

初期宇宙におけるR対称性の破れ

濱田雄太(京都大学)

共同研究者

鎌田耕平(DESY)

小林達夫(京都大学)

大河内豊(九州大学)

2013年8月8日 素粒子物理学の進展

arXiv[1211.5662], JCAP 1304 (2013) 043に基づく

一方でエネルギー \ll TeVで新物理の兆候は見えていない。

新物理があるとしたらもっと高いスケールだろう。
そのようなスケールを探るのには宇宙論が有用。

今日のトークではR対称性 $U(1)_R$ をもつSUSY模型に注目
宇宙論的制限より $U(1)_R$ の破れのスケールに制限
が課される

R symmetry

E. Nelson and N. Seiberg arXiv[9309299]

- $U(1)_R$ はSUSYに特有でSUSYの破れと密接に関係
- **gaugino質量**を得るためには $U(1)_R$ の破れが必要

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} m_{1/2} \underbrace{\lambda\lambda}_{\text{R-charge 2}} \quad \theta \rightarrow e^{i\alpha}\theta$$
$$W \rightarrow e^{2i\alpha}W, \mathcal{L} \sim \int d^2\theta W$$

R-charge 2

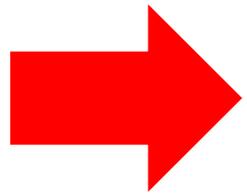
- explicitな破れとspontaneousな破れ

Gauge Mediation模型

D. Shih et. al.
arXiv[0810.5773]

話すこと

- (Gauge Mediation模型を念頭に) $U(1)_R$ が自発的に破れる模型
- 初期宇宙で $U(1)_R$ のSSB



トポロジカルなobject : R-string
pseudo NG boson : R-axion

- R-stringやR-axionの宇宙論的制限より $U(1)_R$ の破れのスケールに制限が課される

トークのプラン

1. R-axionは弱く相互作用し長寿命
2. R-stringとR-axionの宇宙論
3. Axion mass & breaking scaleに制限

トークのプラン

1. R-axionは弱く相互作用し長寿命
2. R-stringとR-axionの宇宙論
3. Axion mass & breaking scaleに制限

Model

$$W_{\text{eff}} = \Lambda_{\text{eff}}^2 X + W_0$$

$$g_{X\bar{X}}^{-1} \simeq 1 - \frac{2\tilde{\lambda}}{f_a^2} |X|^2 + \frac{\tilde{\lambda}}{f_a^4} |X|^4$$

$$V(X) = \frac{\lambda}{4} (|X|^2 - f_a^2)^2 - 2 \frac{W_0 \Lambda_{\text{eff}}^2}{M_{\text{pl}}^2} X + \text{h.c.}$$

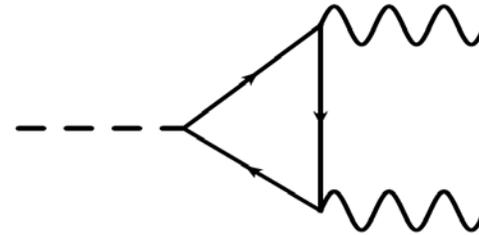
$$X = \frac{\overset{\text{R-saxion}}{s} + \sqrt{2} f_a \exp(i\overset{\text{R-axion}}{a}/\sqrt{2} f_a)}{\sqrt{2}}$$

$$m_a^2 = \frac{4W_0 \Lambda_{\text{eff}}^2}{f_a M_{\text{pl}}^2}$$

- X はSUSYをF-termで破る場で**R-charge 2**を持つ
- W_0 は宇宙項を0にするために導入. $U(1)_R$ を**explicitに破る**
- Non-canonical Kahlerによって X のscalar部分も期待値を持つ
- Messenger sectorは特に指定しないが $U(1)_R$ を保つとする

$U(1)_R$ の破れ

- $U(1)_R$ はわずかに破れる
 - アノマリー

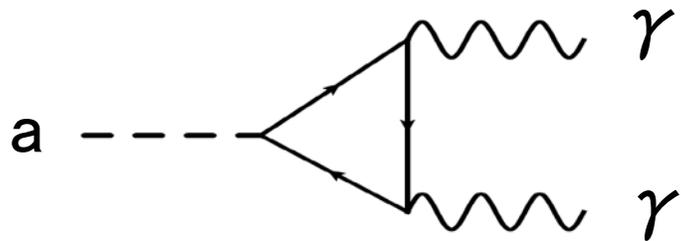


- 宇宙項を0にするためのSuperpotentialの定数項 W_0

R-axionとゲージ場の相互作用

- ゲージ場とはアノマリーを通して結合

$$\frac{C_{em} g_{em}^2}{32\pi^2 f_a} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \quad C_{em} = \text{Tr } U(1)_R U(1)_{em}^2$$



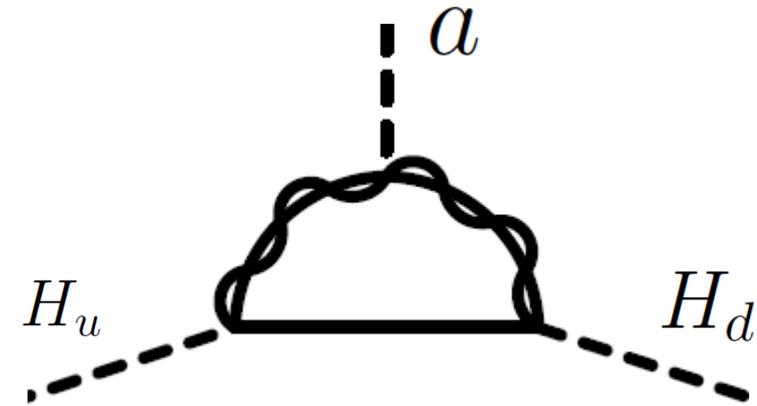
フェルミオンとの相互作用

H. Goh and M. Ibe
arXiv[0810.5773]

- Messenger scaleで $\mathcal{L} \sim e^{-ia/(\sqrt{2}f_a)} m_{1/2} \lambda \lambda$
- Higgs potential

$$V = (|\mu|^2 + m_{H_u}^2) |H_u^0|^2 + (|\mu|^2 + m_{H_d}^2) |H_d^0|^2 + \frac{1}{8} (g^2 + g'^2) (|H_u^0|^2 - |H_d^0|^2)^2 - (e^{-ia/(\sqrt{2}f_a)} B \mu H_u^0 H_d^0 + c.c.)$$

- 電弱相転移の後, B μ termによって Higgs場の位相方向とR-axionが混合. その結果,R-axionとフェルミオンが結合する



R-axionとフェルミオンの結合

- R-axionとフェルミオンとの結合

$$\lambda_u = i \frac{m_u}{f_a} \kappa \cos^2 \beta,$$

$$\lambda_d = i \frac{m_d}{f_a} \kappa \sin^2 \beta,$$

$$\lambda_\ell = i \frac{m_\ell}{f_a} \kappa \sin^2 \beta,$$

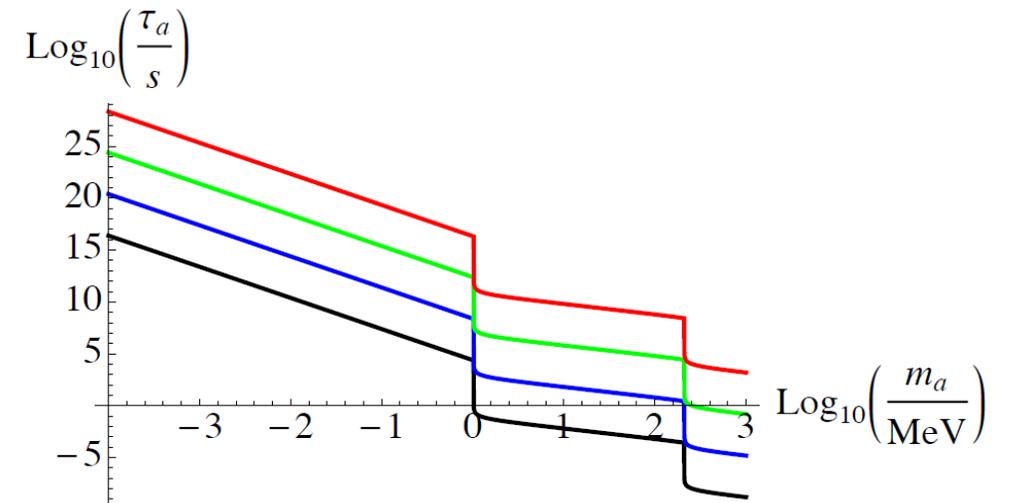
$$\kappa = (1 + r^2 \sin^2 2\beta)^{-1/2} \quad r = v/(\sqrt{2}f_a)$$

R-axionの崩壊

- 今日の話ではhadronへ崩壊しない $m_a < 1 \text{ GeV}$ を考える
- 崩壊先はphoton, electron, muon

$$\Gamma(a \rightarrow 2\gamma) \simeq \frac{C_{em}^2}{16\pi} \left(\frac{g_{em}}{4\pi}\right)^4 \left(\frac{m_a}{f_a}\right)^2 m_a$$

$$\Gamma(a \rightarrow f\bar{f}) = \frac{\lambda_f^2}{8\pi} m_a \left(1 - 4m_f^2/m_a^2\right)^{1/2}$$



上から $f_a = 10^{12}, 10^{10}, 10^8, 10^6 \text{ GeV}$
 $\tan \beta = 30$, anomaly 係数 = 2

トークのプラン

1. R-axionは弱く相互作用し長寿命
2. R-stringとR-axionの宇宙論
3. Axion mass & breaking scaleに制限

R-axionの生成過程

- R-axion生成過程
 - 熱的な生成
 - R-stringからの放出
 - wallの崩壊
 - Coherent oscillation

R-axionの熱的な生成

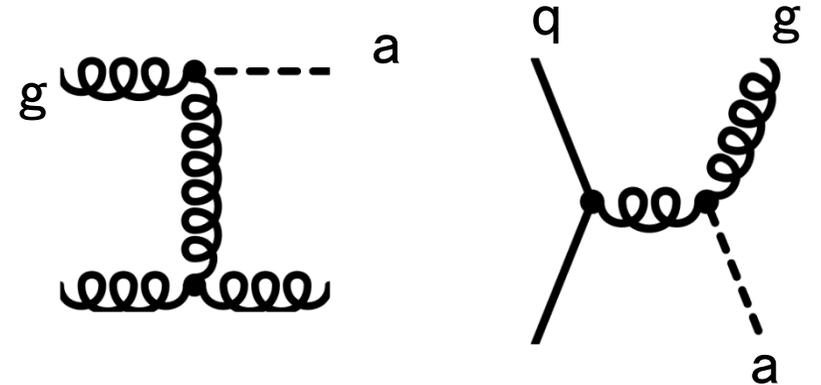
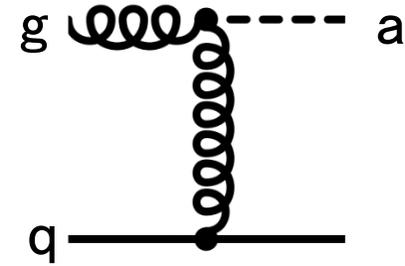
- Thermal plasmaの散乱

$$T_D \simeq 10^6 \text{GeV} g_s^{-6} C_g^{-2} \left(\frac{f_a}{10^{10} \text{GeV}} \right)^2$$

- $T_R > T_D$ の場合(R-axionは熱平衡)

$$\frac{\rho_a}{s} = 2.6 \times 10^{-6} \text{GeV} \left(\frac{m_a}{\text{MeV}} \right)$$

- $T_R < T_D$ の場合は上の値の T_R/T_D 倍



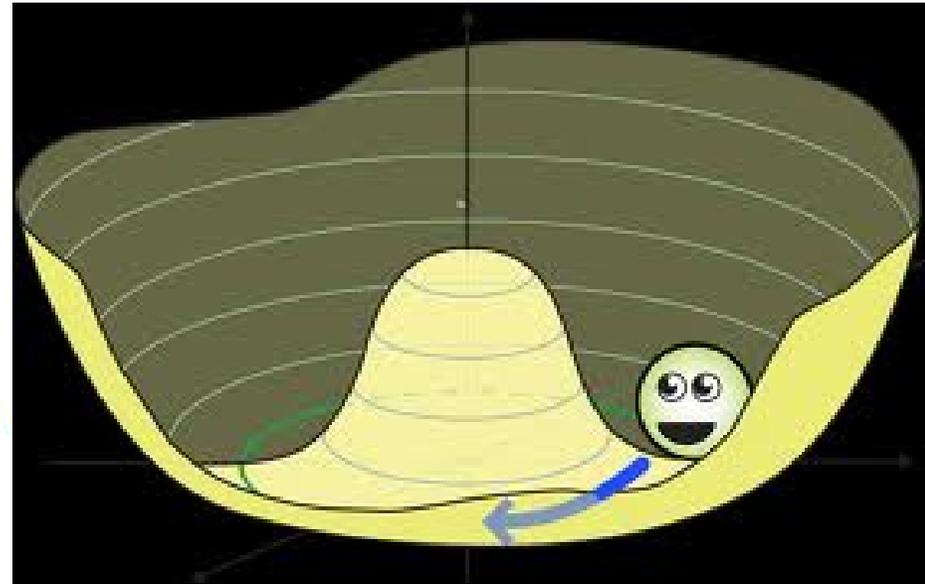
R-stringからの放出

- $U(1)_R$ の自発的破れに伴いR-stringが現れる
- R-stringはR-axionと結合している

R-axion interaction (Kalb-Ramond)

$$f_a \partial_\mu a = \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} \partial^\nu B^{\lambda\rho} \quad S \sim 2\pi f_a \int B_{\mu\nu} d\sigma^{\mu\nu}$$

$$d\sigma^{\mu\nu} = \epsilon^{ab} X_{,a}^\mu X_{,b}^\nu d^2\zeta$$

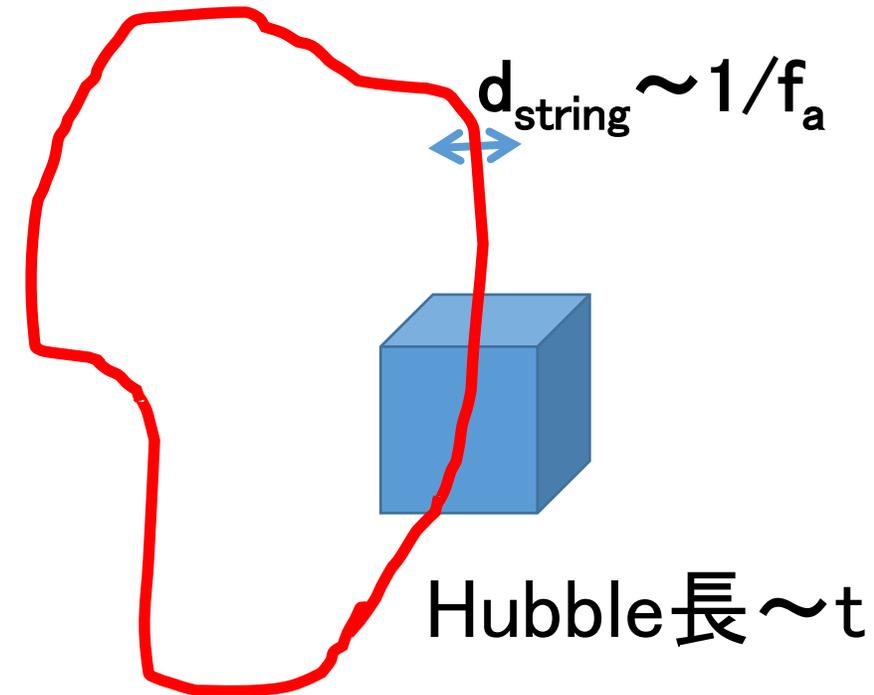


R-stringのエネルギー密度

- R-stringは互いに交差し、だいたいHubble長あたりに1本のstringが存在
- R-stringのエネルギー密度は

$$\mu_{\text{string}} \simeq 2\pi f_a^2 \log \left(\frac{t}{d_{\text{string}}} \right)$$

$$\rho_{\infty} \simeq \frac{2\pi}{t^2} f_a^2 \log \left(\frac{t}{d_{\text{string}}} \right)$$



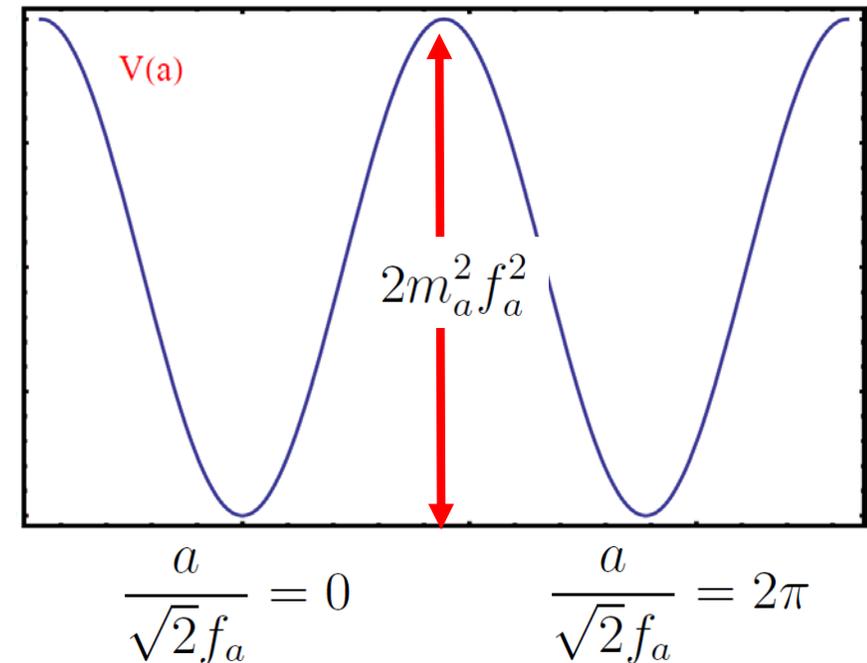
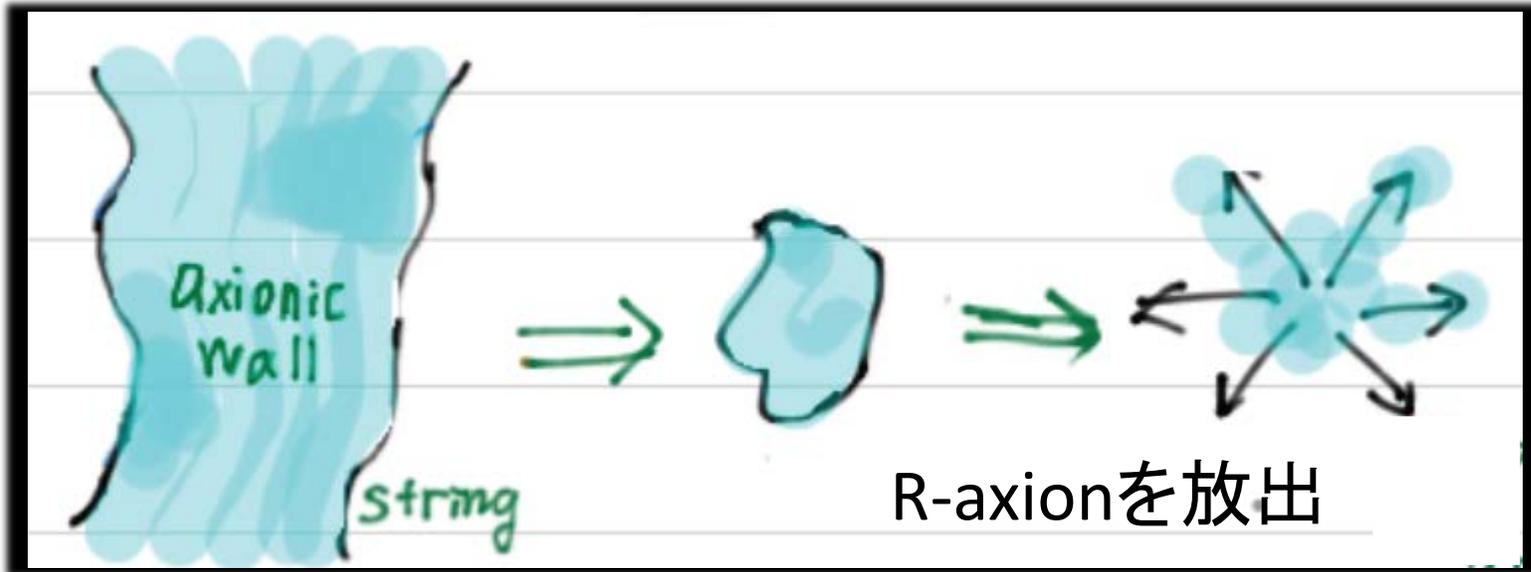
- エネルギー密度の時間依存性から放出されるR-axionの量を評価可能！

String wall system

T.Hiramatsu M.Kawasaki,
K.Saikawa, T.Sekiguchi
arXiv[1202.5851]

- H が小さくなってくると $U(1)_R$ をexplicitに破る項を無視できなくなる
- **string**を端とした**wall**を形成 (string wall system)
- その後, wallが崩壊しR-axionを放出

$$V = -m_a^2 f_a^2 \cos\left(\frac{a}{\sqrt{2}f_a}\right)$$



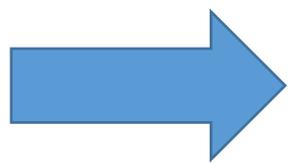
Coherent oscillation

- $U(1)_R$ breakingの後、R-axionのfield valueはどこかに値をとる

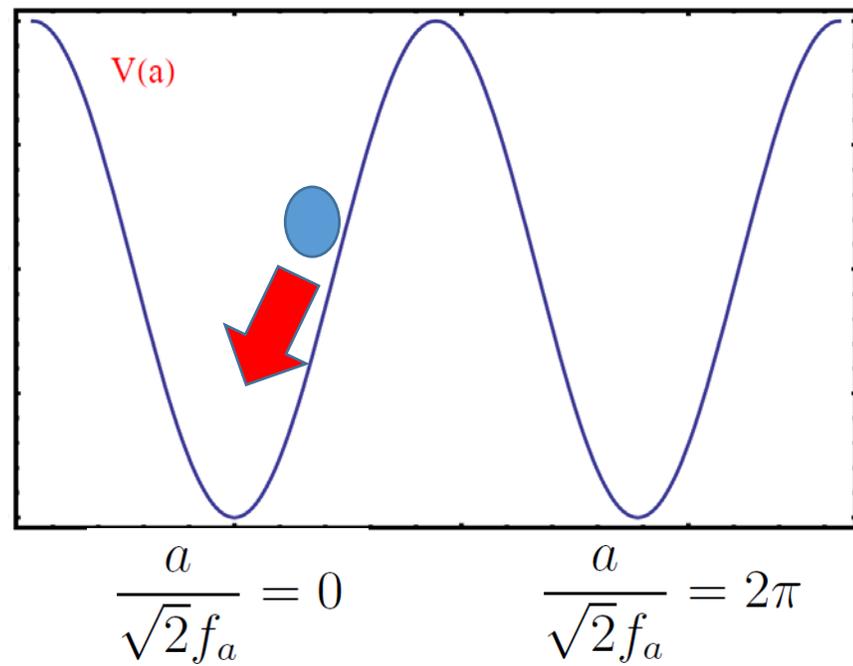
- スカラー場のEoM $\ddot{a} + \underline{3H\dot{a}} + \frac{\partial V}{\partial a} = \ddot{a} + 3H\dot{a} - \frac{1}{2\sqrt{2}}m_a^2 f_a \sin\left(\frac{a}{\sqrt{2}f_a}\right) = 0$

まさつ項

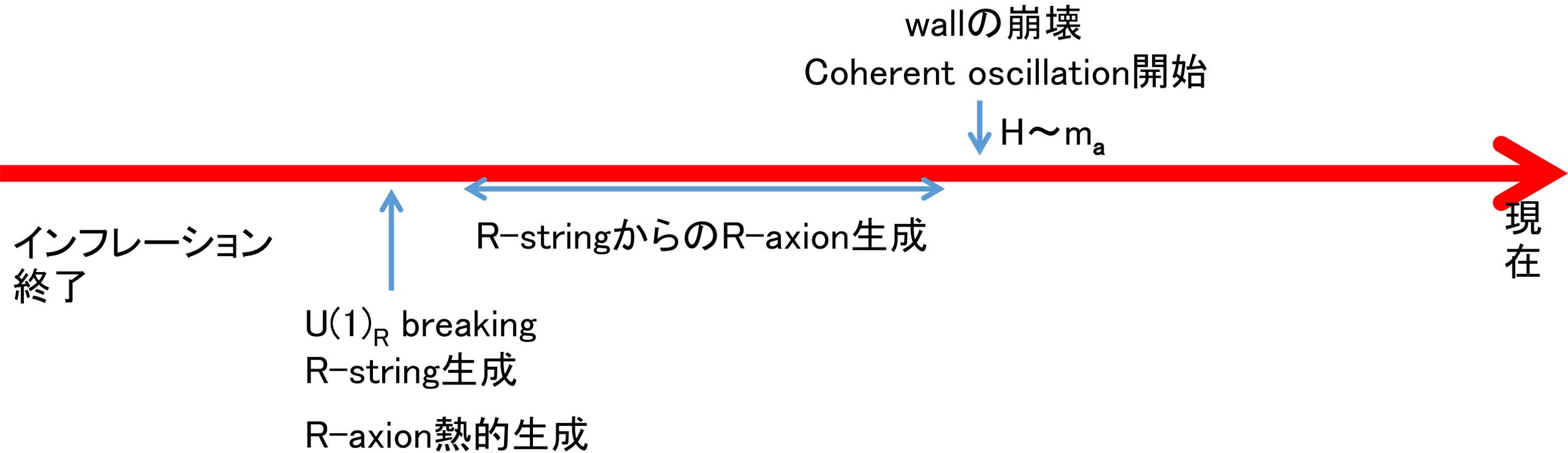
- $H \sim m_a$ になるとaはまさつ項に勝って振動を開始



R-axionは振動の分だけ
エネルギーを持つ



想定するシナリオ



トークのプラン

1. R-axionは弱く相互作用し長寿命
2. R-stringとR-axionの宇宙論
3. Axion mass & breaking scaleに制限

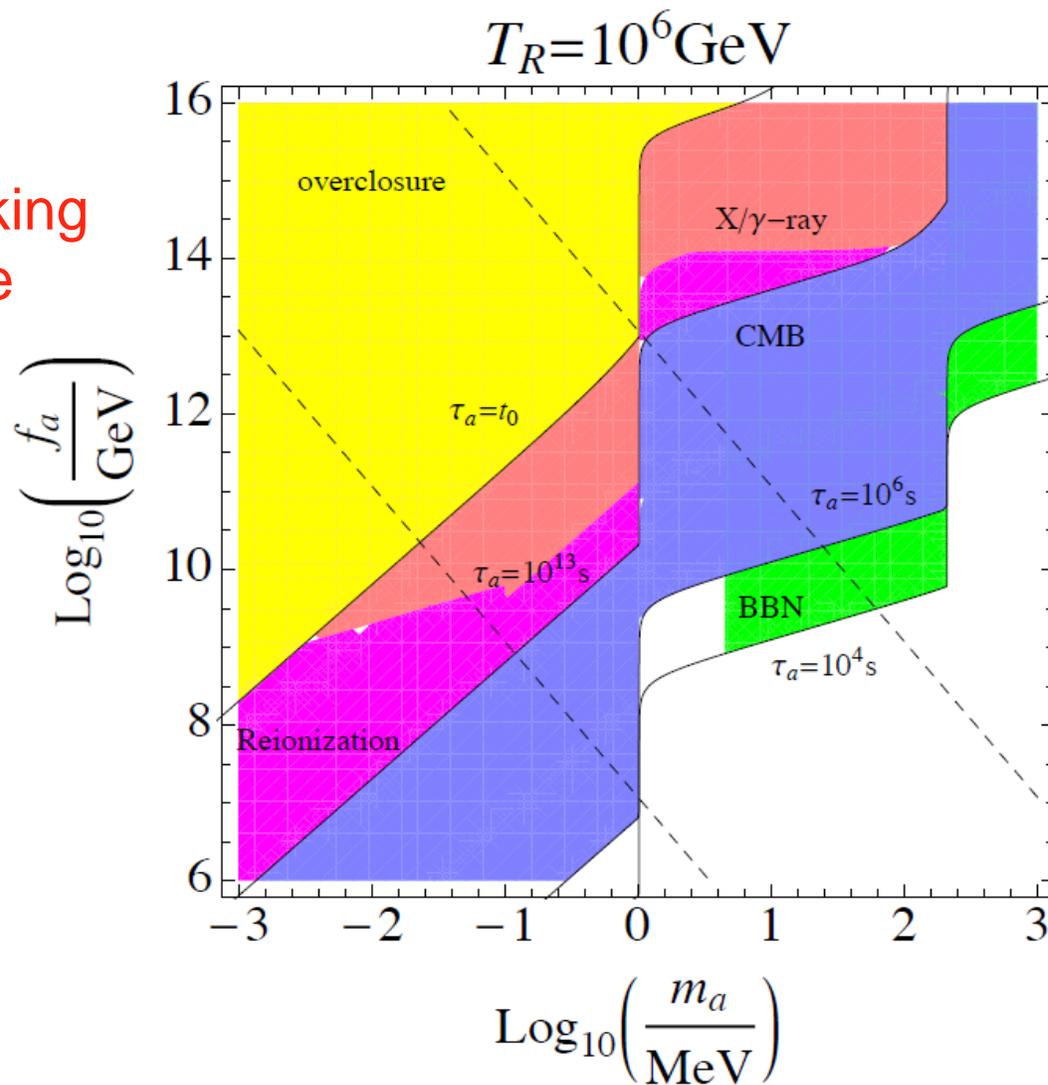
R-axionの生成まとめ

- R-stringは生き残らずR-axionへと崩壊する
- R-axionはどこかで崩壊 or 生き残る
- R-axionの生成量,寿命に応じて制限がかかる
 - BBN [Kawasaki, Kohri and Moroi `04]
 - CMB [W. Hu and J. Silk 1993, Ellis et al. 1992]
 - X/ γ ray の制限 [Greiner et al. 2008]
 - 再イオン化の制限 [Zhang et al. 0704.2444]
 - DMのabundance

得られた制限

$\tan\beta=30$
anomaly係数=2
 $g^*=200$

R-breaking
scale

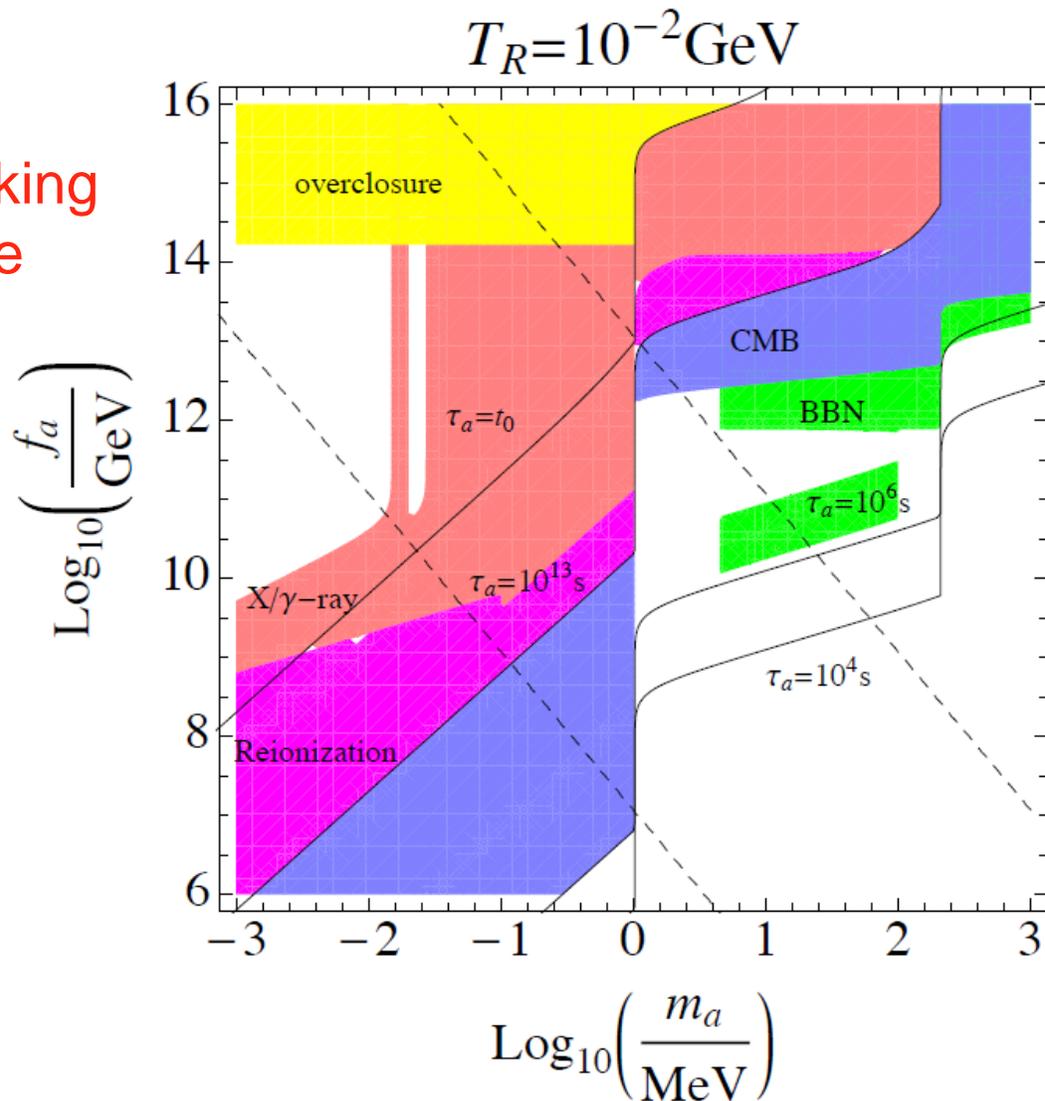


axion
mass

得られた制限

$\tan\beta=30$
anomaly係数=2
 $g^*=200$

R-breaking
scale



axion
mass

まとめ

- $U(1)_R$ を自発的に破るモデルに現れるR-string, R-axionの宇宙論を考察した
- R-axionの質量 m_a と $U(1)_R$ の破れのスケール f_a に厳しい制限がつく

Work in progress

- もっと重いR-axionについての制限
- String axion