

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アクシオ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

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

Bento-Branco-Parada模型

[Bento, Branco, Parada (1991)]

模型の設定

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

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

$\left\{ \begin{array}{l} \text{CP対称性} \rightarrow M, g_i, g'_i, y_{ij}^d \text{ は実定数, } \theta_s = 0 \\ \text{Z}_2 \text{対称性} \rightarrow H \bar{Q}_{Li} D_R \text{ を禁止} \end{array} \right.$

電荷	S	D_L	D_R	Q_{Li}	d_{Ri}	u_{Ri}	H
Z_2	1	1	1	0	0	0	0

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

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

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

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 $V \supset \gamma_{SH} |H|^2 (S^2 + S^{*2})$

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

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	0	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と
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

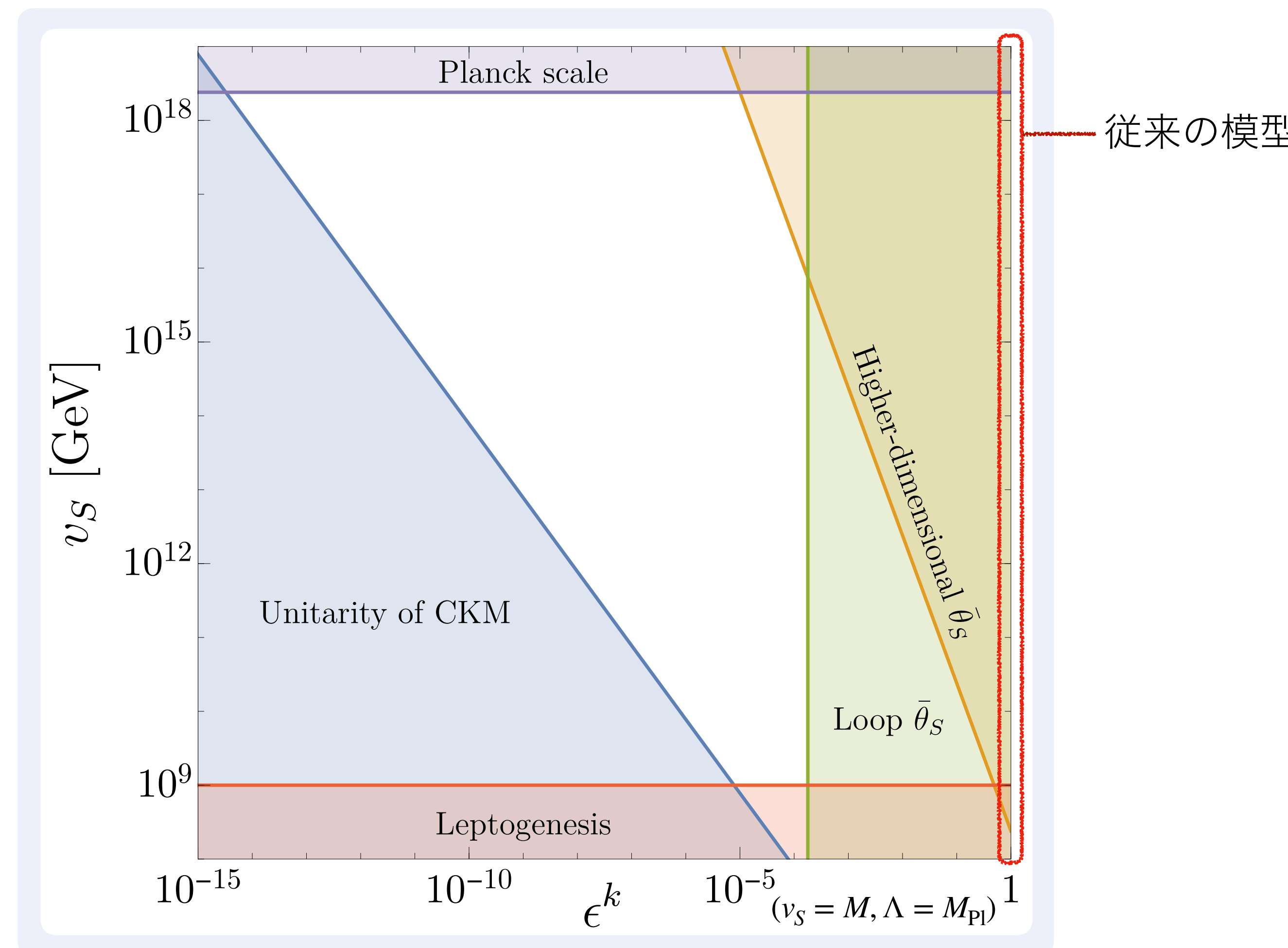
$$\mathcal{L}_l = - \left[\frac{1}{2} (\xi_{ij} S + \xi'_{ij} S^*) \bar{N}_i^c N_j + y_{ij}^\nu \tilde{H} \bar{L}_i N_j + y_{ij}^e H \bar{L}_i e_{Rj} + \text{h.c.} \right]$$

→ Complex

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 $\epsilon = \frac{\langle \phi \rangle}{\Lambda} \ll 1$

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

$\bar{\theta}_s \ll 1$ を保ったQCDアクシオンドメインウォールの崩壊

→ 暗黒物質や重力波の生成