



# Axion-DM 理論

July 5 2019 @ダークマター懇談会

高橋 史宜  
(東北大)

# 1.導入

---

- ▶ ダークマターは新しい物理の直接的証拠
- ▶ ダークマターは
  - ✓ (i) 冷たい（構造形成時に非相対論的）
  - ✓ (ii) 現在の宇宙のエネルギーの約1/4
  - ✓ (iii) とても長生き

$$\tau_{\text{DM}} \gtrsim 175 \text{ Gyr}$$

K. Enqvist, S. Nadathur, T. Sekiguchi and T. Takahashi,  
[arXiv:1906.09112 \[astro-ph.CO\]](#).

- (i),(ii): ダークマターの生成過程, 宇宙の歴史に依る
- (iii): ダークマター粒子の性質で決まる.

## ✓なぜとても長生き？

- ・対称性で崩壊が禁止ないし抑制.
- ・とても相互作用が弱い.
- ・とても軽い.

## ✓なぜとても軽い？

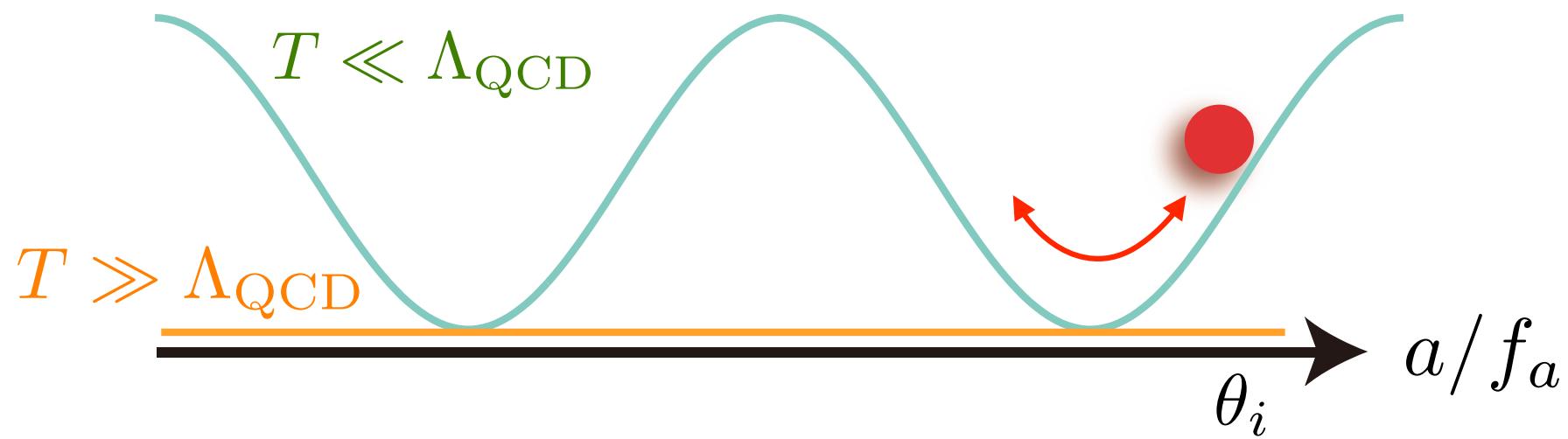
- ・対称性で質量が抑制

例：pNG boson (axion), シフト対称性  
sterile neutrino, カイラル対称性  
hidden photon, ゲージ対称性

以下，ダークマター候補のアクションを考える.

## 2. QCDアクションとALP

- QCDアクションは標準理論を超える新しい物理の有力な候補の一つ。
  - ・強いCP問題をダイナミカルに解決  
Peccei, Quinn '77, Weinberg '78, Wilczek '78
  - ・ダークマターを説明可能  
Preskill, Wise, Wilczek '83, Abbott, Sikivie, '83, Dine, Fischler, '83
- Axion-like particle (ALPs)も同様にダークマター候補



## 2つの大事なパラメター

$m_a$

質量

$f_a$

崩壊定数

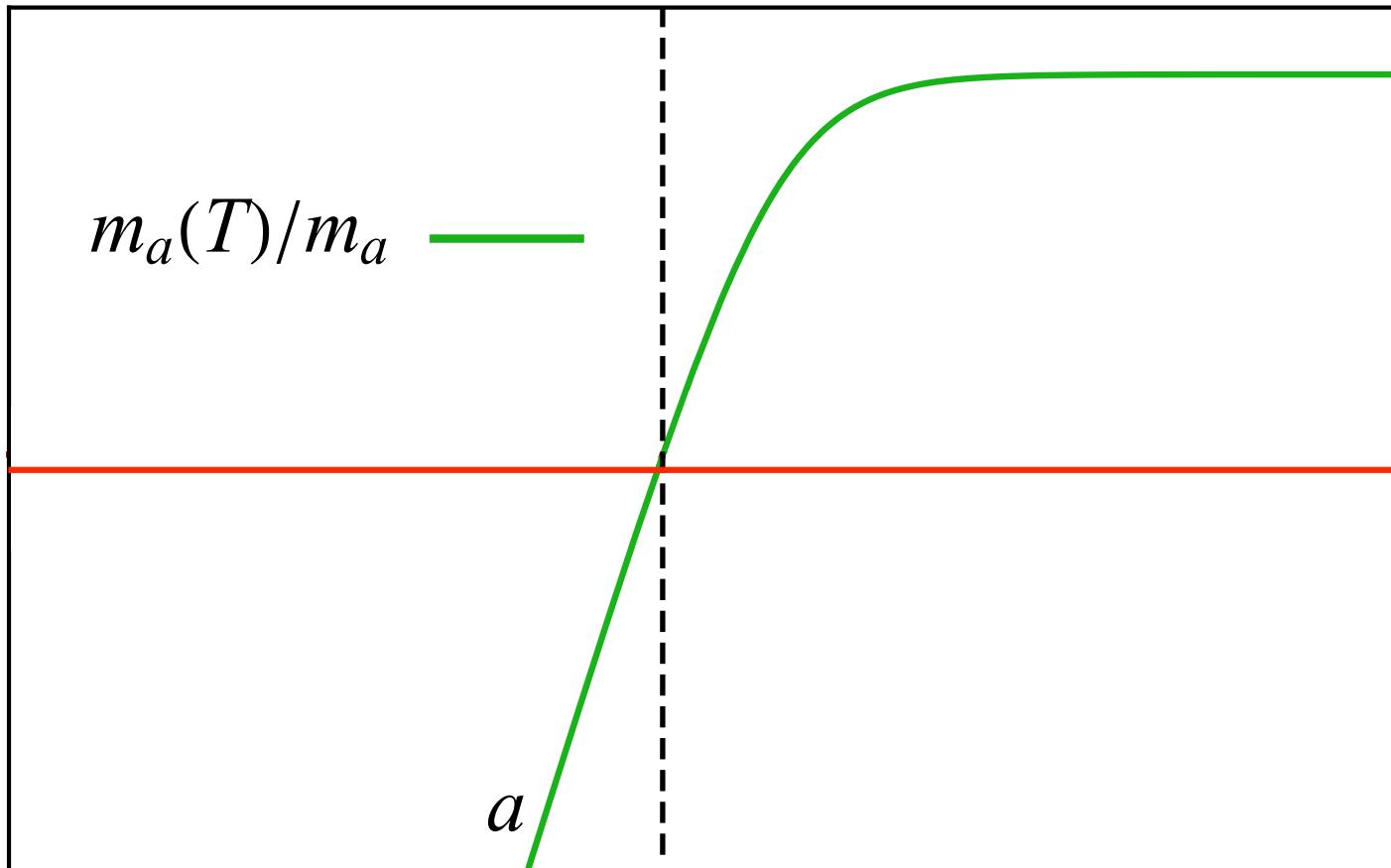
軽ければ安定で  
DMに寄与

相互作用の強さ  $\propto 1/f_a$

初期振幅を決めるのに大事.

どちらもアクションDMの存在量を決めるのに重要.

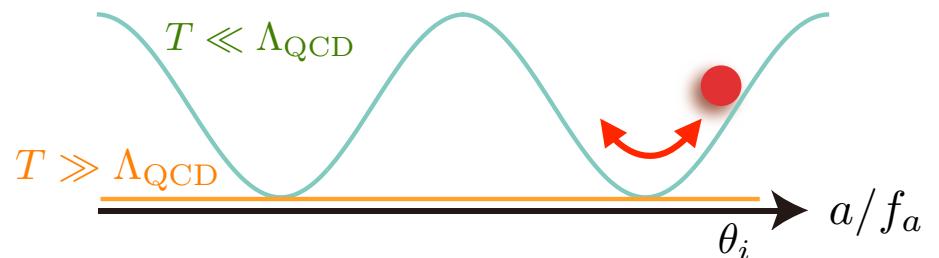
# QCD axion ALP



# High T

# Low T

massとHubbleがcomparableになると振動開始.



# アクションの存在量

## QCDアクション

$$\Omega_a h^2 \simeq 0.14 \theta_*^2 \left( \frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.17}$$

“Classical axion window”:  $10^8 \text{ GeV} \lesssim f_a \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$

## ALP

$$\Omega_\varphi h^2 \simeq 0.3 \theta_*^2 \left( \frac{m_\varphi}{1 \text{ eV}} \right)^{1/2} \left( \frac{f_\varphi}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^2$$

# QCDアクションの相互作用

## • Gluons

$$\mathcal{L}_{aGG} = N_{\text{DW}} \frac{a}{F_a} \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a = \frac{a}{f_a} \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{a\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

defines the axion decay constant  $f_a = \frac{F_a}{N_{\text{DW}}}$ .  $N_{\text{DW}}$ : domain wall number

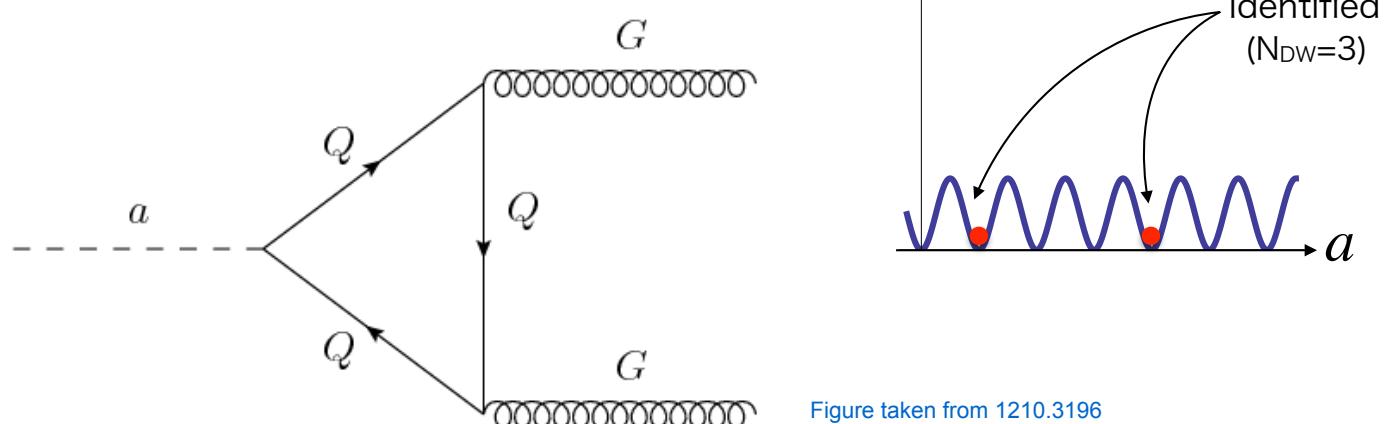


Figure taken from 1210.3196

### Hadronic/KSVZ axion

Kim '79, Shifman, Vainshtein, and Zakharov '80

Yet unknown heavy  
quarks run in the loop.

### DFSZ axion

Dine, Fischler, and Srednicki '81, Zhitnitsky '80

Ordinary SM quarks  
run in the loop.  $N_{\text{DW}} = 3$  or 6.

N.B. Both heavy and SM quarks, or only a part of SM quarks may run in the loop, which help to avoid the domain wall problem by  $N_{\text{DW}} = 1$ .

# アクションの相互作用

## • Photons

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{g_{a\gamma\gamma}}{4} a F_{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} = -g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}$$

$$g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha}{2\pi f_a} \left( \frac{E}{N} - 1.9 \right) \quad \text{E and N are EM and color anomaly factors of the PQ current.}$$

## • Electrons

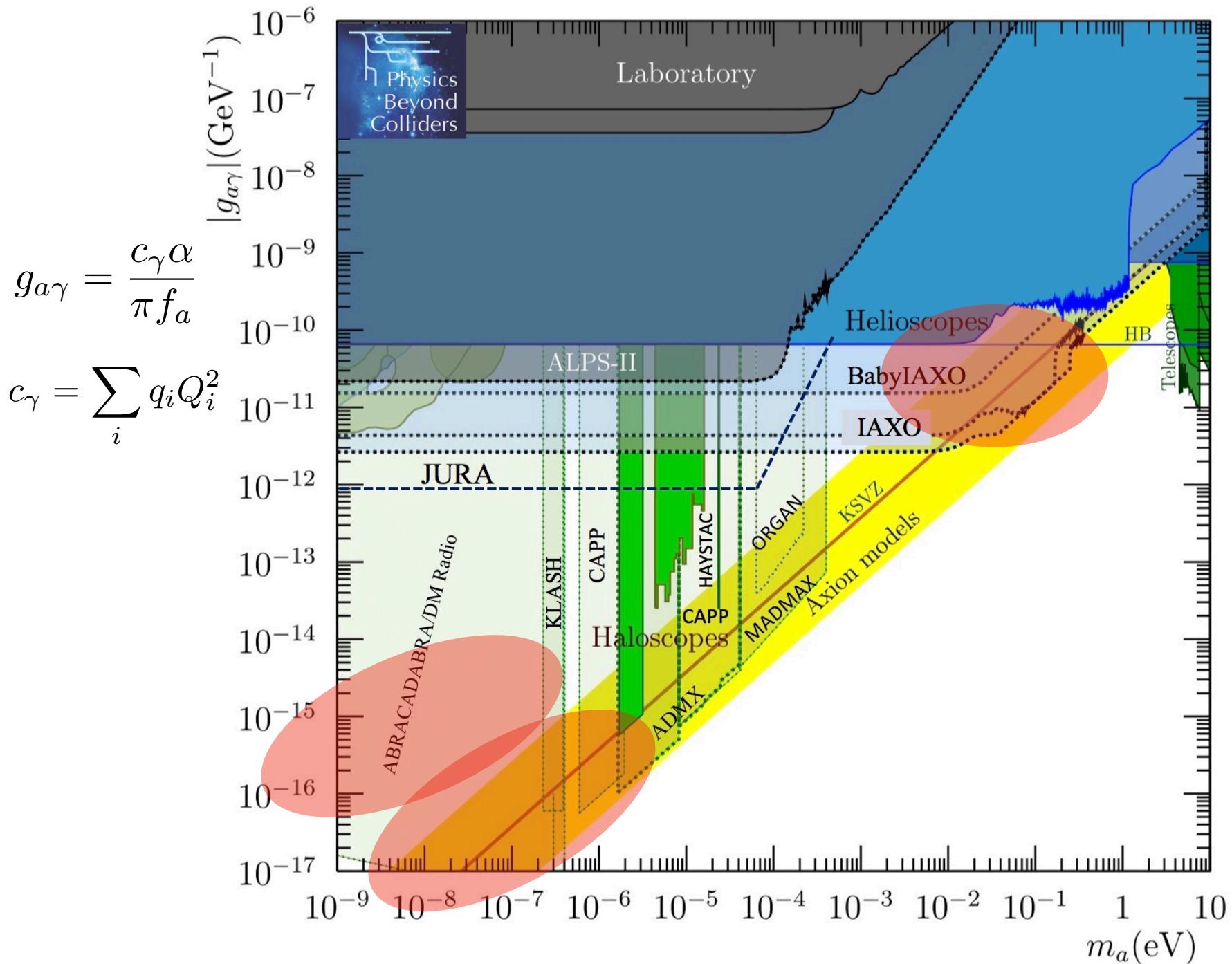
$$\mathcal{L}_{aee} = \frac{C_e}{2f_a} \partial_\mu a (\bar{\Psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_e) = -ig_{aee} a (\bar{\Psi}_e \gamma_5 \Psi_e) + \dots$$

$$g_{aee} \equiv \frac{C_e m_e}{f_a} \quad C_e = \frac{\cos^2 \beta}{3} \quad \text{for DFSZ axion.}$$

Model-dependent. Coupling to electrons appear only at loop-level in the hadronic axion.

## • Nucleons

$$\mathcal{L}_{aN\bar{N}} = \sum_{N=p,n} \frac{C_N}{2f_a} \partial_\mu a (\bar{\Psi}_N \gamma^\mu \gamma_5 \Psi_N)$$



Taken from `Physics Beyond Colliders at CERN: Beyond the Standard Model Working Group Report,' arXiv:1901.09966 [hep-ex].

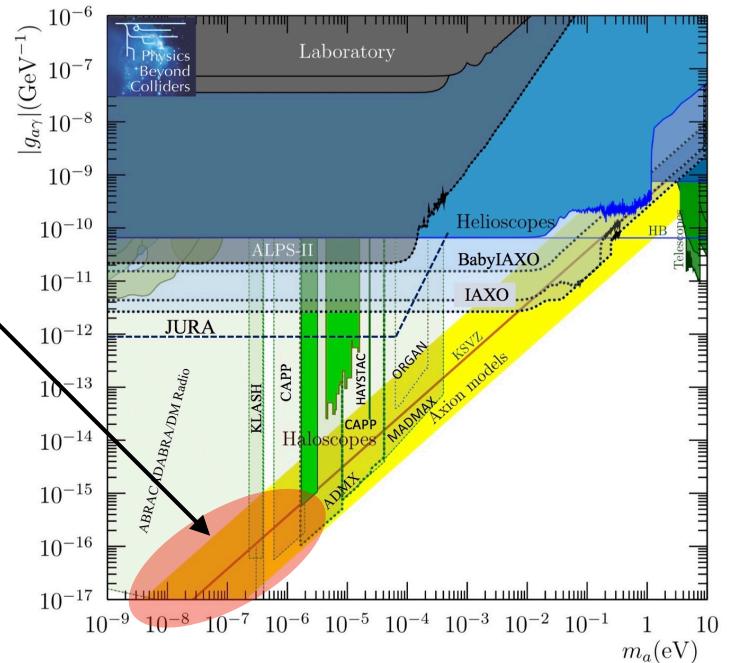
私の

# 3. 最近のトピック

# Topic 1: それは微調整ですか？

QCD axionはこの領域でとても軽い。  
つまり $f_a$ が大きい。

$$\Omega_a h^2 \simeq 0.14 \theta_*^2 \left( \frac{f_a}{10^{12} \text{ GeV}} \right)^{1.17}$$

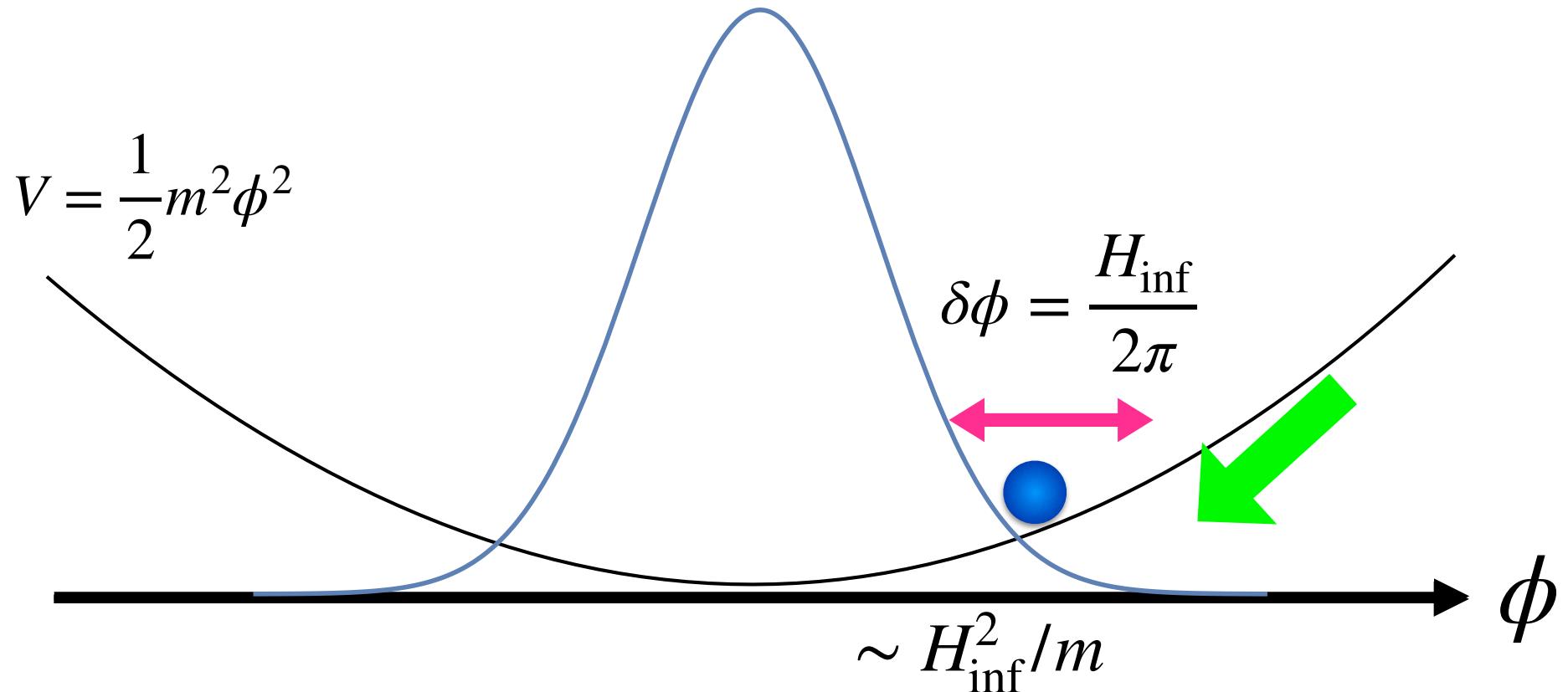


$f_a = 10^{16-17} \text{ GeV}$ だとDMの存在量に合わせるために、  
初期振幅を $O(10^{-3})$ くらいに小さくしないといけない。

cf.  $\frac{\text{物理学者の総数}}{\text{地球上の総人口}} \sim 10^{-4}$

# Topic 1: それは微調整ですか？

実は、「自然な」初期値はインフレーションスケールに依存する。

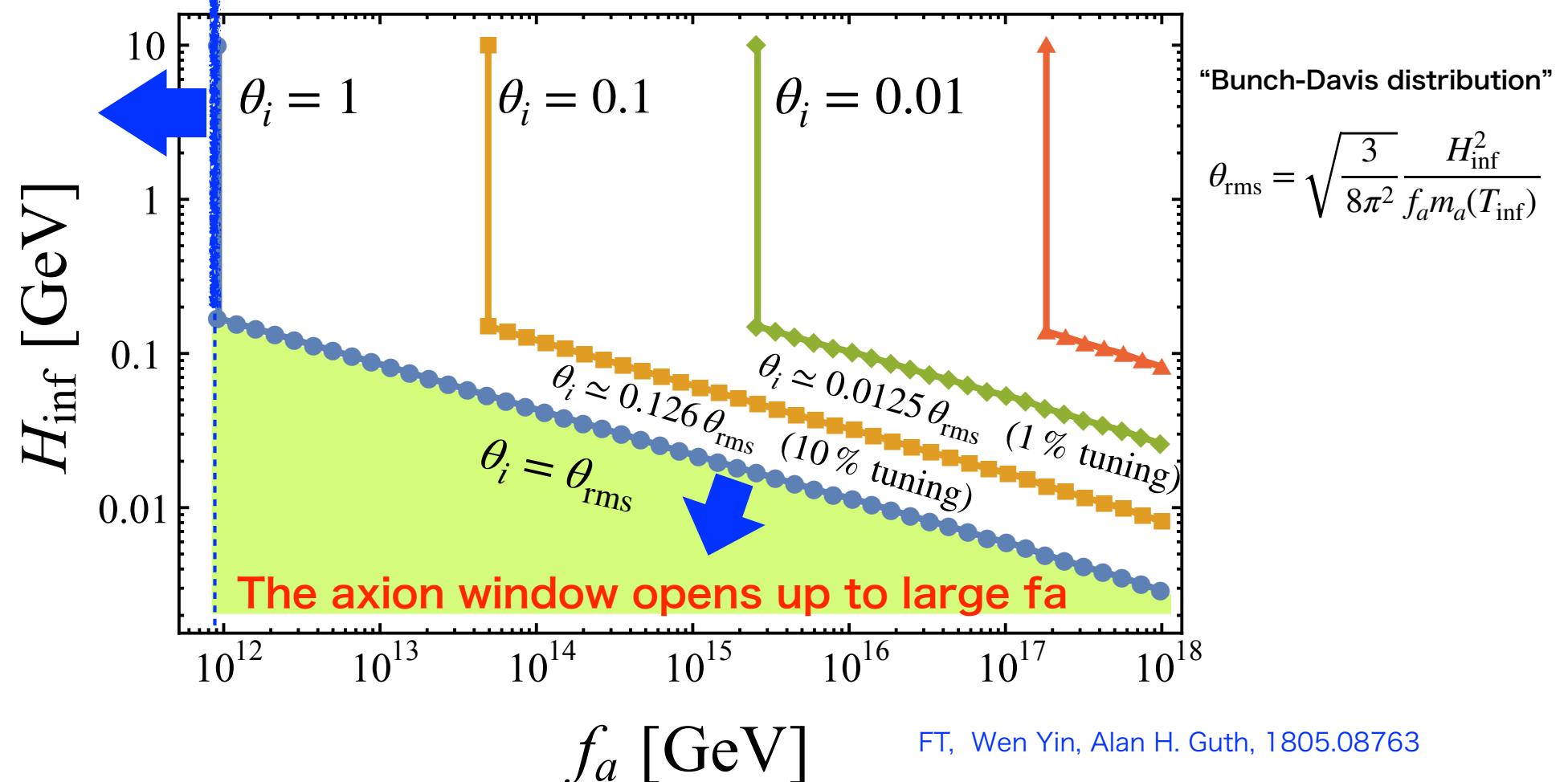


典型的な初期振幅は  $\theta_* \sim \frac{H_{\text{inf}}^2}{m_a(T_{\text{GH}})f_a}$  となり,  
1より小さくなりうる。

The upper bound of the QCD axion window can be relaxed in low-scale inflation with  $H_{\text{inf}} \lesssim \Lambda_{\text{QCD}}$ .

Conventional axion window,  $f_a \lesssim 10^{12} \text{ GeV}$

Peter W. Graham, Adam Scherlis, 1805.07362,  
FT, Wen Yin, Alan H. Guth, 1805.08763

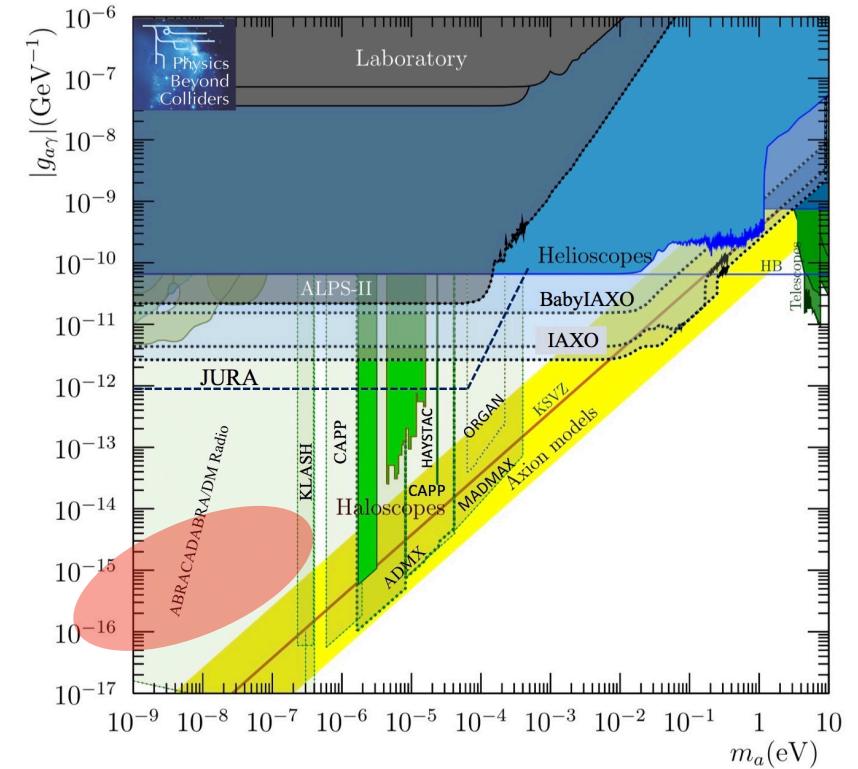


# Topic 2: とにかく減らしたい

$f_a$ がGUTスケールくらい大きいとアクションの量が多すぎる傾向.

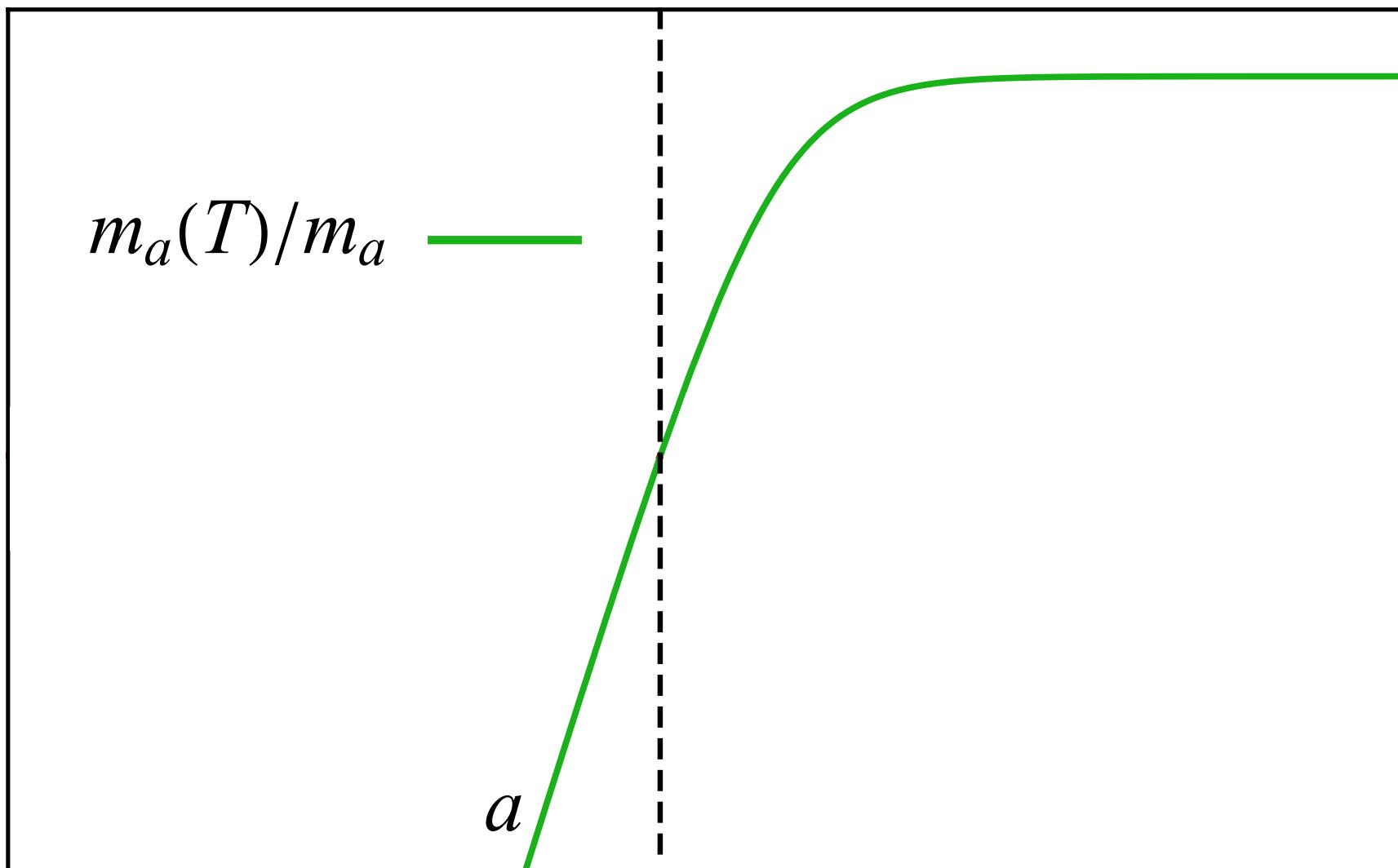
減らす方法はいろいろ知られている.

- ・エントロピーを生成して薄める
  - ・Hidden monopoleを使ってWitten効果
  - ・Hidden photon生成
- etc. **See Kitajima's talk**



QCDアクションをそれより軽いALPに転換させることが可能.

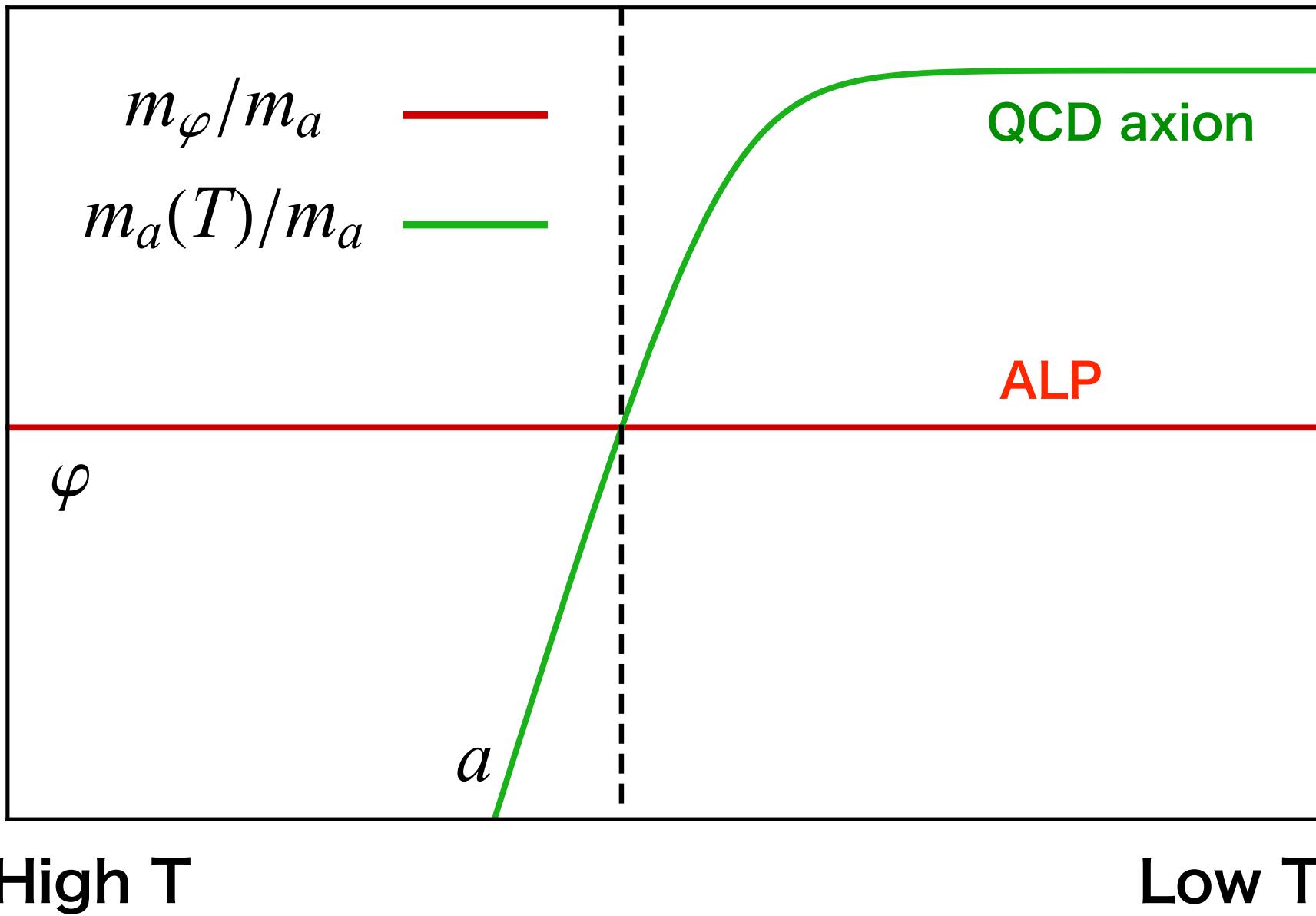
# QCD axion



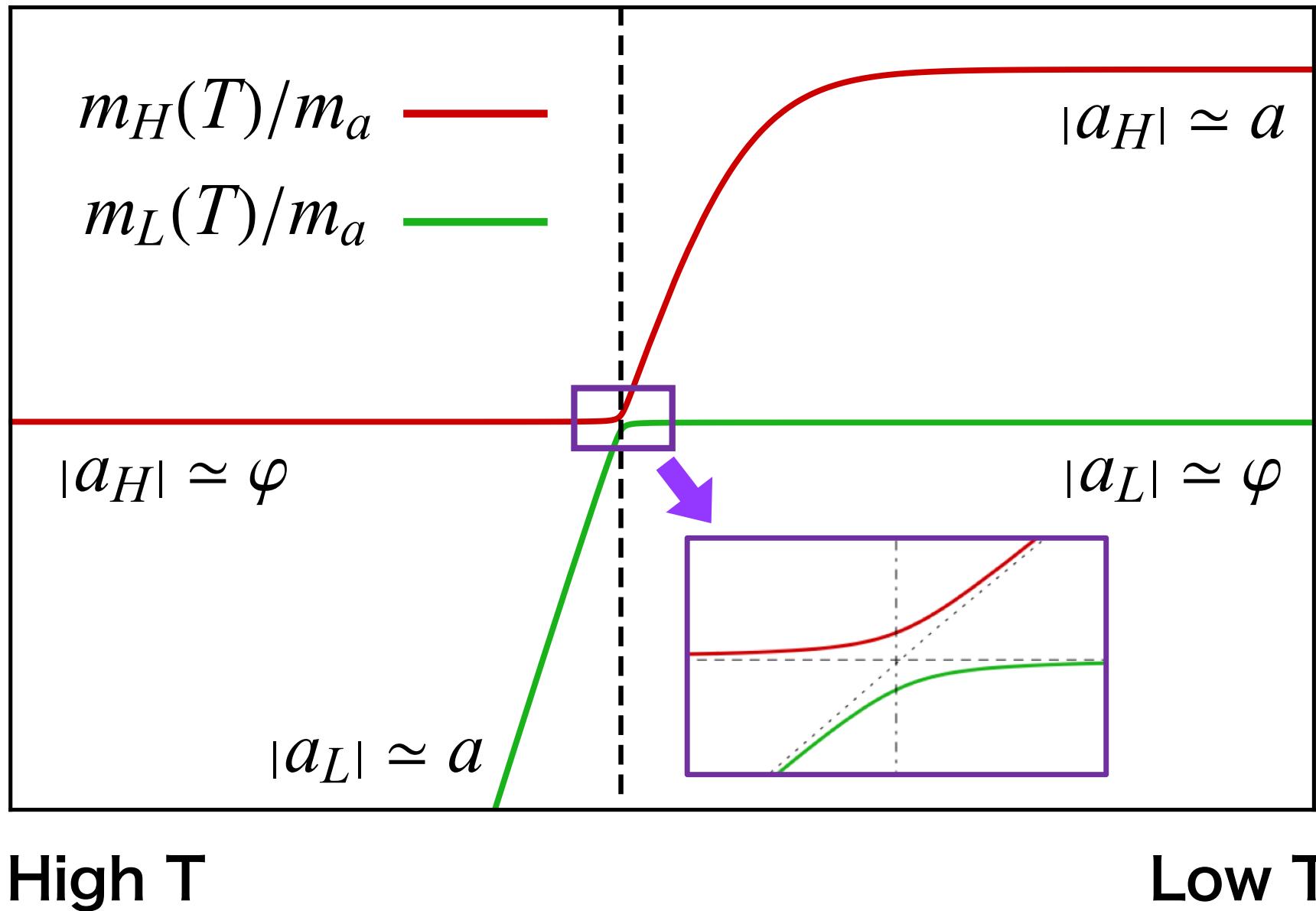
High T

Low T

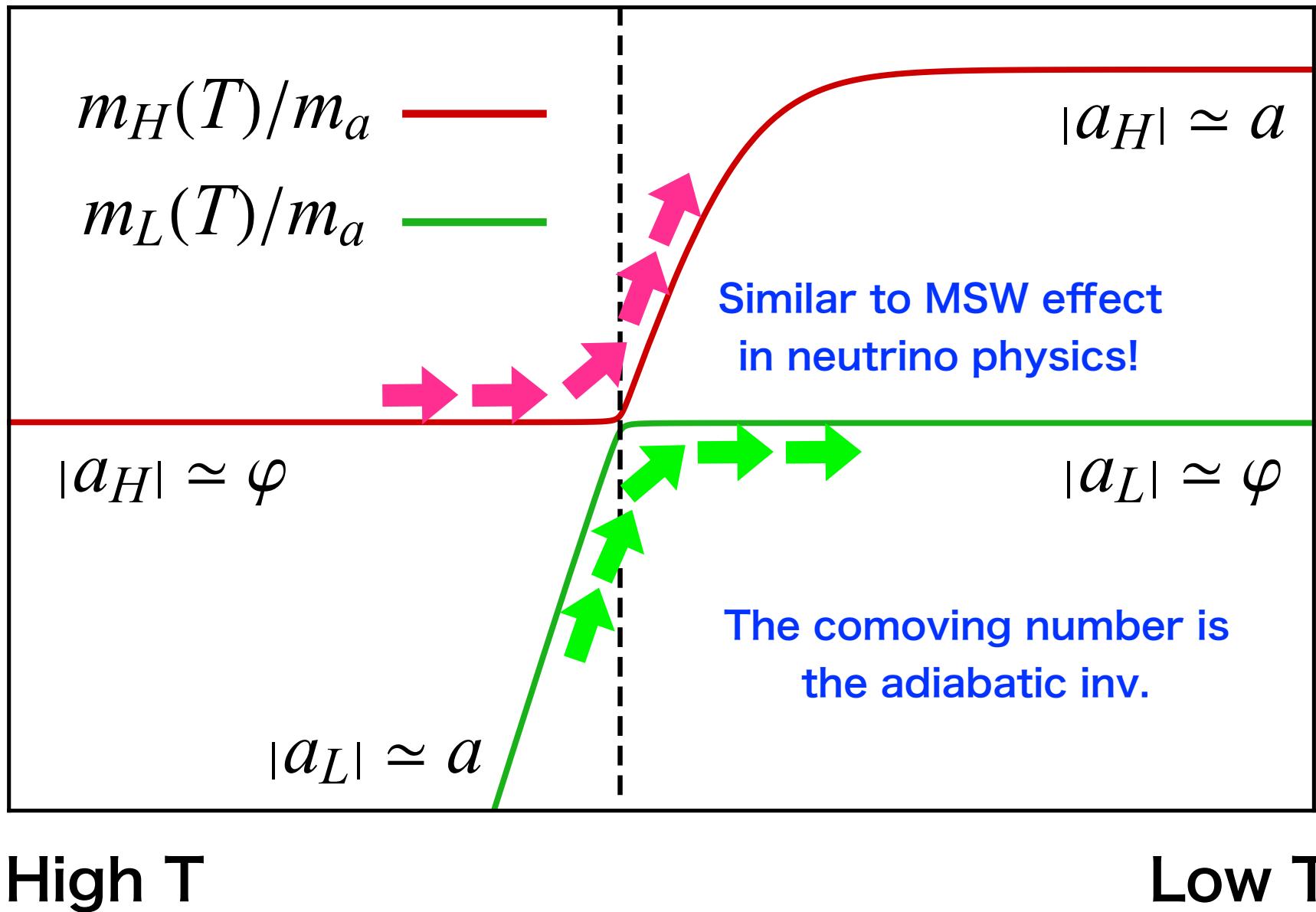
## QCD axion + ALP with $m_\varphi < m_a(T = 0)$



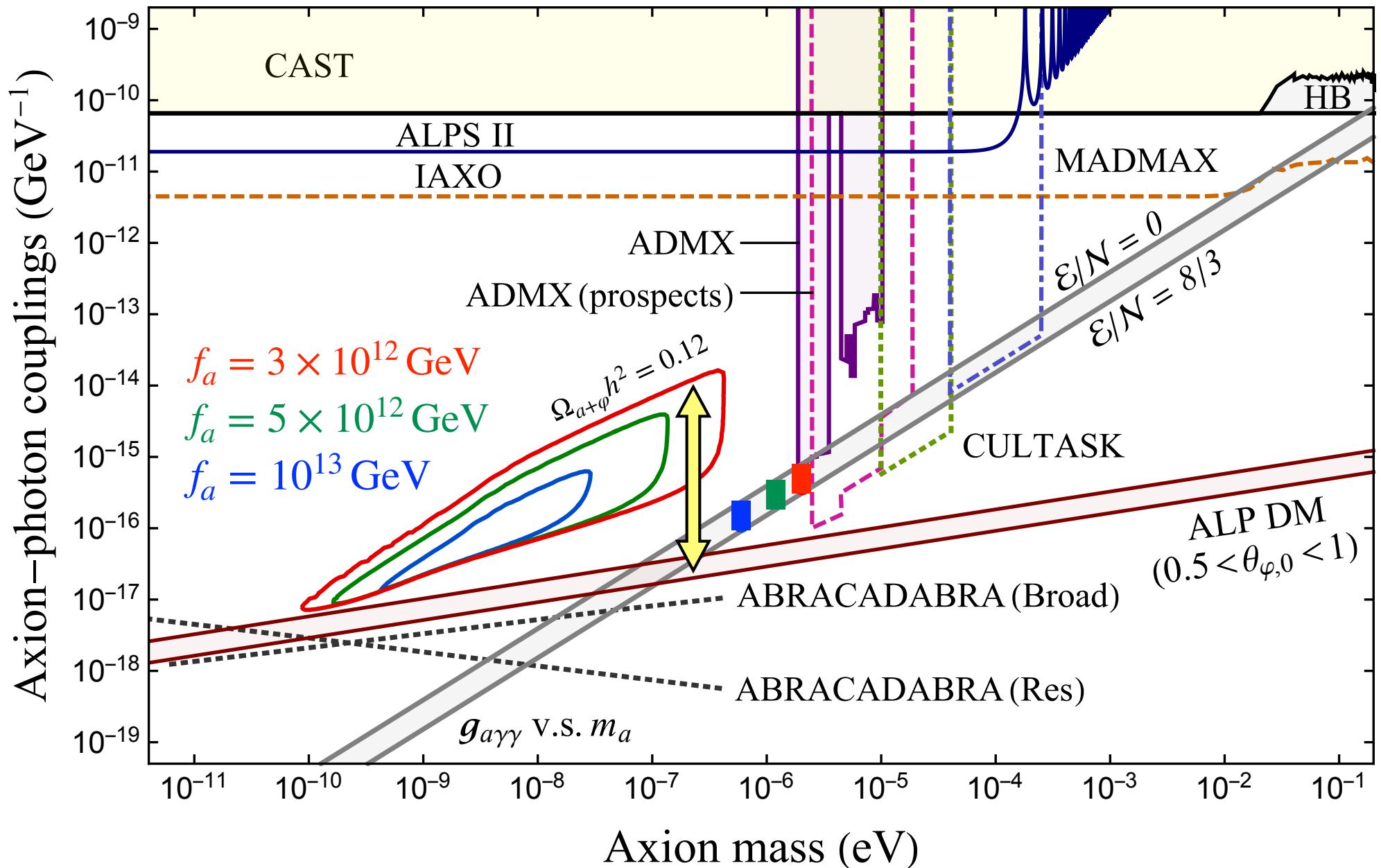
# QCD axion + ALP with $m_\varphi < m_a(T=0)$ + mass mixing



# QCD axion + ALP with $m_\varphi < m_a(T=0)$ + mass mixing



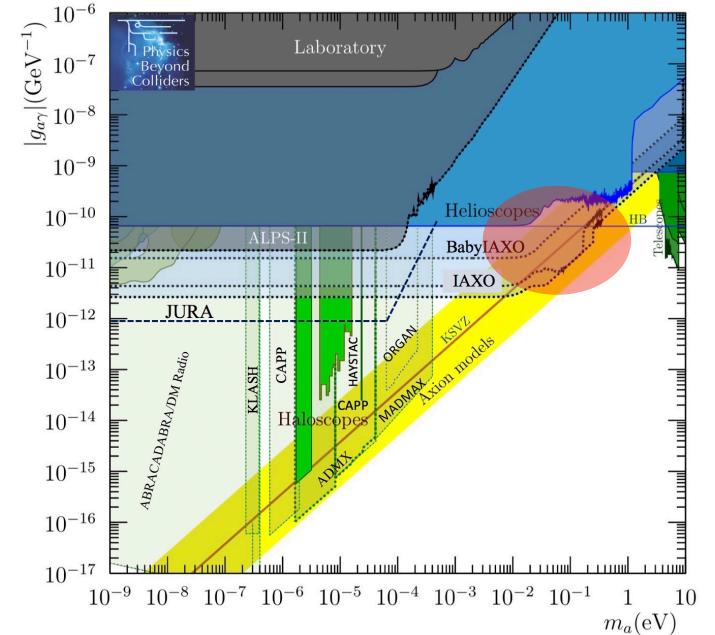
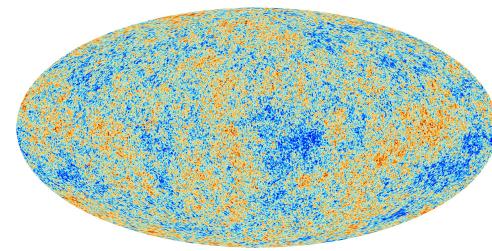
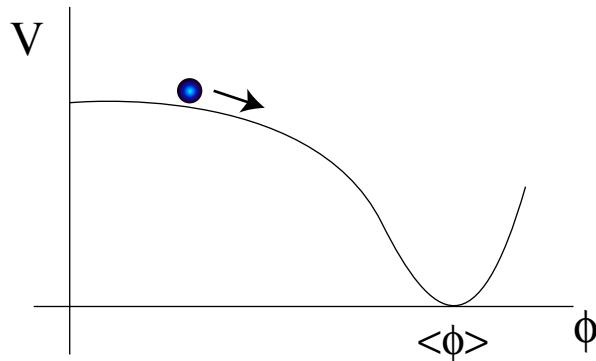
# Axion coupling to photons



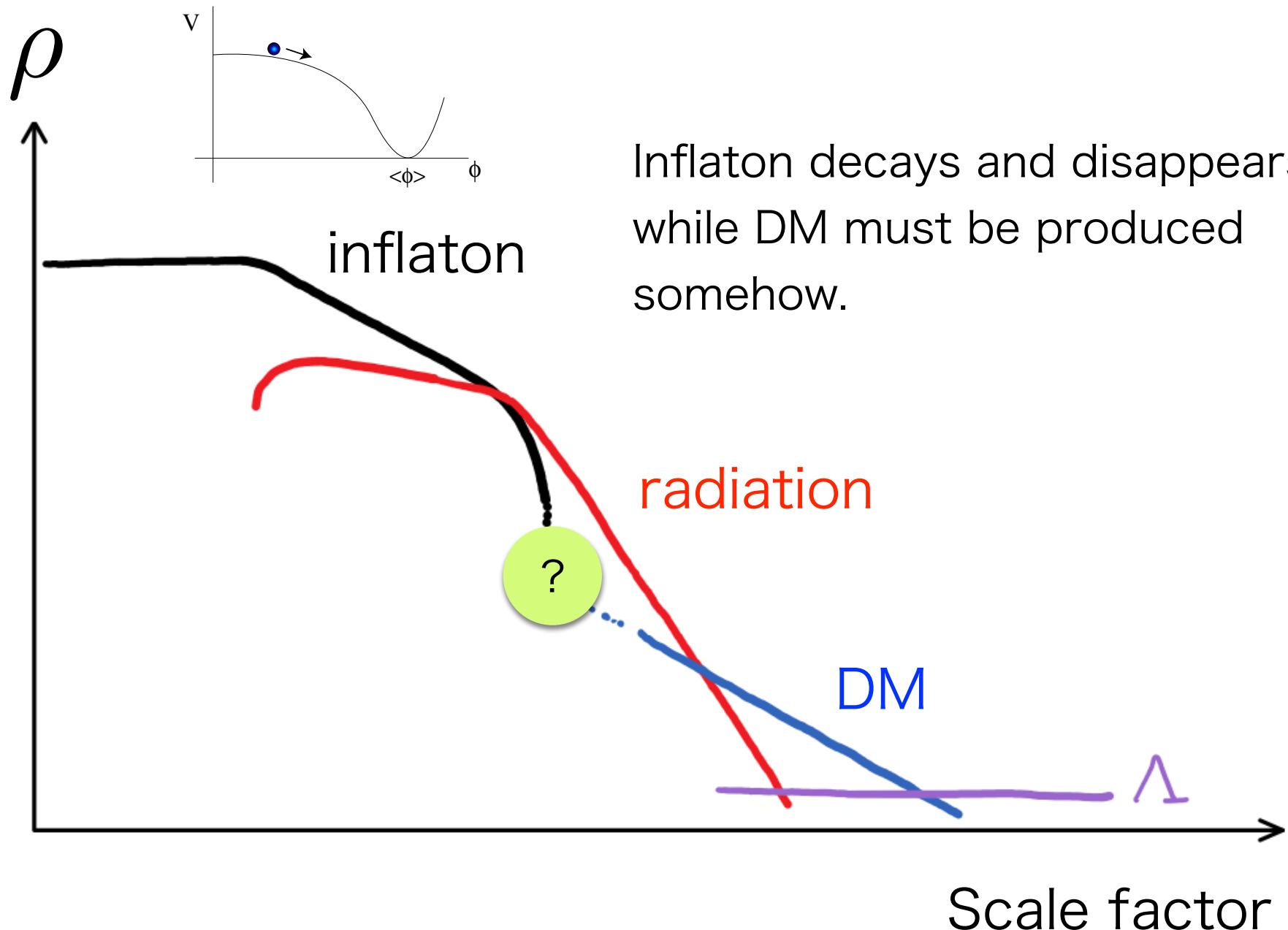
ALP coupling to photons can be enhanced by a few orders of magnitude.

# Topic 3: ALPでインフラトン

インフラトンもダークマターも電  
気的に中性で宇宙のエネルギーの  
支配的成分であった。

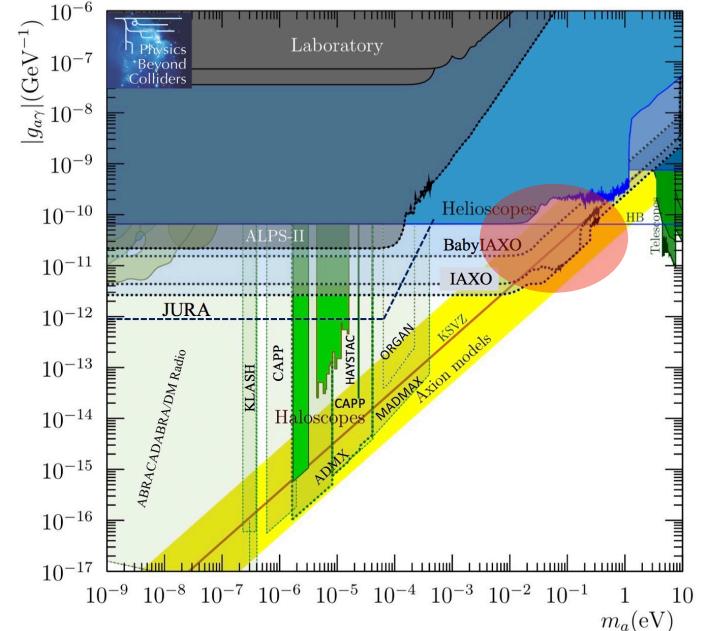
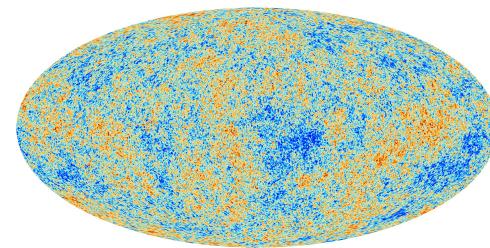
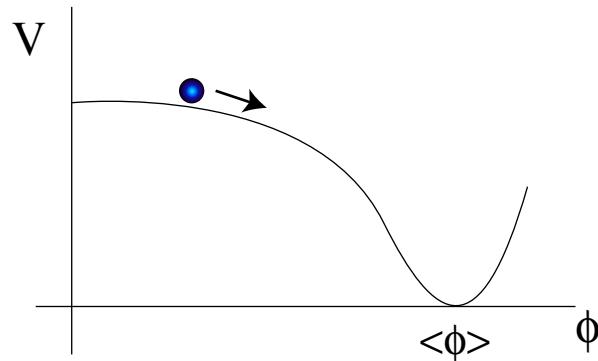


# Topic 3: ALPでインフラトン



# Topic 3: ALPでインフラトン

インフラトンもダークマターも電  
気的に中性で宇宙のエネルギーの  
支配的成分であった。



**ALP inflaton = ALP DM**

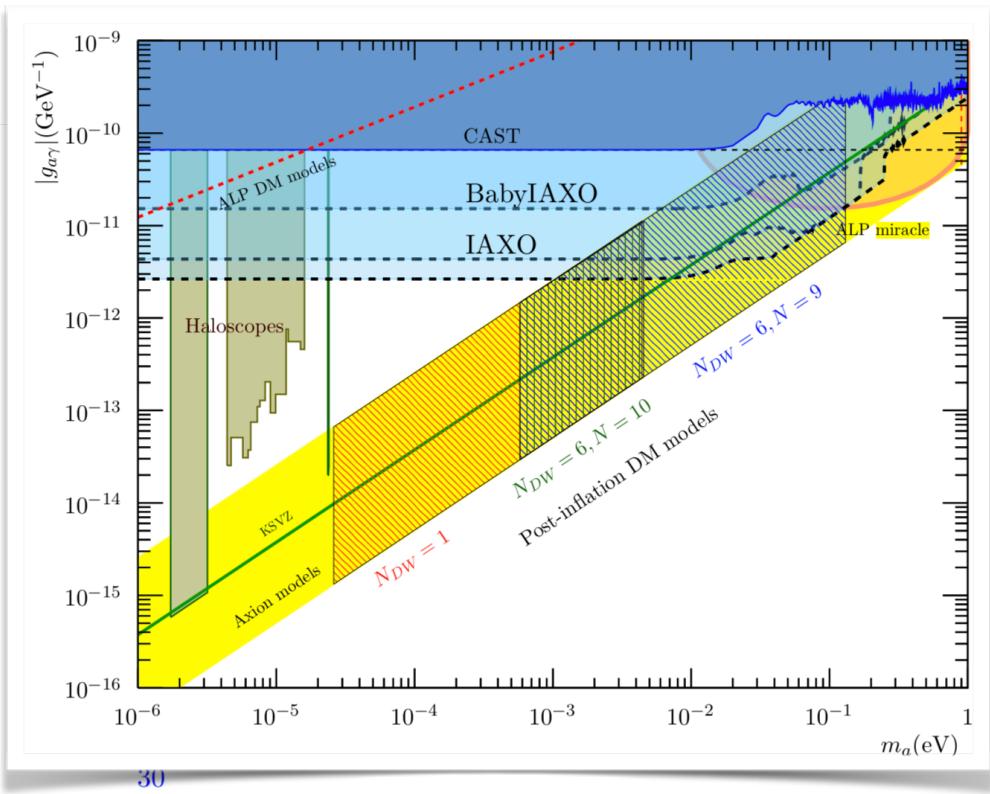
$$m_\phi = \mathcal{O}(0.01 - 1) \text{ eV}$$
$$g_{\phi\gamma\gamma} = \mathcal{O}(10^{-11}) \text{ GeV}^{-1}$$

**“ALP miracle”**

# Physics potential of the International Axion Observatory (IAXO)

## Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	
<b>2</b>	<b>Axions from high-energy physics</b>	
2.1	Stringy axions	
2.2	The low-energy Lagrangian and field-theoretic models	
<b>3</b>	<b>A meV mass QCD axion as dark matter candidate</b>	
3.1	The pre-inflationary Peccei-Quinn symmetry breaking scenario	
3.2	The post-inflationary Peccei-Quinn symmetry breaking scenario	
3.3	Production of dark matter axions from topological defects	
3.3.1	Models with $N_{\text{DW}} = 1$	
3.3.2	Models with $N_{\text{DW}} > 1$	
<b>4</b>	<b>Axions as dark radiation</b>	
4.1	Thermally produced ALP dark radiation	
4.2	Non-thermal ALP dark radiation from modulus decay	
4.3	Additional observational hints of axionic dark radiation	
<b>5</b>	<b>Axions and inflation</b>	
5.1	Axion hilltop inflation	33
5.2	Reheating of the ALP inflaton into photons	34
5.3	The ALP miracle: axionic unification of inflaton and DM	35
<b>6</b>	<b>Hints for axions in the anomalous cooling of stellar objects</b>	
6.1	Summary of cooling anomalies	36
6.1.1	Pulsating white dwarfs	37
6.1.2	The white dwarf luminosity function	38
6.1.3	Globular clusters	39
6.1.4	He-burning supergiants	39
		40



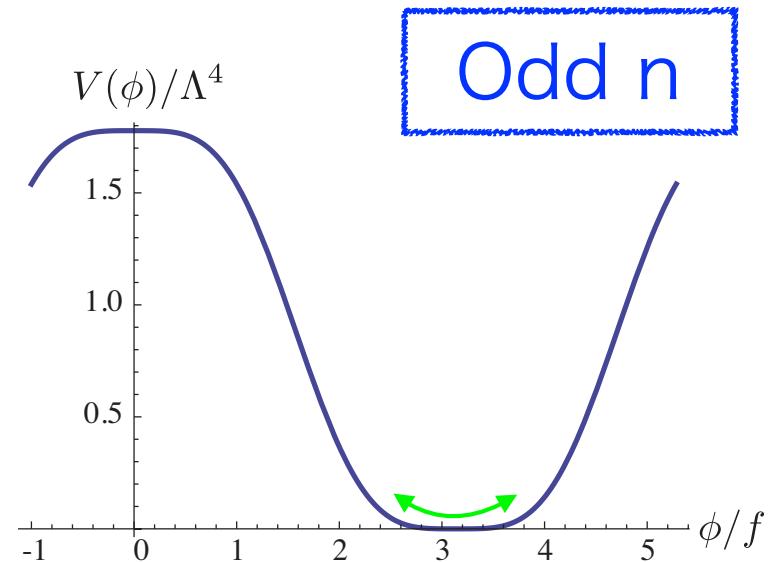
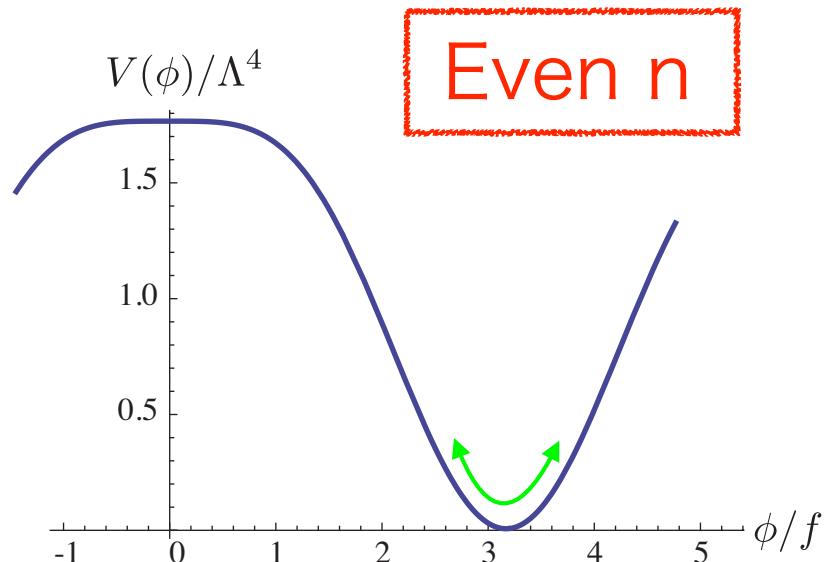
# • Axion hilltop inflation

Czerny, FT 1401.5212,  
Czerny, Higaki, FT 1403.0410, 1403.5883  
Croon and Sanz, 1411.7809

Low-scale axion inflation can be realized with **at least two cosine terms**: “*Multi-natural inflation*”

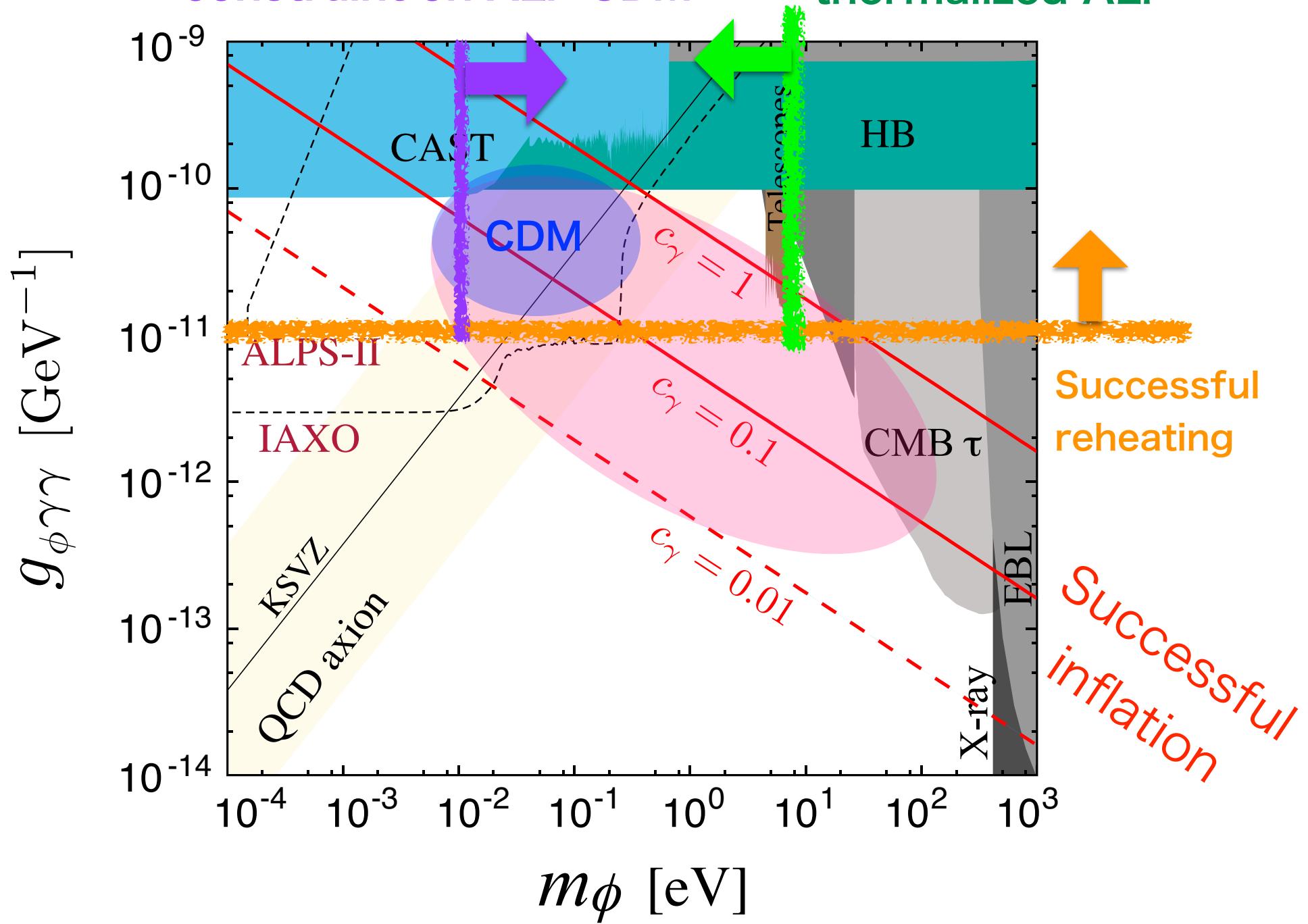
$$V_{\text{inf}}(\phi) = \Lambda^4 \left( \cos \left( \frac{\phi}{f} + \theta \right) - \frac{\kappa}{n^2} \cos \left( \frac{n\phi}{f} \right) \right) + \text{const.}$$

The inflaton mass at the minimum,  $m_\phi$ , depends on  $n$ .



## Small-scale structure constraint on ALP CDM

## HDM constraint on thermalized ALP



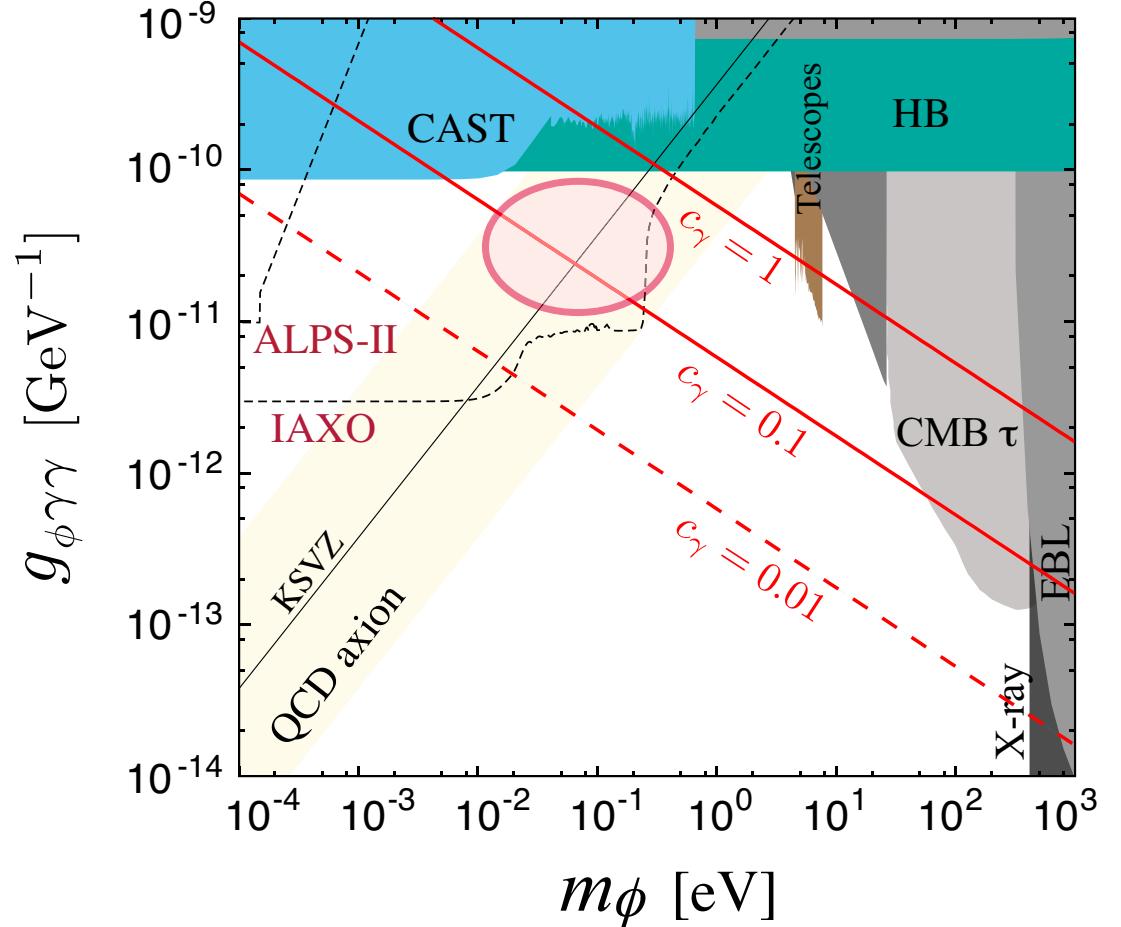
# Inflaton = DM = ALP



$$m_\phi = \mathcal{O}(0.01 - 1) \text{ eV}$$

$$g_{\phi\gamma\gamma} = \mathcal{O}(10^{-11}) \text{ GeV}^{-1}$$

within the reach of future axion helioscopes and laser experiments.



*“An ALP miracle”*

\*Plus, there is a preference for extra cooling of HB stars

$$g_{\phi\gamma\gamma} = (0.29 \pm 0.18) \times 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$$

# 4. まとめ

- QCDアクション, ALPはダークマターの良い候補
- どのパラメター領域が良いかは模型次第
- よく言う微調整が必要な大きな $f_a$ の領域もインフレーションスケールが低ければOK.
- QCDアクションとALPのadiabatic conversionが起きると, 普通はDMに足りないところでもALP DM可能.
- インフラトンとダークマターの統一模型 (ALP miracle)

