



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



ICTP-AP
INTERNATIONAL CENTRE FOR
THEORETICAL PHYSICS ASIA-PACIFIC

Heavy axion from asymmetric mirror confinement

Teng Ma (马腾)

中国科学院大学，亚太理论物理中心

Collaborators: G. Cacciapaglia, C. Csáki

2026 年 8 月 27 日

强 CP 问题：可观测的是 $\bar{\theta}$

QCD 允许 CP-odd 拓扑项：

$$\mathcal{L}_\theta = \frac{\theta g_s^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}.$$

相位不只是裸 θ

SM Yukawa 项含有复相位；手征旋转会同时移动 θ 与 Yukawa 行列式相位，因此物理组合是

$$\bar{\theta} = \theta - \arg \det(y_u y_d).$$

实验约束

中子 EDM 未观测到要求

$$|\bar{\theta}| \lesssim 10^{-10},$$

而自然参数空间中一般预期 $\mathcal{O}(1)$ 。

核心结论

强 CP 问题的核心是：为什么 QCD 真空角与 Yukawa 相位的物理组合被高精度调到零？

Peccei–Quinn 机制：把 $\bar{\theta}$ 变成动力学变量

引入反常全局对称性 $U(1)_{PQ}$ ，自发破缺后产生轴子：

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(f_a + S)e^{ia/f_a}.$$

轴子通过反常耦合进入 QCD：

$$\mathcal{L} \supset \frac{\alpha_s}{8\pi} \left(\bar{\theta} + \kappa \frac{a}{f_a} \right) G\tilde{G}.$$

QCD 产生势能

$$V_{\text{QCD}}(a) \simeq \chi_{\text{QCD}} \left[1 - \cos \left(\bar{\theta} + \kappa \frac{a}{f_a} \right) \right].$$

势能最小化自动选择 $\bar{\theta}_{\text{eff}} = 0$ 。

传统 QCD axion 的质量为什么很轻?

QCD axion 的质量由 QCD 拓扑易感率控制:

$$m_a^2 f_a^2 = \chi_{\text{QCD}}, \quad m_a \sim \frac{m_\pi f_\pi}{f_a}.$$

约束导致轻质量

通常有

$$f_a \gtrsim 10^9 \text{ GeV}, \quad m_a \lesssim 10^{-3} \text{ eV}.$$

后果

势能尺度 $m_a^2 f_a^2$ 很小, 任何额外 PQ 破缺都可能移动真空, 使 $\bar{\theta} \neq 0$, 即 Axion quality problem。

Axion quality problem: Planck 尺度修正的威胁

量子引力一般不保护全局对称性，因此可诱导 PQ 破缺算符：

$$\mathcal{O}_{4+n} = c \frac{(\phi^\dagger \phi)^{(n+4-q)/2} \phi^q}{M_{\text{Pl}}^n} + \text{h.c.} \quad \phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(f_a + S)e^{ia/f_a}$$

它会贡献额外轴子势：

$$\Delta V(a) = -\Delta \cos\left(q \frac{a}{f_a} + \delta\right), \quad \Delta \sim \frac{f_a^{4+n}}{M_{\text{Pl}}^n}.$$

真空偏移与 quality 条件

$$\Delta \bar{\theta} \approx \frac{\Delta}{m_a^2 f_a^2} \sim \frac{f_a^{2+n}}{m_a^2 M_{\text{Pl}}^n} \stackrel{!}{\lesssim} 10^{-10}.$$

因此最低允许的 n 近似为

$$n_{\min} \simeq \left\lceil \frac{10 + 2 \log_{10}(f_a/\text{GeV}) - 2 \log_{10}(m_a/\text{GeV})}{\log_{10}(M_{\text{Pl}}/\text{GeV}) - \log_{10}(f_a/\text{GeV})} \right\rceil.$$

这里默认 $|c| \sin \delta \sim \mathcal{O}(1)$ ，且忽略 $\mathcal{O}(1)$ 系数；算符维数为 $d = 4 + n$ 。

普通 QCD axion 对低维 PQ 破缺非常敏感

用普通 QCD axion 关系

$$m_a^{\text{QCD}} \simeq 5.7 \mu\text{eV} \left(\frac{10^{12} \text{ GeV}}{f_a} \right)$$

代入 quality 条件, 可得到典型要求:

f_a [GeV]	m_a^{QCD}	n_{min}	$d_{\text{min}} = 4 + n_{\text{min}}$
10^9	$\sim 6 \times 10^{-3} \text{ eV}$	5–6	9–10
10^{10}	$\sim 6 \times 10^{-4} \text{ eV}$	~ 7	~ 11
10^{11}	$\sim 6 \times 10^{-5} \text{ eV}$	~ 8	~ 12
10^{12}	$\sim 6 \times 10^{-6} \text{ eV}$	~ 9	~ 13

这就是 quality problem

若没有额外机制, 维数 $d \lesssim 9\text{--}13$ 的 Planck-suppressed PQ-breaking 算符都可能把 axion 真空从 $\bar{\theta} = 0$ 推开。heavy axion 的核心好处是增大 $m_a^2 f_a^2$, 从而显著降低这个维数要求。

Heavy axion 的逻辑：增大 $m_a^2 f_a^2$ 而不移动 CP 真空

quality problem 给出的目标

Planck-suppressed PQ breaking 产生额外势能尺度 Δ ，真空偏移为

$$\Delta\bar{\theta} \approx \frac{\Delta}{m_a^2 f_a^2} \sim \frac{f_a^{2+n}}{m_a^2 M_{\text{Pl}}^n}.$$

普通 QCD axion

$$m_a^2 f_a^2 = \chi_{\text{QCD}}.$$

χ_{QCD} 很小，因此同一个 Δ 容易导致 $|\Delta\bar{\theta}| > 10^{-10}$ ，这就是 quality problem。

Heavy axion

引入相位对齐的新强动力学势能：

$$V_{\text{aligned}} \simeq \chi_{\text{eff}} [1 - \cos(\bar{\theta} + a/f_a)], \quad \chi_{\text{eff}} \gg \chi_{\text{QCD}}.$$

于是 $m_a^2 f_a^2 = \chi_{\text{eff}}$ 变大，而极小值仍在 $\bar{\theta} + a/f_a = 0$ 。

核心结论

heavy axion 缓解 quality problem 的关键是增大公式分母 $m_a^2 f_a^2$ ，同时保持 CP 极小值与 QCD 对齐。

为什么 mirror symmetry 是自然的相位对齐机制？

考虑可见扇区与 mirror 扇区：

$$G_{\text{vis}} \times G_{\text{mir}}, \quad Z_2 : \text{vis} \leftrightarrow \text{mir}.$$

镜像对称的作用

- 高能处两边的 θ 角相同；
- 两边的 Yukawa 相位由同一个结构决定；
- 同一个 axion 同时耦合到 QCD 与 mirror gauge group。

$$\text{Physical } \bar{\theta} : \quad \theta_{\text{vis}} - \arg \det Y_{\text{vis}} = \theta_{\text{mir}} - \arg \det Y_{\text{mir}}$$

对应的 axion 势能

$$V(a) \simeq -\chi_{\text{QCD}} \cos\left(\bar{\theta}_{\text{vis}} + \frac{a}{f_a}\right) - \chi_{\text{mir}} \cos\left(\bar{\theta}_{\text{mir}} + \frac{a}{f_a}\right).$$

$$Z_2 : \bar{\theta}_{\text{vis}} = \bar{\theta}_{\text{mir}}, \quad \chi_{\text{mir}} \gg \chi_{\text{QCD}}.$$

关键

mirror 势能提高 axion 质量；相位对齐保证势能最小点仍对应 $\bar{\theta} = 0$ 。

已有 heavy-axion 模型的主要代价：人为尺度层级

相位对齐后的剩余问题

mirror symmetry 可以使新势能与 QCD 的 CP 极小值对齐；此时 heavy axion 构造的关键问题转为如何自然地产生

$$\chi_{\text{mir}} \gg \chi_{\text{QCD}}.$$

已有模型中常见的 tuning 来源

在许多已有构造中，这通常需要人为输入非对称尺度，例如

$$v' \gg v, \quad \Lambda'_{\text{QCD}} \gg \Lambda_{\text{QCD}}, \quad M'_{\text{GUT}} \neq M_{\text{GUT}}.$$

这些层级往往来自软/显式 Z_2 -breaking masses、Higgs/GUT breaking 参数或 mirror fermion thresholds；如果它们只是独立输入，就需要额外调节并稳定这些尺度。

核心结论

本工作的切入点是：不把 mirror 低能尺度作为独立输入，而让未破缺 mirror SU(5) 通过 RG running 动力学生成大 susceptibility。

已有 heavy-axion 路线的主要困难

路线	主要困难
独立新强扇区	新 confining group 可给大势能，但它通常有独立 CP-odd invariant；若极小值不与 QCD 对齐，heavy axion 不能解决 strong CP。
color-unified / enlarged color	共同 color 起源可帮助相位对齐；但 small-instanton 贡献常带 Yukawa 抑制， m_a 提升效率有限。
mirror QCD 或 mirror GUT	Z_2 自然给出相位对齐；剩余问题是如何产生 $\chi_{\text{mir}} \gg \chi_{\text{QCD}}$ ，而不把 mirror 谱或破缺尺度作为独立调节参数。

本工作的定位

采用 mirror-GUT 方向：保留 Z_2 给出的相位对齐，但把大 susceptibility 的来源交给未破缺 mirror SU(5) 的禁闭动力学。

核心结论

已有路线的共同 tension 是：既要抬高 m_a ，又不能把相位或尺度层级变成新的调节。

一般机制: asymmetric mirror confinement

核心物理图像

该机制不在拉氏量中引入两个独立尺度, 而是在同一个 Z_2 -symmetric UV 理论中通过真空选择产生非对称分支。

1. UV: 精确 mirror 对称

$$G_{\text{vis}} \times G_{\text{mir}}, \quad Z_2 : \text{vis} \leftrightarrow \text{mir}.$$

两边的 gauge coupling、 θ 角和 Yukawa 结构在高能配对。

2. 真空: 自发非对称

标量势允许简并真空; 物理分支选择

$$\langle \Phi \rangle \neq 0, \quad \langle \hat{\Phi} \rangle = 0.$$

因此可见侧破缺, 而 mirror 侧不破缺。

3. IR: mirror 禁闭

未破缺的 mirror gauge group 继续 running, 并在红外禁闭:

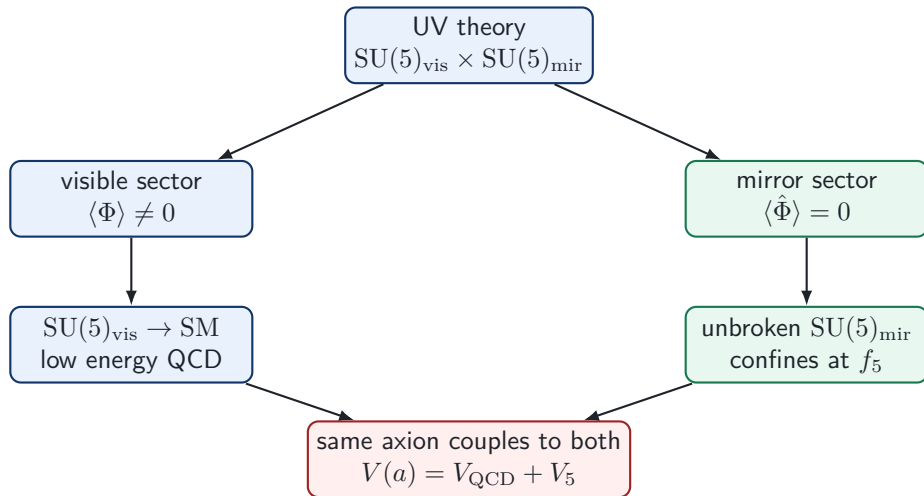
$$G_{\text{mir}} \xrightarrow{\text{RG}} \Lambda_{\text{mir}}.$$

新尺度由 gauge dynamics 生成。

核心结论

非对称来自真空选择; 新强尺度来自 mirror running。下一步将该一般机制嵌入 $SU(5)$ GUT。

应用到 $SU(5)$ GUT: 可见侧破缺, mirror 侧禁闭



自发破缺 mirror Z_2 : 不用显式破坏镜像对称

引入 GUT breaking scalar 与其 mirror partner: $\Phi, \hat{\Phi}$.

$$\mathcal{L} \supset -\lambda_{\Phi} \left[V(\Phi) + V(\hat{\Phi}) \right] + \xi \operatorname{Tr}(\Phi^{\dagger} \Phi) \operatorname{Tr}(\hat{\Phi}^{\dagger} \hat{\Phi}),$$

$$V(X) = (\operatorname{Tr}[X^{\dagger} X] - \mu^2)^2.$$

非对称真空

若

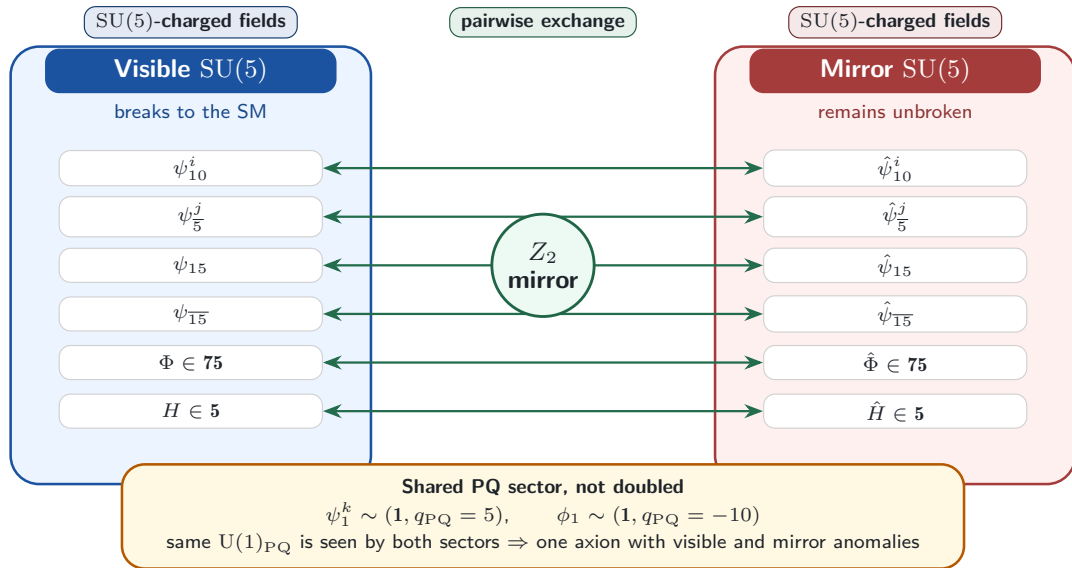
$$\xi > 2\lambda_{\Phi},$$

有两个简并极小值:

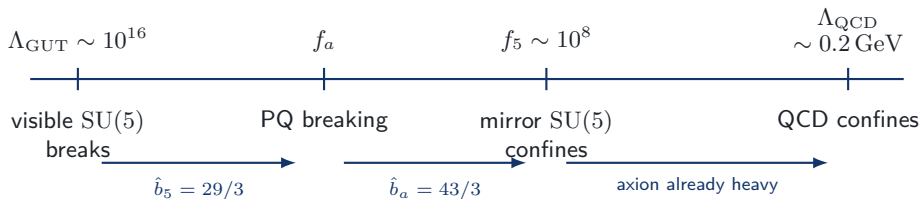
$$\langle \Phi \rangle \neq 0, \langle \hat{\Phi} \rangle = 0 \quad \text{or} \quad \langle \Phi \rangle = 0, \langle \hat{\Phi} \rangle \neq 0.$$

选择第一支作为我们宇宙: 可见 GUT 破缺, mirror GUT 未破缺。

模型输入: Z_2 配对结构与单一 PQ axion



尺度生成：同一个 axion 先在 mirror 侧变重



因果关系

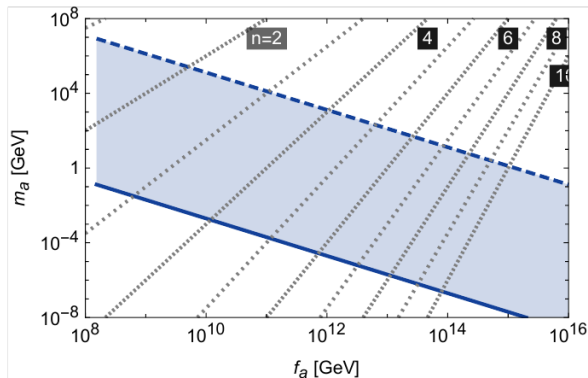
单一 PQ axion 同时耦合可见 QCD 与 mirror SU(5)。由于 mirror SU(5) 未破缺并更早禁闭， f_5 先产生主导 axion 势能；低能 QCD 势能只是在 Λ_{QCD} 附近加入小修正，因此

$$m_a^2 f_a^2 \simeq \chi_5 \gg \chi_{\text{QCD}}.$$

由 running 得到的新尺度

$$f_5 = \Lambda_{\text{GUT}} \left(\frac{\Lambda_{\text{QCD}}}{\Lambda_{\text{GUT}}} \right)^{7/\hat{b}_a} \simeq 1.54 \times 10^8 \text{ GeV}$$

Fig. 2: heavy axion 提高 PQ 对 Planck 修正的稳定性



图的物理含义

蓝色阴影区给出 mirror SU(5) 模型可实现的 (f_a, m_a) 范围；灰色虚线给出不破坏强 CP 解所需的 Planck 压低算符最低维数 $d = 4 + n$ 。

Quality 条件

Planck-suppressed PQ-breaking operator 诱导

$$\Delta\bar{\theta} \sim \frac{f_a^{2+n}}{m_a^2 M_{\text{Pl}}^n} \lesssim 10^{-10}.$$

因此，在固定 f_a 时， $m_a^2 f_a^2$ 越大， $\Delta\bar{\theta}$ 越小。

mirror SU(5) 的改进

未破缺 mirror GUT 动态禁闭给出

$$m_a^2 f_a^2 \simeq \chi_5 \gg \chi_{\text{QCD}}.$$

所以同样的 Planck 修正造成更小的真空偏移：

$$f_a = 10^9 \text{ GeV} \Rightarrow n \simeq 2-3.$$

CP 对齐: loop-induced $\Delta\bar{\theta}$ 仍然可控

tree-level: 同一个 CP invariant

$\mathbb{Z}_2$ 在 UV 树图层面给出

$$\bar{\theta}_{\text{vis}} = \bar{\theta}_{\text{mir}} \equiv \bar{\theta},$$

同一个 a/f_a 进入两侧 anomaly。

loop level: radiative misalignment 的量级

$$\Delta\bar{\theta} = \Im \text{Tr}(M^{-1}\delta M).$$

SM-like/GUT Yukawa running 给出

$$\delta\bar{\theta}_{\text{SM-like}} \lesssim 10^{-20}.$$

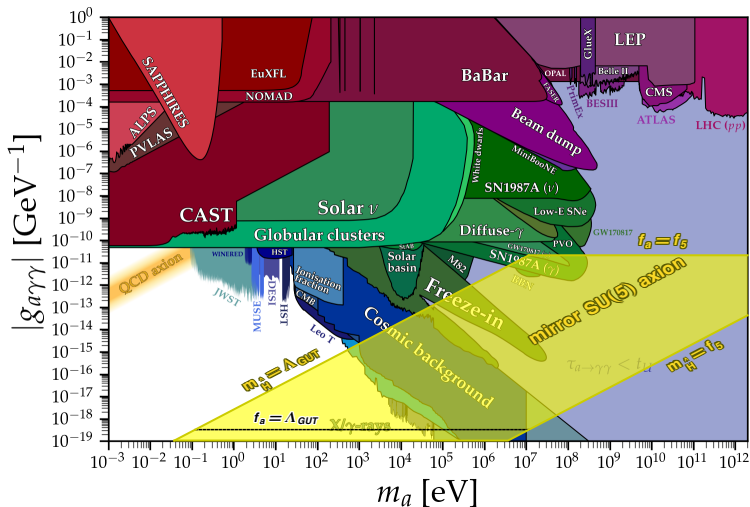
新的六 Yukawa invariant J_6 在 mirror-visible RG 失配中以 3-loop 出现, 其贡献满足

$$\delta\bar{\theta}_{J_6} \lesssim 10^{-8} (y_1 y_1 y_{15} y_{15}).$$

结果

因此若 $(y_1 y_1 y_{15} y_{15}) \lesssim 10^{-2}$, 就满足 $|\bar{\theta}| < 10^{-10}$ 的实验限制。

Fig. 3: heavy but weakly coupled axion 参数空间



核心信息: 黄色 band 是 mirror SU(5) axion 预测区。普通 QCD axion 满足 $m_a f_a \simeq m_\pi f_\pi$, 而本模型中 $m_a^2 f_a^2 \simeq \chi_5 \gg \chi_{\text{QCD}}$, 而 $g_{a\gamma\gamma} = \alpha_{\text{em}}(8/3)/(2\pi f_a)$ 。因此可以得到 m_a 更大、但 $g_{a\gamma\gamma}$ 仍小的 heavy axion。

Domain wall 问题：两个来源

宇宙学约束来自两个离散简并

模型中有两次可能留下 domain-wall 网络的步骤：

mirror Z_2 的自发非对称选择, $U(1)_{PQ}$ 破缺后的离散真空.

1. GUT 尺度 Z_2 wall

- 来源：visible 与 mirror 两个简并真空。
- 风险：显式 bias 可能重新污染 strong CP。
- 保守处理：

$$T_{RH} < \Lambda_{GUT}.$$

2. PQ domain wall

- 来源：PQ anomaly/domain-wall number $N > 1$ 。
- 原型模型： $N = 7$ 。
- 需要避免稳定 wall 网络：

$$T_{RH} < f_5 \quad \text{or} \quad \text{quality-safe bias.}$$

核心信息

最干净的 cosmology 是让再加热温度低于相应破缺/禁闭尺度，使危险网络从一开始不形成。

SU(4) axionless 分支

最小设定

UV 中保留 mirror Z_2 , 真空选择 visible 方向破缺:

$$\mathrm{SU}(4)_C \times \mathrm{U}(1)_R \rightarrow \mathrm{SU}(3)_c \times \mathrm{U}(1)_Y.$$

mirror color 保持未破缺, 并在 f_4 禁闭。

额外 vectorlike pair 与 singlet scalar 相互作用:

$$y_P \phi (PP^c + \hat{P}\hat{P}^c) + \text{h.c.}$$

后续 P 质量来自 mirror confinement 诱导的 IR threshold。

UV 判据: $\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$ 没有自发破缺

$$m_{\phi, \text{eff}}^2 > 0, \quad \langle \phi \rangle_{\text{pert}} = 0.$$

为什么没有 elementary axion?

- UV/perturbative theory 中 $\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$ 没有自发破缺; ϕ 不是 PQ order parameter。
- 因而没有 elementary Nambu–Goldstone axion。
- 低能相位自由度来自 mirror confinement, 而不是 UV PQ pNGB。

SU(4) axionless: η' 是消除 theta 的 scalar

禁闭后出现的相位自由度

mirror $\widehat{\text{SU}(4)}_C$ 禁闭后, IR 中出现 anomalous singlet scalar η' 。它同时进入 mirror anomaly 与可见 QCD 的 theta-like 组合:

$$V_{\text{IR}}(\eta') \simeq \chi_4 \left[1 - \cos(\hat{\theta}_4 - 7\eta') \right] + \chi_{\text{QCD}} \left[1 - \cos(\bar{\theta}_{\text{vis}} - 7\eta') \right].$$

在 aligned branch 中, UV matching 使两项依赖同一个相位组合。极小化给出

$$\hat{\theta}_4 - 7\langle\eta'\rangle = 0, \quad \bar{\theta}_{\text{vis}} - 7\langle\eta'\rangle = 0.$$

由此可见 QCD 中的 theta 也由 composite η' 消除。

与传统 QCD axion 的区别

- 传统 axion 是 elementary PQ pNGB, 轻场 a/f_a 动力学松弛 $\bar{\theta}$ 。
- 这里没有 elementary PQ axion; η' 是 mirror confinement 产生的 heavy anomalous singlet。
- η' 的质量来自 mirror anomaly, $m_{\eta'}^2 \sim \chi_4/F_4^2 \sim f_4^2$, 因此不是 light QCD axion。

核心要点

一句话总结

asymmetric vacuum $\Rightarrow$ unbroken mirror SU(5) $\Rightarrow$ RG confinement $f_5 \Rightarrow$ heavy aligned axion.

1. 核心机制

可见 SU(5) 破缺到 SM; mirror SU(5) 保持未破缺, 并在 f_5 动态禁闭。

3. 重轴子与 quality

mirror confinement 主导 axion 势能, 使 m_a 可达 GeV 量级, 并缓解 Planck-suppressed PQ breaking。

2. 动力学生成

f_5 来自 RG running / dimensional transmutation, 不是人为设置的 mirror 破缺尺度。

4. 强 CP 仍被解决

mirror symmetry 保证新势能与 QCD 相位对齐; 辐射与阈值修正在原型模型中可控。

扩展方向

SU(4) axionless 分支中, η' 扮演 axion-like 相位匹配角色, 但不是 light QCD axion。

谢谢！

Thank you for your attention.