

# Production of gauge field and charged particles during axion inflation



Jun'ya Kume (RESCEU, UTokyo)



kjun0107@resceu.s.u-tokyo.ac.jp

Based on arXiv:2204.01180 by Tomohiro Fujita (WIAS), JK, Kyohei Mukaida (KEK), Yuichiro Tada (Nagoya U.) (To be published in JCAP)

## 1 Introduction: axion inflation + U(1) gauge

- axion as an inflaton
  - 物質場との結合: Chern-Simons項、軸性カレント
  - シフト対称性 → 平坦なpotential

$$\frac{1}{4f} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \quad \frac{\phi}{f} \partial_\mu J_5^\mu$$

現象論的にも面白い!

### U(1) gauge sourced by CS coupling

$$\left[ \partial_\tau^2 + k^2 \pm 2k \frac{\xi}{\tau} \right] \mathcal{A}_\pm(\tau, k) = 0$$

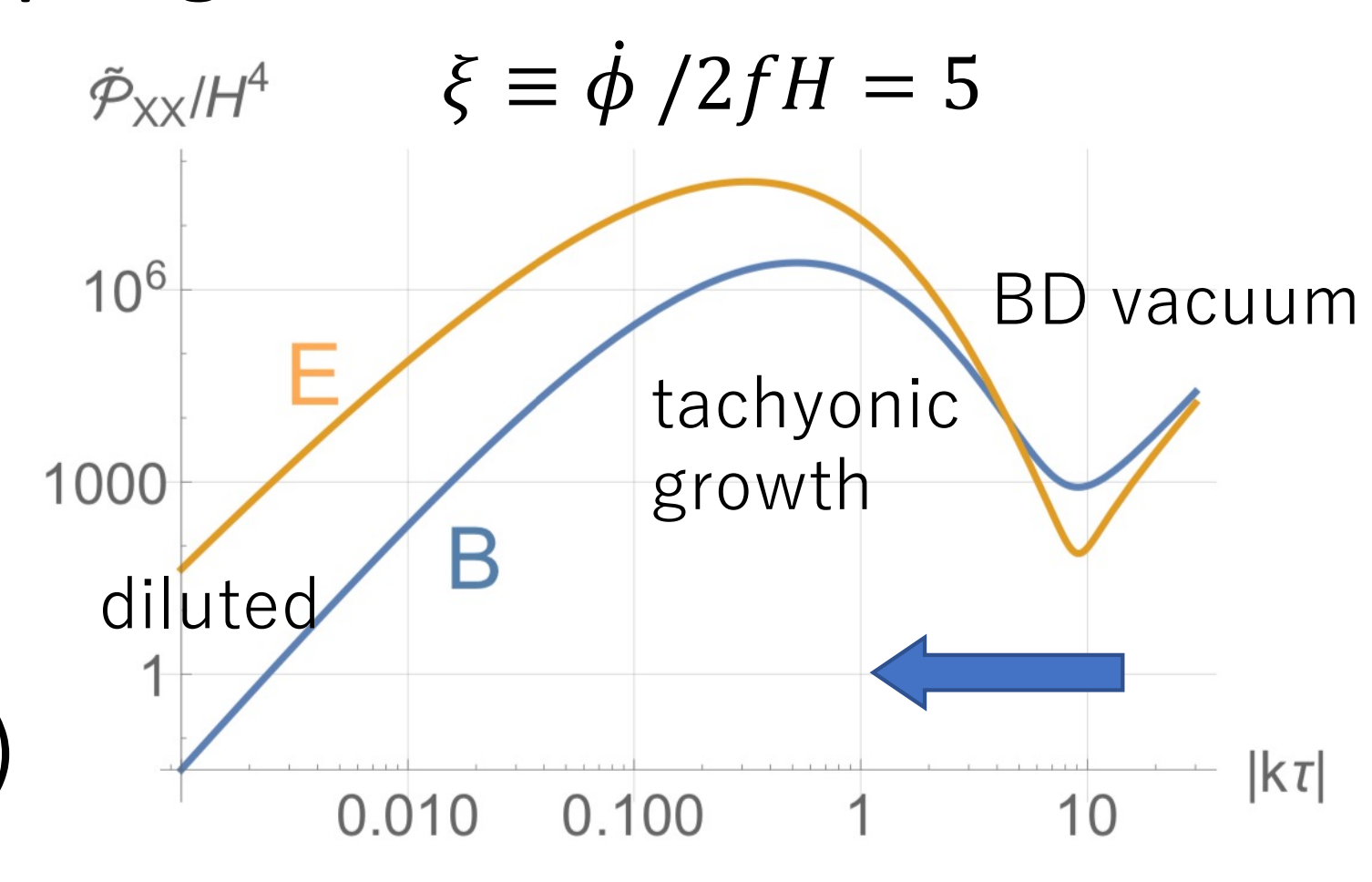
$$\mathcal{A}_+(\tau, k) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{\pi\xi/2} W_{-i\xi, 1/2}(2ik\tau)$$

→ peaked at **super-horizon scale**!!

- 大スケールのヘリカル磁場生成
- バリオン数生成(via chiral anomaly)

(Anber & Sorbo 2006, Anber & Sabancilar 2015, ...)

ただし...U<sub>Y</sub>(1) in SM → **荷電粒子生成**の寄与?



## 2 Q. Backreaction from charged particles?

- induced current & dynamical equilibrium

$$eJ_i \simeq \frac{e^3 B E_i}{6\pi^2 a^3 H} \coth\left(\frac{\pi B}{E}\right)$$

(Domcke & Mukaida 2018)

→ 電磁場に対する**負のフィードバック**

$$\dot{\rho}_A = -2H \langle \tilde{\mathbf{E}}^2 + \tilde{\mathbf{B}}^2 \rangle - 2\xi_{\text{eff}} H \langle \tilde{\mathbf{E}} \cdot \tilde{\mathbf{B}} \rangle = 0$$

$$\xi_{\text{eff}}(\tilde{E}, \tilde{B}) = \xi - \frac{e^3}{12\pi^2} \coth\left(\frac{\pi \tilde{B}}{\tilde{E}}\right) \frac{\tilde{E}}{H^2}$$

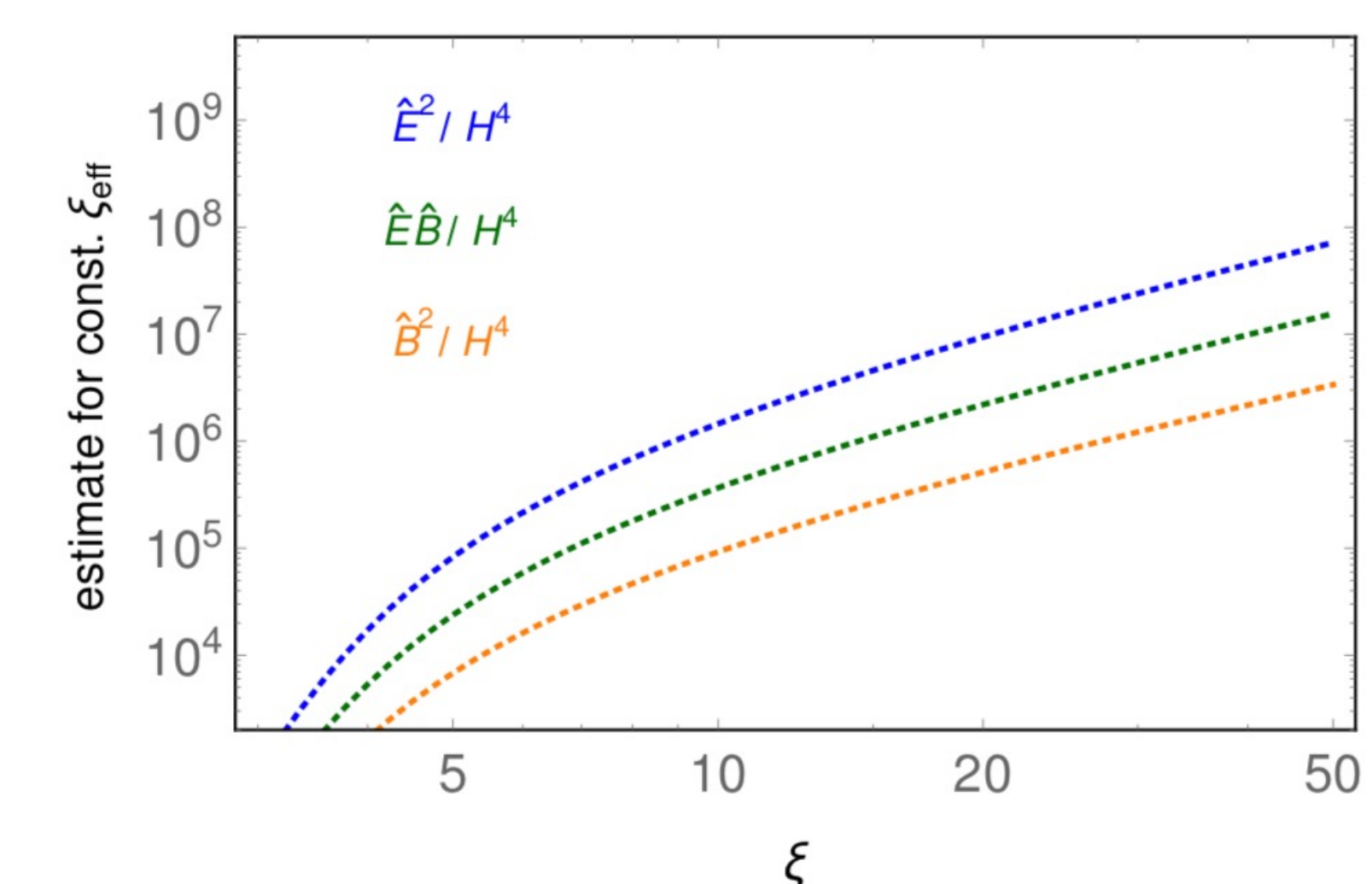
平衡電磁場強度の **rough estimate**

$$\tilde{E}(\xi_{\text{eff}}(\tilde{E}_{\text{eq}}, \tilde{B}_{\text{eq}})) \quad \tilde{B}(\xi_{\text{eff}}(\tilde{E}_{\text{eq}}, \tilde{B}_{\text{eq}}))$$

from EoM without  $\mathbf{J} \rightarrow \tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{X}}_{\text{eq}}$

各モードの振る舞いは...? 🤔

※ξ = const.としてinflatonは背景扱い

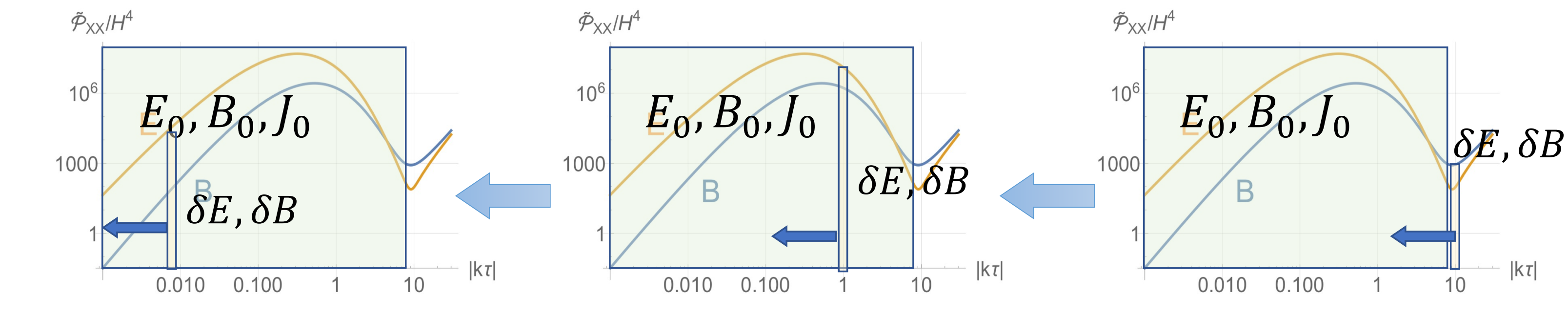


## 3 Idea: mean-field approx.

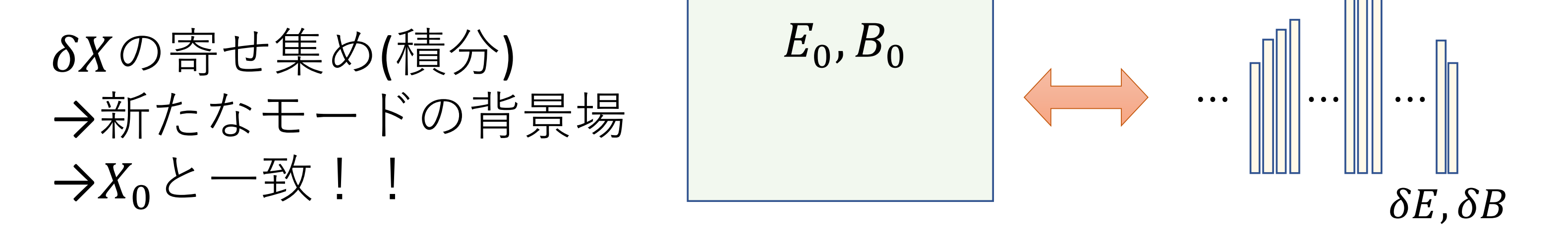
- equilibrium + perturbation

$$\mathbf{E}(\tau, \mathbf{x}) \simeq \mathbf{E}_0 + \delta\mathbf{E}(\tau, \mathbf{x}) \quad \mathbf{B}(\tau, \mathbf{x}) \simeq \mathbf{B}_0 + \delta\mathbf{B}(\tau, \mathbf{x})$$

平均場( $X_0$ ): 反平行, 定常一様 → 背景カレント  $J_0$  と balanced  
摂動( $\delta X$ ): 背景場の元で成長する single k-mode  
→ カレント揺らぎ  $\delta J$  の影響



**動的平衡 = self-consistency**



## 4 Analysis: self-consistent EM fields

- EoM for the perturbation

$$\partial_\tau^2 A_i - \partial_j^2 A_i + \frac{2\xi}{\tau} \epsilon_{ijl} \partial_j A_l = a^2 e J_i(E, B)$$

→ (leading order:  $E_0, B_0$  balanced w/  $J_0(E_0, B_0)$ )

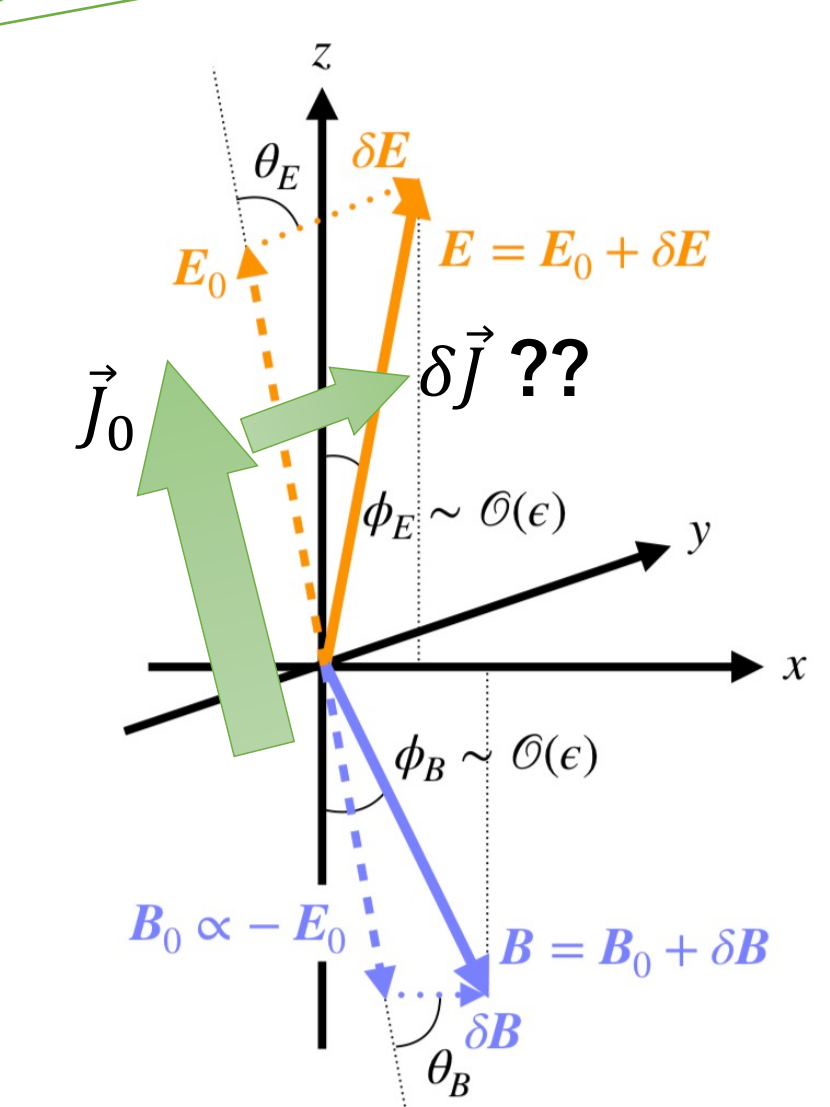
$$\partial_\tau^2 \delta A_i - \partial_j^2 \delta A_i + \frac{2\xi}{\tau} \epsilon_{ijl} \partial_j \delta A_l = \dots$$

カレント揺らぎ  $\delta J$   
→ 反平行の摂動的破れ

$\vec{E}_0 \cdot \vec{B}_0 = -E_0 B_0$  but  $\vec{E} \cdot \vec{B} \neq -EB \xrightarrow{\text{Lorentz tr.}} \vec{E} \cdot \vec{B} = -EB$

full-field に対して反平行配位のカレント表式を apply

$$eJ \simeq \frac{e^3 BE}{6\pi^2 a^3 H} \coth\left(\frac{\pi B}{E}\right) \simeq eJ_0 + e\delta J(\delta E, \delta B)$$

$$\vec{J} = \left[ 1 - \frac{E_0 \delta E_z - B_0 \delta B_z}{E_0^2 + B_0^2} \right] \mathbf{e}_z + \frac{E_0 \delta \mathbf{E} - B_0 \delta \mathbf{B}}{E_0^2 + B_0^2} \quad (z \rightarrow \text{direction of } E_0)$$


$\delta A$  の一次までの寄与:

$$\left[ \partial_\tau^2 - \frac{\Sigma_E + \Sigma_E' \sin^2 \theta_k}{\tau} \partial_\tau + k^2 + \frac{k}{\tau} (2\xi - (\Sigma_B + \Sigma_B' \sin^2 \theta_k)) \right] \mathcal{A}_+^{(\sigma)}(\tau, \mathbf{k}) = 0$$

EM conductivity  $\Sigma_{X^{(\sigma)}}(E_0, B_0)$  appears!

$$\mathcal{A}_+^{(\sigma)}(\tau, \mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{\pi\xi/2} z^{\Sigma/2} \left[ c_1 W_{-i\xi_{\text{eff}}(\Sigma+1)/2}(-2iz) + c_2 M_{-i\xi_{\text{eff}}(\Sigma+1)/2}(-2iz) \right]$$

初期条件で決定:  
 $z \equiv -k\tau = 2\xi$  (不安定性のスケール) で solution w/o  $\mathbf{J}$  に接続

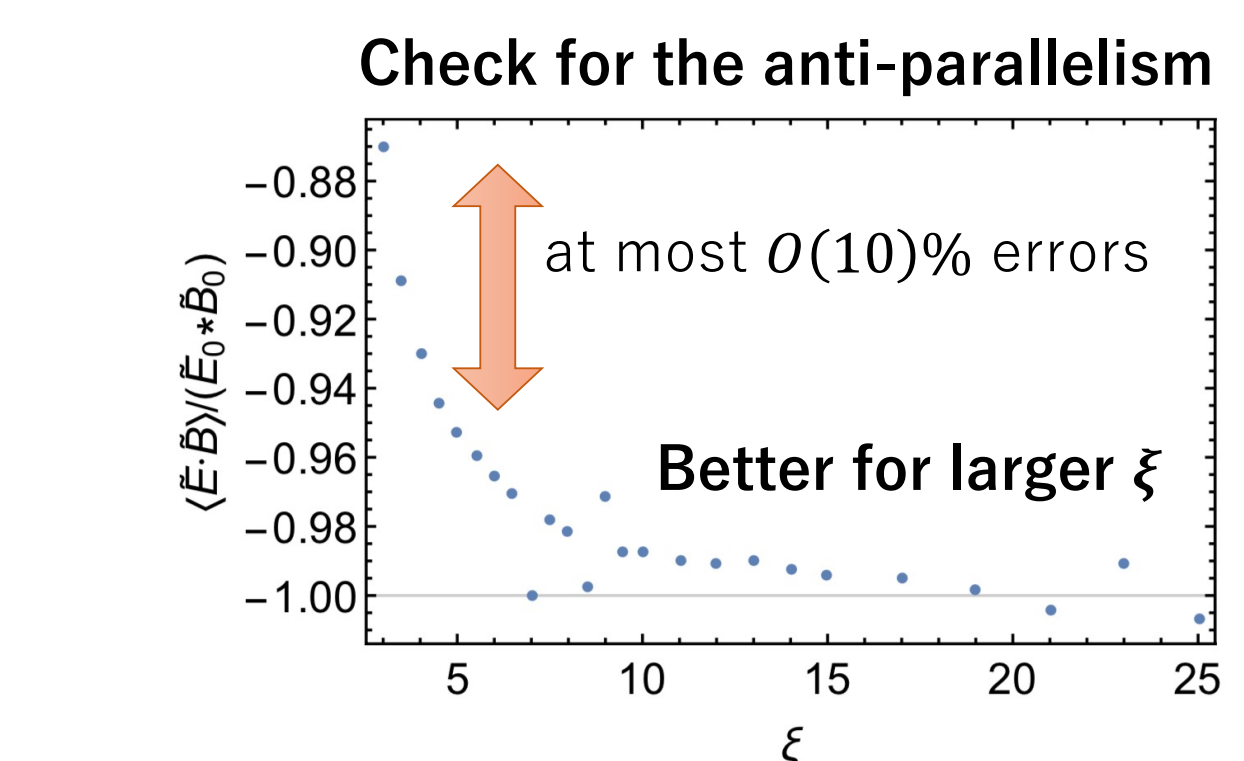
**背景場下での反作用を取り入れた解!**

### Self-consistent solution

$$\rho_{X_0} = \frac{X_0^2}{2} = \frac{1}{4} \int_{-1}^1 d\cos\theta \int_0^{2\xi} \frac{dz}{z} \tilde{\rho}_{\delta X \delta X}^{+(\sigma)}(z, \theta)$$

input  $E_0, B_0 \rightarrow \Sigma_{X^{(\sigma)}}(E_0, B_0)$

平衡電磁場強度を決定  
→  $\Sigma$ 、モード関数も決まる



※強度のみに対する自己無撞着条件だが、他の平均場の性質も再現された! ( $\xi \geq 3$ )

### Results

- 電磁場の振幅が劇的に suppress
  - model-indep. bound (Domcke+ 2018) を満たす
  - エネルギー輸送における fermion dominance
- large  $\xi$  でピークが  $\sim H$  に shift
  - カレント無しでは  $\sim H/\xi$
  - 磁場生成には negative な結果...?

→  $E$  と  $B$  の強度の漸近  
→ 別手法でも同様の振る舞い (Gorbar+ 2021)

## 5 Summary & Discussion

- axion inflation + U(1) gauge → 様々な現象論的帰結  
**荷電粒子生成の寄与の推定が難題** (e.g. 標準模型 U<sub>Y</sub>(1))
- inflation 中の動的平衡を仮定し, 平均場近似を apply  
→ **反作用を取り入れたモードの振る舞い** が明らかに!
- 近似の妥当性も注意深く評価 (→ see our paper!)  
特に large  $\xi$  で consistent & 非常に良い精度

- 現象論への示唆?  
小スケール揺らぎ (PBH), 非ガウス性, バリオン数生成  
→ 電磁場強度 ( $\langle \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \rangle$ ) による評価  
背景重力波, 磁場生成 → スペクトルの情報

- further extension  
full SM DoF, inflation end...?  
より動的な取り扱い  
→ stochastic approach...?

(Fujita, Mukaida, Tada 2022)