

Dynamical Solution of Axion Domain Wall Problem

宇宙線研究所(ICRR)

小林伸

共同研究者：

伊部昌宏(ICRR)、鈴木資生(ICRR)、柳田勉(TDLI)

目次

- 研究背景
- Spectator による解決策
- 結論

目次

- 研究背景
 - Strong CP 問題とアクシオン
 - 宇宙論からの制限
 - ドメインウォール問題
- Spectator による解決策
- 結論

θ 項

QCDラグランジアンには、 θ に依存する項が追加される。

$$\mathcal{L}_\theta = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{a\mu\nu}$$

中性子の電気双極子モーメント (EDM)

$$d_n = 4.5 \times 10^{-15} e\bar{\theta} \text{ cm}$$

$$\bar{\theta} = \theta + \arg(\det M_q)$$

EDMの測定実験

$$|\bar{\theta}| \lesssim \times 10^{-10} \quad \text{C. A. Baker, et al. PRL, 97(2006).}$$

ファインチューニング

Strong CP問題

Peccei-Quinn機構

R. D. Peccei and H. R. Quinn.
PRL, 1977.

Axial $U(1)_{PQ}$ と、新たなスカラー場 (PQ場) P を導入

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -y q_L^\dagger P q_R + \text{h.c.} \quad q : \text{KSVZ quark}$$

PQ breaking: $P \rightarrow v_{PQ} \exp\left(i \frac{a}{v_{PQ}}\right) \quad a : \text{axion}$

クォークのカイラル回転で $F\tilde{F}$ 項に P 場の位相成分を移す

$$\bar{\theta} \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{a\mu\nu} \rightarrow \left(\bar{\theta} + \frac{a}{f_a}\right) \frac{g^2}{32\pi^2} F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{a\mu\nu}$$

θ 項はダイナミカルな量 \rightarrow ポテンシャルの最小点に落ちる。

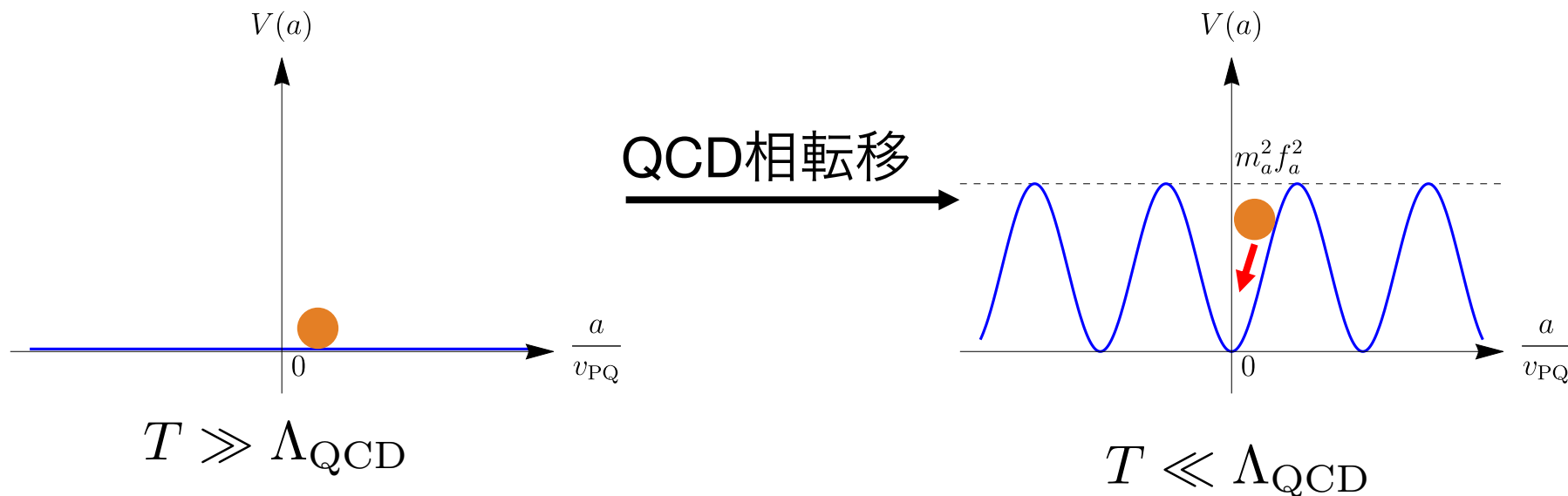
$$\bar{\theta} + \frac{a}{f_a} = 0, \quad f_a \equiv \frac{v_{PQ}}{N}, \quad N : \text{quark number}$$

アクシオンのポテンシャル

- QCD相転移付近でポテンシャルが出現

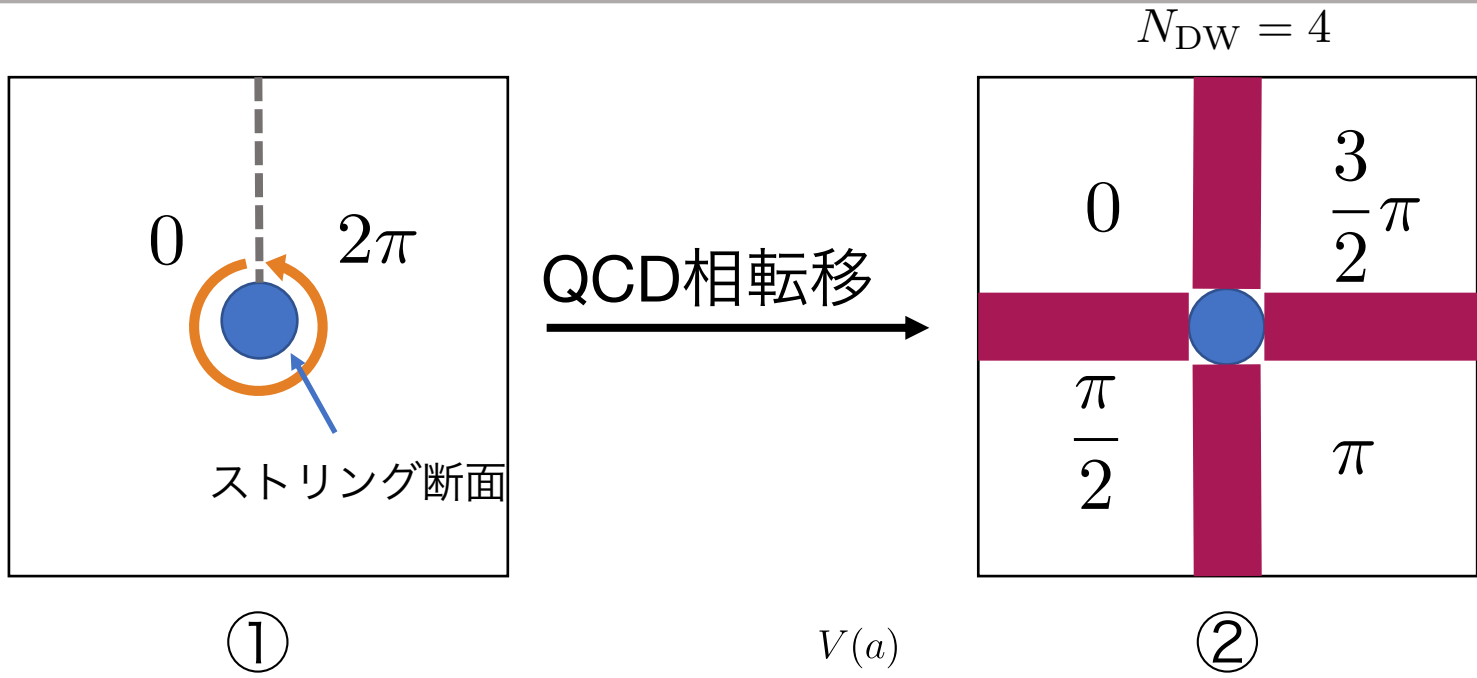
O. Wantz, E. P. S. Shellard,
PRD82 (2010)

$$m_a^{QCD}(T) = \begin{cases} 6.48 \times 10^{-8} \text{ eV} \left(\frac{\Lambda_{\text{QCD}}}{400 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{\Lambda_{\text{QCD}}} \right)^{-3.34} & T > 0.26 \Lambda_{\text{QCD}} \\ 6.11 \times 10^{-6} \text{ eV} \left(\frac{\Lambda_{\text{QCD}}}{400 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{-1} & T < 0.26 \Lambda_{\text{QCD}} \end{cases}$$

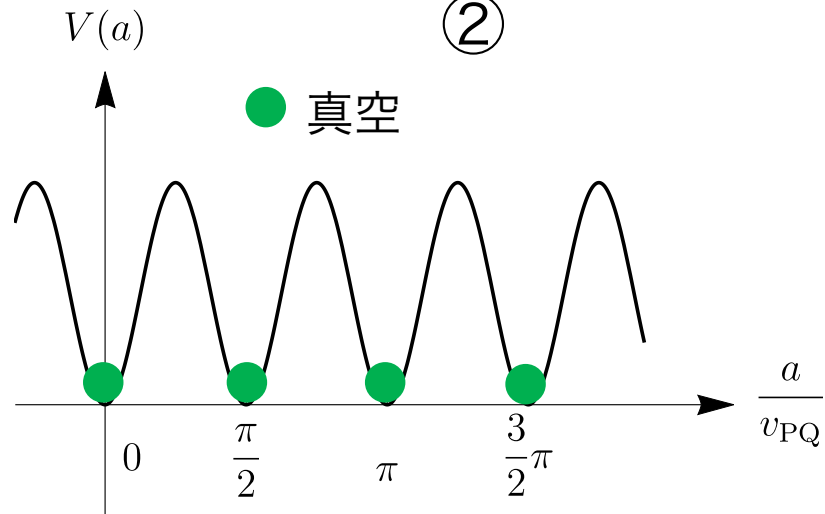


- コヒーレント振動:ダークマター残存量
- ドメインウォールの形成

アクシオンの位相欠陥



- ① $U(1)_{PQ}$ の破れ
→ スtring形成
- ② QCD相転移で Z_N の破れ
→ ドメインウォール形成



ドメインウォール問題

ドメインウォールのエネルギー密度 (1 Hubble 体積あたりに1つのとき)

$$\rho_w \sim \frac{T_w d_H^2}{d_H^3} \sim m_a f_a^2 H \propto \begin{cases} R^{-2} & \text{放射優勢期} \\ R^{-3/2} & \text{物質優勢期} \end{cases}$$

$$d_H = \frac{1}{H} : \text{Hubble 半径}$$

T_w : ウォールの張力

ドメインウォールの存在

- 宇宙の一様等方性の観測と矛盾
- 膨張速度の変化



ドメインウォールを壊す、もしくは生じさせなくする機構が必要

解決方法

- インフレーション前に $U(1)_{PQ}$ を破る

宇宙膨張で位相欠陥の数密度が非常に低くなる

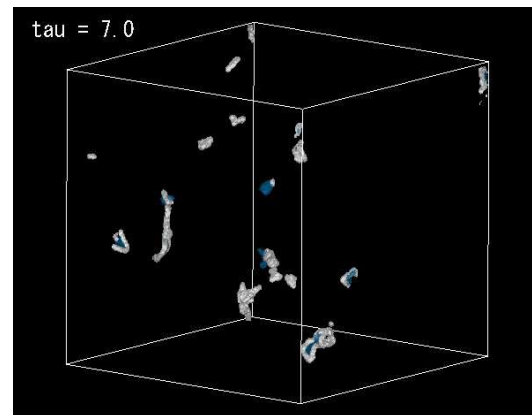
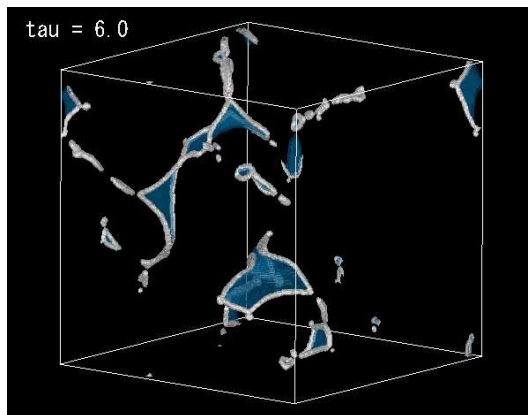
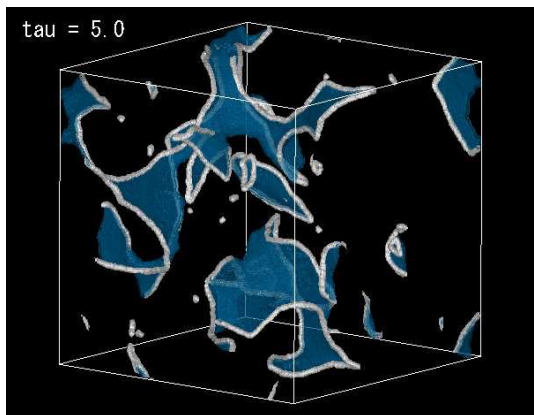
- ← 等曲率揺らぎの観測による制限が存在 M. Kawasaki, K. Nakayama, ARNPS **63**(2013)

$$\theta_i \sim 1 \quad \text{に対して} \quad H_I \lesssim 10^8 \text{ GeV}$$

- $N_{DW} = 1$ シナリオ A. Vilenkin and A. E. Everett, PRL **48** (1982)

ドメインウォールが収縮・消滅
シミュレーションでも確認される

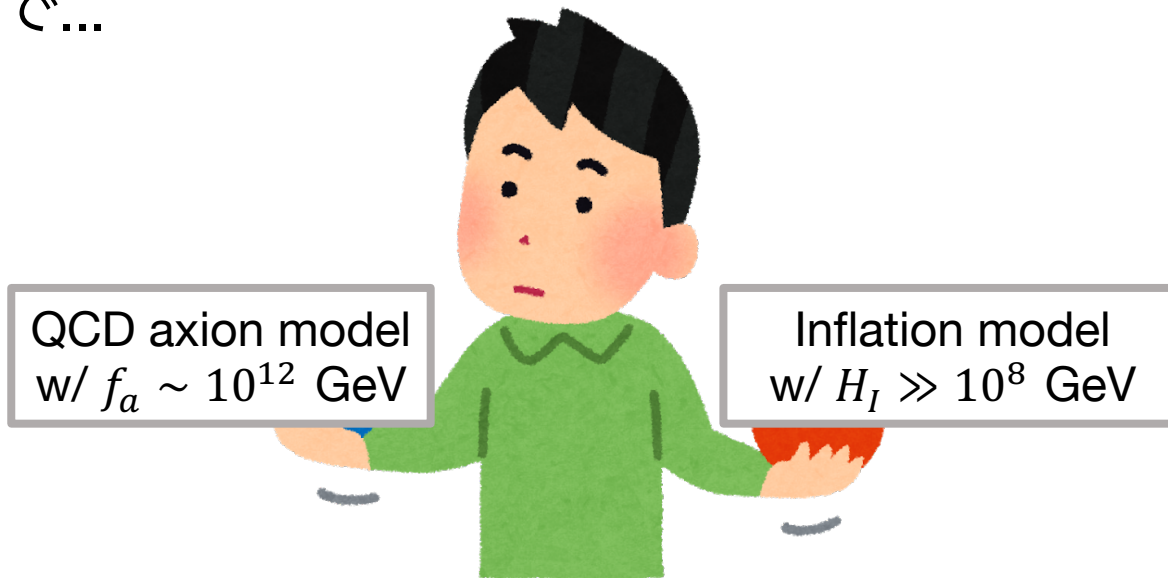
T. Hiramatsu, *et al.*, PRD **85** (2012)



- ← アクシオンの過剰生成で $f_a \lesssim 10^{10} \text{ GeV}$ に制限

本研究の目標

これまで...



今回は...

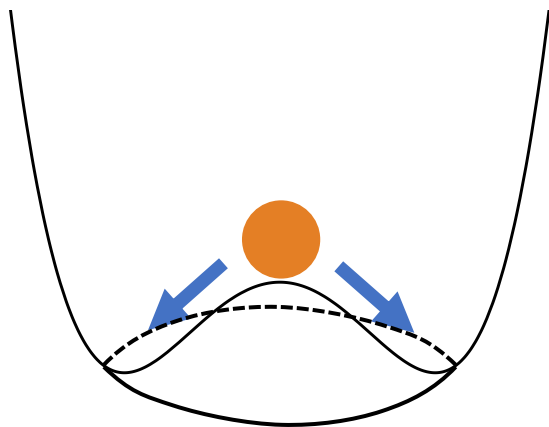
- 2つを両立する模型構築は可能か？
- 可能ならどれだけ回復できるか？

目次

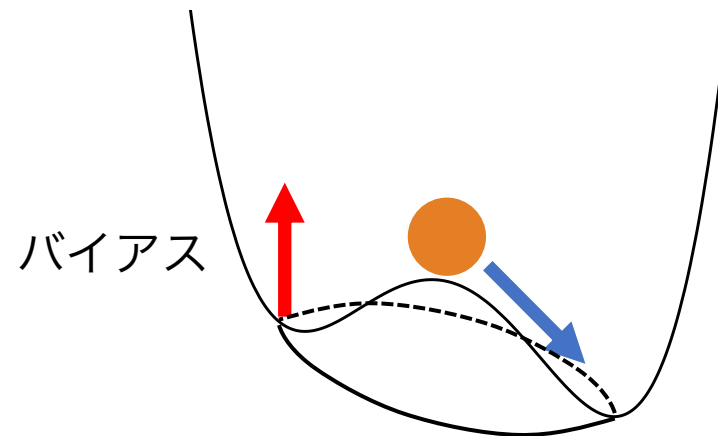
- 研究背景
- Spectator による解決策
 - 基本的なアイデア
 - 模型設定
 - ダイナミクスの詳細
 - パラメータへの制限
- 結論

基本的なアイデア

- $U(1)_{PQ}$ は放射優勢期に破る
→ 等曲率揺らぎによる制限を抑制できる
- PQ場と、大きな場の値を持つ Spectator の結合によってアクシオンポテンシャルに傾きをかける
→ 力学的にアクシオンを一つの位相に落とす



Spectator なし



Spectator あり

模型設定

登場する場

ϕ : インフラトン

P : PQ 場 (熱浴と接する)

S : PQ 荷を持つ複素スカラー場 (熱浴とは接しない)

$$\begin{aligned} V(P, S, \phi) = & V(\phi) + \lambda_p \left(|P|^2 - \frac{v_{PQ}^2}{2} \right)^2 + c_p H_I^2 |P|^2 \\ & + m_s^2 |S|^2 + \frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{Pl}^{2n-4}} |S|^{2n} - c_s H_I^2 |S|^2 \\ & + \frac{\lambda}{m! M_{Pl}^{m-3}} S^m P + \text{h.c.} \end{aligned}$$

模型設定

登場する場

ϕ : インフラトン

P : PQ 場 (熱浴と接する)

S : PQ 荷を持つ複素スカラー場 (熱浴とは接しない)

$$\begin{aligned}
 V(P, S, \phi) = & V(\phi) + \lambda_p \left(|P|^2 - \frac{v_{PQ}^2}{2} \right)^2 + c_p H_I^2 |P|^2 \\
 & + m_s^2 |S|^2 + \frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{Pl}^{2n-4}} |S|^{2n} - c_s H_I^2 |S|^2 \\
 & + \frac{\lambda}{m! M_{Pl}^{m-3}} S^m P + \text{h.c.}
 \end{aligned}$$

模型設定

登場する場

ϕ : インフラトン

P : PQ 場 (熱浴と接する)

S : PQ 荷を持つ複素スカラー場 (熱浴とは接しない)

$$\begin{aligned}
 V(P, S, \phi) = & V(\phi) + \lambda_p \left(|P|^2 - \frac{v_{PQ}^2}{2} \right)^2 + c_p H_I^2 |P|^2 \\
 & + m_s^2 |S|^2 + \frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{Pl}^{2n-4}} |S|^{2n} - c_s H_I^2 |S|^2 \\
 & + \frac{\lambda}{m! M_{Pl}^{m-3}} S^m P + \text{h.c.}
 \end{aligned}$$

模型設定

登場する場

ϕ : インフラトン

P : PQ 場 (熱浴と接する)

S : PQ 荷を持つ複素スカラー場 (熱浴とは接しない)

$$\begin{aligned}
 V(P, S, \phi) = & V(\phi) + \lambda_p \left(|P|^2 - \frac{v_{PQ}^2}{2} \right)^2 + c_p H_I^2 |P|^2 \\
 & + m_s^2 |S|^2 + \frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{Pl}^{2n-4}} |S|^{2n} - c_s H_I^2 |S|^2 \\
 & + \frac{\lambda}{m! M_{Pl}^{m-3}} S^m P + \text{h.c.}
 \end{aligned}$$

模型設定

登場する場

ϕ : インフラトン

P : PQ 場 (熱浴と接する)

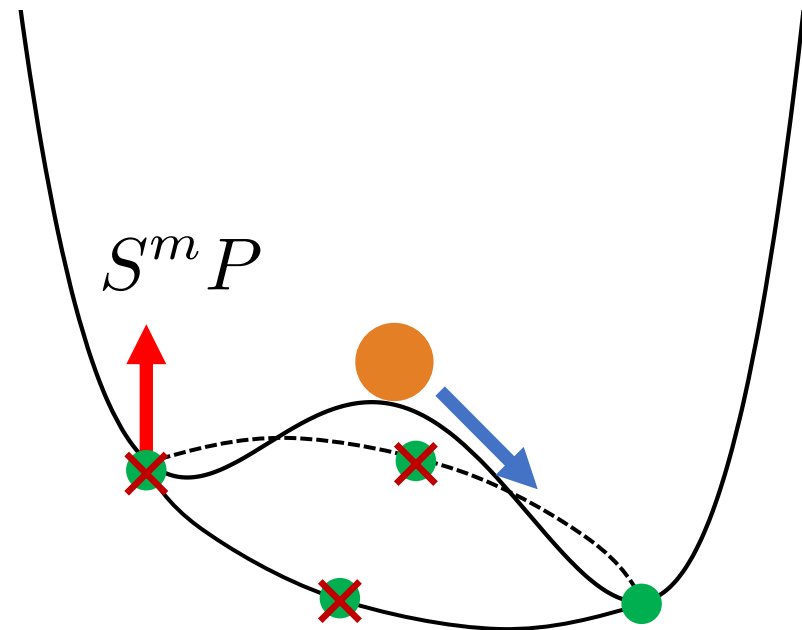
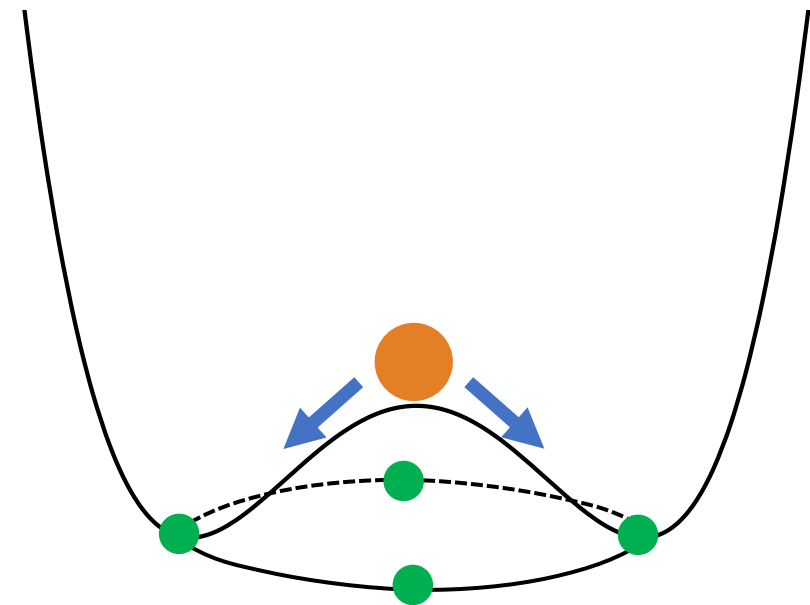
S : PQ 荷を持つ複素スカラー場 (熱浴とは接しない)

$$\begin{aligned}
 V(P, S, \phi) = & V(\phi) + \lambda_p \left(|P|^2 - \frac{v_{PQ}^2}{2} \right)^2 + c_p H_I^2 |P|^2 \\
 & + m_s^2 |S|^2 + \frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{Pl}^{2n-4}} |S|^{2n} - c_s H_I^2 |S|^2 \\
 & + \frac{\lambda}{m! M_{Pl}^{m-3}} S^m P + \text{h.c.} \quad \text{バイアス項}
 \end{aligned}$$

Spectator の働き

P のポテンシャル

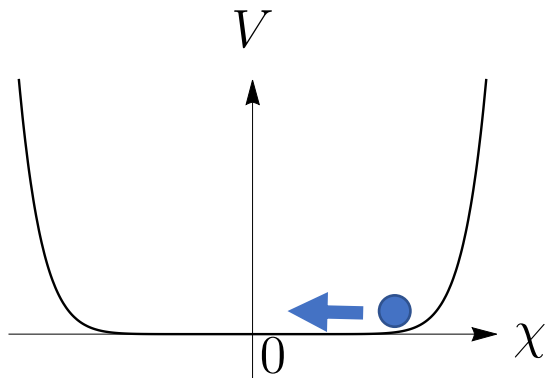
P のポテンシャル



バイアス項なし

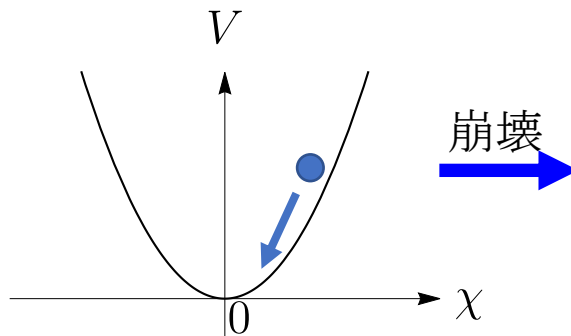
バイアス項あり

時間発展の概略 (PQ breaking ~ QCD transition)

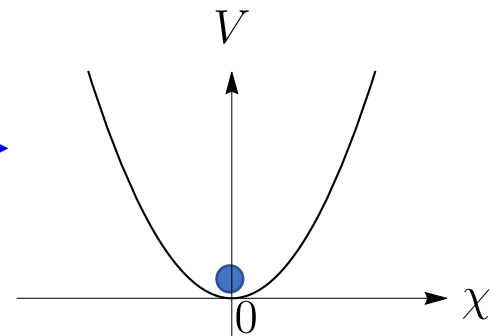


HIGH

v_{PQ}

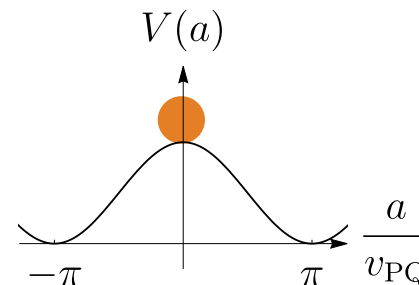
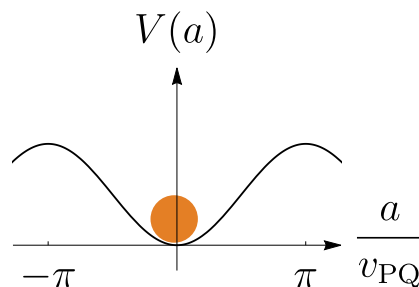
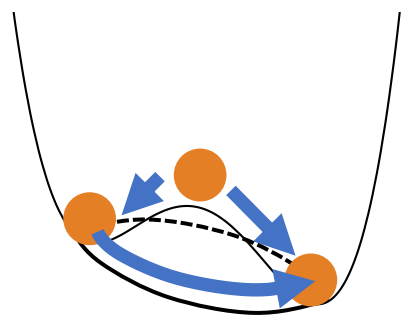


S場の振動開始

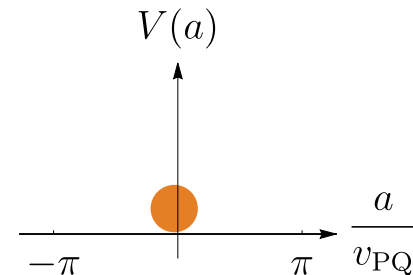


LOW

T



1つの位相にアクシオンが落ち着く

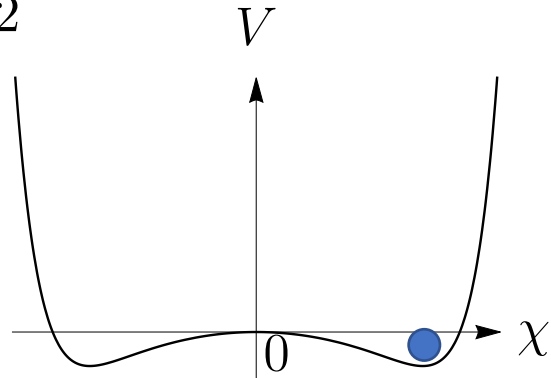


その後、QCDアクシオンへ

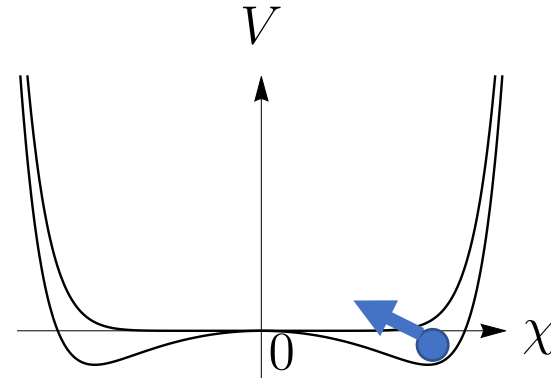
$$P = \frac{v_{PQ}}{\sqrt{2}} e^{ia/v_{PQ}}$$

Spectator のダイナミクス

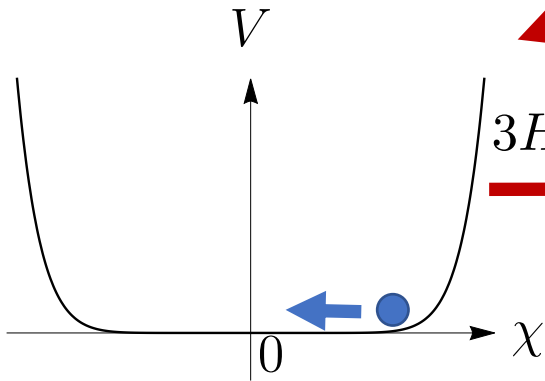
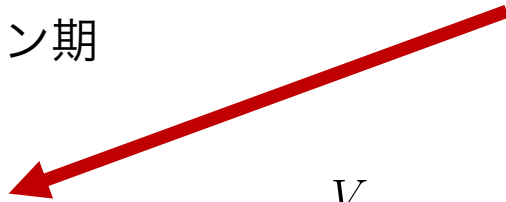
$$S = \frac{\chi}{\sqrt{2}} e^{i\theta_b}$$



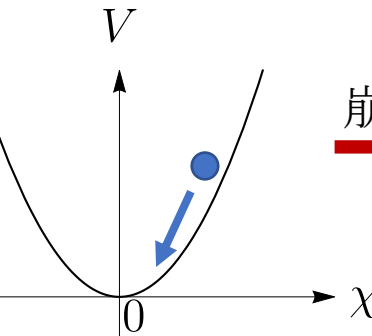
インフレーション期



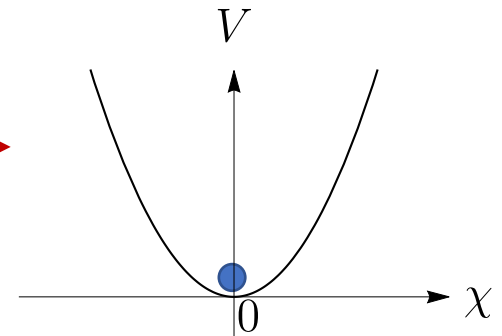
インフラトン振動期



$$3H < m_s$$



崩壊



放射優勢期

Spectator に対する要請

- 少なくともPQ対称性が破れるまで large field value を保ち、振動しない

→ ポテンシャルのべきに対する制限

Y. Ema, *et al.*, JCAP 1602, no. 02, 067 (2016)

$$\frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{\text{Pl}}^{2n-4}} |S|^{2n}, n \geq 6 \longrightarrow |S| \simeq M_{\text{Pl}} \left(\frac{H}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

- コヒーレント振動が宇宙を支配しない
- Massless fermion へ崩壊させる

$$\mathcal{L}_{S\text{-decay}} = -y_s S \bar{\psi}_s \psi_s + \text{h.c.}$$

アクシオンのポテンシャル

アクシオンはバイアス項からポテンシャルが生じる。

$$V(a) = 2 \frac{\lambda v_{\text{PQ}}}{m! M_{\text{Pl}}^{m-3}} \left(\frac{\chi}{\sqrt{2}} \right)^m \cos \left(\frac{a}{v_{\text{PQ}}} + m\theta_b \right)$$
$$\simeq 2 \frac{\lambda}{m!} v_{\text{PQ}} M_{\text{Pl}}^3 \left(\frac{H}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{m}{n-1}} \cos \left(\frac{a}{v_{\text{PQ}}} + m\theta_b \right)$$

ここからアクシオンの質量を得る。

$$m_a(T)^2 = 2 \frac{\lambda M_{\text{Pl}}^3}{m! v_{\text{PQ}}} \left(\frac{H}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{m}{n-1}} \simeq 2 \frac{\lambda M_{\text{Pl}}^3}{m! v_{\text{PQ}}} \left(\frac{T}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{2m}{n-1}}$$

角度成分のダイナミクス

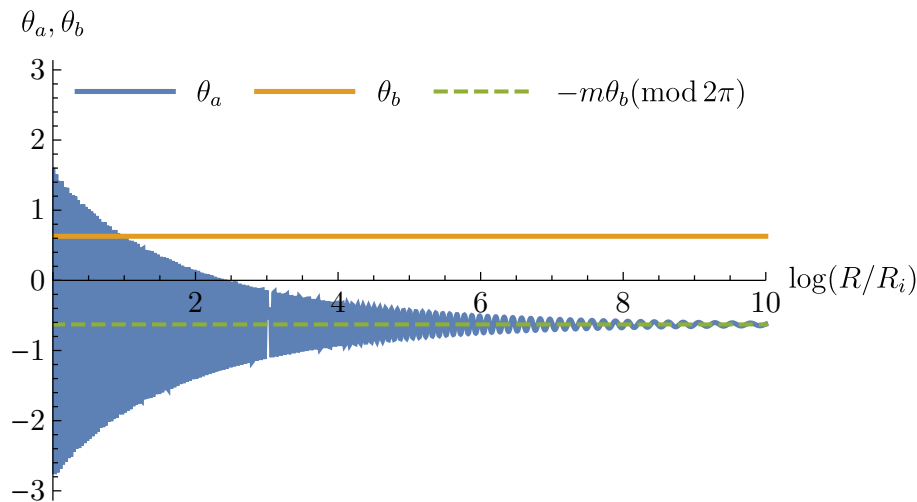
$$V = 2 \frac{\lambda v_{PQ}}{m! M_{Pl}^{m-3}} \left(\frac{\chi}{\sqrt{2}} \right)^m \cos \left(\frac{a}{v_{PQ}} + m \frac{b}{\chi} \right)$$

θ_a θ_b

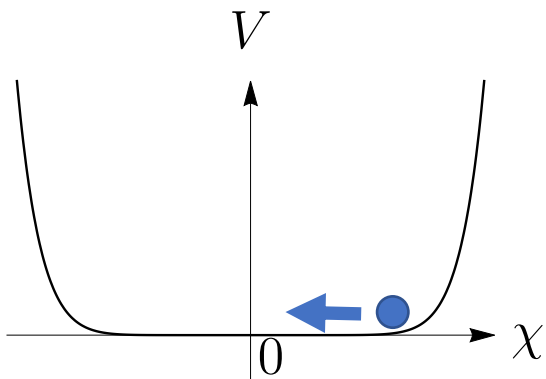
θ_b は動かないのか？

$$v_{PQ} \ll \chi \longrightarrow m_a^2 \simeq V(0)/v_{PQ}^2 \gg V(0)/\chi^2 \simeq m_b^2$$

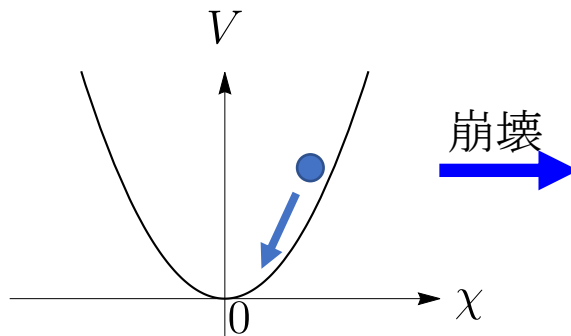
a が圧倒的に速く動くので θ_b は一定とみなせる！



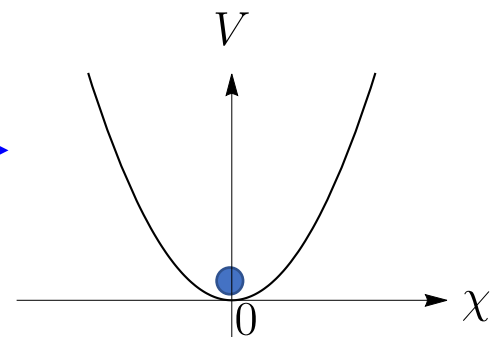
時間発展の概略 (PQ breaking ~ QCD transition)



HIGH



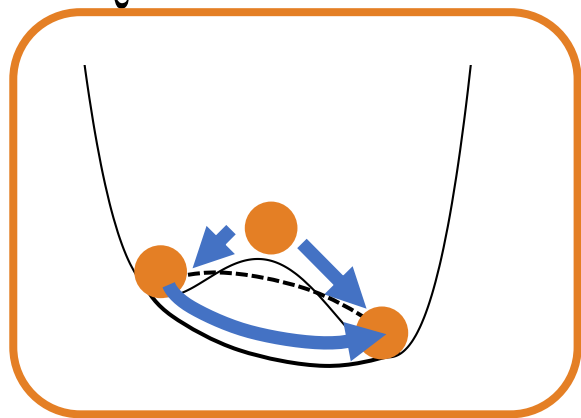
S場の振動開始



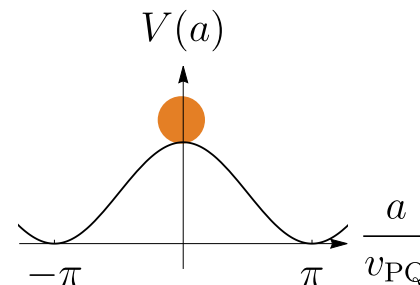
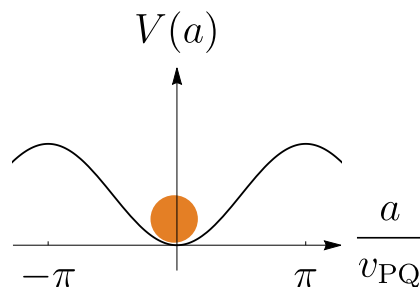
LOW

T

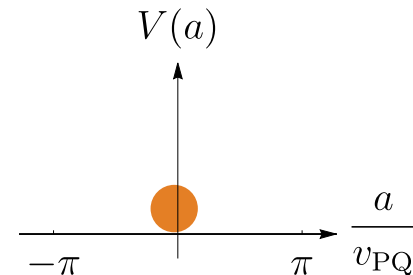
v_{PQ}



$$P = \frac{v_{PQ}}{\sqrt{2}} e^{ia/v_{PQ}}$$

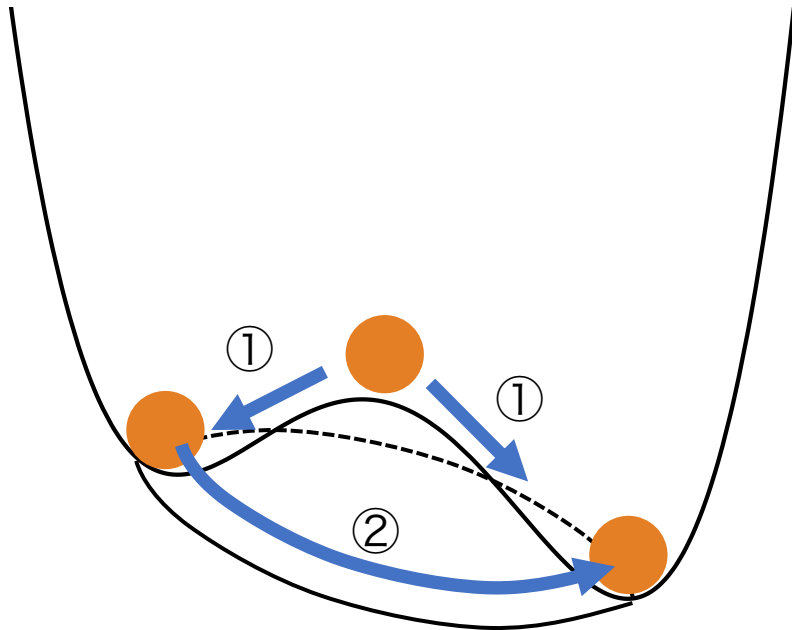


1つの位相にアクシオンが落ち着く



その後、QCDアクシオンへ

ストリング-ドメインウォール系の の形成



①バイアス項があっても、ゆらぎの存在により、最初はバラバラの方向に転がる。

②ポテンシャルの傾きに沿って、エネルギー最低点へと転がる。

→ ストリング-ドメインウォールの形成

ストリング-ドメインウォール系の消滅

ウォールのエネルギー→ストリングのエネルギーとなると収縮して消滅する

$$\frac{E_w}{E_s} = \frac{T_w d_H(T)^2}{T_s d_H(T)} = \frac{T_w}{T_s H(T)} > 1$$

$T_w = 8m_a(T)v_{PQ}^2$: ウォールの表面張力

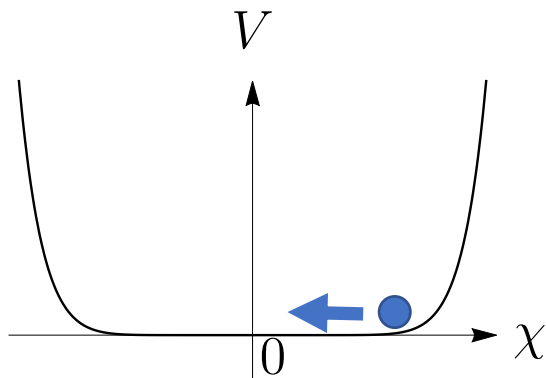
$T_s \simeq 2\pi v_{PQ}^2 \ln\left(\frac{v_{PQ}}{H(T)}\right)$: ストリングの張力

→ $m_a(T) > \frac{\pi}{4} H(T) \ln\left(\frac{v_{PQ}}{H(T)}\right)$

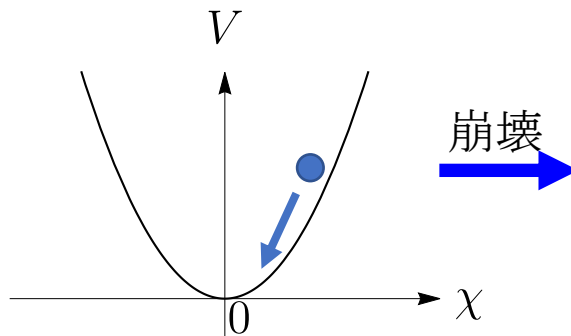
を満たす温度であれば、ドメインウォールが消滅する。

- $N_{DW} = 1$ シナリオよりもずっと早い時期に消滅するので、 f_a の制限を回避できる

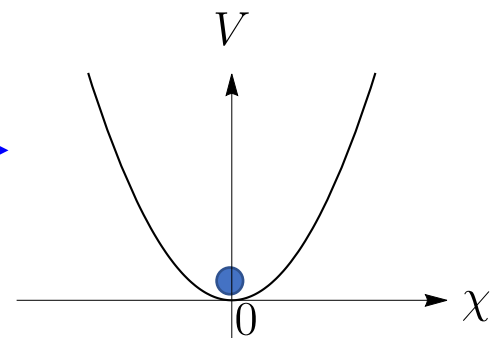
時間発展の概略 (PQ breaking ~ QCD transition)



HIGH



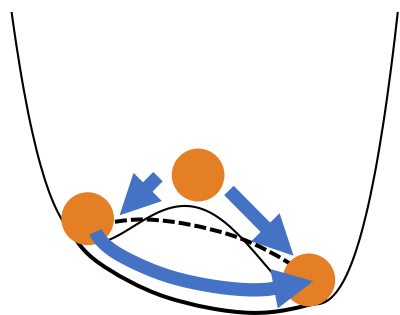
S場の振動開始



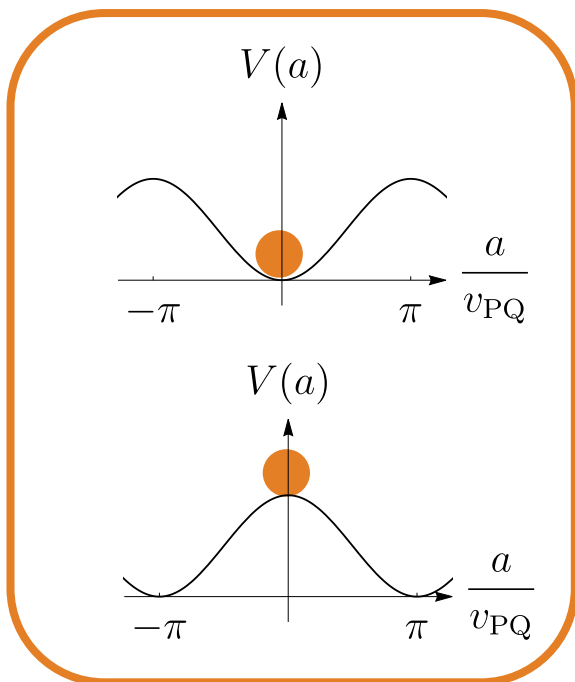
LOW

T

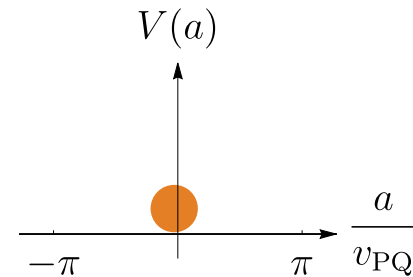
v_{PQ}



$$P = \frac{v_{PQ}}{\sqrt{2}} e^{ia/v_{PQ}}$$



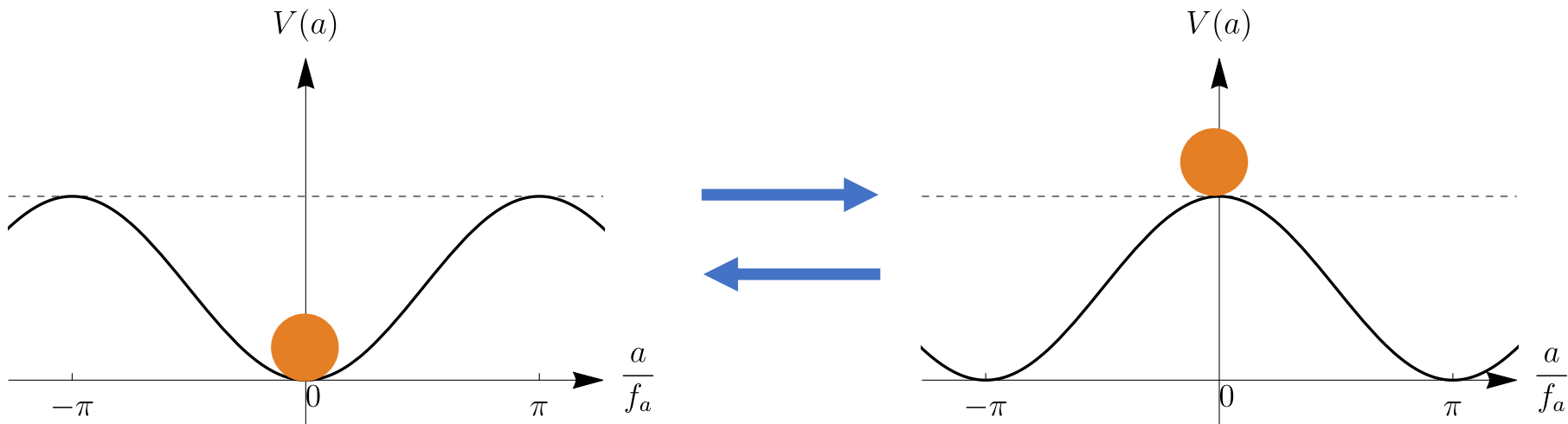
1つの位相にアクシオンが落ち着く



その後、QCDアクシオンへ

アクシオンポテンシャルの振動

S 場が振動を始めると、アクシオンのポテンシャルも振動する。



このとき、 $3H < m_a$ だとアクシオンが転がって、位相がバラバラになる。



$$m_s \gtrsim 3H > m_a$$

アクシオン質量の温度依存性

PQ対称性の破れの直後 $m_a \gtrsim 3H > m_s$

S場の振動開始前後 $m_s \gtrsim 3H > m_a$

→ m_a は H よりも速く落ちる！

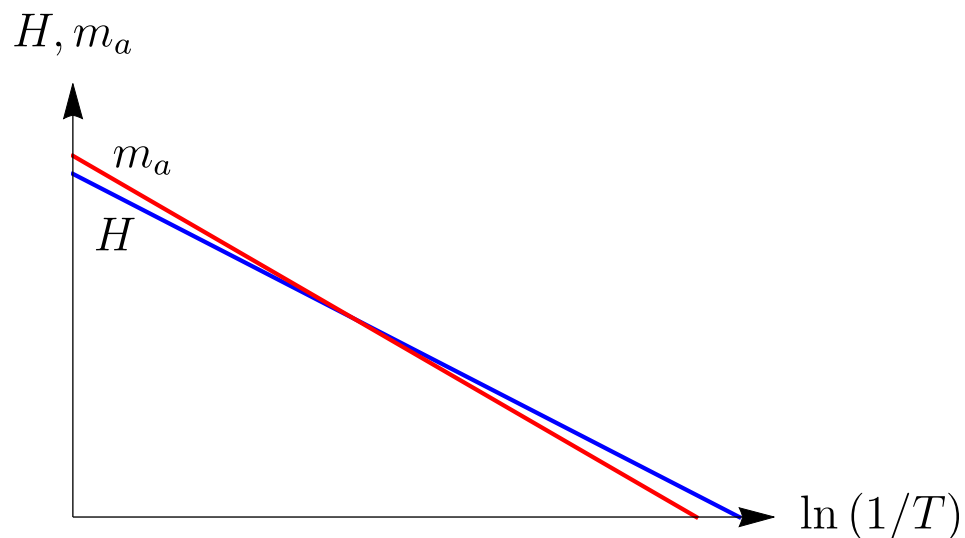
$$m_a(T)^2 \propto \left(\frac{H}{M_{\text{Pl}}} \right)^{\frac{m}{n-1}}$$

であるから、

$$m > 2(n-1)$$

minimal な模型は

$$n = 6, m = 11$$



パラメータへの制限

ドメインウォールが崩壊しなくなる温度 T_{coll}

$$m_a(T_{\text{coll}}) = \frac{\pi}{4} H(T_{\text{coll}}) \ln \left(\frac{v_{\text{PQ}}}{H(T_{\text{coll}})} \right)$$

アクシオンが転がらなくなる温度 T_{fric}

$$m_a(T_{\text{fric}}) = 3H(T_{\text{fric}})$$

これらの量に対し、

$$T_{\text{coll}}(\lambda) < v_{\text{PQ}}$$

$$m_a(T_{\text{fric}}) = 3H(T_{\text{fric}}) > m_s$$

がパラメータへの制限になる。

パラメータへの制限

S のダイナミクスにバイアス項が効いてしまうと、 S が原点に落ちなくなってしまう

$m = 2n - 1$ の場合、

$$\frac{\lambda_s^2}{(n!)^2 M_{P1}^{2n-4}} |S|^{2n} \sim \frac{\lambda}{m! M_{P1}^{m-3}} |S|^{2n-1} v_{PQ}$$

のときにバイアス項と S のポテンシャルが同程度になる。
この時、質量項がバイアスに勝てば原点に落ちてくれる。

$$\frac{\lambda}{m!} v_{PQ} M_{P1} \left(\frac{(n!)^2 \lambda v_{PQ}}{m! \lambda_s^2 M_{P1}} \right)^{2n-3} < m_s^2$$

をバイアス項による S へのバックリアクションを無視できる条件として課す。

等曲率揺らぎ

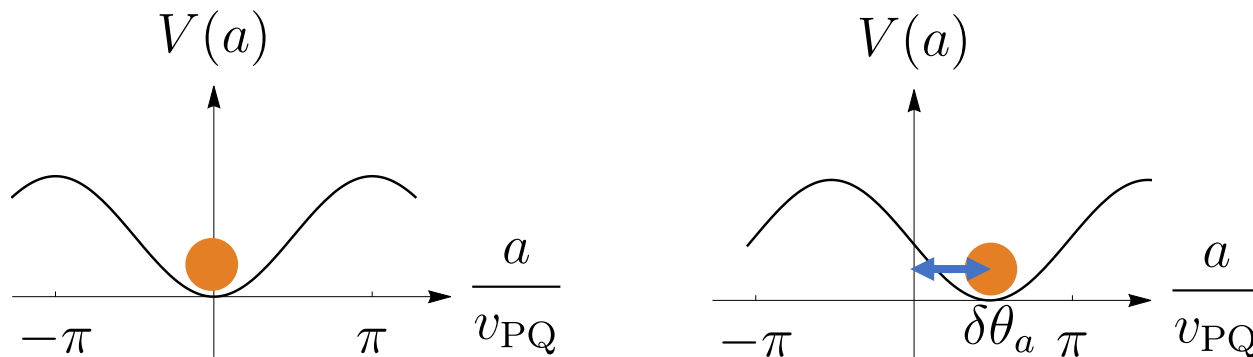
インフレーション中に、 S 場の位相方向に揺らぎが生じる。

$$\delta\theta_b \sim \frac{H_I}{2\pi\langle\chi\rangle_I}$$

アクシオンのポテンシャル

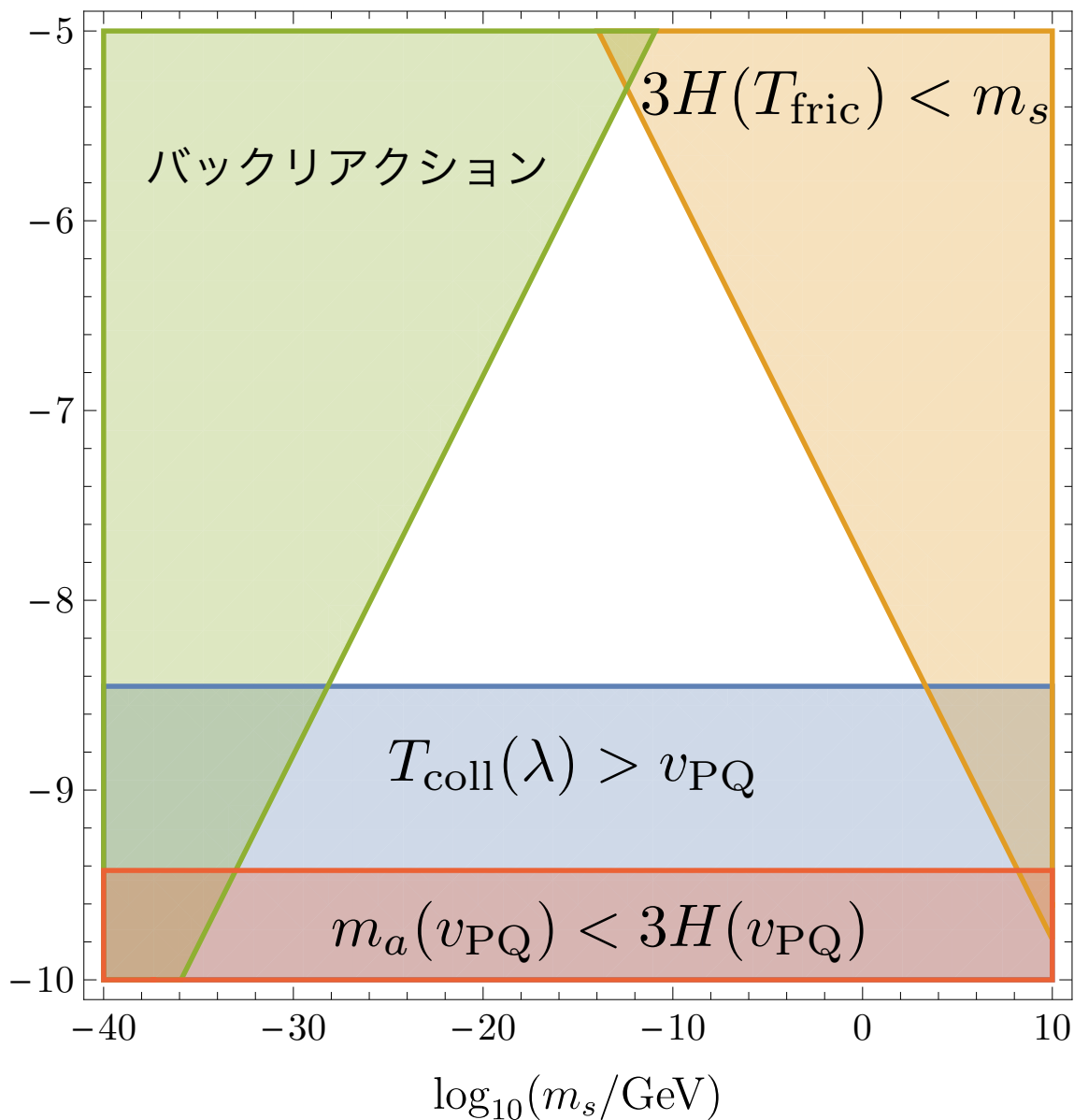
$$V(a) = 2 \frac{\lambda v_{\text{PQ}}}{m! M_{\text{Pl}}^{m-3}} \left(\frac{\chi}{\sqrt{2}} \right)^m \cos \left(\frac{a}{v_{\text{PQ}}} + m\theta_b \right)$$

の最低点が揺らぐため、アクシオンに揺らぎが移る。



$$\delta\theta_a \propto m N_{\text{DW}} \frac{H_I}{2\pi\langle\chi\rangle_I} \longrightarrow \text{等曲率揺らぎの発生}$$

パラメータへの制限



$\lambda_s = 10^{-4}$ として計算

Isocurvature の制限

$$H_I \lesssim 2 \times 10^{11} \text{ GeV}$$

$$\times \left(\frac{\sqrt{c_s}}{N_{\text{DW}}^4 \lambda_s} \right)^{1/3}$$

(パラメータによるが)
 $H_I \sim 10^{13} \text{ GeV}$ も可能

先行研究との比較

	$f_a \sim 10^{11}$ GeV	$H_I \sim 10^{13}$ GeV
$N_{DW} = 1$ シナリオ	✗	○
インフレーション中の PQ breaking	○	✗
今回の模型	○	○

- $f_a \sim 10^{11}$ GeV はADMXで探索可能な範囲
 I. Stern, “ADMX Status”,
PoS ICHEP2016
- $H_I \sim 10^{13}$ GeVはCOreEで探索可能な範囲
 COreE
Cosmic Origins Explorer
A White Paper

結論

- 早い時期にドメインウォールを潰すことで、アクシオンの過剰生成による制限を回避できた。
- 等曲率揺らぎの制限を完全に回避することはできないが、既存のシナリオよりも制限を緩和できた。
- より正確な制限を与えるにはシミュレーション等を用いてより詳しくダイナミクスを追う必要がある。