

Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination

物質優勢期をトリガーとしたアクシオンの振動について

山田 將樹

東北大学

in collaboration with

Shota Nakagawa, Fuminobu Takahashi (Tohoku Univ.)

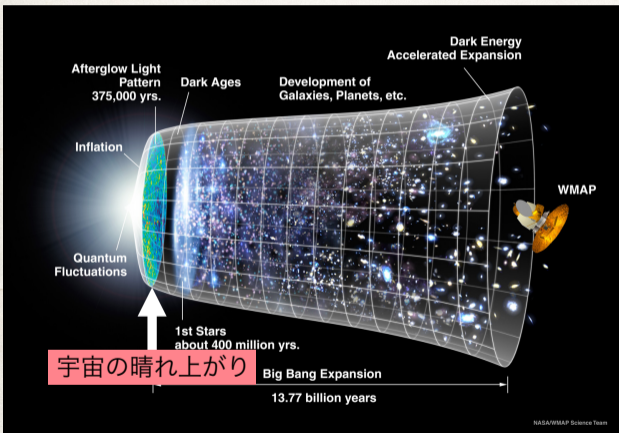
Based on hep-ph/2103.08153



目次

- 宇宙背景放射と偏光面の観測
- Cosmic birefringence (複屈折) とアクシオンの運動
- 物質優勢期をトリガーとしたアクシオンの振動モデル
- UV complete なモデル
- まとめ

宇宙は熱い火の玉の状態から始まり、時間とともに膨張することで冷えていっている。
この火の玉宇宙の名残の光が宇宙背景放射として現在観測されている。



宇宙の晴れ上がり以前では光子と電子は頻りにトムソン散乱している。

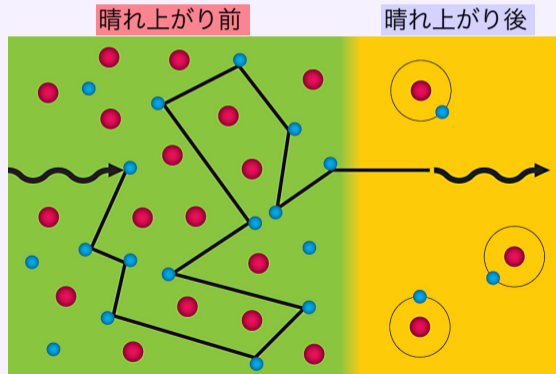


Figure from <http://abyss.uoregon.edu/%7Ejs/ast223/lectures/lec22.html>,
modified by https://www.rikanenpyo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_009.html

宇宙は熱い火の玉の状態から始まり、時間とともに膨張することで冷えていっている。
この火の玉宇宙の名残の光が宇宙背景放射として現在観測されている。

トムソン散乱では、偏光面が入射光と反射光の
両方に垂直になるという性質がある。

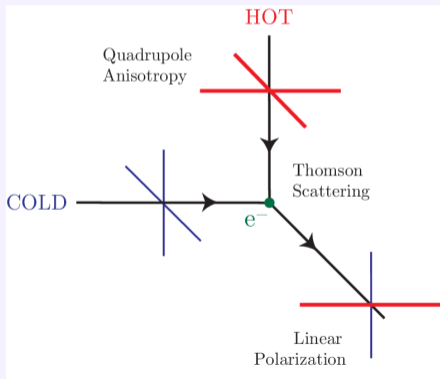


Figure from 9706147, modified by 0811.3919

宇宙の晴れ上がり以前では光子と電子は
頻りにトムソン散乱している。

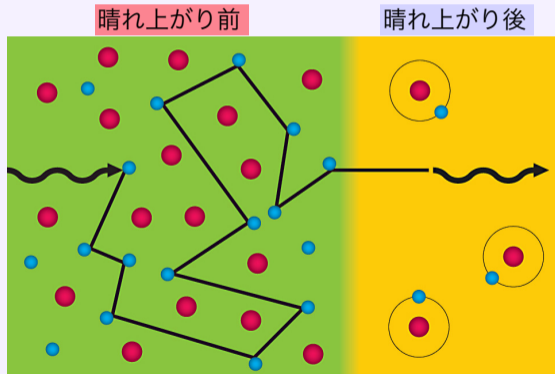


Figure from <http://abyss.uoregon.edu/%7Eajs/ast223/lectures/lec22.html>,
modified by https://www.rikanenpvo.jp/FAQ/tenmon/faq_ten_009.html

宇宙は熱い火の玉の状態から始まり、時間とともに膨張することで冷えていっている。
この火の玉宇宙の名残の光が宇宙背景放射として現在観測されている。

トムソン散乱では、偏光面が入射光と反射光の
両方に垂直になるという性質がある。

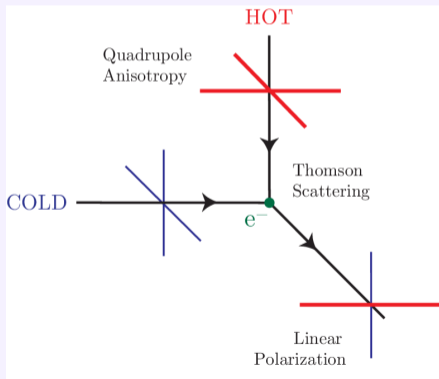
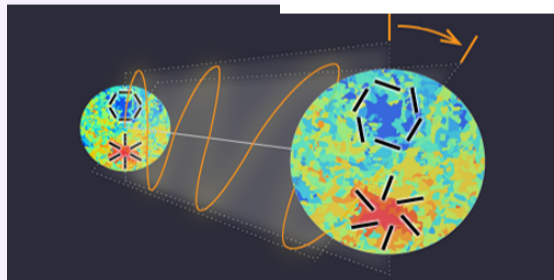


Figure from 9706147, modified by 0811.3919

トムソン散乱の性質により、宇宙背景放射の光の偏光面は宇宙背景放射の温度揺らぎの分布と関連しており、E-modeのみが作られる。
もし偏光面が回転していたとすると、観測によって回転角を測ることができる。

$$\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$$

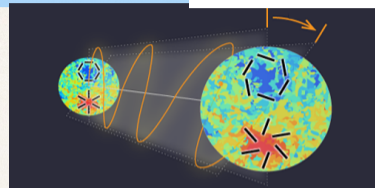


宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

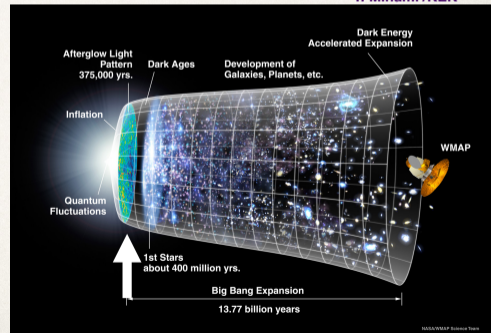
Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



Y. Minami /KEK

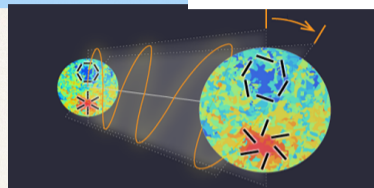


宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

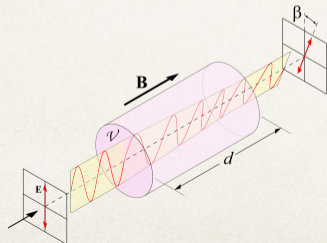
この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



Y. Minami /KEK

偏光面を回転させる効果としては、ファラデー効果と Birefringence (複屈折) がある。



物質に磁場をかけておくと、その磁場の方向に光が通過するとき偏光面が回転する。ただし、

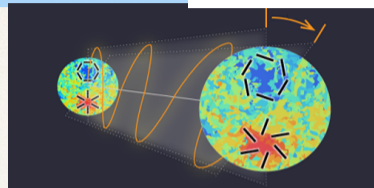
- 物質 (電子) がないと働かない
- 磁場が我々の方向に向かって等方になっていない

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



Y. Minami /KEK

偏光面を回転させる効果としては、ファラデー効果と Birefringence (複屈折) がある。

光の偏光ごとに屈折率が異なるという性質

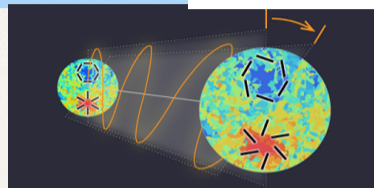


宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

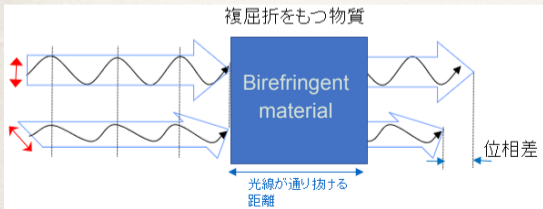
この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



Y. Minami /KEK

偏光面を回転させる効果としては、ファラデー効果と Birefringence (複屈折) がある。



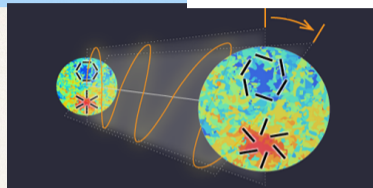
光の偏光ごとに 屈折率 が異なるという性質
媒質中の光速

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

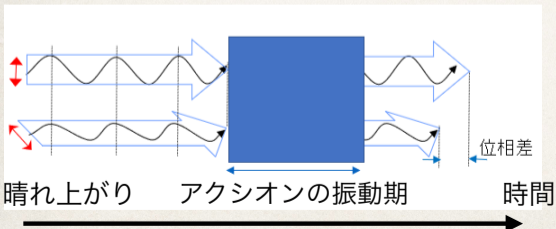
- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



Y. Minami /KEK

偏光面を回転させる効果としては、ファラデー効果と Birefringence (複屈折) がある。

光の偏光ごとに 屈折率 が異なるという性質



媒質中の光速

← アクシオン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

$$\Rightarrow \omega_{L,R}^2 = k^2 \left(1 \pm c_\gamma \frac{\alpha}{\pi} \frac{\dot{\phi}}{k f_\phi} \right)$$

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

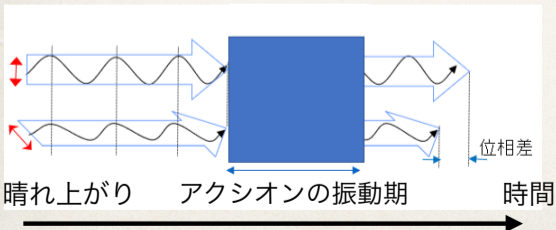
- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



- $\phi = \phi(t)$
- $\Delta\phi \neq 0$
- $\beta = c_\gamma \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{f_\phi} \simeq 0.42 c_\gamma \left(\frac{\phi_{\text{today}} - \phi_{\text{LSS}}}{2\pi f_\phi} \right) \text{ deg} = \mathcal{O}(1)$
- $10^{-33} \text{ eV} \lesssim m_\phi \lesssim 10^{-28} \text{ eV}$

S.M.Carroll, G.B.Field,R.Jackiw '90
D.Harari, P.Sikivie '92
S.M.Carroll, '98

偏光面を回転させる効果としては、ファラデー効果と Birefringence (複屈折) がある。



光の偏光ごとに 屈折率 が異なるという性質

媒質中の光速 ← アクシオン

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

$$\omega_{L,R}^2 = k^2 \left(1 \pm c_\gamma \frac{\alpha}{\pi} \frac{\dot{\phi}}{k f_\phi} \right)$$

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. 125, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

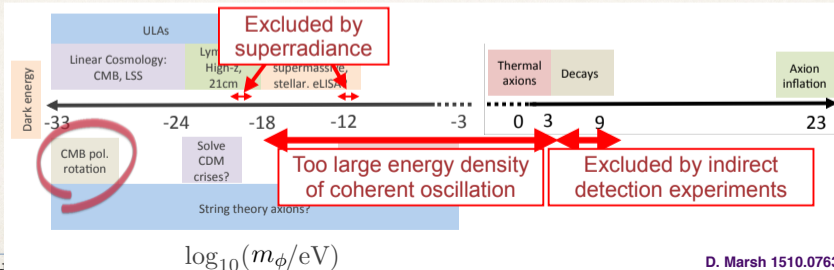
- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- O(1) degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



- $\phi = \phi(t)$
- $\Delta\phi \neq 0$
- $\beta = c_\gamma \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{f_\phi} \simeq 0.42 c_\gamma \left(\frac{\phi_{\text{today}} - \phi_{\text{LSS}}}{2\pi f_\phi} \right) \text{ deg} = \mathcal{O}(1)$
- $10^{-33} \text{ eV} \lesssim m_\phi \lesssim 10^{-28} \text{ eV}$

S.M.Carroll, G.B.Field,R.Jackiw '90
D.Harari, P.Sikivie '92
S.M.Carroll, '98

このようなアクシオンは超弦理論の compactification で現れるが、すでにexcludeされているパラメーター領域もある。



See, e.g.,
Stott, Marsh 1805.02016,
Mehta et al. 2103.06812

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14$ deg

この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- $O(1)$ degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



- $\phi = \phi(t)$
- $\Delta\phi \neq 0$
- $\beta = c_\gamma \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{f_\phi} \simeq 0.42 c_\gamma \left(\frac{\phi_{\text{today}} - \phi_{\text{LSS}}}{2\pi f_\phi} \right) \text{ deg} = \mathcal{O}(1)$
- $10^{-33} \text{ eV} \lesssim m_\phi \lesssim 10^{-28} \text{ eV}$

S.M.Carroll, G.B.Field,R.Jackiw '90
D.Harari, P.Sikivie '92
S.M.Carroll, '98

アクシオンの質量がこの範囲にあるのはなぜか？

どうしてアクシオンが宇宙の晴れ上がり以降、現在までの間に振動を開始したのか？

(Cosmic coincidence problem or "why now" problem)

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果が得られている。

Y. Minami and E. Komatsu, Phys. Rev. Lett. **125**, 221301 (2020) $\beta = 0.35 \pm 0.14 \text{ deg}$

この観測結果を説明するためには...

- 宇宙の全方向一様に回転
- 特定の方向に回転 = P, CP の破れ
- $\mathcal{O}(1)$ degrees の回転
- 宇宙の晴れ上がり以降に回転



- $\phi = \phi(t)$
- $\Delta\phi \neq 0$
- $\beta = c_\gamma \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\Delta\phi}{f_\phi} \simeq 0.42 c_\gamma \left(\frac{\phi_{\text{today}} - \phi_{\text{LSS}}}{2\pi f_\phi} \right) \text{ deg} = \mathcal{O}(1)$
- ~~$10^{-33} \text{ eV} \lesssim m_\phi \lesssim 10^{-28} \text{ eV}$~~

S.M.Carroll, G.B.Field,R.Jackiw '90
D.Harari, P.Sikivie '92
S.M.Carroll, '98

どうしてアクシオンが宇宙の晴れ上がり以降、現在までの間に振動を開始したのか？

(Cosmic coincidence problem or "why now" problem)

$$V(\phi) = \frac{1}{2} c_H H_{\text{DM}}^2(t) \phi^2 \quad H_{\text{DM}}^2 \equiv \frac{\rho_{\text{DM}}}{3M_{\text{Pl}}^2}, \quad c_H = \mathcal{O}(1)$$

S. Nakagawa, F. Takahashi, M.Y., 2103.08153

➡ 物質優勢期をトリガーとしてアクシオンが振動を開始する。

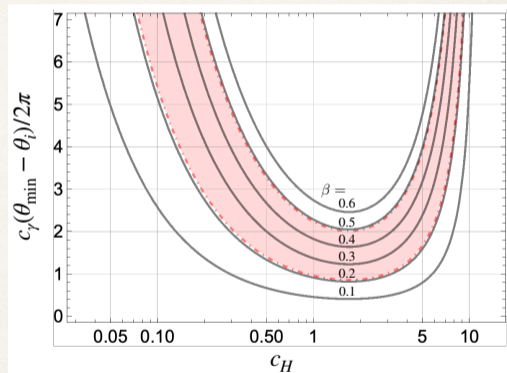
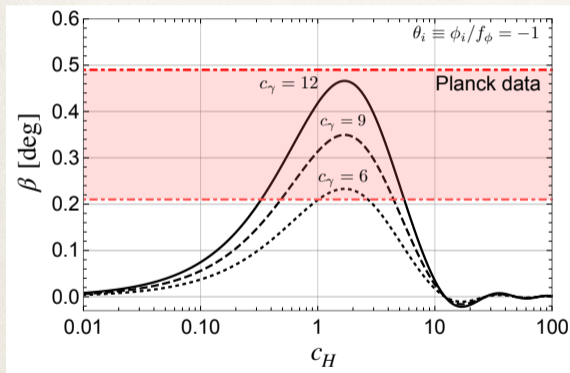
"Why now" problem of axion oscillation



Coincidence of matter-radiation equality and recombination epoch

Cosmic birefringence triggered by DM domination

- Low-energy EFT:
$$\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}c_H H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2 - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



S. Nakagawa, F. Takahashi, M.Y., 2103.08153

Cosmic birefringence triggered by DM domination

- Low-energy EFT:
$$\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}c_H H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2 - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

この有効質量を出すようなUV theoryはあるか？

- UV origin 1: non-minimal gravitational coupling
- UV origin 2: Witten effect on hidden monopole DM

Cosmic birefringence triggered by DM domination

- Low-energy EFT: $\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}c_H H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2 - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

- UV origin 1: non-minimal gravitational coupling

$$\mathcal{L} \supset -\xi R\phi^2 \sim 3\xi H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2$$

- 輻射優勢期では $R \ll H^2$ なので無視できる.
- 物質優勢期には $\sqrt{6\xi}H$ の質量を与える.

S. Nakagawa, F. Takahashi, M.Y., 2103.08153

Cosmic birefringence triggered by DM domination

- Low-energy EFT: $\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}c_H H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2 - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

- UV origin 2: Witten effect on hidden monopole DM

- Hidden sector に $SU(2)_H$ ゲージ理論を導入し、それを Adjoint Higgs field で $U(1)_H$ に破ったとする。そのときに現れるモノポールはダークマターの候補となる。
- アクシオンがこの $U(1)_H$ とも相互作用していると、モノポールが $\phi/(2\pi f_\phi)$ の電荷を持つ。

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F_{H,\mu\nu} F_H^{\mu\nu} - \frac{\alpha_H \phi}{8\pi f_\phi} F_{H,\mu\nu} \tilde{F}_H^{\mu\nu} \quad \longrightarrow \quad \text{div} \vec{E}_H = -\frac{\alpha_H \phi}{2\pi f_\phi} \text{div} \vec{B}_H \quad (\text{Witten effect})$$

E. Witten '79

Cosmic birefringence triggered by DM domination

- Low-energy EFT: $\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}c_H H_{\text{DM}}^2(t)\phi^2 - c_\gamma \frac{\alpha}{4\pi} \frac{\phi}{f_\phi} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

- UV origin 2: Witten effect on hidden monopole DM

- Hidden sector に $SU(2)_H$ ゲージ理論を導入し、それをAdjoint Higgs field で $U(1)_H$ に破ったとする。そのときに現れるモノポールはダークマターの候補となる。
- アクシオンがこの $U(1)_H$ とも相互作用していると、モノポールが $\phi/(2\pi f_\phi)$ の電荷を持つ。

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F_{H,\mu\nu} F_H^{\mu\nu} - \frac{\alpha_H \phi}{8\pi f_\phi} F_{H,\mu\nu} \tilde{F}_H^{\mu\nu} \quad \longrightarrow \quad \text{div} \vec{E}_H = -\frac{\alpha_H \phi}{2\pi f_\phi} \text{div} \vec{B}_H \quad (\text{Witten effect})$$

E. Witten '79

- モノポールがダークマターとして漂っていると、全体の電場のエネルギーを最小化するようにアクシオンが有効ポテンシャルを得る。

$$m_\phi^2 \simeq \left(\frac{\alpha_H}{4\pi f_\phi} \right)^2 \rho_M(t) = c_H H_{\text{DM}}^2(t) \quad \text{where} \quad c_H = 3 \left(\frac{\alpha_H}{4\pi} \frac{M_{\text{pl}}}{f_\phi} \right)^2 = \mathcal{O}(1) \quad \text{for} \quad f_\phi = 10^{16} \text{ GeV} \quad \text{and} \quad \alpha_H = \mathcal{O}(0.01)$$

Fischler, Presskill '83

S. Nakagawa, F. Takahashi, M.Y., 2103.08153

Summary

宇宙背景放射の偏光面が回転していたという解析結果は、アクシオンが晴れ上がりの時代以降に振動を始めたことを示唆している。("Why now" problem?)

物質優勢期をトリガーとしてアクシオンが振動を開始したと考えると、自然に説明できる。

$$V(\phi) = \frac{1}{2} c_H H_{\text{DM}}^2(t) \phi^2$$

- UV origins:

- Non-minimal coupling to gravity

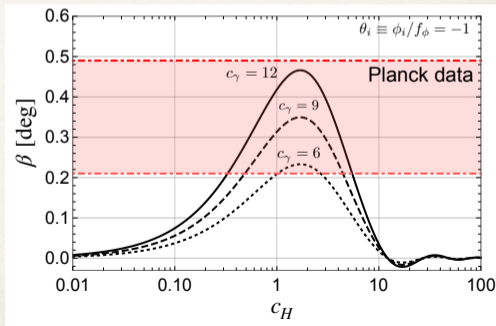
$$\mathcal{L} \supset -\xi R \phi^2 \sim -3\xi H_{\text{DM}}^2(t) \phi^2$$

- Hidden monopole dark matter

$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4} F_{H,\mu\nu} F_H^{\mu\nu} - \frac{\alpha_H \theta_H}{8\pi} F_{H,\mu\nu} \tilde{F}_H^{\mu\nu}$$

$$\rightarrow c_H = 3 \left(\frac{\alpha_H M_{\text{pl}}}{4\pi f_\phi} \right)^2 \quad \text{for monopole DM}$$

$$= \mathcal{O}(1) \quad \text{for } f_\phi = 10^{16} \text{ GeV} \quad \text{and} \quad \alpha_H = \mathcal{O}(0.01)$$



Appendix: その他の最近のreferences

- インフレーション中の揺らぎの影響についての研究
 - Pospelov, Ritz, Skordis 0808.0673 (massless の場合)
 - Fujita, Minami, Murai, Nakatsuka 2008.02473 (axion の local fluctuation を考慮)
- ダークマターと関連するモデル
 - Fedderke, Graham, Rajendran 1903.02666 (Fuzzy DM, 晴れ上がりの期間に振動していると偏光をwashoutする効果)
 - Nakagawa, Takahashi, Yamada 2103.08153 (This work!)
- ダークエネルギーと関連するモデル
 - Fujita, Murai, Nakatsuka, Tsujikawa 2011.11894 (early dark energyによって H_0 tensionも解決)
 - Choi, Lin, Visinelli, Yanagida 2106.12602 (small EW instanton によって質量を与える)
 - Obata 2108.02150 (two-axion alignment mechanism でダークマターとも関連)
- Topological defects の形成に関するモデル
 - Agrawal, Hook, Huang 1912.02823 (Cosmic stringによるanisotropic birefringenceに関する研究)
 - Jain, Long, Amin 2103.10962 (Cosmic stringによるanisotropic birefringenceに関する研究)
 - Takahashi, Yin 2012.11576 (Domain wall without cosmic strings のモデル, isotropic と anisotropic の両方を予言)