr模型には、高次項やループ寄与からCP角が生じるという課題がある。
近似的な対称性を課すことで余分なCP角への寄与を抑制する模型を提案した。
結果としてCP角を十分に小さく保ちながら、模型に熱的レプトジェネシスを組み込むことができた。
複素スカラー場が離散対称性の破れを引き起こす模型ではQCDアクションが現れることを発見した。

■ 強いCP問題

QCDのθ項はCP対称性を破る: $\mathcal{L} \supset \frac{\theta_s}{32\pi^2} g_s^2 G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}$

物理的な観測量はクォーク質量の位相を含めた

$$\bar{\theta}_s = \theta_s - \arg[\det(\mathbf{m}_u \mathbf{m}_d)]$$

標準模型では $\bar{\theta}_s$ は自由なパラメータである一方、
中性子の電気双極子モーメント測定によると

$$|\bar{\theta}_s| \lesssim 10^{-10} \quad [\text{Abel et al. (2020)}]$$

一方CKM行列には $\mathcal{O}(1)$ のCPの破れ

- $\begin{cases} \cdot \text{ CP対称性を課して自発的にうまく破る: Nelson-Barr機構 } \\ \cdot \bar{\theta}_s \text{ に対応する場によって動的に } \bar{\theta}_s \rightarrow 0 : \text{ QCDアクション } \\ \quad [\text{Nelson (1984), Barr (1984), ...}] \\ \quad [\text{Peccei, Quinn (1977), Weinberg (1978), Wilczek (1978), ...}] \end{cases}$

■ Bento-Branco-Parada模型

[Bento, Branco, Parada (1991)]

• 模型の設定

標準模型 + vector-like quark $D_{L,R}^{\text{Hypercharge } -\frac{1}{3}}$ と complex scalar S を導入

$$\mathcal{L}_d = - \left[M \bar{D}_L D_R + (g_i S + g'_i S^*) \bar{D}_L d_{Ri} + y_{ij}^d H \bar{Q}_{Li} d_{Rj} + \text{h.c.} \right]$$

CP対称性 → M, g_i, g'_i, y_{ij}^d は実定数, $\theta_s = 0$

Z_2 対称性 → $H \bar{Q}_{Li} D_R$ を禁止

電荷	S	D_L	D_R	Q_{Li}	d_{Ri}	u_{Ri}	H
Z_2	1	1	1	0	0	0	0
$Z_{4n}^{(\text{app})}$							

S が真空期待値を持つことでCPが自発的に破れる

$$V(S, H) = \lambda_H (|H|^2 - v_H^2)^2 + \lambda_S (|S|^2 - v_S^2)^2 + \dots \rightarrow \langle S \rangle = v_S e^{i\theta}$$

クォークの質量行列は

$$\mathcal{L}_m = - (\bar{d}_{Li}, \bar{D}_L) \begin{pmatrix} \mathbf{m}_{ij} & \mathbf{0} \\ B_j & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_{Rj} \\ D_R \end{pmatrix} + \text{h.c.} \quad \mathbf{m}_{ij} \equiv y_{ij}^d v_H \quad B_j \equiv (g_j e^{i\theta} + g'_j e^{-i\theta}) v_S$$

複素なのは B_j のみ → $\det \mathcal{M} = M \det \mathbf{m} \in \mathbb{R} \rightarrow \bar{\theta}_s = 0$

一方、CKM行列に $\mathcal{O}(1)$ のCP角を出すには

$$B_j \sim M$$

またCKM行列におけるユニタリ性の破れは

$$\frac{\mathbf{m}^2}{M^2} \lesssim 10^{-3}$$

• クオリティ問題

ループや高次項を考えると $\bar{\theta}_s$ がゼロでなくなる

• ループ $V \supset \gamma_{SH} |H|^2 (S^2 + S'^2)$

$$\rightarrow \bar{\theta}_s \sim \frac{\gamma_{SH}}{32\pi^2} \sin(2\theta) \sum_i (g_i^2 - g_i'^2) \log \left(\frac{m_h^2}{m_\phi^2} \right)$$

γ_{SH} か g_i, g'_i を小さくする必要がある

• 高次項 $\mathcal{L} = \frac{c_i S + c'_i S^*}{\Lambda} H \bar{Q}_{Li} D_R + \text{h.c.} \rightarrow \bar{\theta}_s \sim \frac{v_S}{\Lambda}$

$$\rightarrow v_S \leq 10^8 \text{ GeV for } \Lambda = M_{\text{Pl}}$$

ドメインウォール形成を避けるには再加熱温度に上限

■ 近似的な離散対称性を課した模型

[Murai, Nakayama, 2407.16202]

• 模型の設定

ラグランジアンに入る項の種類は同じ:

$$\mathcal{L}_d = - \left[\epsilon^k M \bar{D}_L D_R + \epsilon^k (g_i S + g'_i S^*) \bar{D}_L d_{Ri} + y_{ij}^d H \bar{Q}_{Li} d_{Rj} + \text{h.c.} \right]$$

電荷	S	D_L	D_R	Q_{Li}	d_{Ri}	u_{Ri}	H	N_i	L_i	e_{Ri}
Z_4	2	2	2	0	0	0	0	1	1	1
$Z_{4n}^{(\text{app})}$	2n	2n	$2n - k$	k	k	k	k	n	n	n

新たに導入した離散対称性が近似的なものであるとする
対称性を破る項に小さな定数 $\epsilon \ll 1$ のべきがつく

高次項、ループ寄与とともに ϵ^{2k} の抑制

$$\epsilon^k \lesssim 10^{-5} \text{ なら } |\bar{\theta}_s| \lesssim 10^{-10}$$

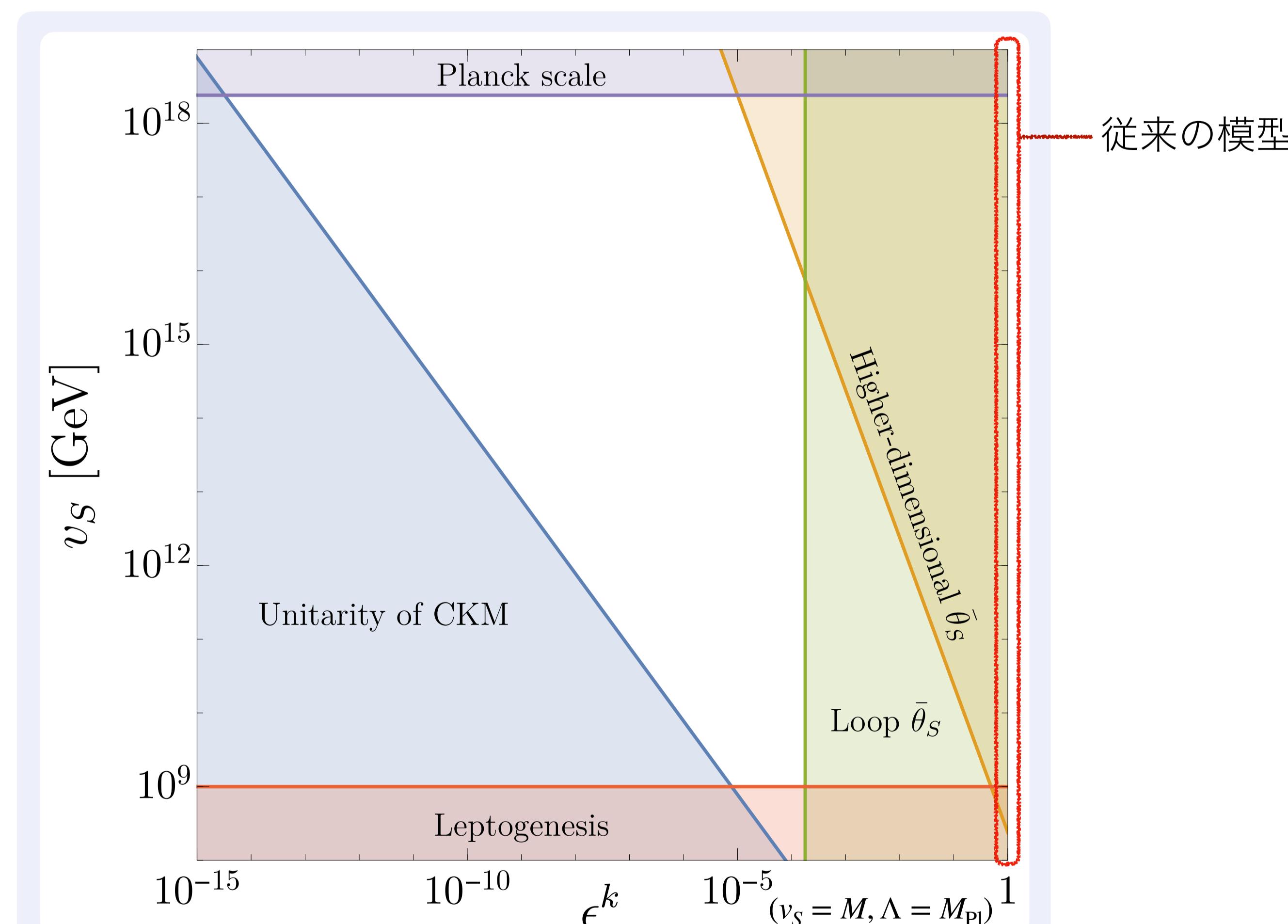
• レプトジェネシス

$$\mathcal{L}_l = - \left[\frac{1}{2} (\xi_{ij} S + \xi'_{ij} S^*) \bar{N}_i^c N_j + y_{ij}^\nu \tilde{H} \bar{L}_i N_j + y_{ij}^e H \bar{L}_i e_{Rj} + \text{h.c.} \right]$$

各項は $Z_4, Z_{4n}^{(\text{app})}$ について対称

Thermal leptogenesis の要請: $M_1 \gtrsim 10^9 \text{ GeV}, T_R \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$

→ $v_S \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$ であれば leptogenesis が可能



• ドメインウォール形成の回避

再加熱で $T \gtrsim v_S$ になったとしても

ハッブル質量項と有限温度効果次第で対称性が回復しない

$$V(S) \simeq - (2\lambda_S v_S^2 + c \mathcal{H}^2) |S|^2 - \frac{\lambda_{SH}}{6} T^2 |S|^2 + \lambda_S |S|^4$$
$$\mathcal{L} \supset c \frac{R}{12} |S|^2 \quad V \supset \lambda_{SH} |H|^2 |S|^2$$

• 複素スカラー場による $Z_{4n}^{(\text{app})}$ の実現

[Murai, Nakayama, 2412.19456]

Z_{4n} の電荷を持ったスカラー場 ϕ のVEVによって $\epsilon = \frac{\langle \phi \rangle}{\Lambda} \ll 1$.

$$\mathcal{L} \supset - \left(\frac{\phi}{\Lambda} \right)^k M \bar{D}_L D_R \rightarrow \text{NGボゾンが QCD axion として振る舞う}$$

$\bar{\theta}_s \ll 1$ を保った QCD アクションとドメインウォールの崩壊

→ 暗黒物質や重力波の生成