

Cosmologically safe QCD axion as a present from extra dimension

山田 將樹

東京大学 宇宙線研究所



共同研究者: 川崎雅裕 (宇宙線研), 柳田勉 (Kavli IPMU),

Phys.Lett. B750 (2015) 12 [hep-ph/1506.05214]

目次

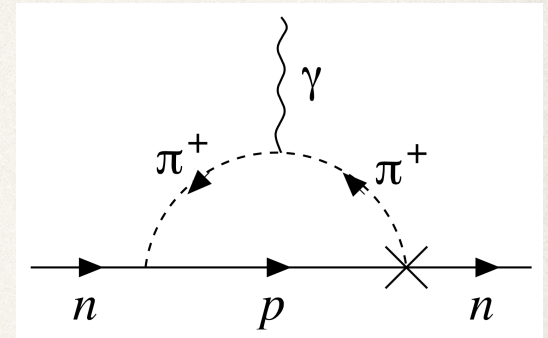
- introduction (strong CP 問題とPQ機構)
 - PQ 対称性の起源と破れのスケール
 - 宇宙論的問題
- 余剰次元による解決
- まとめ

Introduction: strong CP 問題

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \supset \frac{\theta g_s^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

$$\text{Neutron EDM} \rightarrow |\theta_{\text{QCD}}| \lesssim 10^{-(10-11)}$$

Baker et. al. 06



Peccei-Quinn 機構による説明:

Peccei and Quinn '77

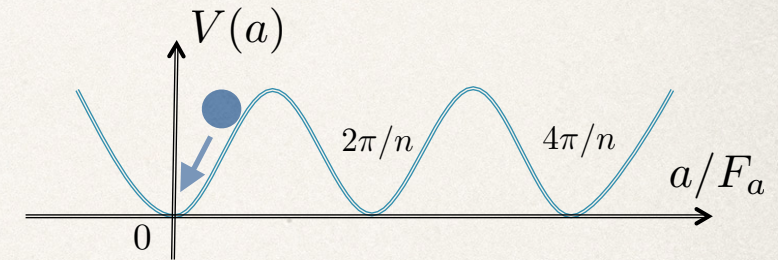
$U(1)_{\text{PQ}}$ のSSBで現れる擬NGボソン (axion) で θ_{QCD} を相殺する.

$U(1)_{\text{PQ}} [SU(3)_c]^2$ anomaly
を持つ global symmetry.

$$\phi Q Q \bar{Q}$$

$$U(1)_{\text{PQ}} : -2 \quad 1 \quad 1$$

$$SU(3)_c : \mathbf{1} \quad \mathbf{3} \quad \bar{\mathbf{3}}$$



しかし

$U(1)_{\text{PQ}}$ が少しでも破れていたら
strong CP 問題は解決しない:

$$M_Q Q Q \bar{Q} \rightarrow M_Q \ll 10^{-45} \text{ GeV}$$

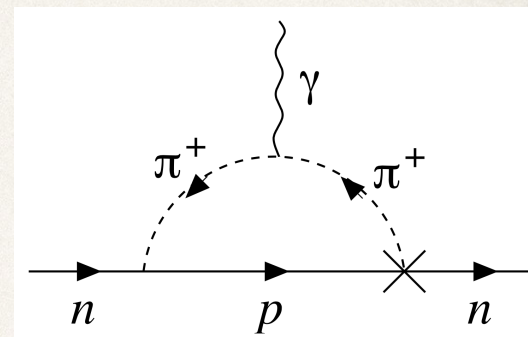
$$\lambda \frac{\phi^n}{M_{\text{Pl}}^{n-4}} \rightarrow \lambda \lesssim 10^{-86+6n} \left(\frac{\langle \phi \rangle}{10^{-6} M_{\text{Pl}}} \right)^{-n}$$

Introduction: strong CP 問題

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} \supset \frac{\theta g_s^2}{32\pi^2} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu}$$

$$\text{Neutron EDM} \rightarrow |\theta_{\text{QCD}}| \lesssim 10^{-(10-11)}$$

Baker et. al. 06



Peccei-Quinn 機構による説明:

Peccei and Quinn '77

$U(1)_{\text{PQ}}$ のSSBで現れる擬NGボソン (axion) で θ_{QCD} を相殺する。

$U(1)_{\text{PQ}} [SU(3)_c]^2$ anomaly
を持つ global symmetry.

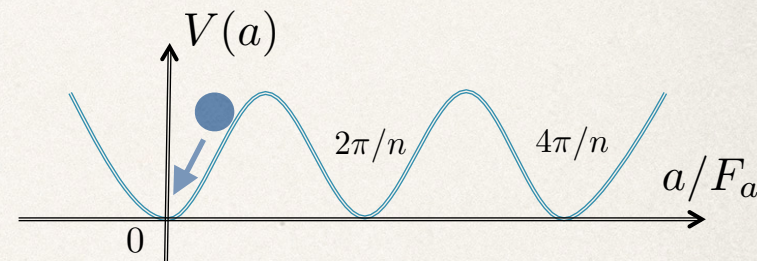
$$\phi Q \bar{Q}$$

$$U(1)_{\text{PQ}} : -2 \quad 1 \quad 1$$

$$SU(3)_c : \mathbf{1} \quad \mathbf{3} \quad \bar{\mathbf{3}}$$

しかし

$U(1)_{\text{PQ}}$ はどこから?



● Z_N 対称性 ($N = 13$)?

● gauge対称性? (一般に煩雑になる)

Holeman et.al. 92, Randall 92, Barr, Seckel 92, Harigaya, Ibe, Schmitz, yanagida 15

● 5次元時空?

Izawa, Watari, Yanagida, 02, Choi 03

Introduction: 宇宙論的問題

axionでDMも説明できる:

$$\Omega_a h^2 \sim 0.1 |\theta_0|^2 \left(\frac{F_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.19}$$

しかし

なぜこのスケールなのか?

さらに

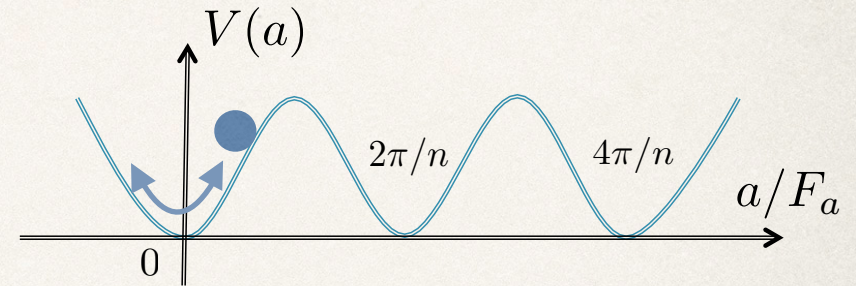
多くの場合に宇宙論的な問題も現れてしまう:

Case A: $U(1)_{\text{PQ}}$ がインフレーション中に破れていた場合:

→ 等曲率ゆらぎの問題

Case B: $U(1)_{\text{PQ}}$ がインフレーション後に破れた場合.

→ domain wall 問題



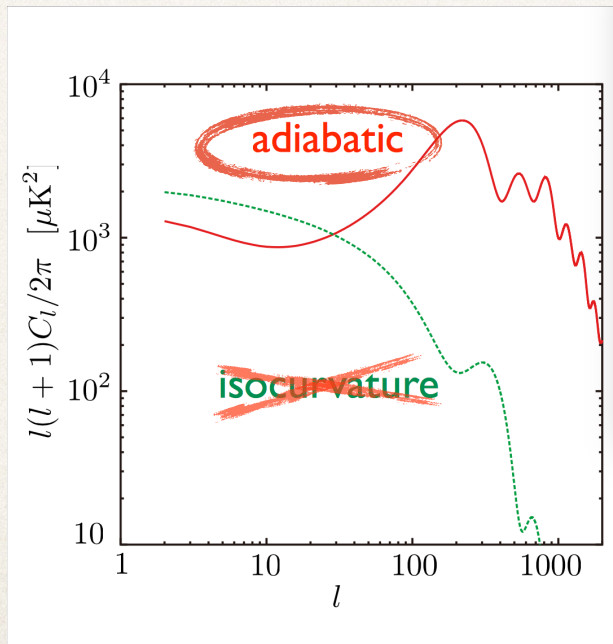
Introduction: 宇宙論的問題 - 等曲率揺らぎの問題

Case A: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション中に破れていた場合

axionは軽いのでインフレーション中にゆらぎを持つ

-> 等曲率ゆらぎとしてCMBゆらぎに寄与してしまう。

$$\delta a \simeq \frac{H_{\text{inf}}}{2\pi} \longrightarrow S = \frac{\delta\rho_m}{\rho_m} - \frac{3\delta\rho_\gamma}{4\rho_\gamma} = \frac{\Omega_a}{\Omega_m} \frac{\delta\rho_a}{\rho_a} \simeq 0.06 \frac{H_{\text{inf}}}{v_a}$$



$$\longrightarrow H_{\text{inf}} \lesssim 10^7 \text{ GeV}$$

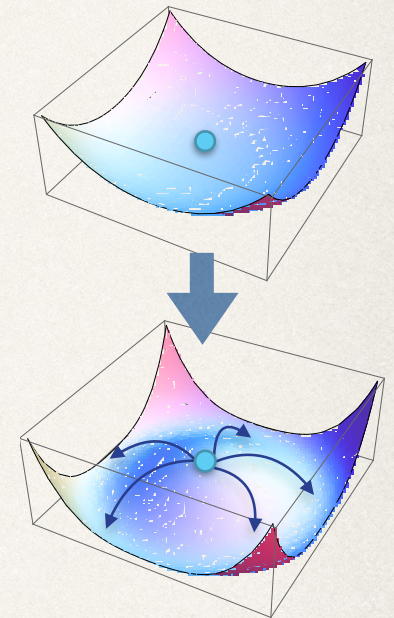
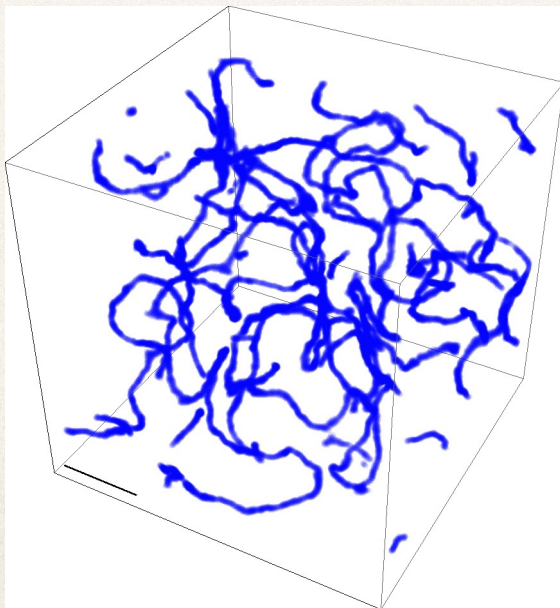
Planck '14

$$\text{cf) } H_{\text{inf}} \simeq 10^{14} \text{ GeV} \left(\frac{r}{0.1} \right)^{1/2}$$

Introduction: 宇宙論的問題 - domain wall 問題

Case B: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション後に破れた場合

$U(1)_{PQ}$ が破れるときにcosmic stringが形成される



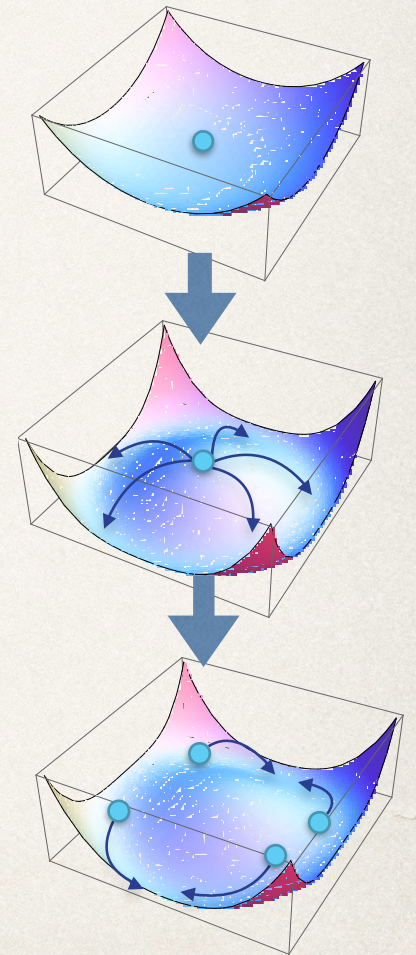
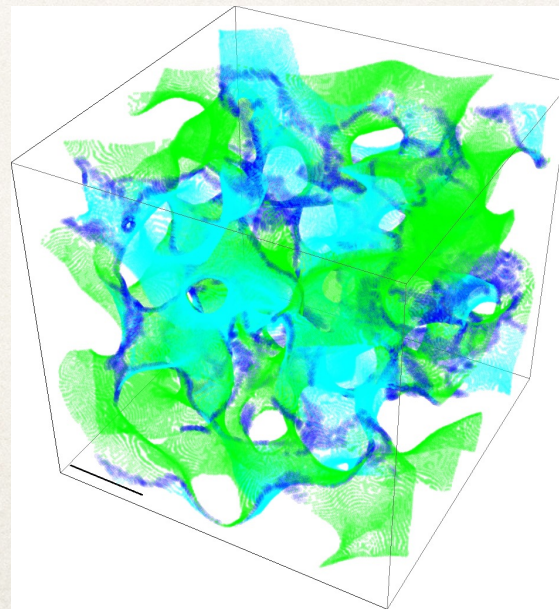
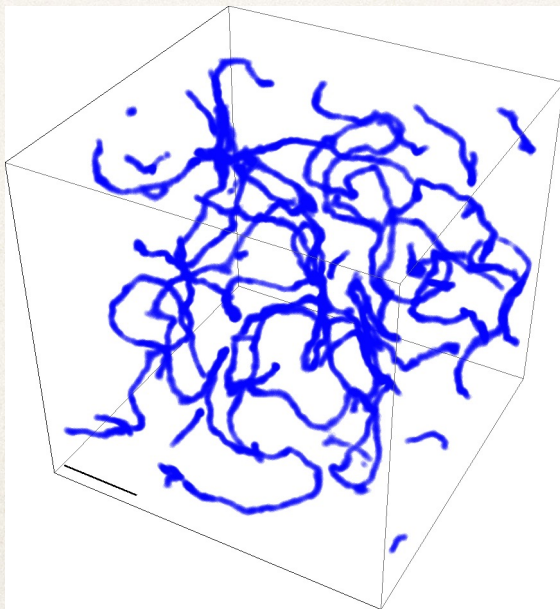
Introduction: 宇宙論的問題 - domain wall 問題

Case B: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション後に破れた場合

$U(1)$

さらに、QCD相転移のときに $U(1)_{PQ} \rightarrow Z_{PQ}$ に破れる

➡ domain wallが形成される



Introduction: 宇宙論的問題 - domain wall 問題

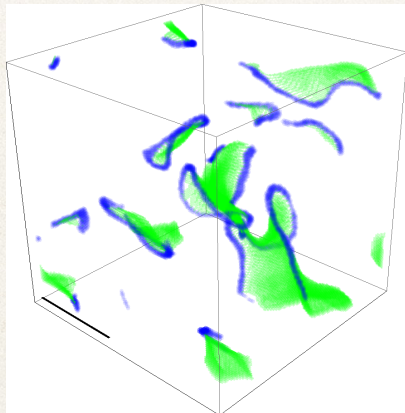
Case B: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション後に破れた場合

$U(1)$

さらに、

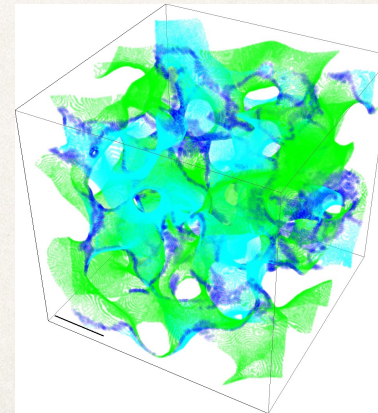
→ domain wallが形成される

Case B-1: $U(1)_{PQ} \rightarrow \text{Nothing}$
(cf. KSVZ model)



すぐに消えてくれるのでOK.

Case B-2: $U(1)_{PQ} \rightarrow Z_n$
(cf. DFSZ model ($n=6$))




安定に残ってしまっていて問題.


PQ 機構によって strong CP 問題を解決し、
axion で DM を説明するためには:

- $U(1)_{PQ}$ の起源を説明し、
- $F_a \sim 10^{12}$ GeV のエネルギースケールも自然に与え、
- 以下の宇宙論的問題も解決しなければならない:

Case A: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション中に破れていた場合:
等曲率ゆらぎの問題

Case B: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション後に破れた場合.

-1: $U(1)_{PQ} \rightarrow \text{nothing}$  問題なし

-2: $U(1)_{PQ} \rightarrow Z_n$ ($n > 1$)  domain wall 問題

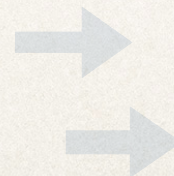
PQ 機構によって strong CP 問題を解決し、
axion で DM を説明するためには:

- U(1)

- $F_a \sim 10^{12}$ GeV

- 余剰次元を入れて解決する

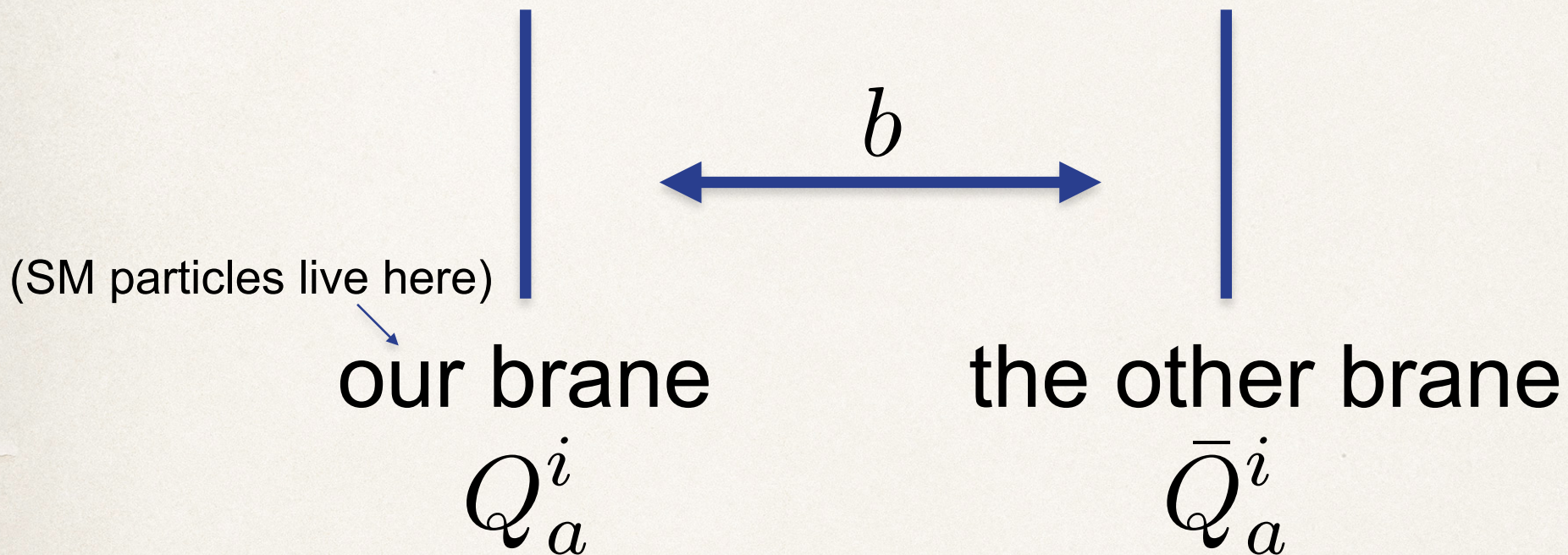
- 以下の予田論的問題も解決しなければならない



5次元時空のモデル - PQ対称性の起源

Izawa, Watari, Yanagida, 02

4次元時空 \times 5th dimension S/Z_2



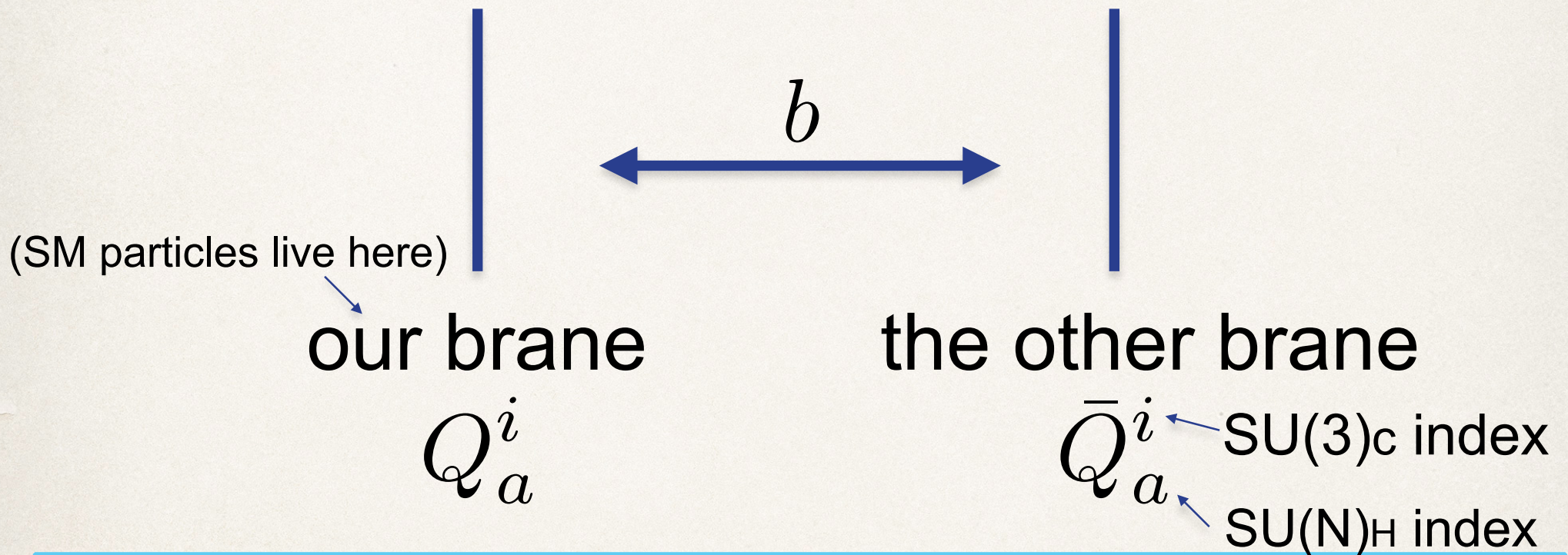
$$M_Q Q \bar{Q} + \text{H.c.}$$

$\sim b^{-1} e^{-M_5 b}$ 小さい \rightarrow accidental $U(1)_{\text{PQ}}$

5次元時空のモデル - PQ対称性の起源

Izawa, Watari, Yanagida, 02

4次元時空 \times 5th dimension S/Z_2



強い $SU(N)_H$ ゲージ相互作用を導入し,
chiral condensationを仮定: $\langle Q\bar{Q} \rangle = v_a^3$

\rightarrow dynamical に $U(1)_{PQ}$ が破れてくれる.

$(F_a \sim v_a)$ cf) Kim 85

5次元時空のモデル - 宇宙論的問題の解決

5次元時空を考えることによって
 $U(1)_{PQ}$ の起源を説明できている.

→ 宇宙論的問題についてはどうか？

Case A: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション中に破れていた場合:
等曲率ゆらぎの問題

Case B: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション後に破れた場合.

$SU(N)_H$ で chiral condensate させる $\rightarrow N_{DW} = N$

-2: $U(1)_{PQ} \rightarrow Z_n$ ($n > 1$) → domain wall 問題

5次元時空のモデル - 宇宙論的問題の解決

5次元時空を考えることによって
 $U(1)_{PQ}$ の起源を説明できている。

→ 宇宙論的問題についてはどうか？

Case A: $U(1)_{PQ}$ がインフレーション中に破れていた場合:

等曲率ゆらぎの問題

本研究では

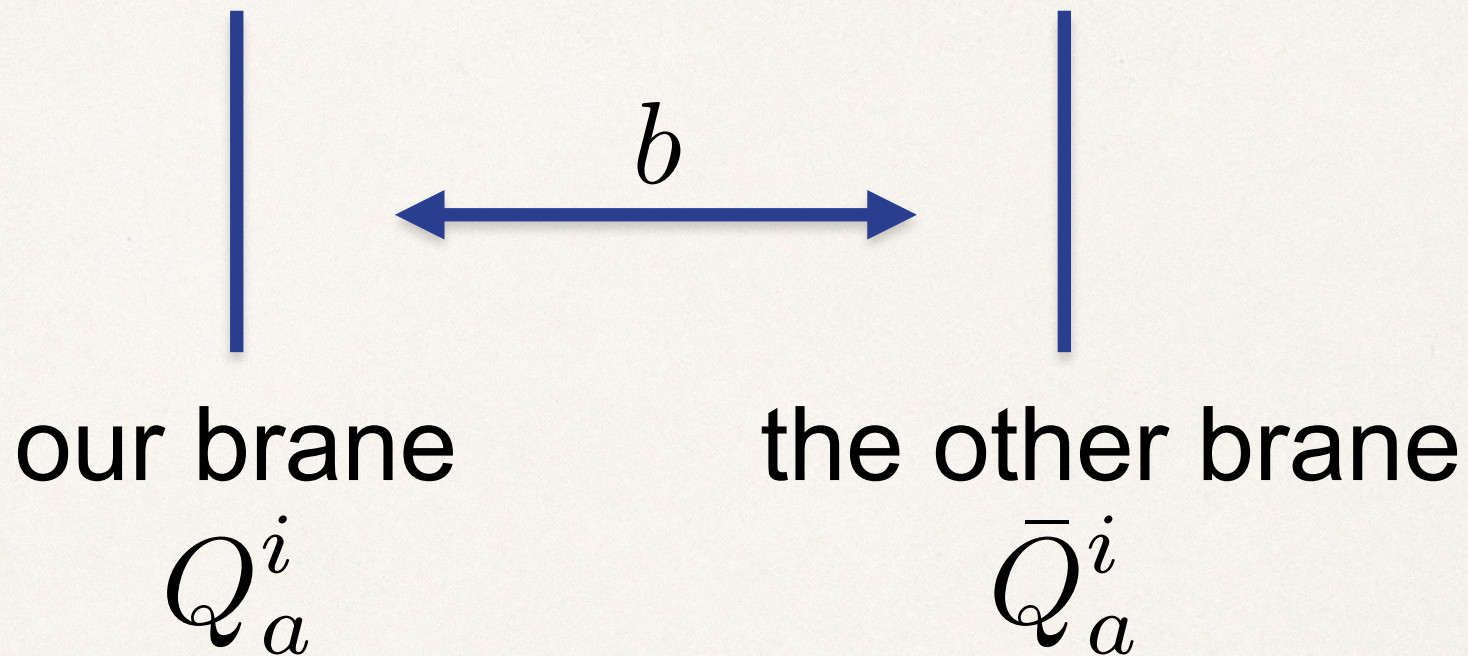
Kawasaki, M.Y. Yanagida 15

このモデルで等曲率ゆらぎを抑える方法を提案.

→ Case A での宇宙論的問題が解決された.

5次元時空のモデル - 等曲率揺らぎの問題の解決

Kawasaki, M.Y. Yanagida 15



アイデア

$$M_Q Q \bar{Q} + \text{H.c.}$$

$\sim b^{-1} e^{-M_5 b}$

インフレーション中に b が小さければ、
 $U(1)_{PQ}$ が大きく破れて axion が massive に
→ axion の揺らぎが抑制される

5次元時空のモデル - 等曲率揺らぎの問題の解決

Kawasaki, M.Y. Yanagida 15

Goldberger-Wise機構で余剰次元の大きさを”固定”する:

Goldberger and Wise (1999)

$$S = \int d^5x \sqrt{g_5} \left(-\frac{M_5^3}{2} R + \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - \frac{m_\Phi^2}{2} \Phi^2 \right)$$

$$- \int_{y=0} d^4x \sqrt{-g_4} V_0(\Phi)$$



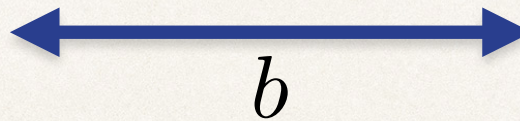
$$\Phi|_{y=0} = v_0$$



$$- \int_{y=1} d^4x \sqrt{-g_4} V_1(\Phi)$$



$$\Phi|_{y=1} = v_1$$



b

5次元時空のモデル - 等曲率揺らぎの問題の解決

Kawasaki, M.Y. Yanagida 15

Glodberger-Wise機構で余剰次元の大きさを”固定”する:

Goldberger and Wise (1999)

$$S = \int d^5x \sqrt{g_5} \left(-\frac{M_5^3}{2} R + \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - \frac{m_\Phi^2}{2} \Phi^2 \right)$$

$\propto b^{-1}$ $\propto b$

$$- \int_{y=0} d^4 \sqrt{-g_4} V_0(\Phi)$$

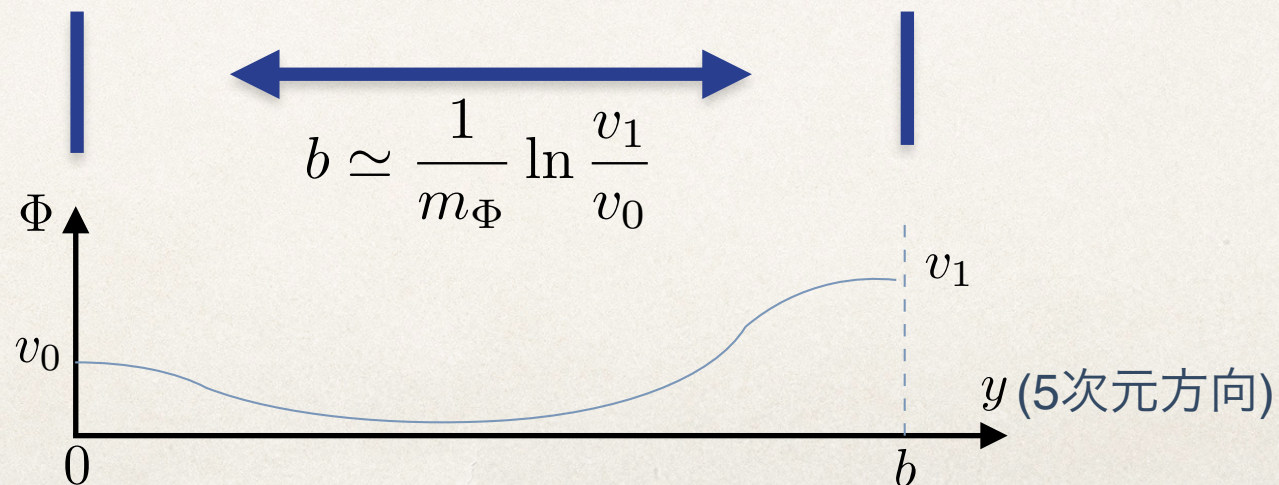
$$- \int_{y=1} d^4 \sqrt{-g_4} V_1(\Phi)$$

↓

$$\Phi|_{y=0} = v_0$$

↓

$$\Phi|_{y=1} = v_1$$



5次元時空のモデル - 等曲率揺らぎの問題の解決

Kawasaki, M.Y. Yanagida 15

Goldberger-Wise機構で余剰次元の大きさを”固定”する:

Goldberger and Wise (1999)

$$S = \int d^5x \sqrt{g_5} \left(-\frac{M_5^3}{2} R + \frac{1}{2} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - \frac{m_\Phi^2}{2} \Phi^2 \right)$$

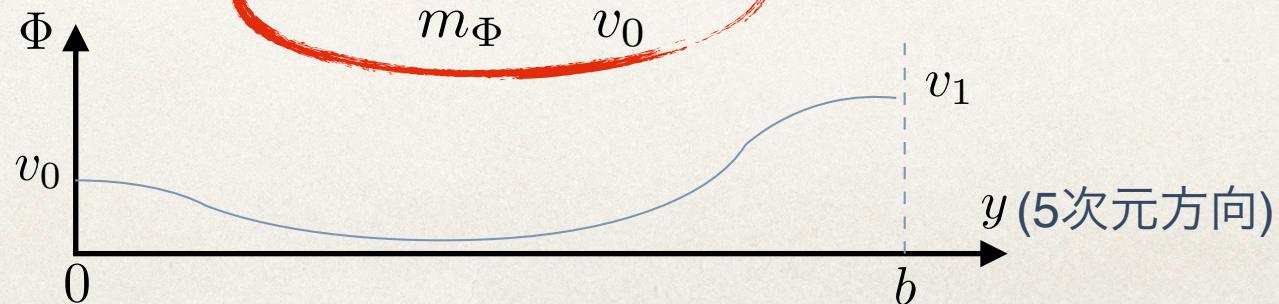
$$- \int_{y=0} d^4 \sqrt{-g_4} V_0(\Phi)$$

インフラトン I との相互作用によって v_0 を変化させる

$$V_0(\Phi) = \frac{\lambda_0}{4M_5^2} (\Phi^2 - v_0^2)^2 - \frac{\lambda_{\text{int}}}{4M_5} \Phi^2 I^2$$

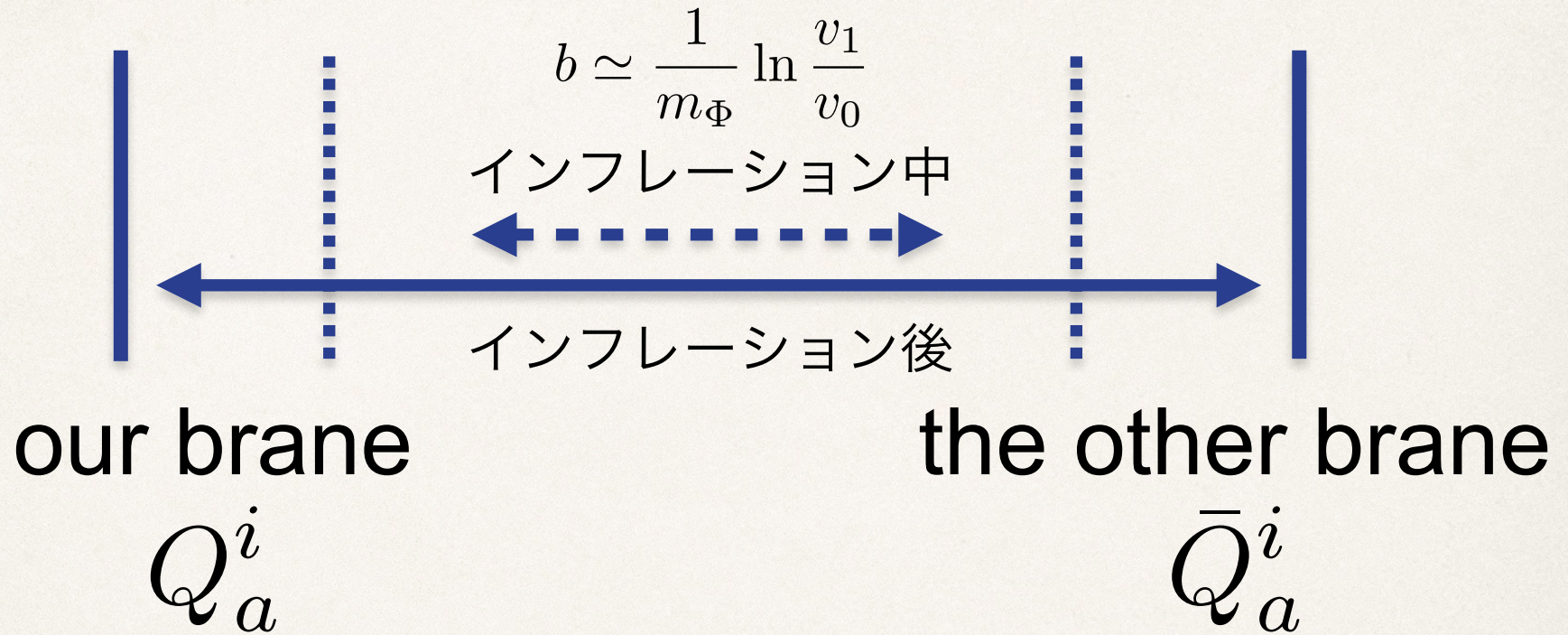
$$\Phi|_{y=0} = v_0$$

$$b \simeq \frac{1}{m_\Phi} \ln \frac{v_1}{v_0}$$



5次元時空のモデル - 等曲率揺らぎの問題の解決

Kawasaki, M.Y. Yanagida 15



パラメータ例

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1^{(\text{inf})} / v_2 = 1.1 \\ v_1^{(\text{now})} / v_2 = 5 \\ m_\Phi / M_5 = 0.01 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M_5 b^{(\text{inf})} \simeq 10 \Rightarrow m_a^{(\text{inf})} \sim 10^{12} \text{ GeV} \\ M_5 b^{(\text{now})} \simeq 160 \Rightarrow |\theta_{\text{QCD}}| \ll 10^{-11} \end{array} \right.$$

まとめ

PQ mechanism によって Strong CP 問題を解決する.

- PQ 対称性の起源は？ その破れのスケールは？
- 宇宙論的問題 (等曲率ゆらぎ、domain wall) は？

余剰次元で離れたbrane上にquarkとanti-quarkを置くことによって PQ 対称性の起源を説明できる.

本研究ではこのモデルを発展させ、
宇宙論的な問題 (等曲率ゆらぎの問題) を解決する機構を提案した.