
アクシオンゲージ場モデルにおける 暗黒輻射残存量の解析

尾形優仁（富山大）

- 共同研究者

柿崎充（富山大） 瀬戸治（北海道大）

- [arXiv:2110.12936](https://arxiv.org/abs/2110.12936) [hep-ph]

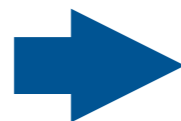
Big Bang Cosmology

✓ 初期宇宙の熱平衡状態や、軽元素合成を予言

- 宇宙背景輻射（CMB）、軽元素の存在比、赤方偏移の観測から確かめられた

✓ 平坦性問題、地平線問題、不要残存物問題などを抱えている

- 加速膨張期が存在することで問題を回避できる

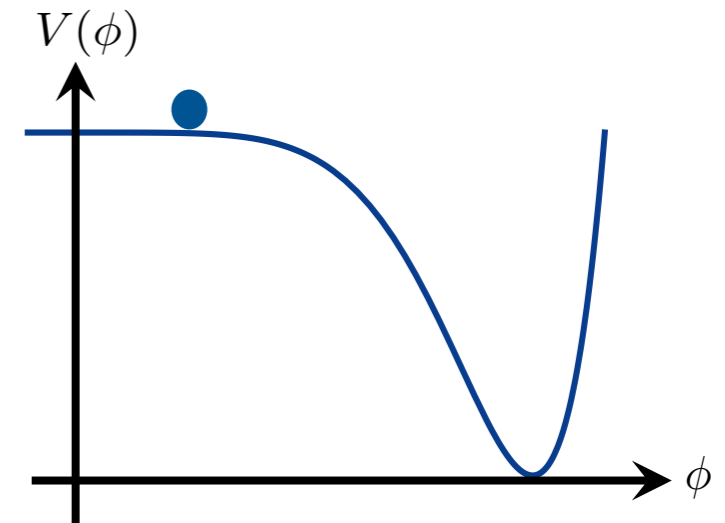


インフレーション

Inflationary Cosmology

- ✓ インフレーションが起こる条件

$$|\dot{H}| \ll H^2, \quad |\ddot{\phi}| \ll |3H\dot{\phi}|$$



➡ 条件を満たす模型が多数存在

- ✓ インフレーション中の真空揺らぎが重力波を生む

$$\mathcal{P}_h = \frac{2H_{\text{inf}}^2}{\pi^2 M_{\text{pl}}^2}$$

- 重力波の観測からインフレーションスケールが決まる

➡ スケールが分かることで模型の選別ができる

Sources of Gravitational Waves

✓ 観測される重力波

[Dimastrogiovanni, Fasiello, Fujita. JCAP, Vol. 01 (2017)]

$$r_{\text{obs}} = r_{\text{vac}} + r_A$$

$$r \equiv \mathcal{P}_h / \mathcal{P}_\zeta$$

r_A ... アクシオンゲージ場由来の
テンソル・スカラー比

✓ $r_{\text{obs}} = 0.06$ に対応するインフレーションスケールは

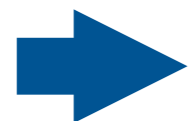
[P. A. R. Ade et al., Phys. Rev. Lett. 121, 221301 (2018)]

- r_{vac} が優位な場合

$$H_{\text{inf}} = 6 \times 10^{12} \text{ GeV}$$

- r_A が優位な場合

$$H_{\text{inf}} \geq 3 \times 10^{12} \text{ GeV}$$



インフレーションスケールが決定できない

Components and Roles

✓ アクシオンゲージ場模型

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_\phi - \frac{1}{2} \text{Tr}[F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}] + \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \chi \partial_\nu \chi - V(\chi) + \frac{\lambda}{2f} \chi \text{Tr}[F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}]$$

- インフラトン(ϕ)

...インフレーションを引き起こす

$$3M_{\text{pl}}^2 H^2 \approx \rho_\phi$$

- Hidden SU(2)ゲージ場(A_μ)

...重力波を生成する

$$\bar{A}_i \delta A_j \rightarrow h_{ij}$$

$$\bar{A}_i^a = aQ \delta_i^a$$

- アクシオン(χ)

...ゲージ場を励起する

$$H\dot{Q} \approx -\frac{\delta V_{\text{eff}}(Q, \chi)}{\delta Q}$$

Stable Solutions

- ✓ 一様等方な背景場として以下のような自由度が許される

$$A_0^a = 0, \quad A_i^a = a(t)Q(t)\delta_i^a$$

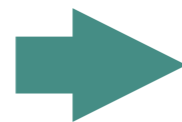
- ✓ ゲージ場の初期値に強結合条件を課す

$$\frac{3}{(m_Q \Lambda)^2} \ll 1, \quad \frac{2}{\Lambda^2} \ll 1$$

$$\Lambda \equiv \lambda Q / f \quad \text{規格化されたゲージ場}$$
$$m_Q \equiv gQ / H \quad \text{ゲージ場の有効質量}$$

- ✓ ゲージ場の運動方程式

$$\dot{Q} \approx -\frac{H}{Q^2} \left(Q^3 + \frac{fV_{,\chi}}{3g\lambda H} \right)$$



$$Q_{\min} = \left(-\frac{fV_{,\chi}}{3g\lambda H} \right)^{1/3}$$

Behavior of Axion

- ✓ 強結合条件が保たれている

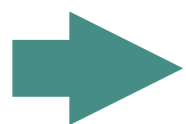
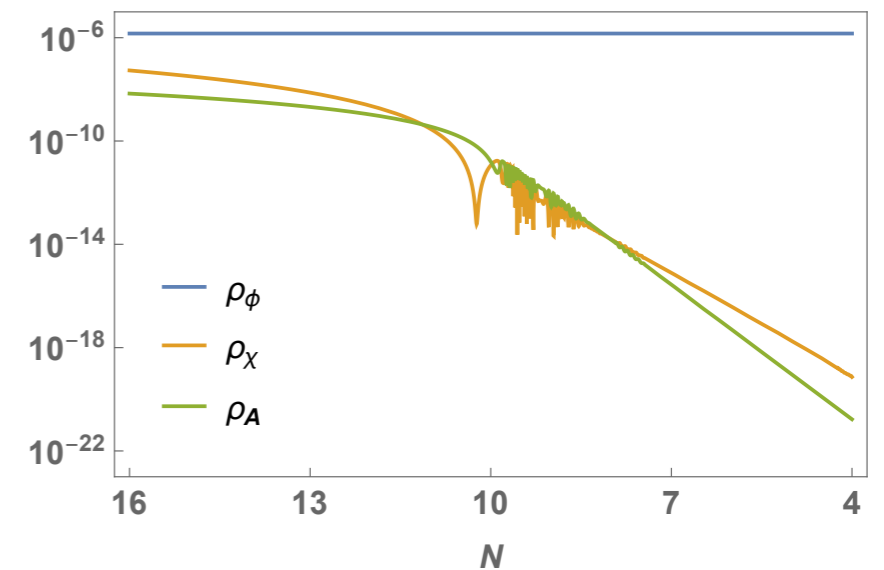
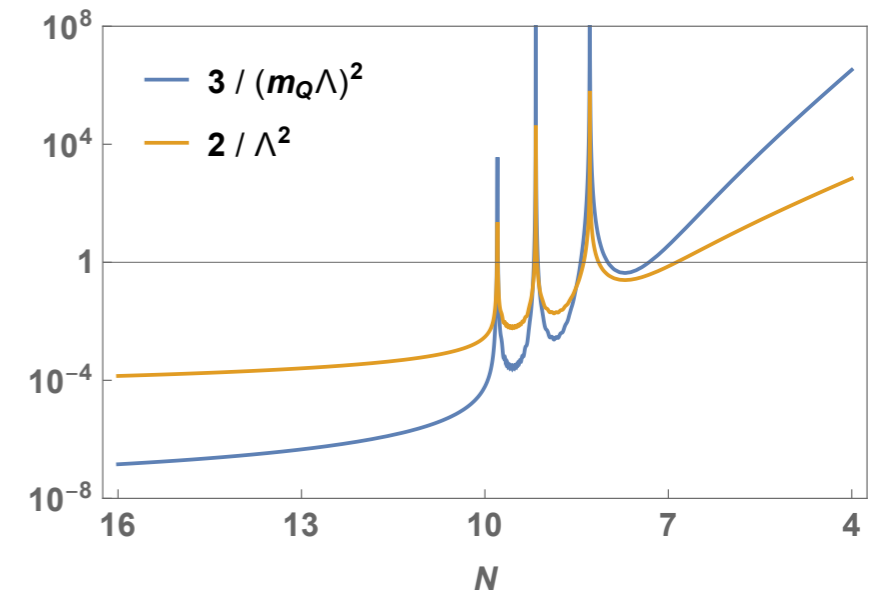
$$\rho_{\text{hid}} \simeq \text{const.}$$

- ✓ 強結合条件が破れる

$$\rho_{\text{hid}} \propto a^{-3}$$

- ✓ $\Gamma \sim H$ のときゲージ場に崩壊する

$$\rho_{\text{hid}} \propto a^{-4} \quad \Gamma = \frac{3m_\chi^3 \lambda^2}{64\pi f^2}$$



残存物が暗黒輻射として振る舞う

Dark Radiation

✓ 再結合時の輻射成分のエネルギー密度

$$\rho_r = \rho_\gamma + \frac{7N_{\text{eff}}^{\text{SM}}}{4} \frac{\pi^2}{30} T_\nu^4 + \rho_d$$

$$= \rho_\gamma + \underbrace{(N_{\text{eff}}^{\text{SM}} + \Delta N_{\text{eff}})}_{N_{\text{eff}}^{\text{obs}}} \frac{7}{4} \frac{\pi^2}{30} T_\nu^4$$

$N_{\text{eff}}^{\text{obs}}$... 観測される量

ρ_d ... 暗黒輻射のエネルギー密度

$N_{\text{eff}}^{\text{SM}}$... SMでのニュートリノの有効自由度

✓ アクシオンゲージ場の寄与

$$\Delta N_{\text{eff}} = \frac{\rho_{\chi\text{dec}}}{3M_{\text{pl}}^2 \Gamma^2} \left(\frac{g_{*\text{CMB}}}{g_{*\text{dec}}} \right)^{4/3} \left[\frac{8}{7} \left(\frac{11}{4} \right)^{4/3} + N_{\text{eff}}^{\text{SM}} \right]$$

$\rho_{\chi\text{dec}}$... アクシオン崩壊時のエネルギー密度

➡ $N_{\text{eff}}^{\text{obs}}$ の詳細な観測からモデルに制限がかかる

Back Reaction and Scalar Fluctuation

✓ 現在確かめられている制限

[A. Papageorgiou, M. Peloso, and C. Unal. JCAP, Vol. 07 (2019)]

- ゲージ場の摂動から背景場へのバックリアクション

$$\ddot{Q} + 3H\dot{Q} + (\dot{H} + 2H^2)Q + 2g^2Q^3 - g\frac{\lambda}{f}\dot{\chi}Q^2 + \mathcal{T}_{\text{BR}}^Q = 0$$



$$g \ll \left(\frac{24\pi^2}{2.3e^{3.9m_Q}} \frac{1}{1+m_Q^{-2}} \right)^{1/2}$$

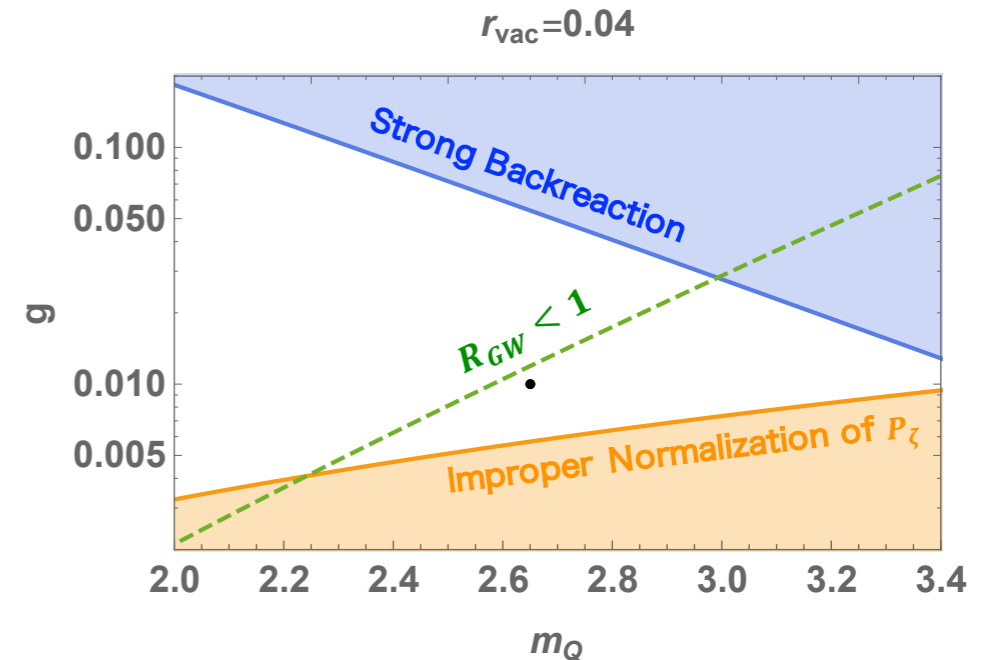
- スカラー揺らぎ

$$\mathcal{P}_\zeta \simeq \frac{g^2}{8\pi^2 m_Q^4} \frac{\varepsilon_B/\varepsilon_\phi}{(1+\varepsilon_B/\varepsilon_\phi)^2}$$

max 1/4



$$\mathcal{P}_\zeta \leq \frac{g^2}{32\pi^2 m_Q^4}$$



g

...ゲージ場の結合定数

$$m_Q \equiv gQ/H$$

...ゲージ場の有効質量

$$\mathcal{R}_{\text{GW}} \equiv r_A/r_{\text{vac}}$$

...テンソル揺らぎの比

Constraints from non-Gaussianity

[A. Papageorgiou, M. Peloso, and C. Unal. JCAP, Vol. 07 (2019)]

✓ 非ガウス性による制限

$$\mathcal{R}_{\delta\phi} \equiv \frac{\delta\mathcal{P}_\phi}{\mathcal{P}_\phi} < 0.1$$

$$\mathcal{R}_{\delta\phi} \simeq \frac{5 \times 10^{-12}}{(1 + \varepsilon_B/\varepsilon_\phi)^2} N_k^2 r_{\text{vac}}^2 m_Q^{11} e^{7m_Q}$$

N_k ...アキシオンが転がる間の
e-folds数

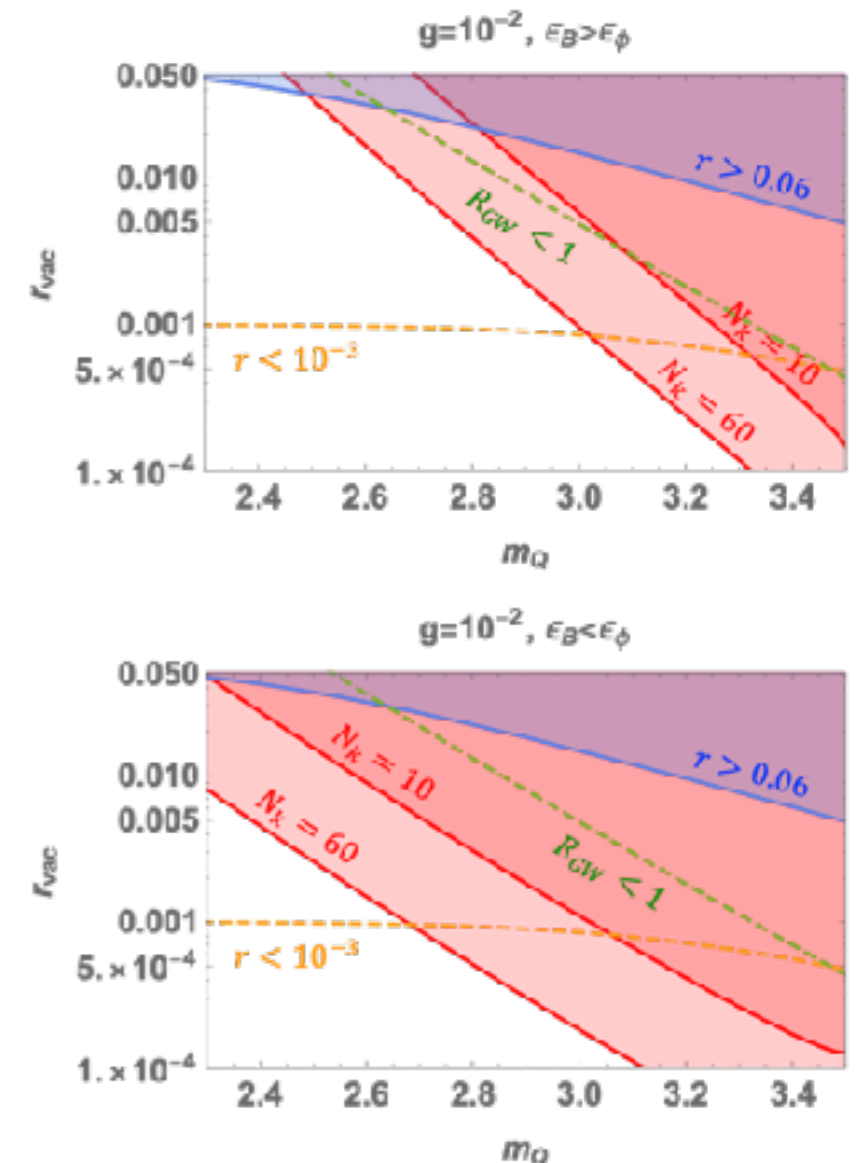
[Dimastrogiovanni, Fasiello, Fujita. JCAP, Vol. 01 (2017)]

$$\mathcal{R}_{\text{GW}} \approx \frac{\varepsilon_B}{2} e^{3.6m_Q} > 1$$

- $\varepsilon_B > \varepsilon_\phi$ のとき、 $r_A > r_{\text{vac}}$ となり得る領域が存在する



この領域で残存量を見積もる



Abundance with $R_{GW} > 1$

✓ アクシオンが崩壊しない場合の残存量

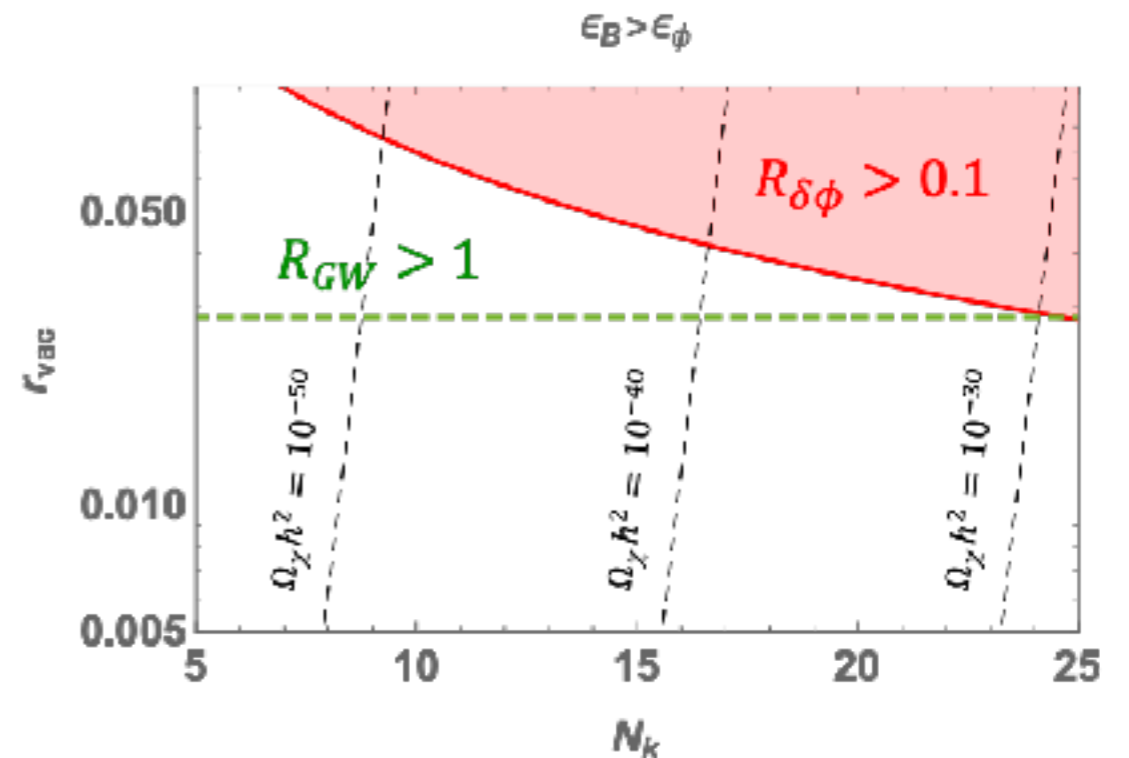
$$g = 10^{-2}, m_Q = 2.65$$

$$\Omega_\chi \propto \left(\frac{1}{r_{\text{vac}}} \right)^{3/2} \rho_{\chi\text{osc}} e^{-3(62 - N_k)}$$

- $\rho_{\chi\text{osc}} = 10^{60} [\text{GeV}]^4$ としても

$$\underline{\Omega_{\text{DM}} \leq 10^{-30} h^{-2}}$$

- ダークマターの残存量 $\Omega_{\text{DM}} = 0.12 h^{-2}$
と比較して非常に小さい



➡ $R_{GW} > 1$ の場合、観測にかかるほどの残存量は作られない

Abundance with $R_{GW} > 0.1$

- ✓ インフレーション終了前に強結合条件が破れる領域 ($a_{\text{end}} > a_{\text{osc}}$)

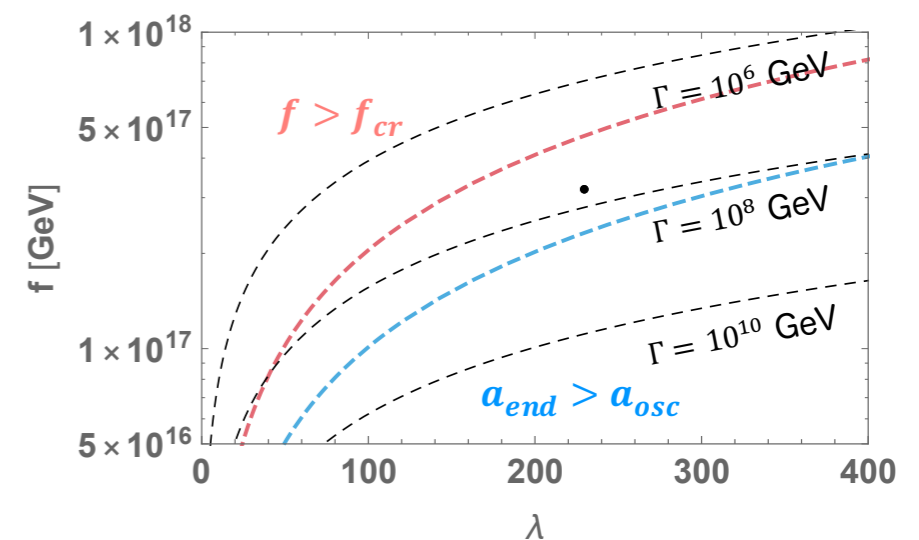
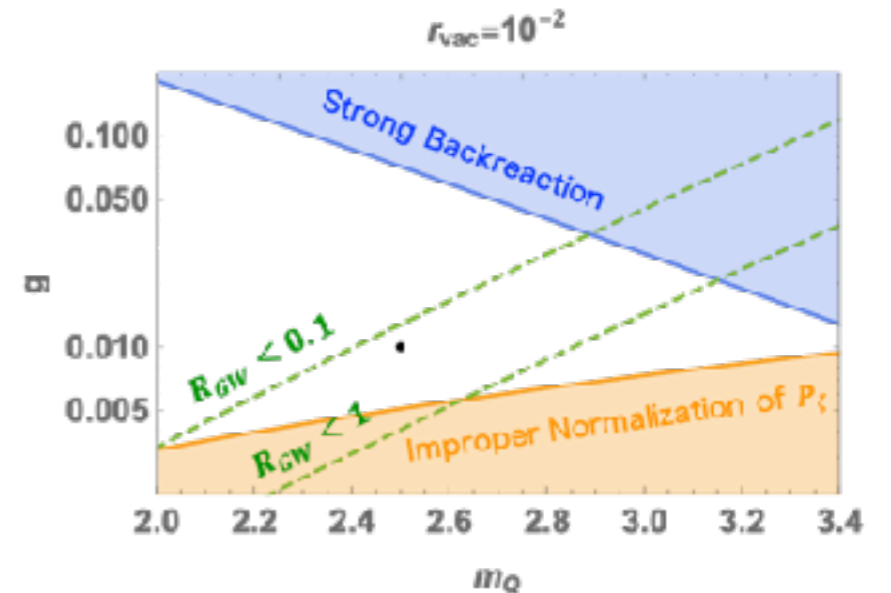
$$f > \left(\frac{\mu^4 \lambda^2}{6 \times 10^2 g H_{\text{osc}}} \right)^{1/3}$$

➡ 右下に行くほど残存量が少なくなる

- ✓ これらの指標を元にパラメータを選択する

$$g = 10^{-2}, \quad m_Q = 2.5$$

$$\lambda = 230, \quad f = 3.2 \times 10^{17} [\text{GeV}]$$



Dark Radiation Abundance

✓ 生成される重力波

$$\mathcal{R}_{\text{GW}} = 0.16$$

✓ 有効自由度への寄与

$$\Delta N_{\text{eff}} = \frac{\rho_{\chi\text{dec}}}{3M_{\text{pl}}^2 \Gamma^2} \left(\frac{g_{*\text{CMB}}}{g_{*\text{dec}}} \right)^{4/3} \left[\frac{8}{7} \left(\frac{11}{4} \right)^{4/3} + N_{\text{eff}}^{\text{SM}} \right]$$

$$= 0.066$$

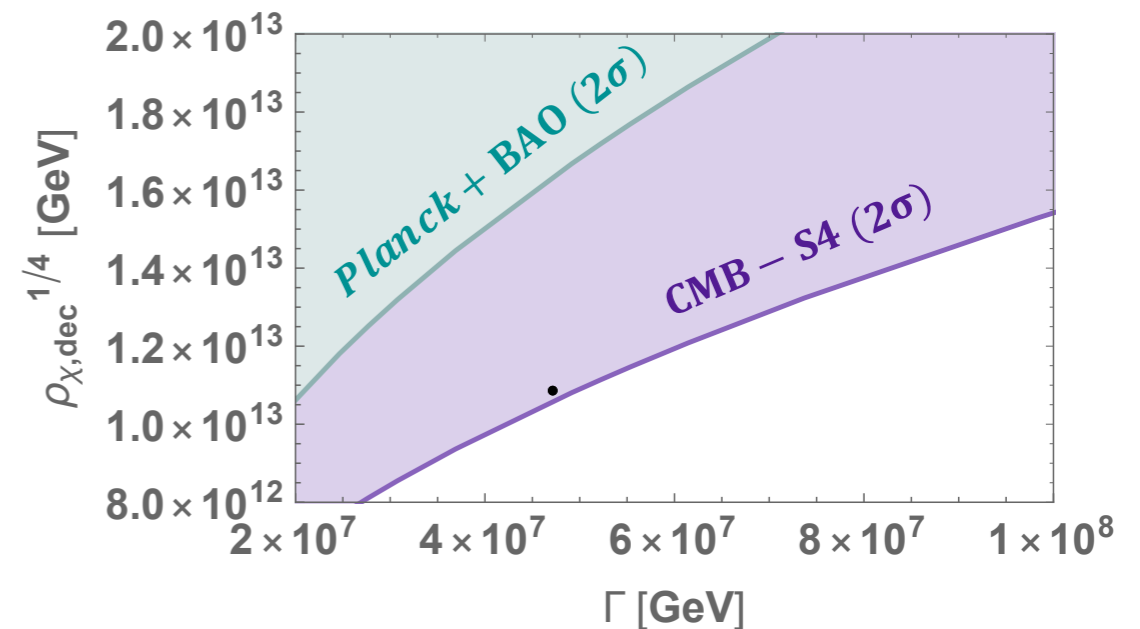
✓ 観測からの制限

$$\Delta N_{\text{eff}}^{\text{CMB}} < 0.34 \quad (\text{Planck} + \text{BAO})$$

$$\Delta N_{\text{eff}}^{\text{CMB}} < 0.06 \quad (\text{CMB} - \text{S4})$$

$$g = 10^{-2}, \quad m_Q = 2.5$$

$$\lambda = 230, \quad f = 3.2 \times 10^{17} [\text{GeV}]$$



[Aghanim, et al. *Astron. Astrophys.*, Vol. 641 (2020)]

[Abazajian, et al. (2019)]

➡ $R_{\text{GW}} > 0.1$ の場合MCBの観測から検証可能な領域が存在する

Conclusion

- ✓ CMBのテンソル揺らぎの観測だけでは、インフレーションスケールが一意に決まらない
- ✓ $R_{GW} > 1$ となるパラメータ領域ではHiddenセクターの残存量は非常に小さくなることが分かった
- ✓ $R_{GW} > 0.1$ のように要求を緩和した場合、暗黒輻射制限からゲージ場が生成する重力波の寄与が検証できることが分かった