
Axion理論

北嶋直弥



東北大学 学際科学フロンティア研究所

ダークマターの懇談会 in 早稲田大学 2019/7/5-6

なぜアクションを考えるのか？

どうやってアクションを捕まえるか？

アクションは面白いか？

なぜアクション？ — 素粒子理論からの要請

理論

素粒子標準模型・強い相互作用 (QCD)

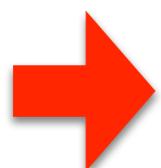
$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} + \frac{g_s^2}{32\pi^2} \theta G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{\mu\nu a}$$



中性子の電気双極子モーメント $d_n \simeq 4.5 \times 10^{-15} \theta e \text{ cm}$

実験

実験による制限値: $|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} e \text{ cm}$



$|\theta| < 0.7 \times 10^{-11} \rightarrow \text{劇的なチューニング}$

Strong CP problem : 偶然？ or 背後に新物理？

解決法：Peccei-Quinn機構

Peccei, Quinn (1977)

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} + \frac{g_s^2}{32\pi^2} \theta G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{\mu\nu a}$$

~~定数~~

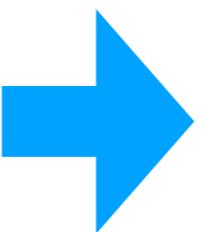
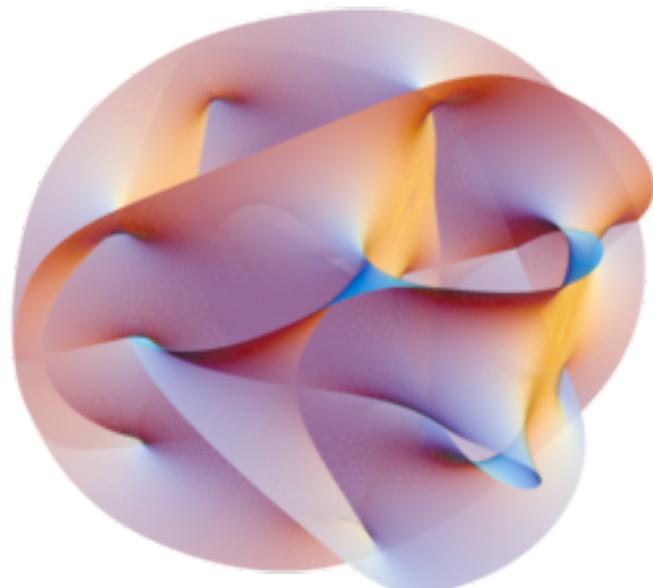
ダイナミカルな場： $\theta(t, \mathbf{x})$

場のダイナミクスによって θ がゼロに行く

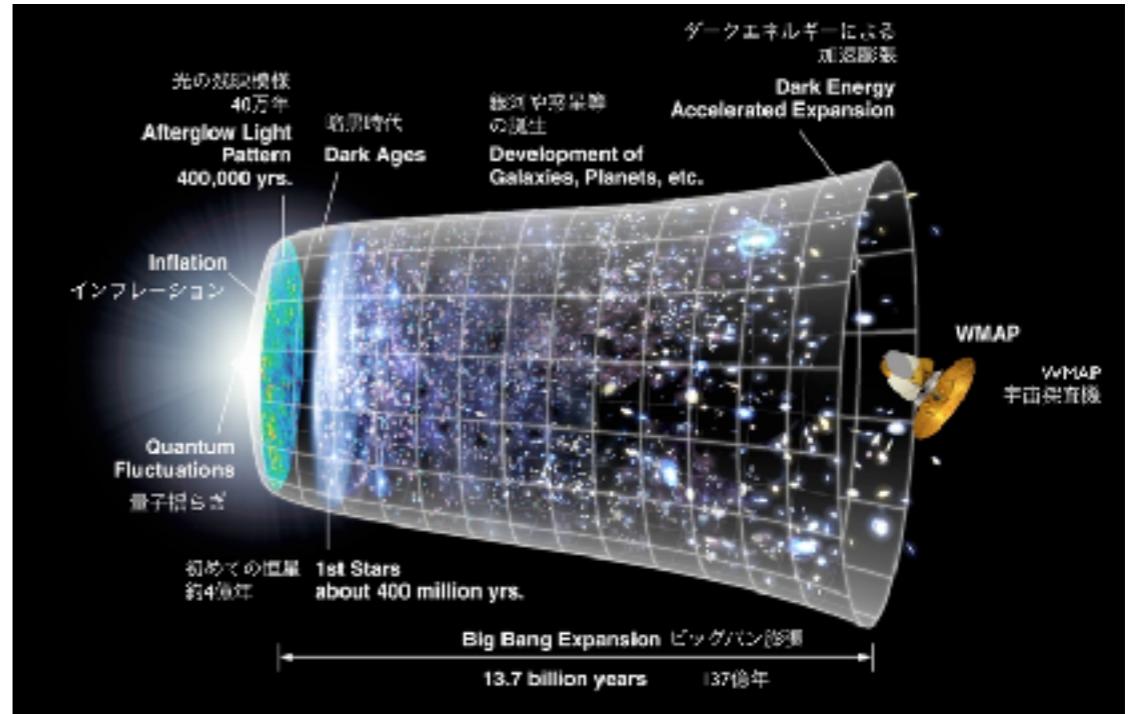
θ は（擬）南部ゴールドストーンボソン「アクション」

→ ダークマターを説明（副産物的ダークマター）

ストリングアクション (ALP)



高次元の理論
(超弦理論など)



4 次元時空

+

数百ものアクションが予言される

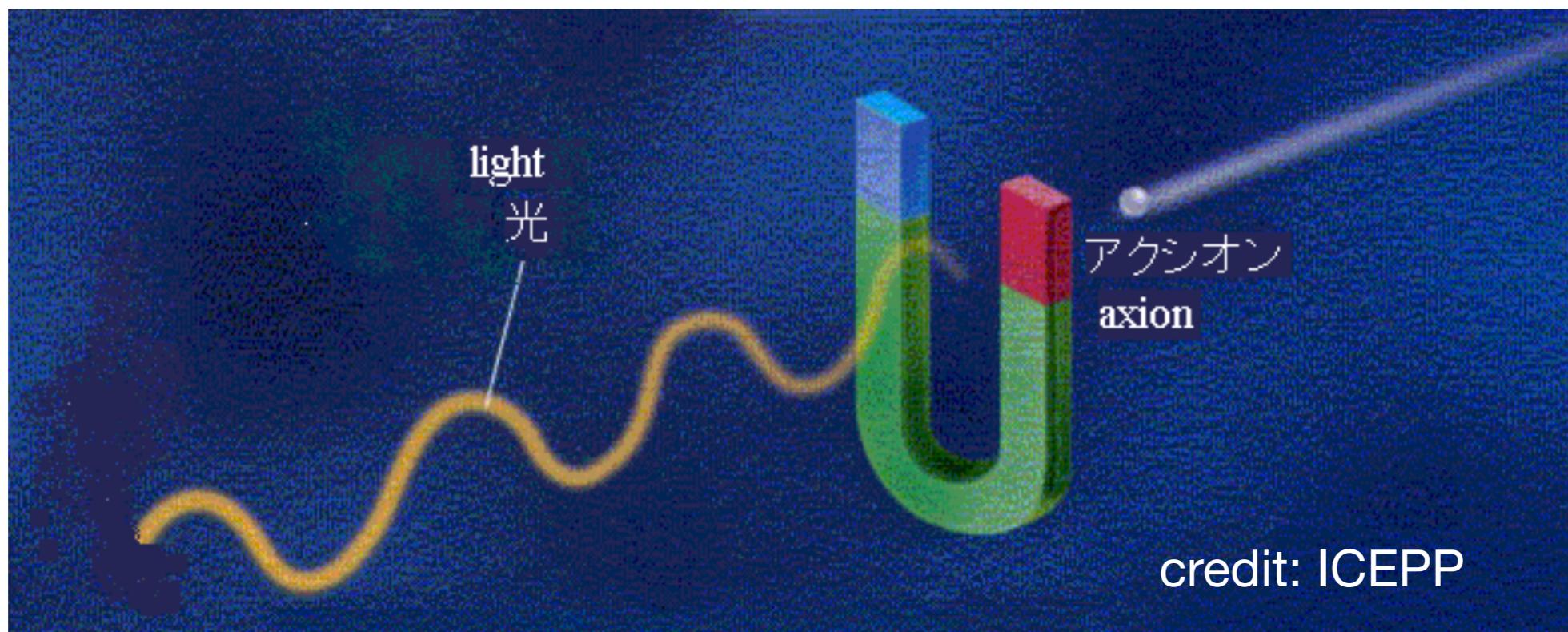
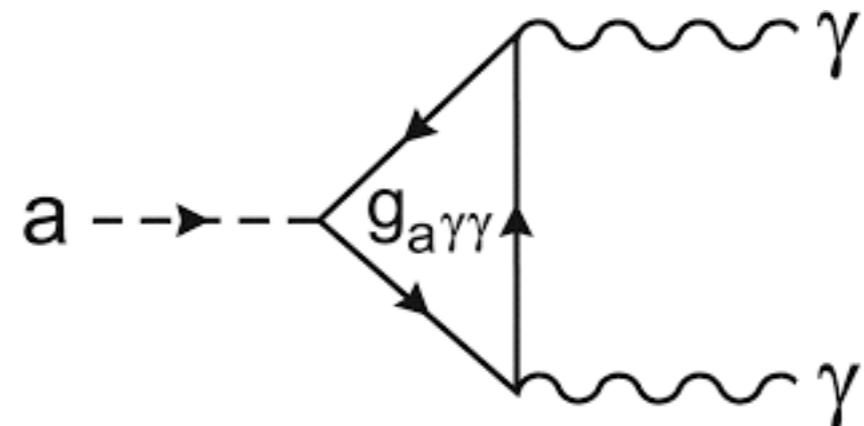


String axion

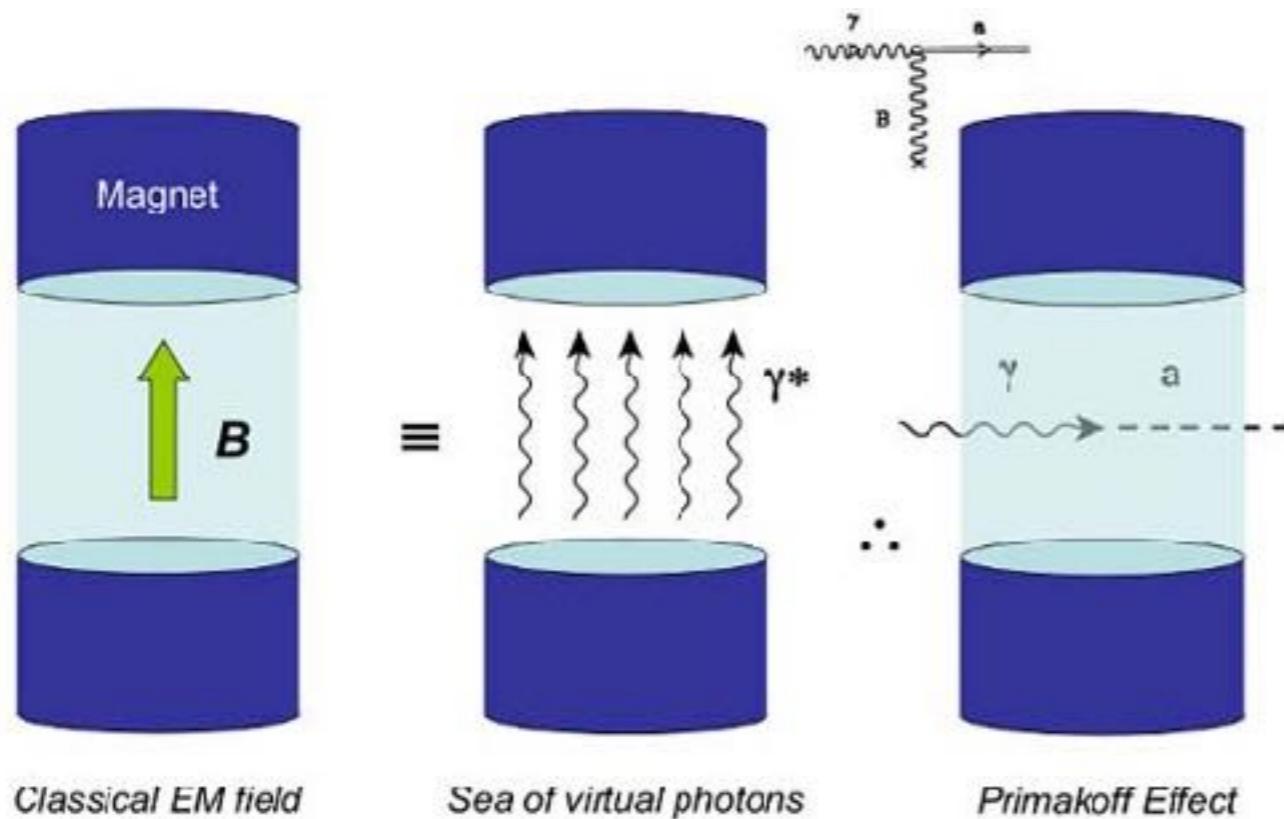
どうやってアクシオンを捕まえるか？

アクシオンとフォトン (or 電子・核子) との相互作用

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} &= \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} \\ &= -g_{a\gamma\gamma} a \vec{E} \cdot \vec{B}\end{aligned}$$

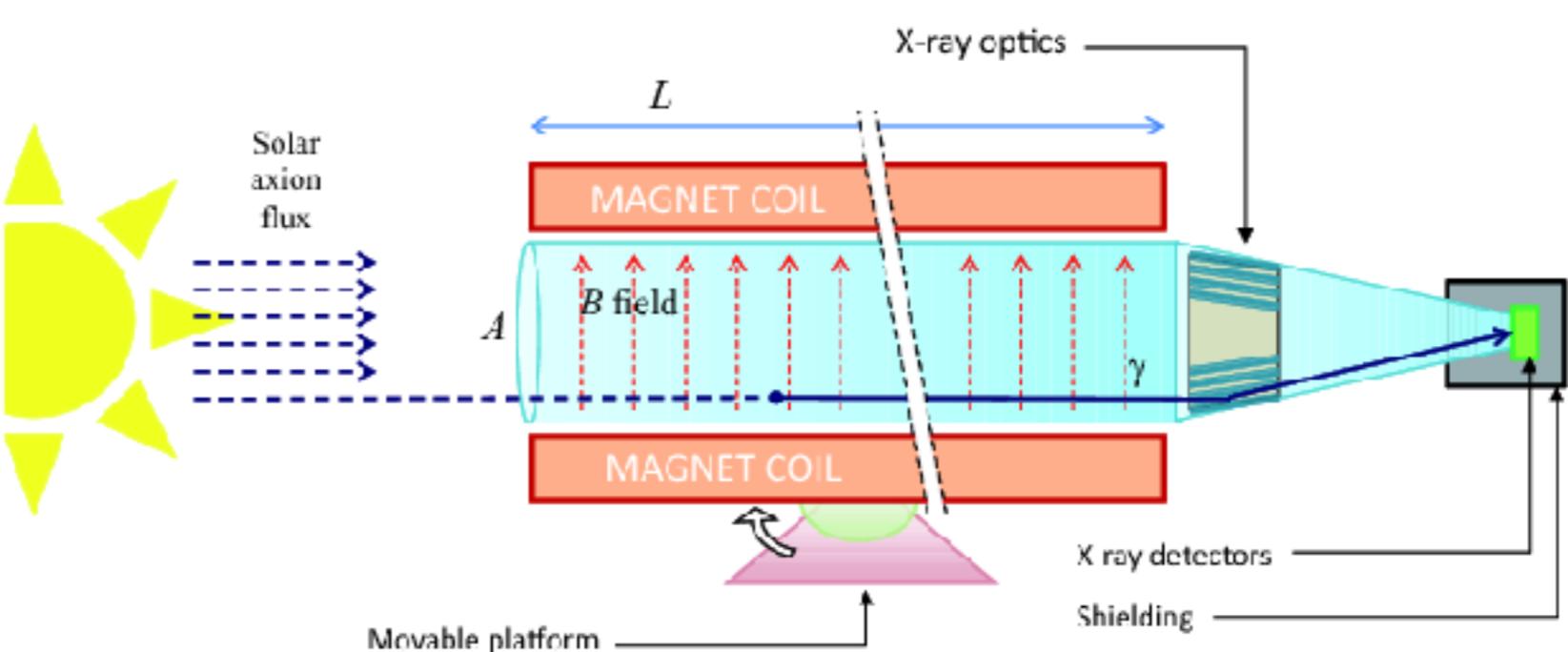


Axion haloscope

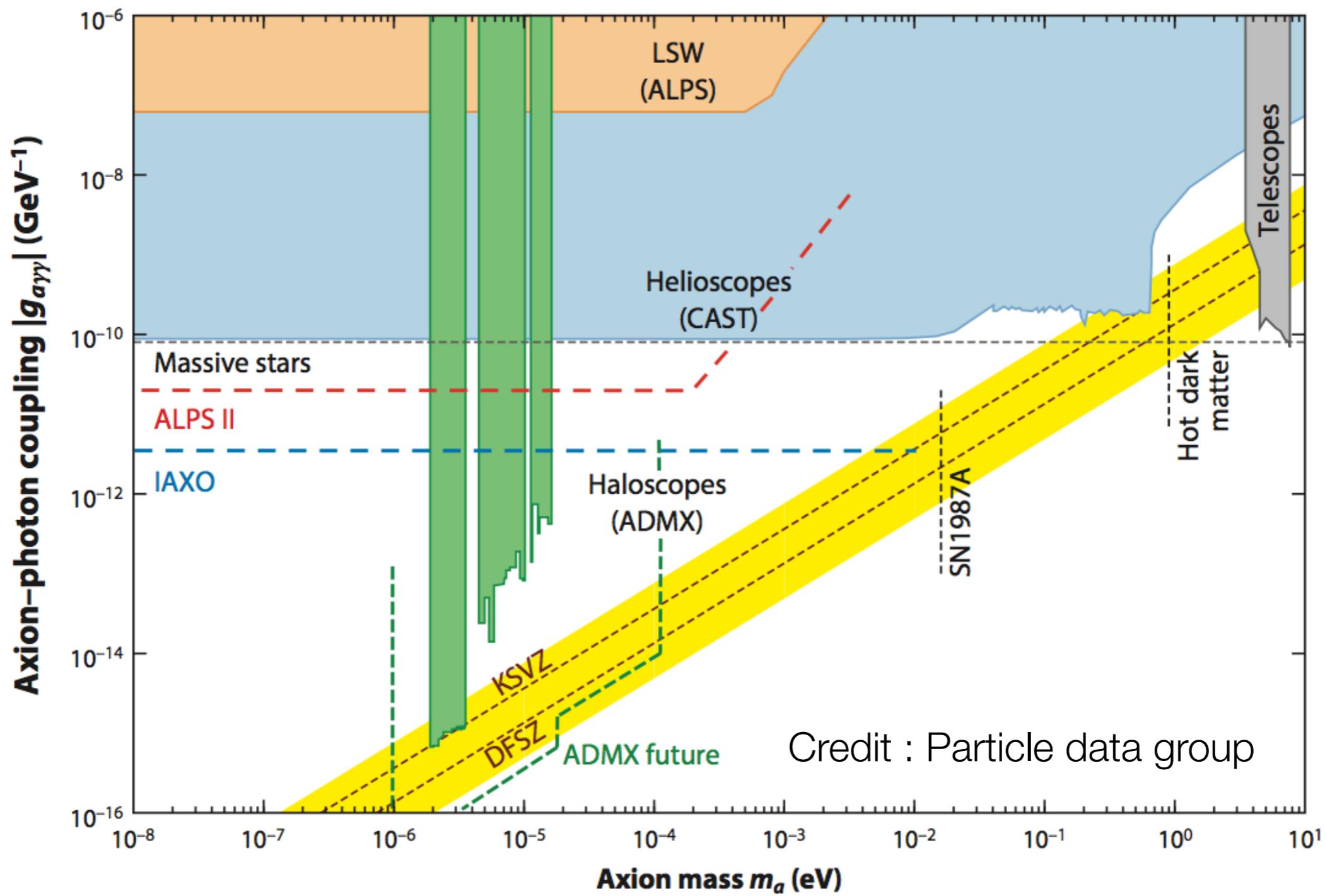


<http://depts.washington.edu/admx/>

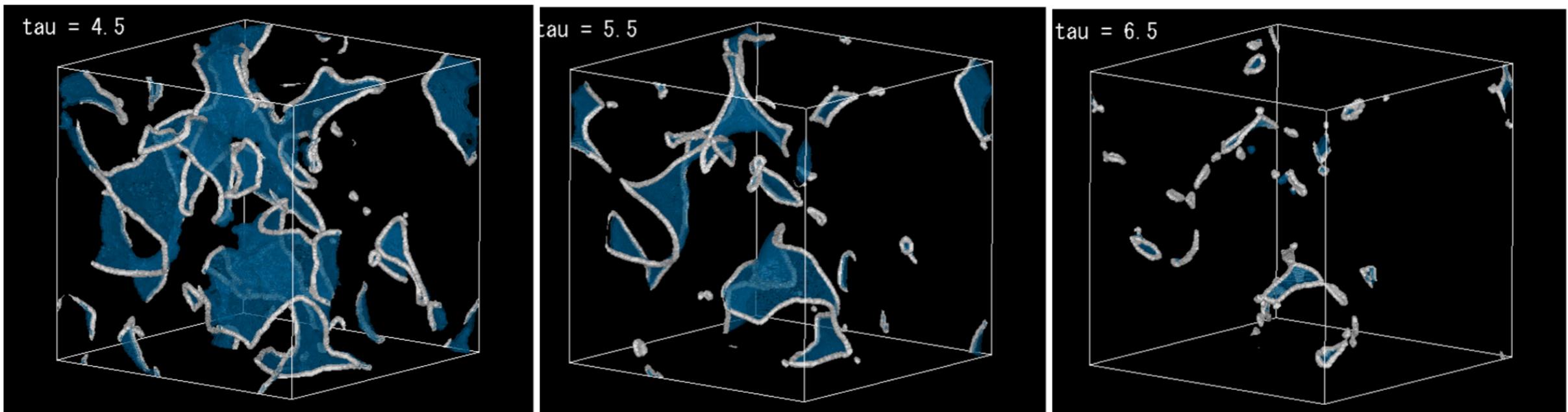
Axion helioscope



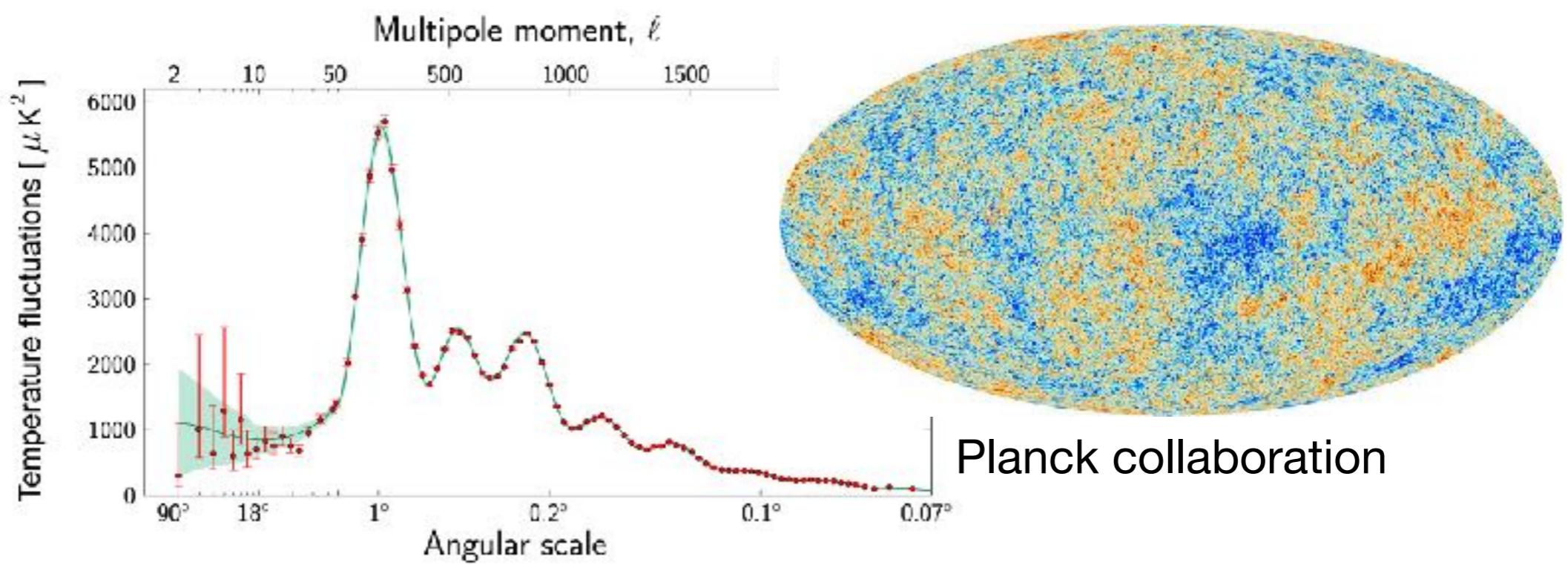
実験による制限



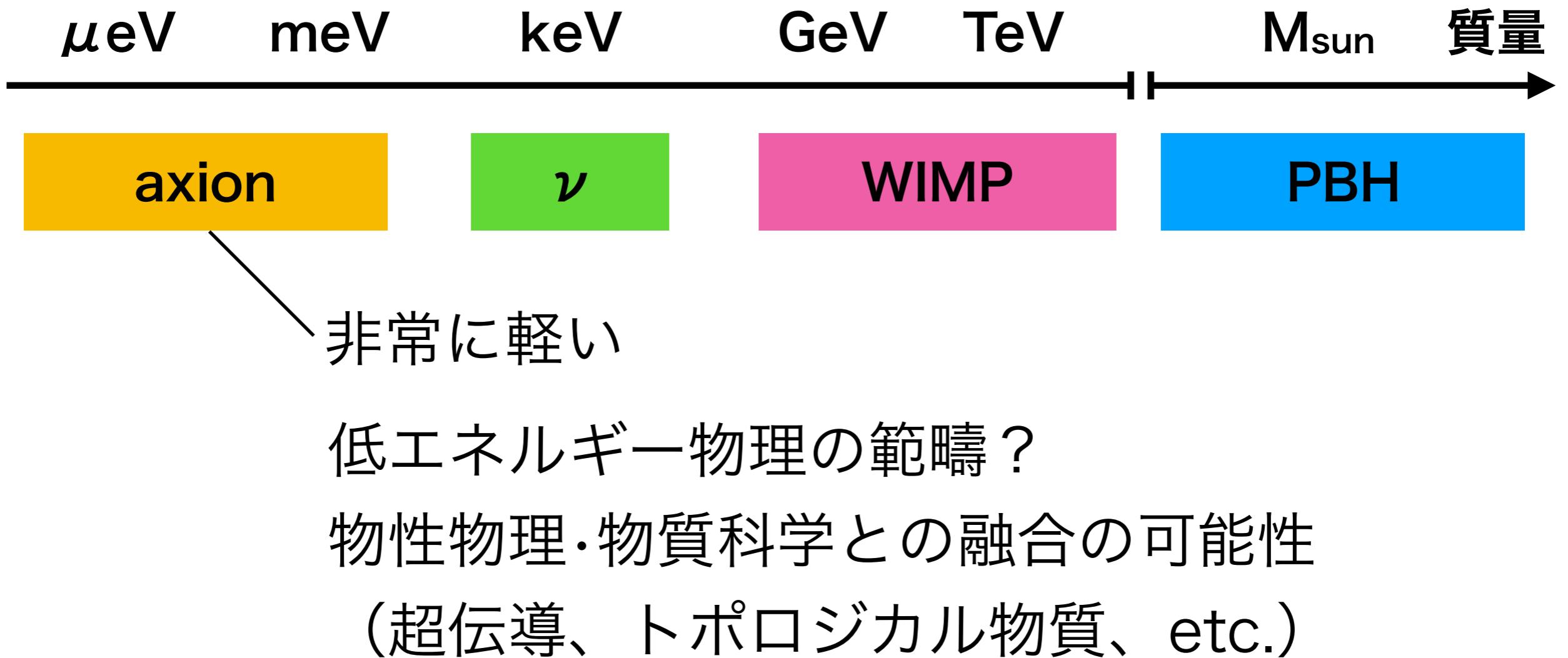
アクションは面白い？



Hiramatsu, Kawasaki, Saikawa, Sekiguchi 1202.5851



アクションは面白い？



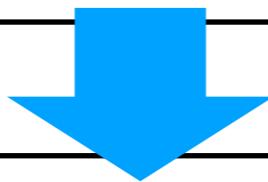
今回話す内容

(初期) 宇宙におけるアクションと電磁気現象

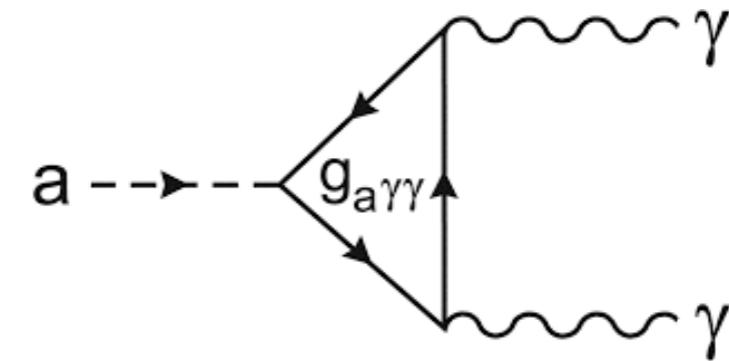
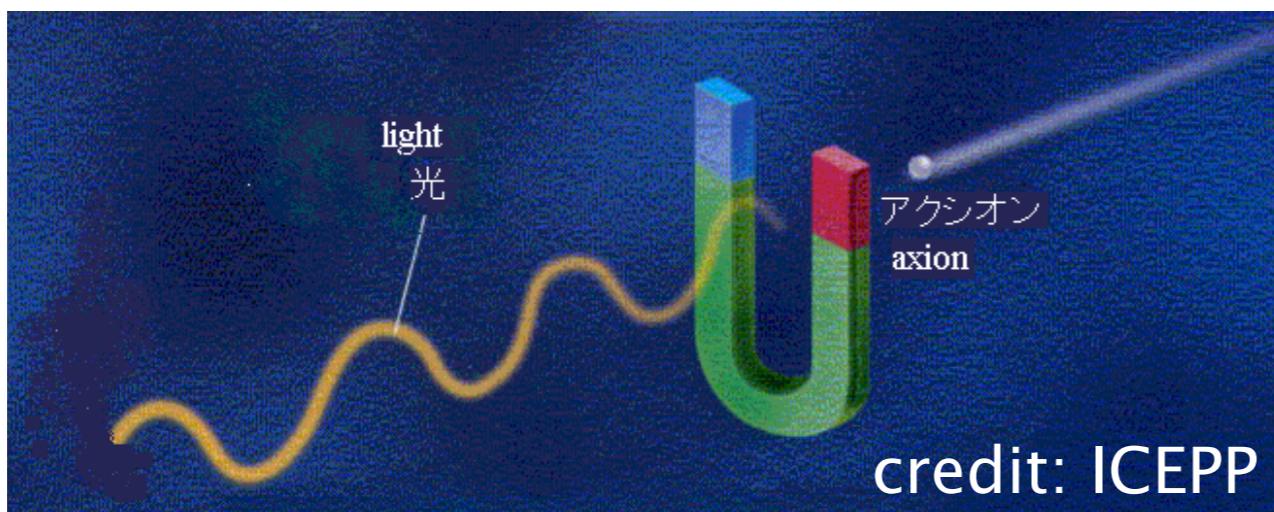
キーワード：ダークフォトン、重力波、中性子星

アクシオンとフォトンの相互作用

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = -g_{a\gamma\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B}$$



- 1. Tachyonic photon production**
- 2. Magnetic axion-photon conversion**
- 3. Axion decay into photons**



アクション- (ダーク) 電磁気学

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\partial^\mu\phi\partial_\mu\phi - V(\phi) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{2}m_{\gamma'}^2 A_\mu A^\mu - \frac{\beta}{4f_a}\phi F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}$$

(dark) photon mass

発展演式

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} - \frac{\nabla^2\phi}{a^2} + \frac{\partial V}{\partial\phi} + \frac{\beta}{4f_a}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} = 0,$$

$$\ddot{\mathbf{A}} + H\dot{\mathbf{A}} - \frac{\nabla^2\mathbf{A}}{a^2} + m_{\gamma'}^2\mathbf{A} - \frac{\beta}{f_aa}\left(\dot{\phi}\nabla\times\mathbf{A} - \nabla\phi\times(\dot{\mathbf{A}} - \nabla A_0)\right) = 0$$

with $\partial_\mu(\sqrt{-g}A^\mu) = 0$ (ローレンツゲージ)

一般に非線形となり解くのは困難

格子シミュレーション

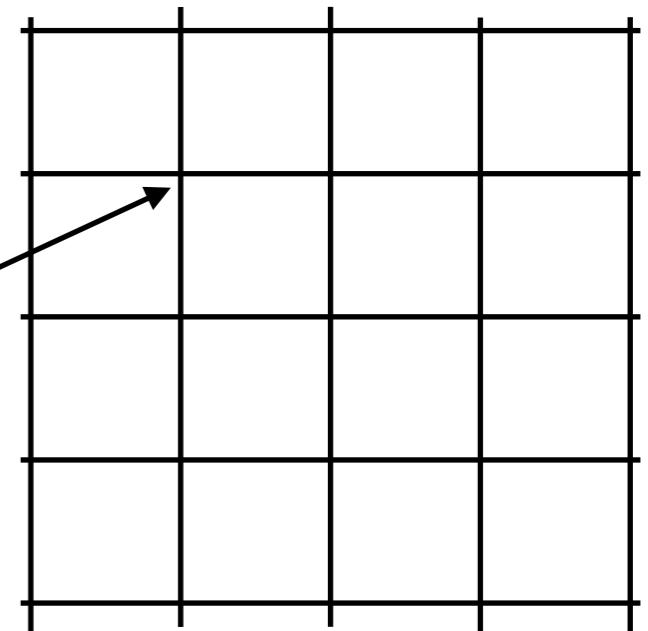
NK, Sekiguchi, Takahashi 1711.06590,
Agrawal, NK, Reece, Sekiguchi, Takahashi, 1810.07188,
see also Adshead+ 1502.06506

時間・空間を離散化

& アクションとゲージ場を各格子点に配置

$$(t, x, y, z) = \left(t_0 + n\delta t, \frac{iL}{N_{\text{grid}}}, \frac{jL}{N_{\text{grid}}}, \frac{kL}{N_{\text{grid}}} \right) \phi(i, j, k)$$
$$\mathbf{A}(i, j, k)$$

grid number : 128^3 or 256^3 , L (Box size) $\sim H^{-1}$



$$\frac{\partial \phi}{\partial x}(i, j, k) \rightarrow \frac{\phi(i+1, j, k) - \phi(i-1, j, k)}{2h}$$

QCDアクション or ALP によるダークフォトン生成

NK, Sekiguchi, Takahashi 1711.06590,
Agrawal, NK, Reece, Sekiguchi, Takahashi, 1810.07188

アクシオンとフォトンの相互作用

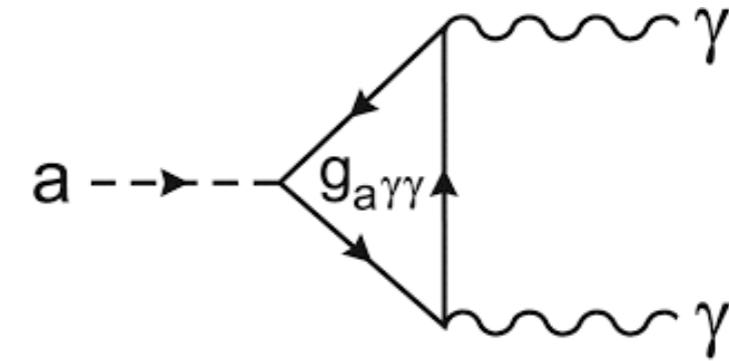
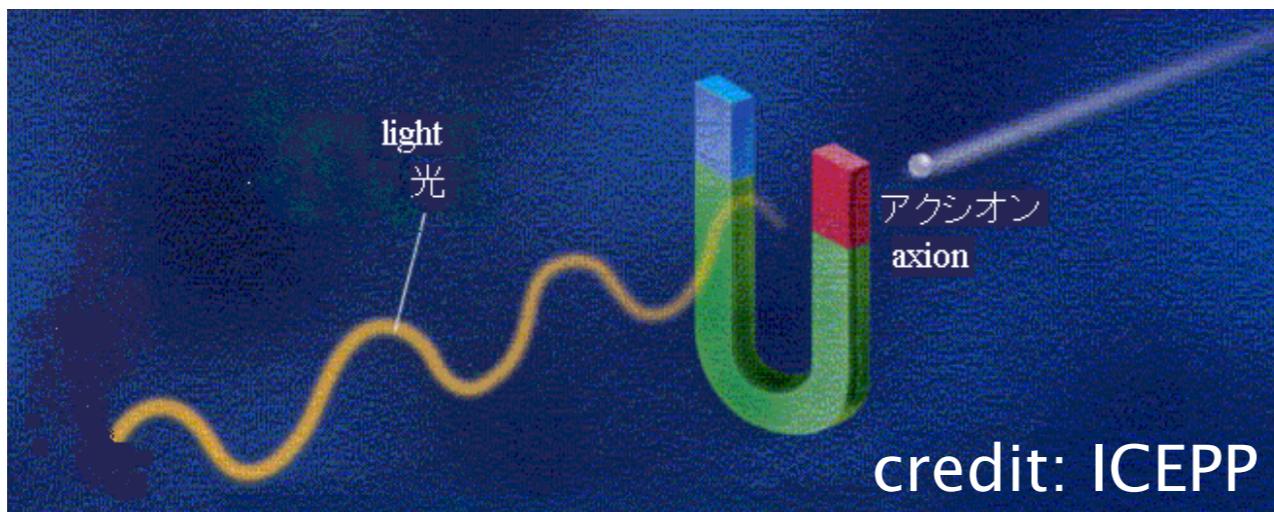
$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = -g_{a\gamma\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B}$$



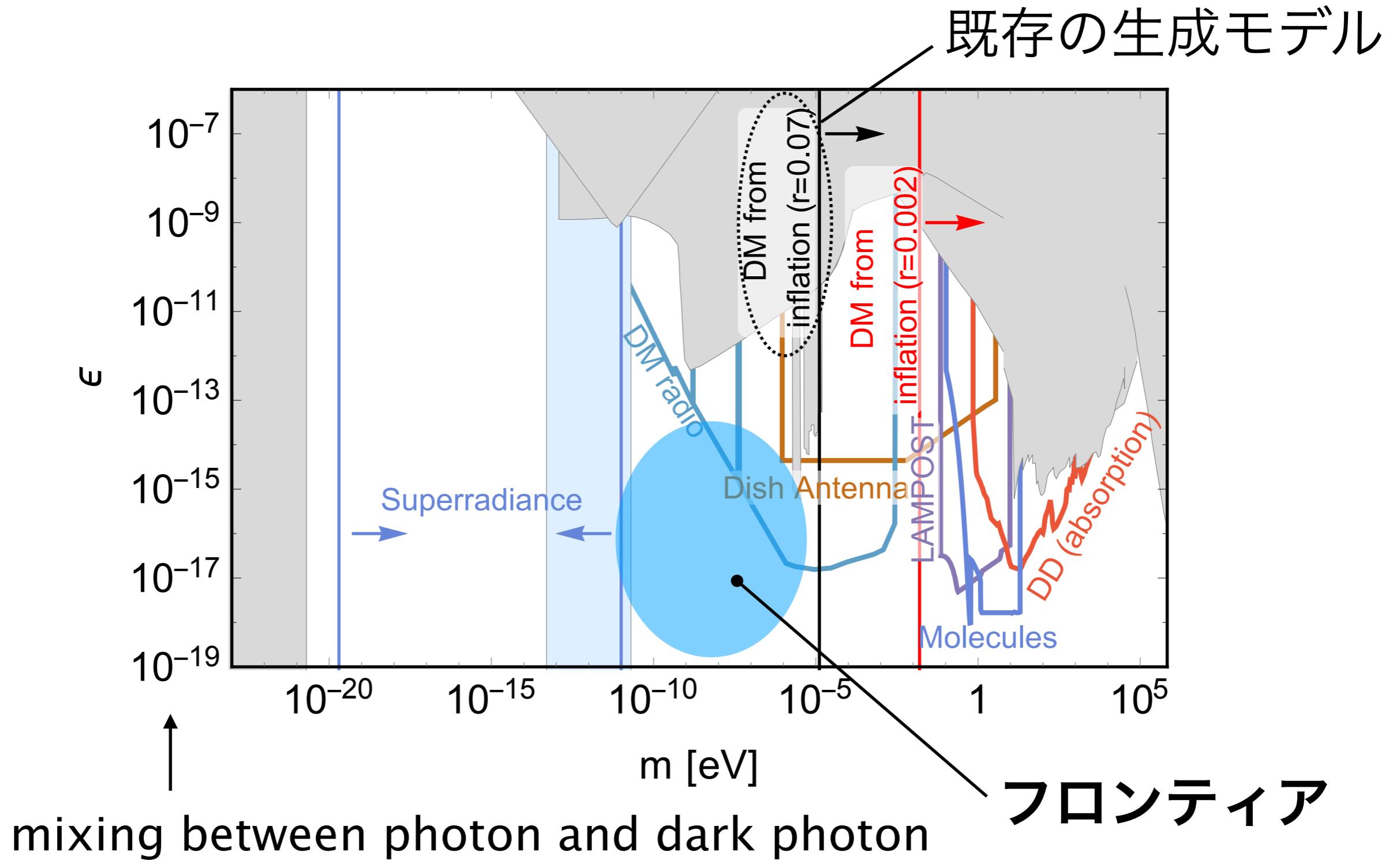
1. Tachyonic photon production

2. Magnetic axion-photon conversion

3. Axion decay into photons



Dark photon hunting field

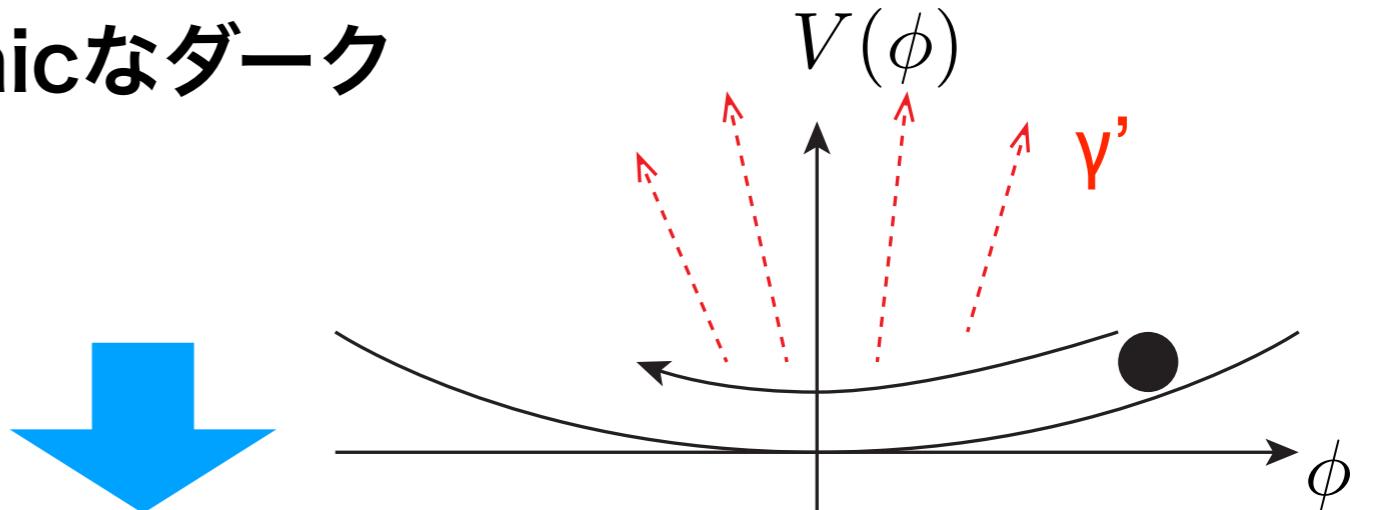


ゲージ場の円偏光モードの線形発展方程式

$$\ddot{\mathbf{A}}_{\mathbf{k},\pm} + H \dot{\mathbf{A}}_{\mathbf{k},\pm} + \left(m_{\gamma'}^2 + \frac{k^2}{a^2} \mp \frac{k}{a} \frac{\beta \dot{\phi}}{f_a} \right) \mathbf{A}_{\mathbf{k},\pm} = 0$$

↑
tachyonic

アクションの振動がtachyonicなダーク
フォトン生成を引き起こす



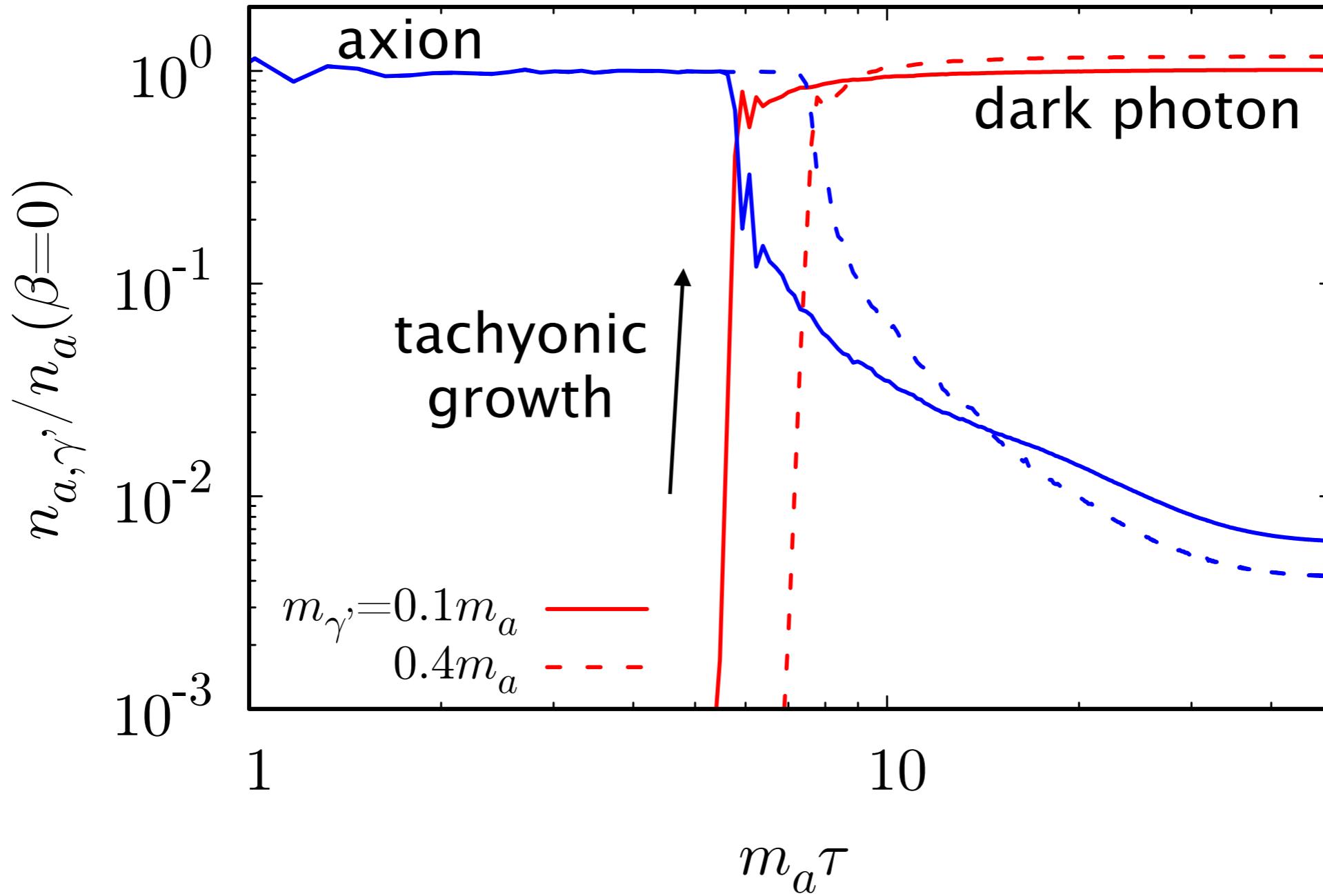
ダークフォトンの新しい生成メカニズム

See also, Co, Pierce, Zhang, Zhao, 1810.07196
Bastero-Gil, Santiago, Ubaldi, Vega-Morales, 1810.07208

ダークフォトンサーチをしている人には朗報

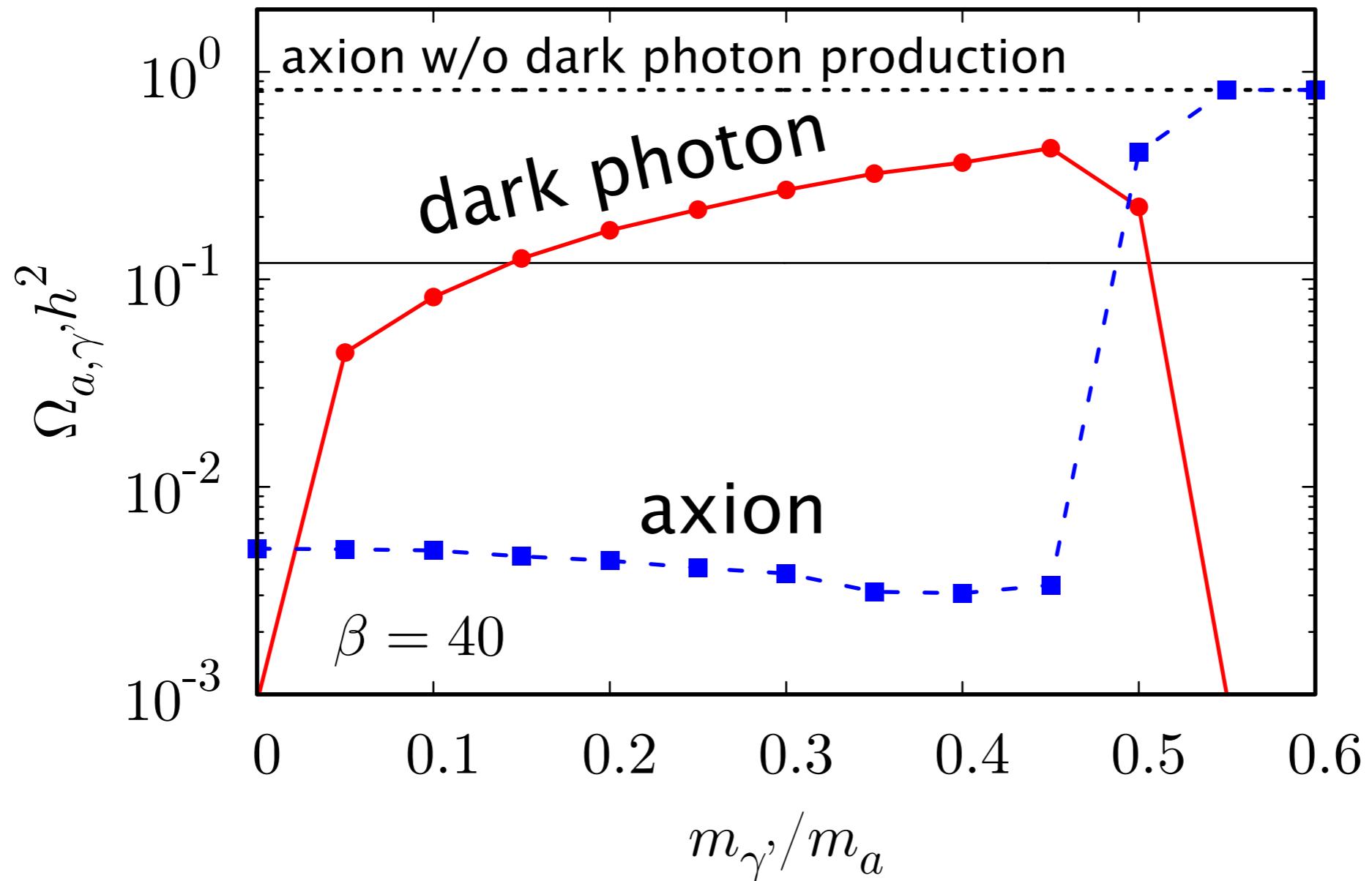
シミュレーション結果：数密度の時間発展

$$\beta = 40, \quad f_a = 10^{14} \text{GeV}, \quad m_a = 10^{-8} \text{eV}, \quad m_{\gamma'} = 0.1m_a$$



アクションの存在量は減り、ダークフォトンが支配的

シミュレーション結果：残存量

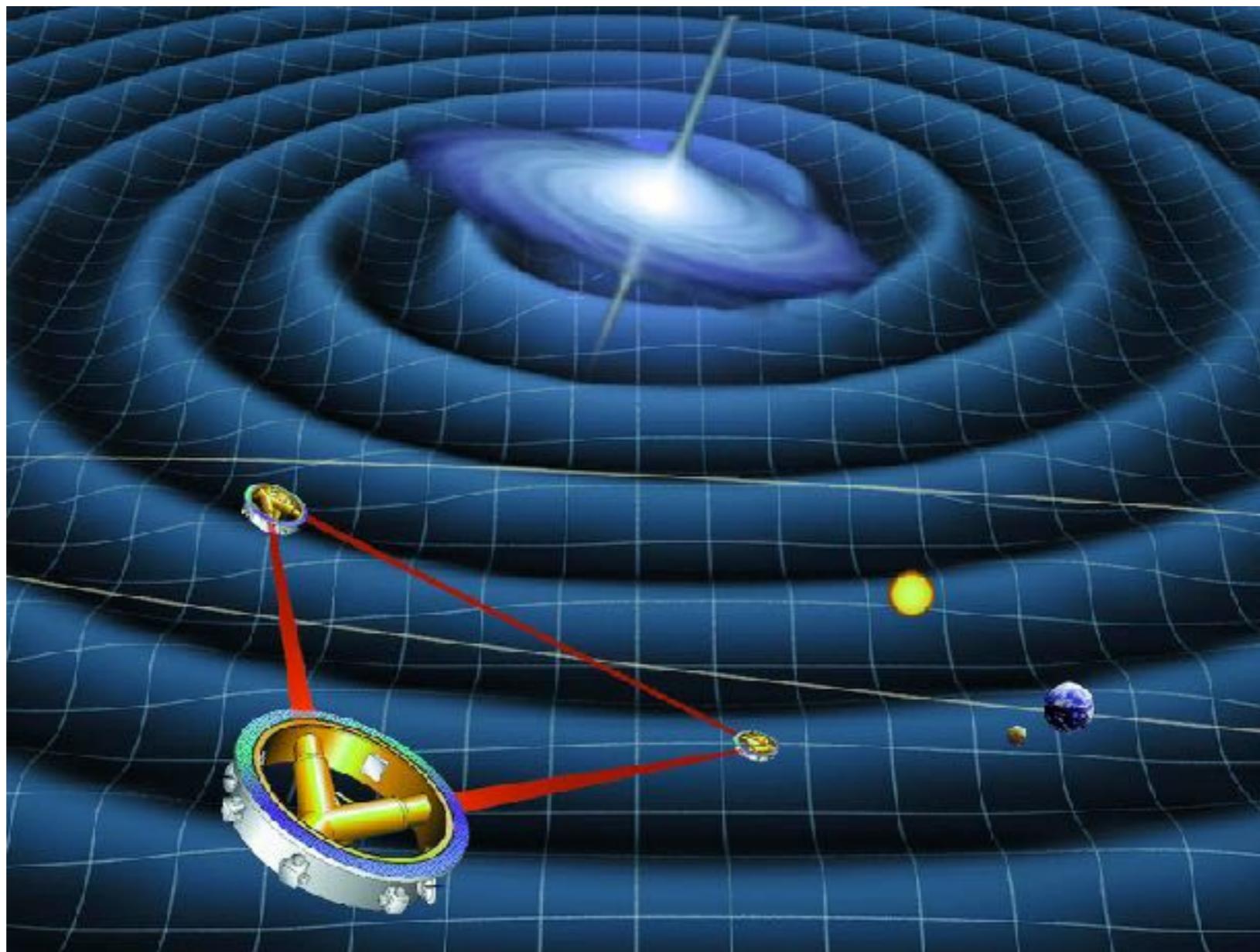


ダークフォトンがダークマターの支配的な成分となる

アクション (ALP) による重力波生成

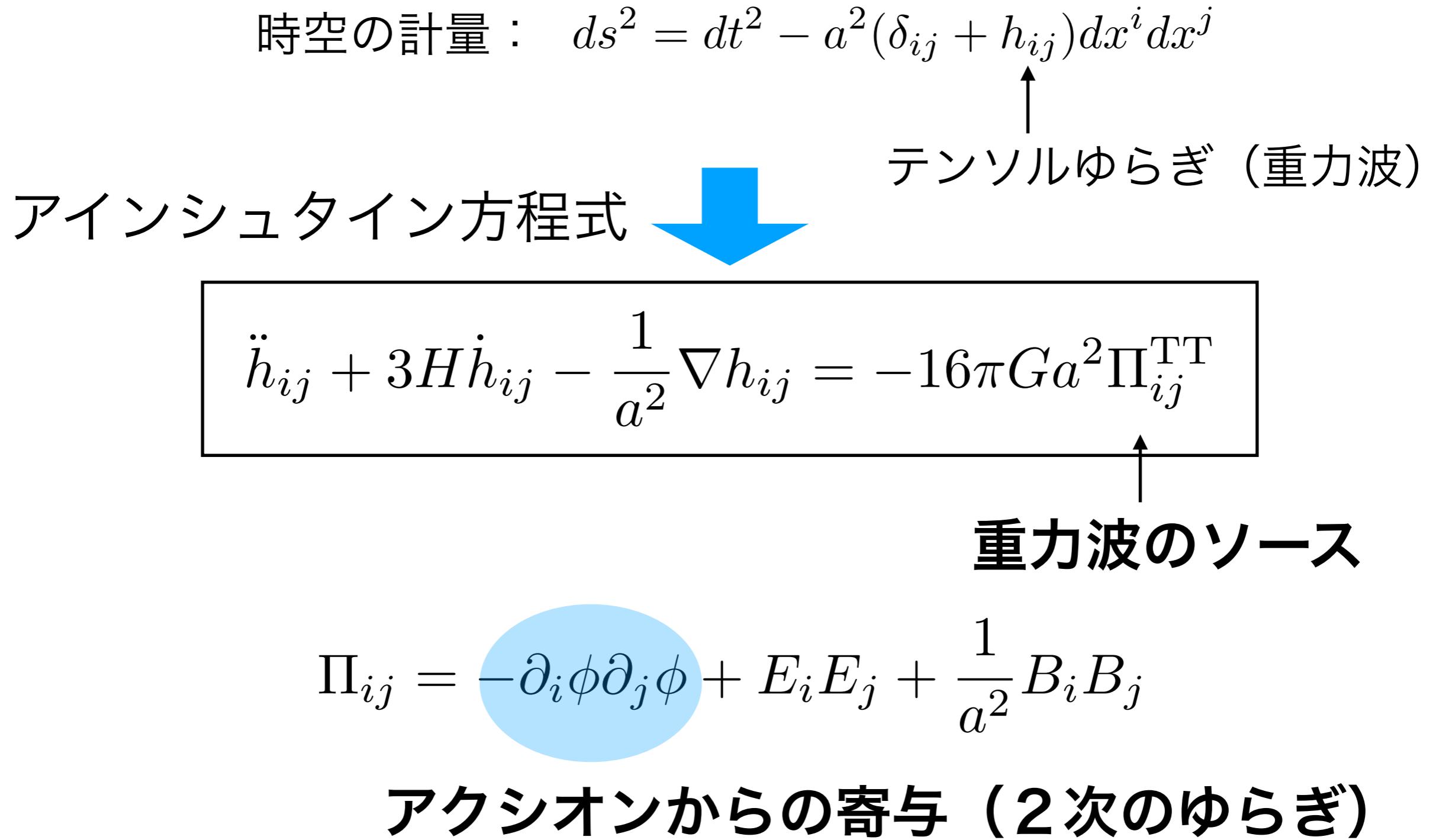
重力波

非常に強い透過力 → アクション振動開始直後の情報をもたらす

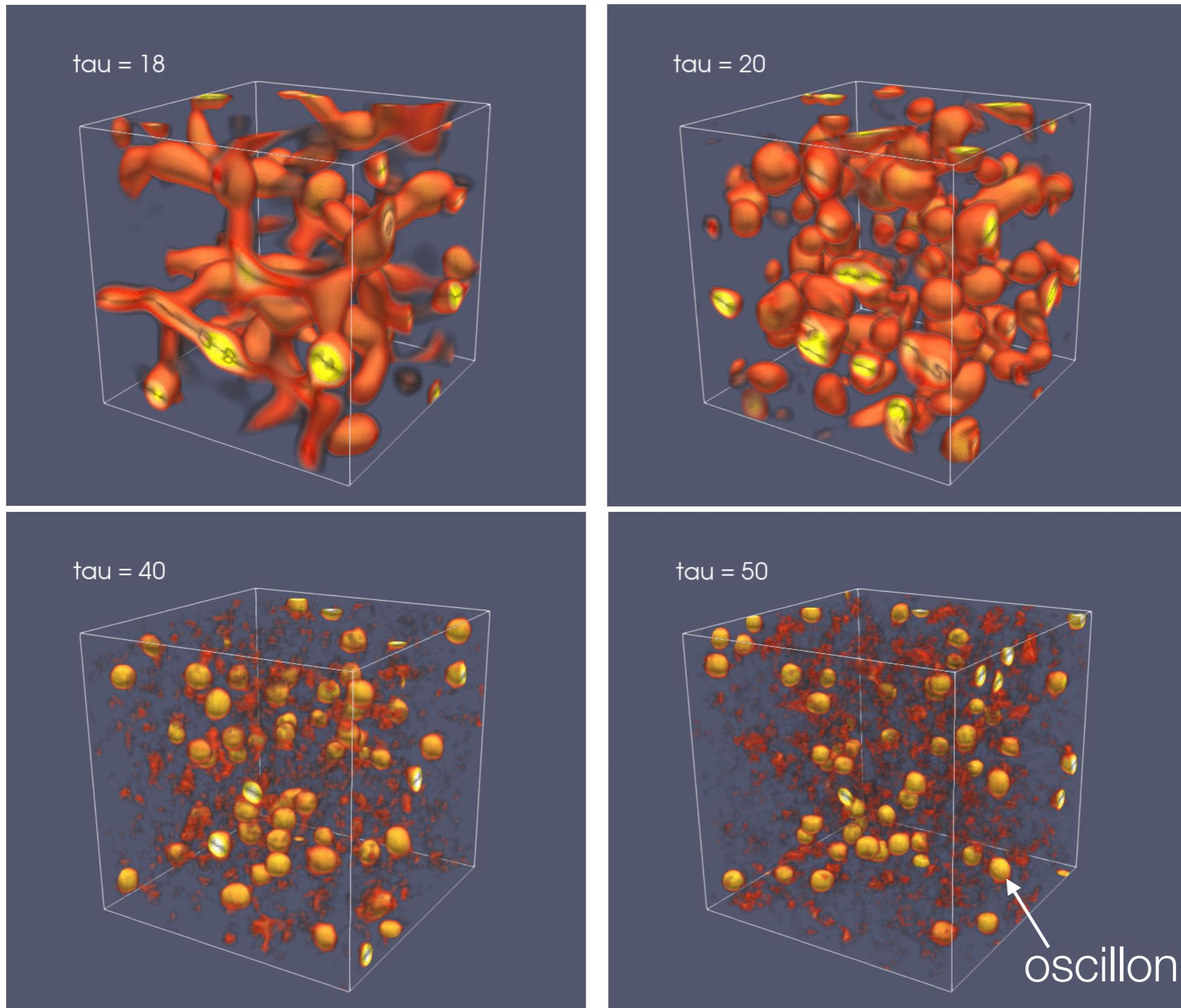


特に大きな崩壊定数のアクションほどより感度がある
 $\sim 10^{16}$ GeV

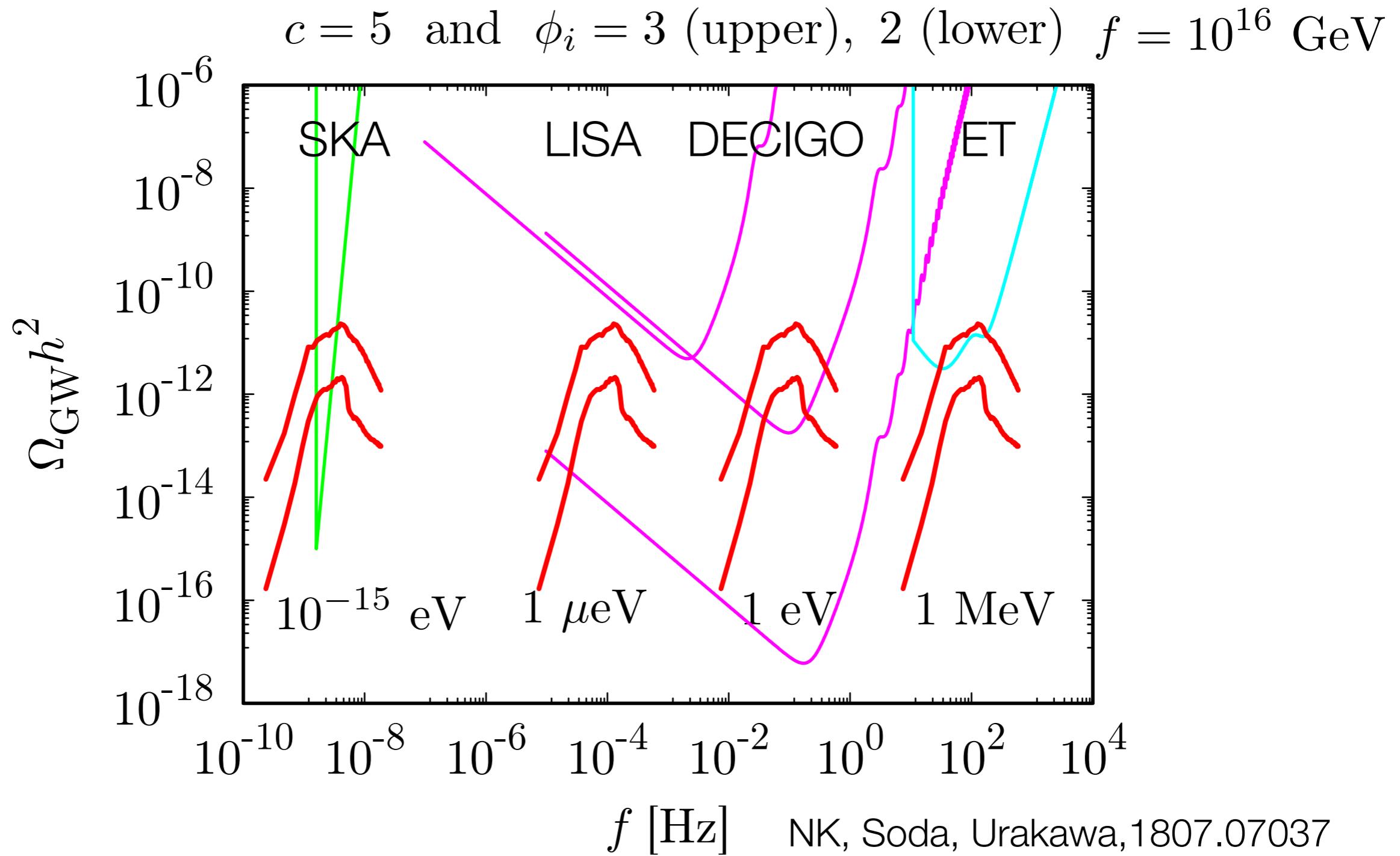
重力波



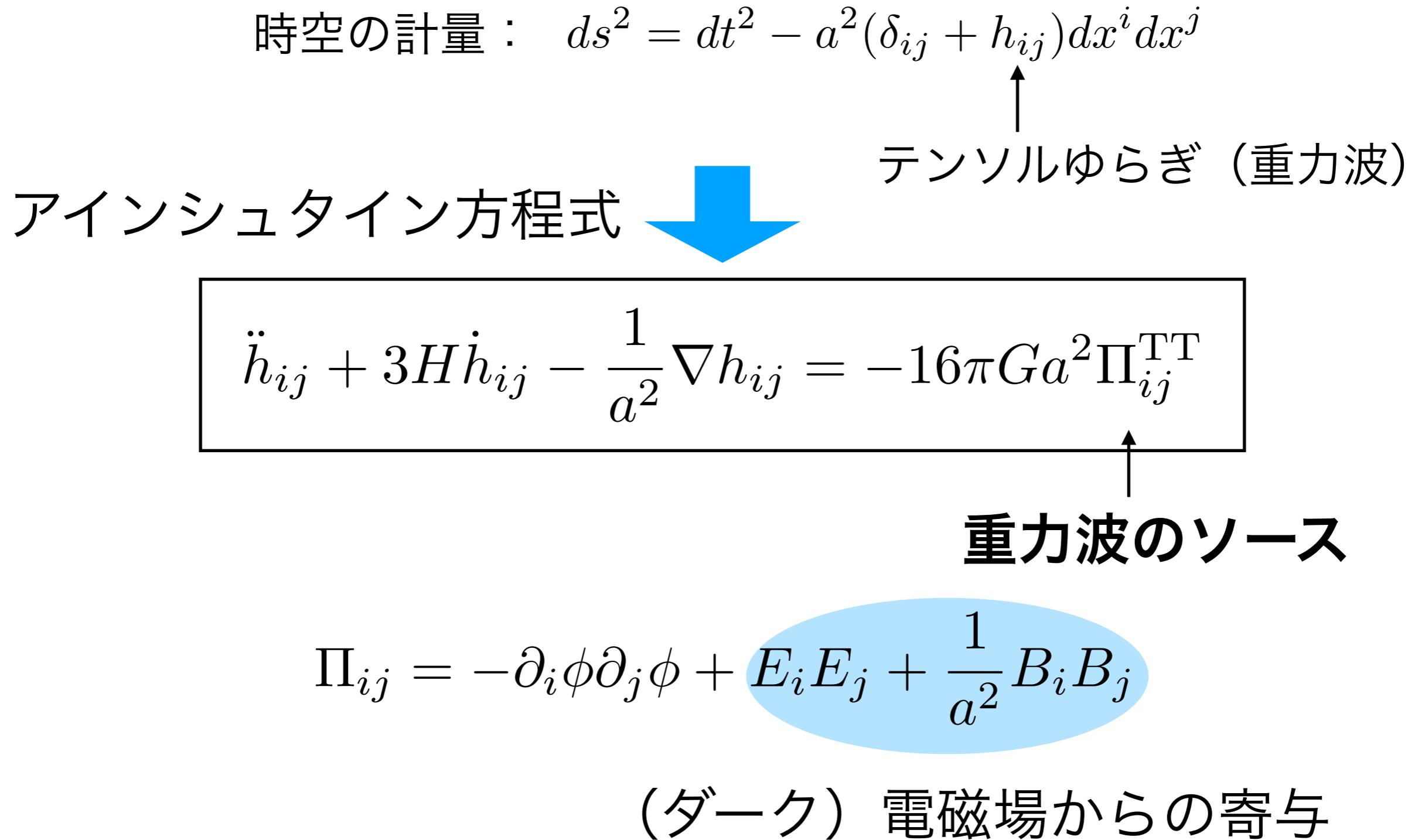
アクションの自己相互作用による不安定性 (plateau-type potential)



重力波フォレスト

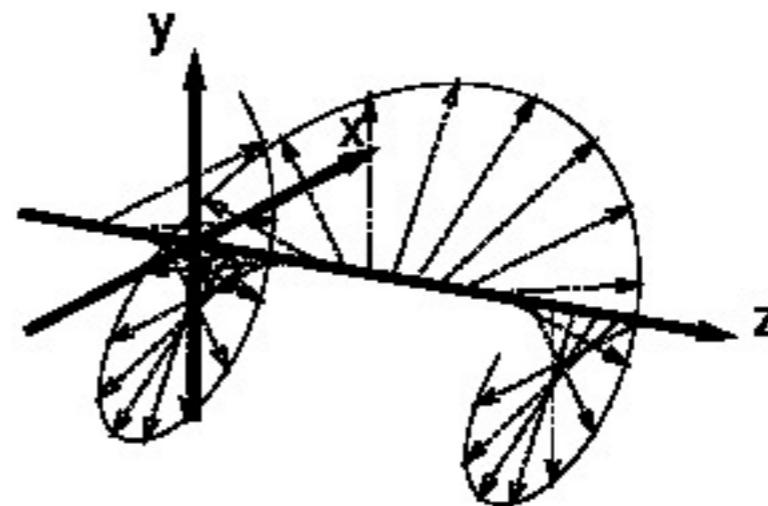
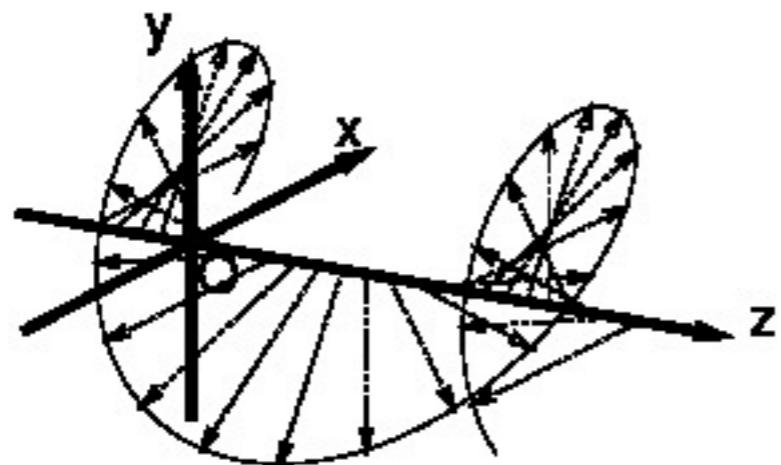


重力波



アクション → フォトンの円偏光モード非対称性

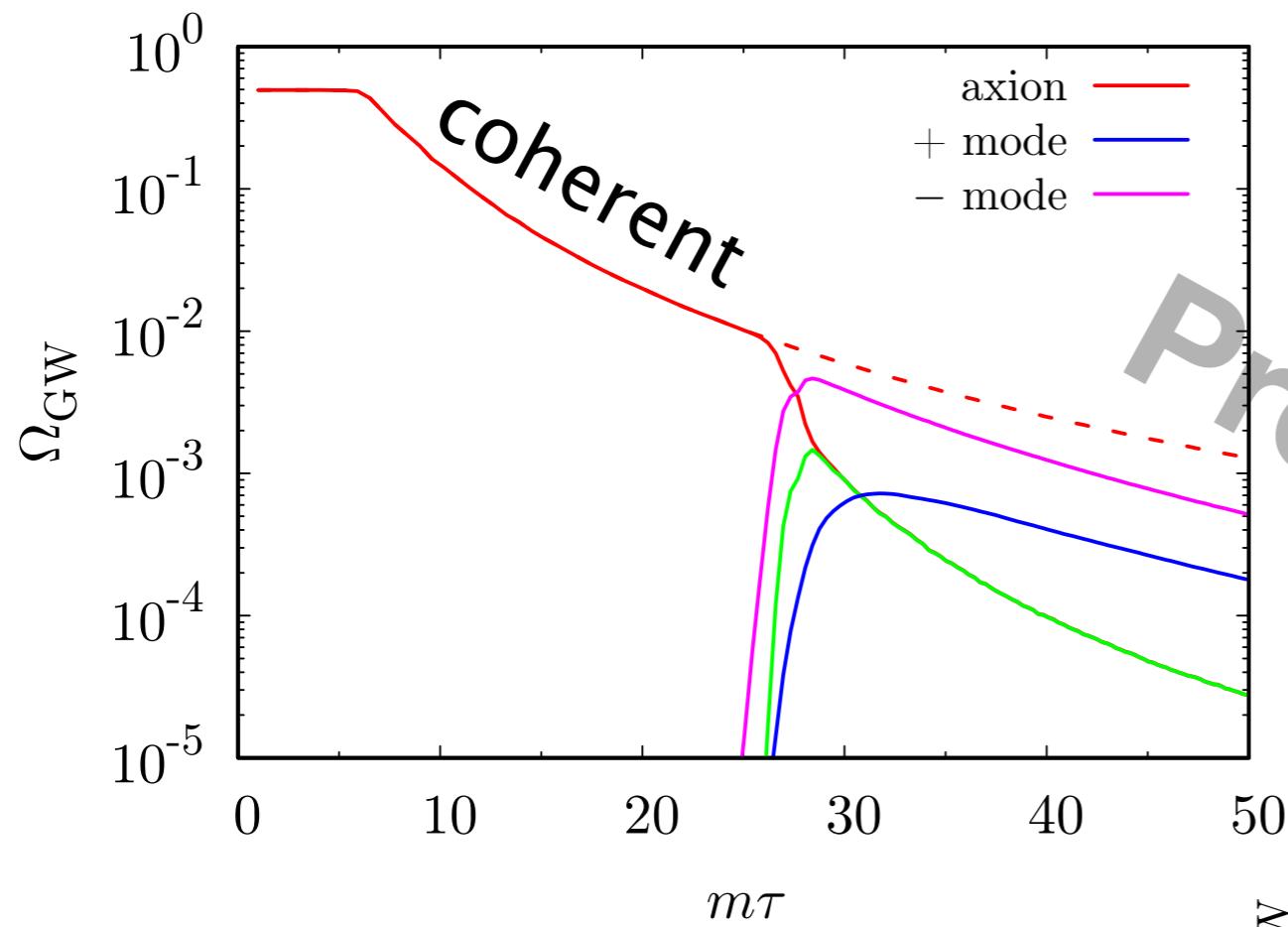
$$\ddot{\mathbf{A}}_{\mathbf{k},\pm} + H \dot{\mathbf{A}}_{\mathbf{k},\pm} + \left(m_{\gamma'}^2 + \frac{k^2}{a^2} \mp \frac{k}{a} \frac{\beta \dot{\phi}}{f_a} \right) \mathbf{A}_{\mathbf{k},\pm} = 0$$



credit : 筑波大学生物資源学類 奈佐原顕郎

重力波の円偏光モード非対称性を生む？

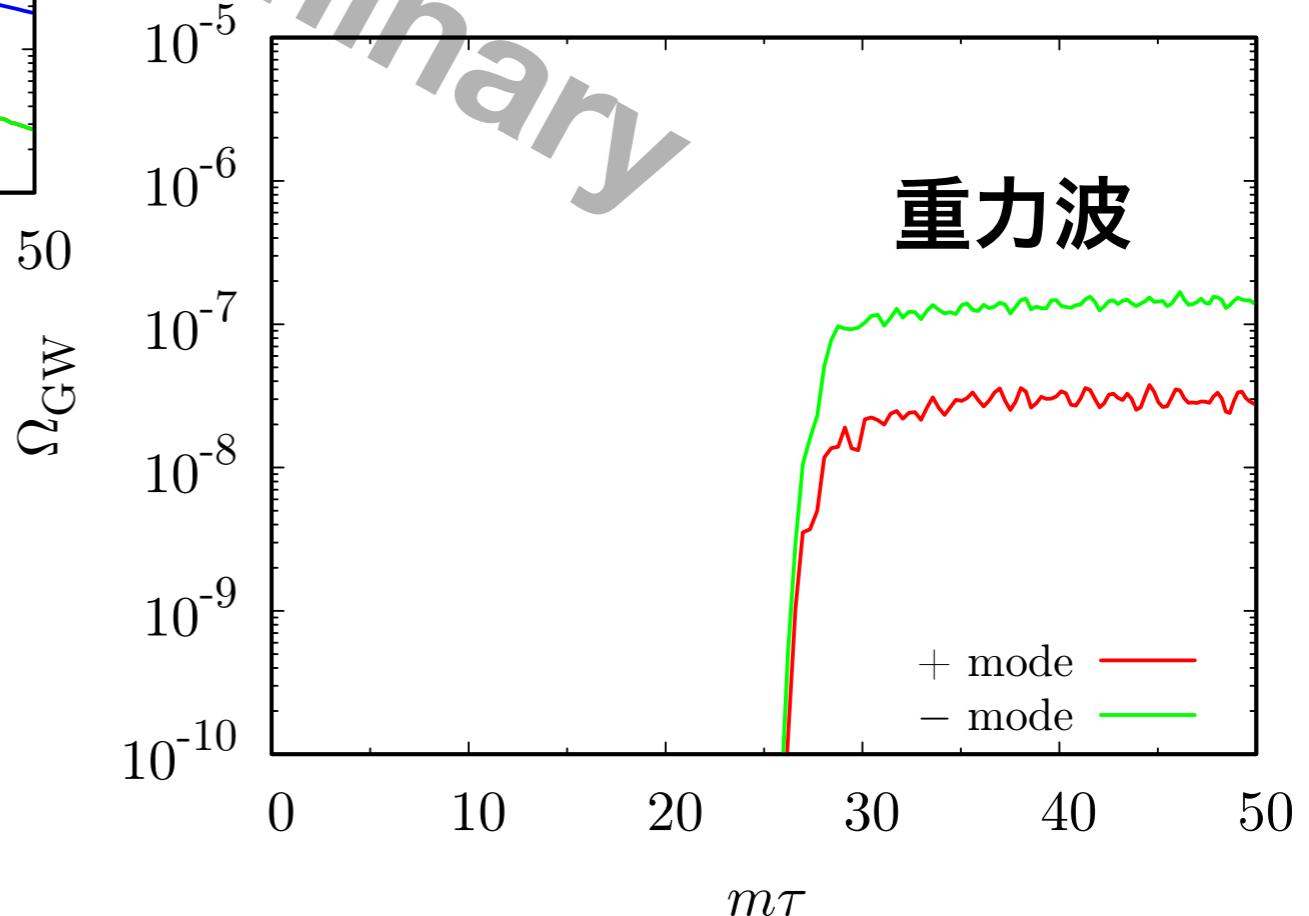
数値計算：時間発展



アクション&ゲージ場

see also Adchead+ 1805.04550,
Machado+ 1811.01950

NK, Soda, Urakawa in prep



重力波の円偏光非対称性はアクション独特のシグナル

中性子星と (QCD) アクション

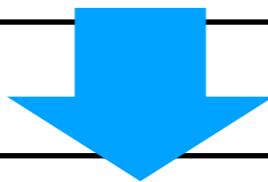
(Recent related works)

F. P. Huang, K. Kadota, T. Sekiguchi, H. Tashiro, 1803.08230
A. Hook, Y. Kahn, B. R. Safdi, Z. Sun, 1804.03145

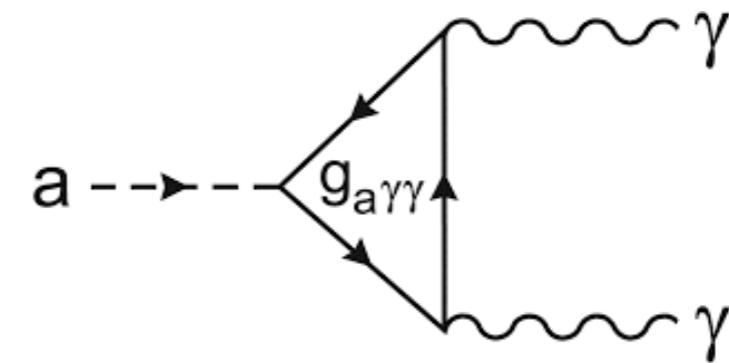
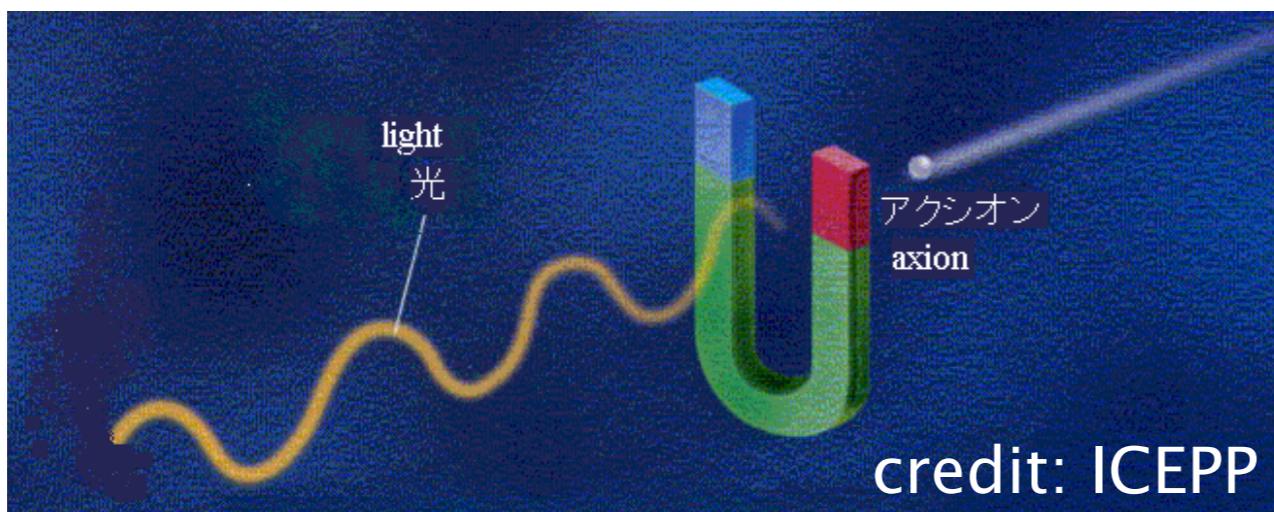
中性子星冷却によるアクションへの制限 : Hamaguchi+ 1806.07151
(核子-アクション相互作用への制限)

アクシオンとフォトンの相互作用

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = \frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} \phi F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} = -g_{a\gamma\gamma} \phi \vec{E} \cdot \vec{B}$$



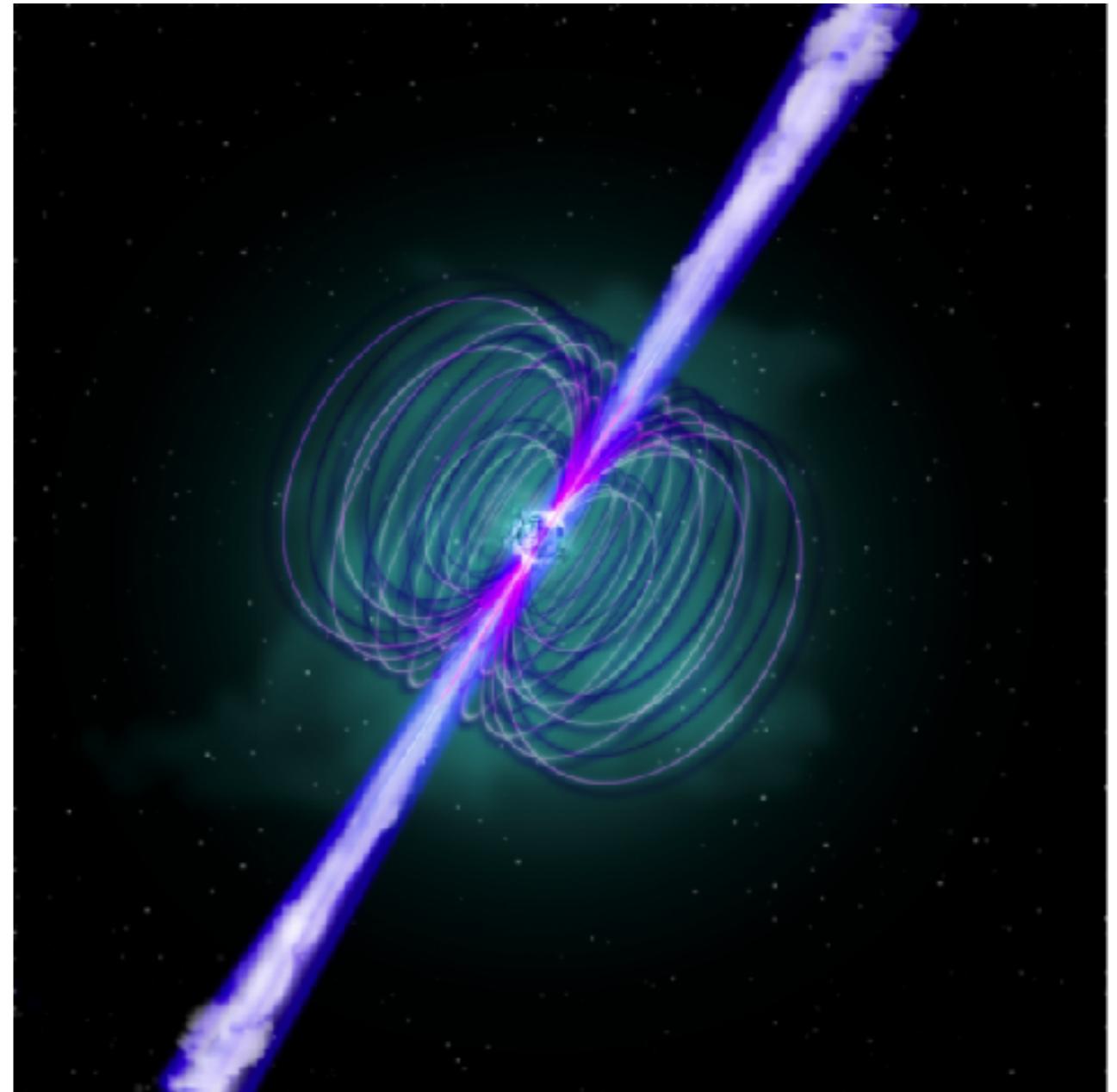
1. Tachyonic photon production
2. Magnetic axion-photon conversion
3. Axion decay into photons



地上実験 : $O(10)$ T



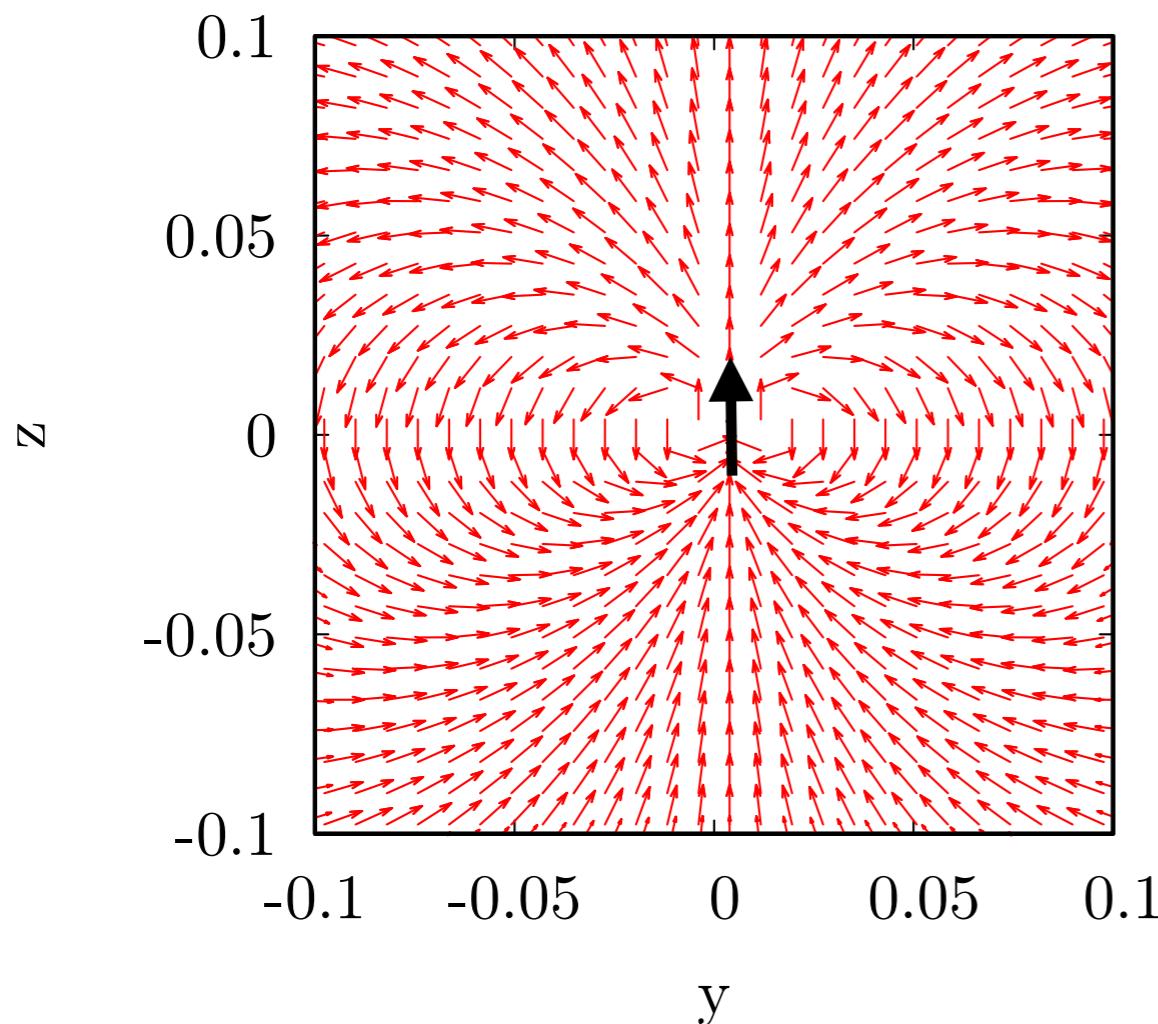
中性子星 : 100億T !



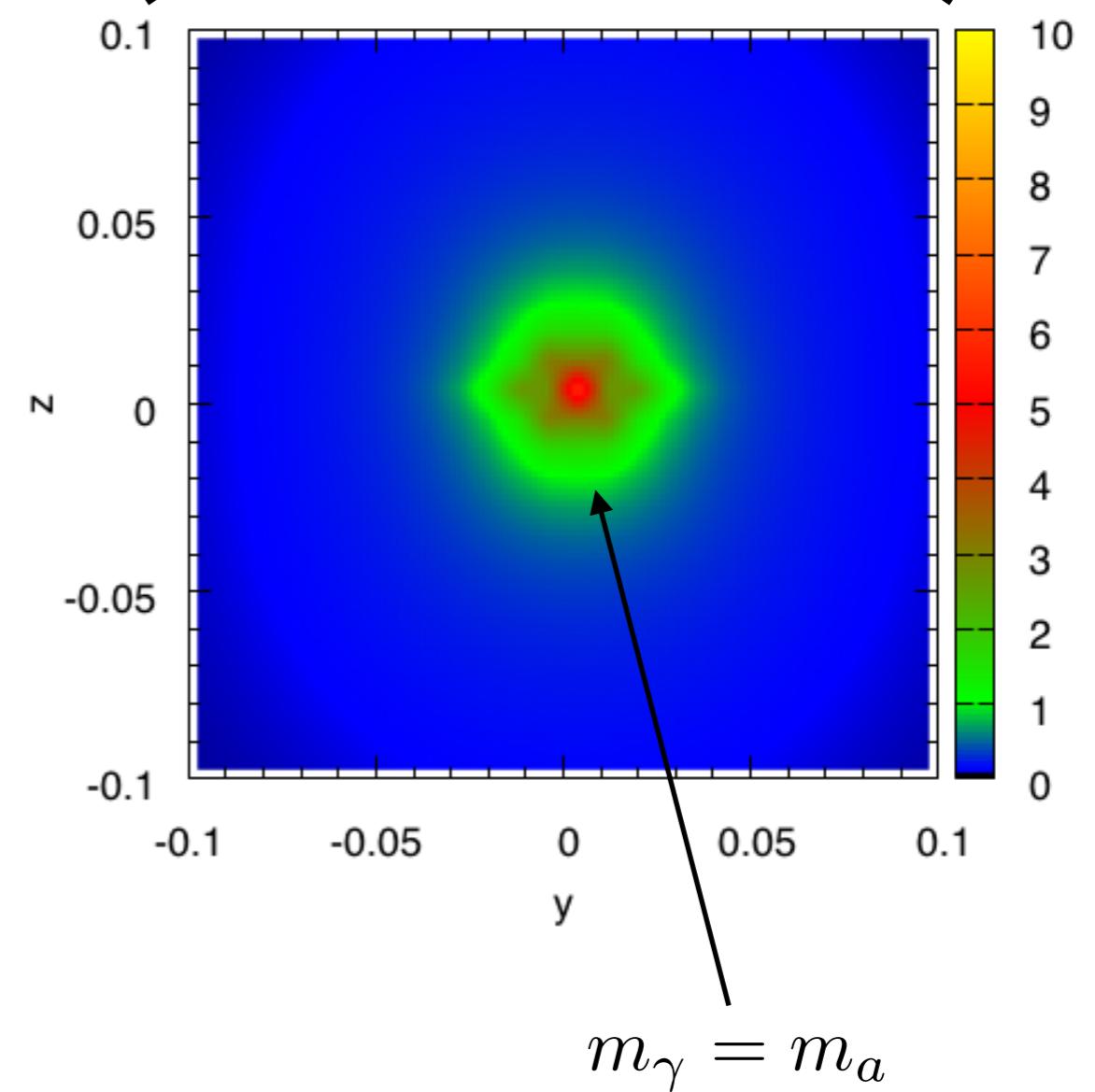
中性子星は天然のアクション検出器となりうるか ?

中性子周りの磁場分布

磁気双極子



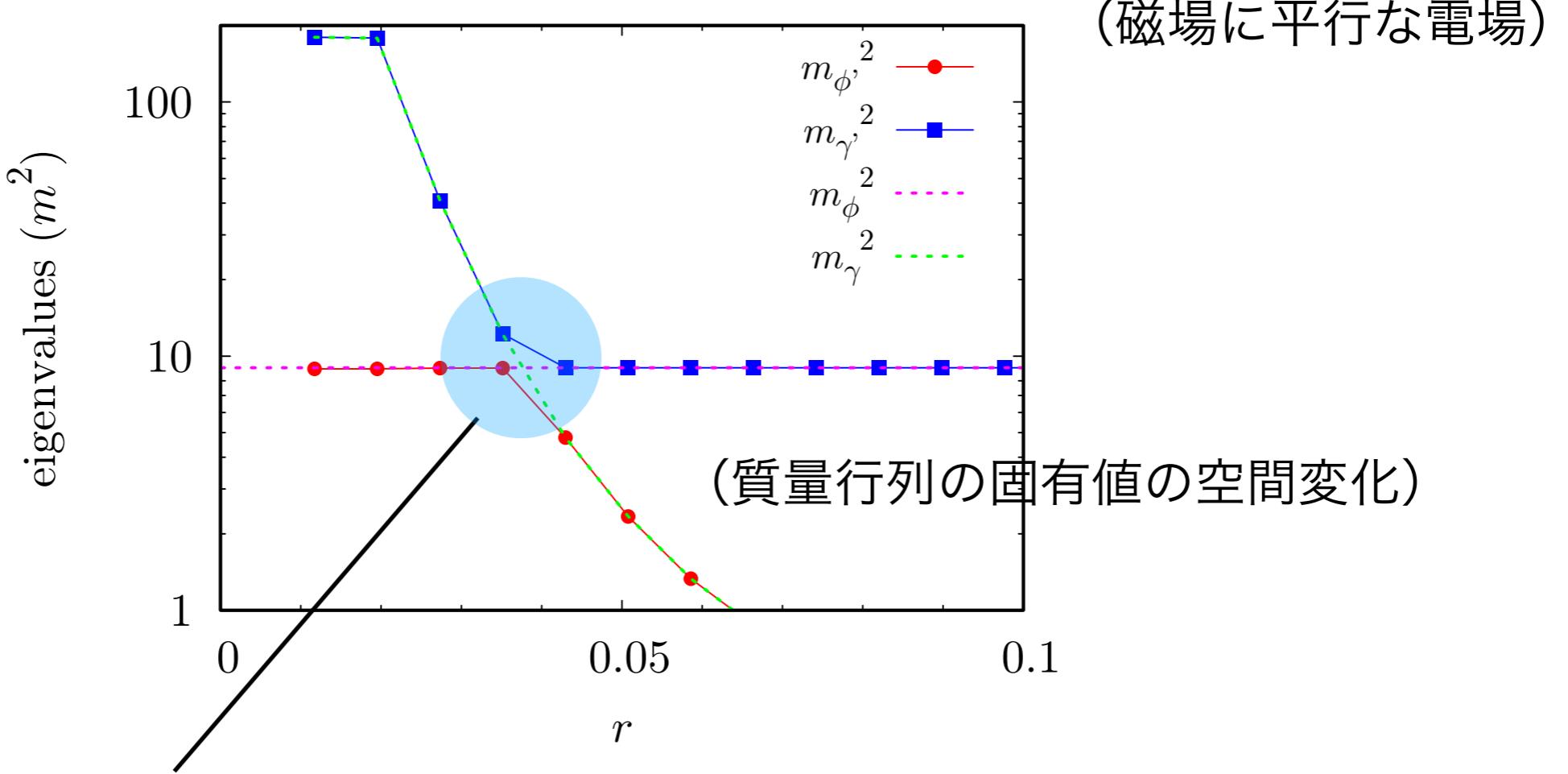
フォトン有効質量
(Goldreich-Julian)



“resonant surface”

Level crossing between axion and photon

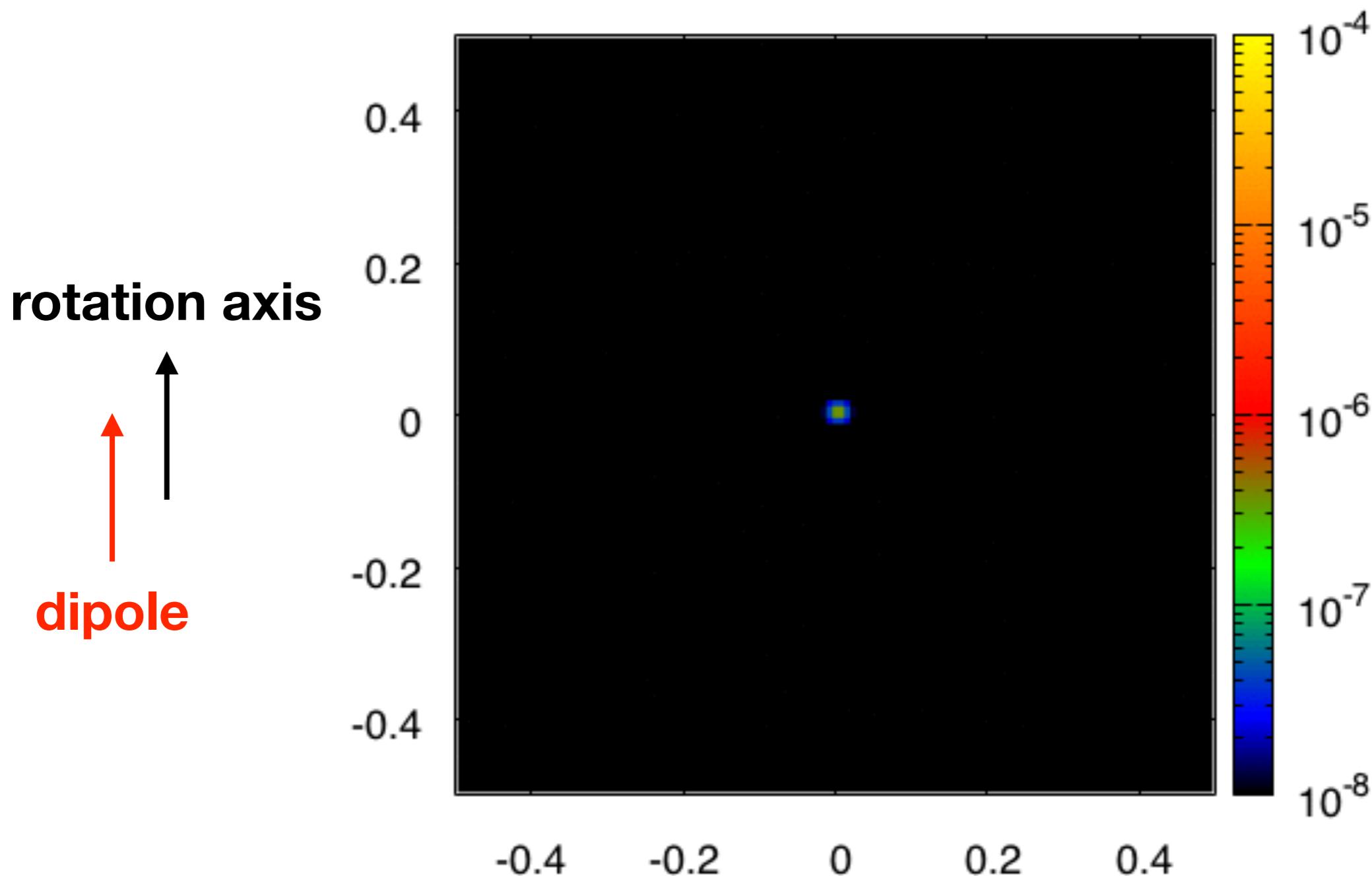
$$\square \begin{pmatrix} \phi \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_\phi^2 & -g_{a\gamma\gamma}\omega B \\ -g_{a\gamma\gamma}\omega B & m_\gamma^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ \gamma \end{pmatrix} = 0$$
$$\gamma = E/\omega$$



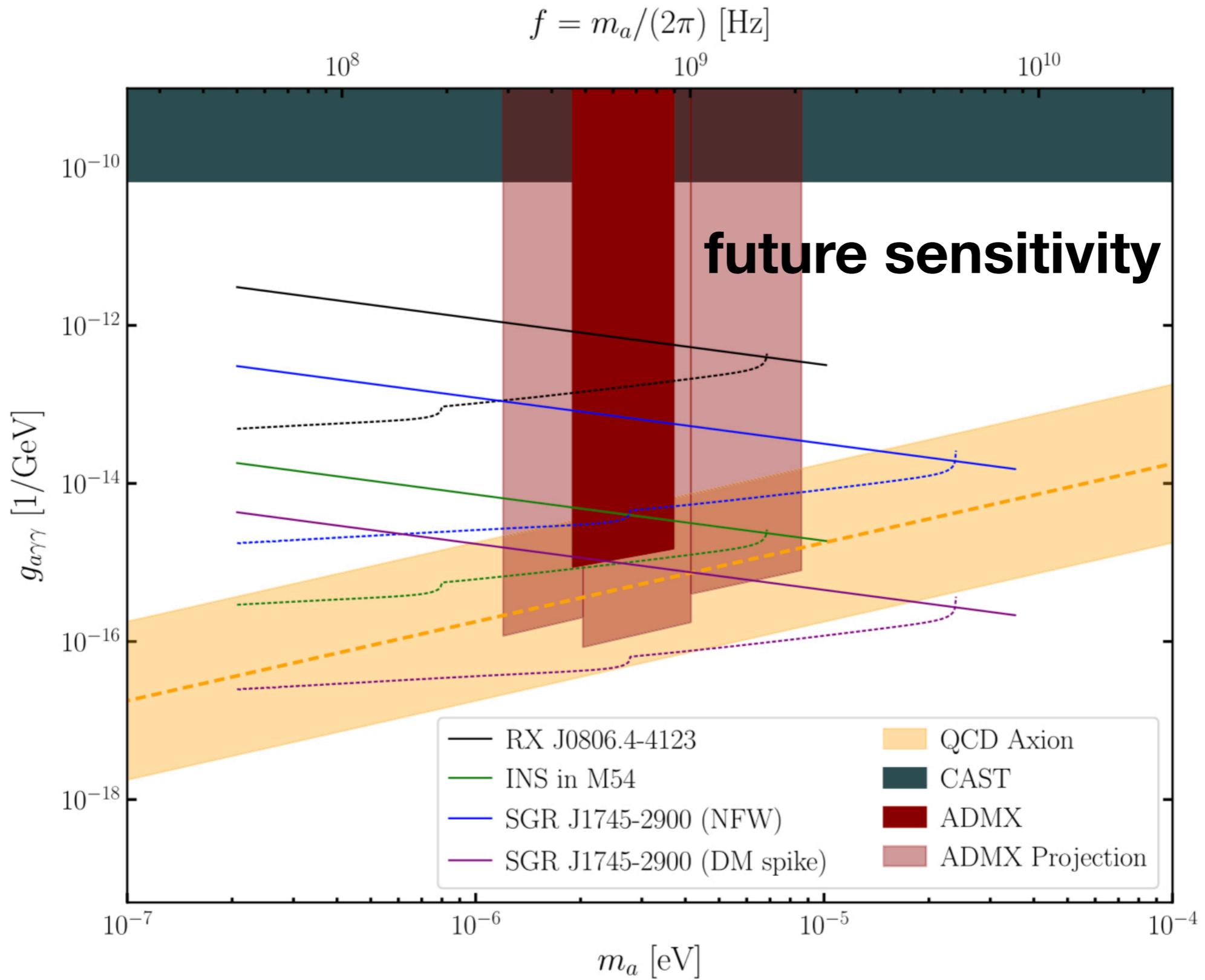
$m_\gamma = m_a$: maximal mixing \rightarrow resonant conversion

frequency \sim axion mass \sim μeV \rightarrow radio telescope

シミュレーション



アクション起源の電波放射 — dipoleに垂直
(パルサー : dipole方向に放射)



A. Hook, Y. Kahn, B. R. Safdi, Z. Sun, 1804.03145

まとめ

アクションは面白い？

宇宙（初期）のアクション-光子相互作用



ダークフォトンダーカマターを生成

円偏光モードの非対称性を持つ重力波を放出

中性子星周りの強磁場による電波放射