

シフト電流で切り開くアクシオン暗黒物質探索



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

尾崎 弦太 (東京大学理学系研究科 物理学専攻 博士3年)

Based on our work: D. Kondo, T. Morimoto, T. Sichanugrist, and G. Osaki, arXiv: 2505.17007.

背景: 暗黒物質探索 < 存在証拠はあるが、正体不明 > 有力候補のアクシオンは光子と相互作用する。
注目の新技術“シフト電流” … 光電流の一種で、従来の太陽光発電とは異なる仕組みで駆動する。
【研究のアイデア】アクシオン暗黒物質を光子に変換し、シフト電流で検出できるのでは？

1. アクシオン・光子相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = g_{a\gamma\gamma} a \mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$$

a : アクシオン場 $\mathbf{E}$: 電場
 $g_{a\gamma\gamma}$: 結合定数 $\mathbf{B}$: 磁場

▶ アクシオン由来電場の大きさ見積もり

暗黒物質(DM)は全てアクシオンであると仮定。

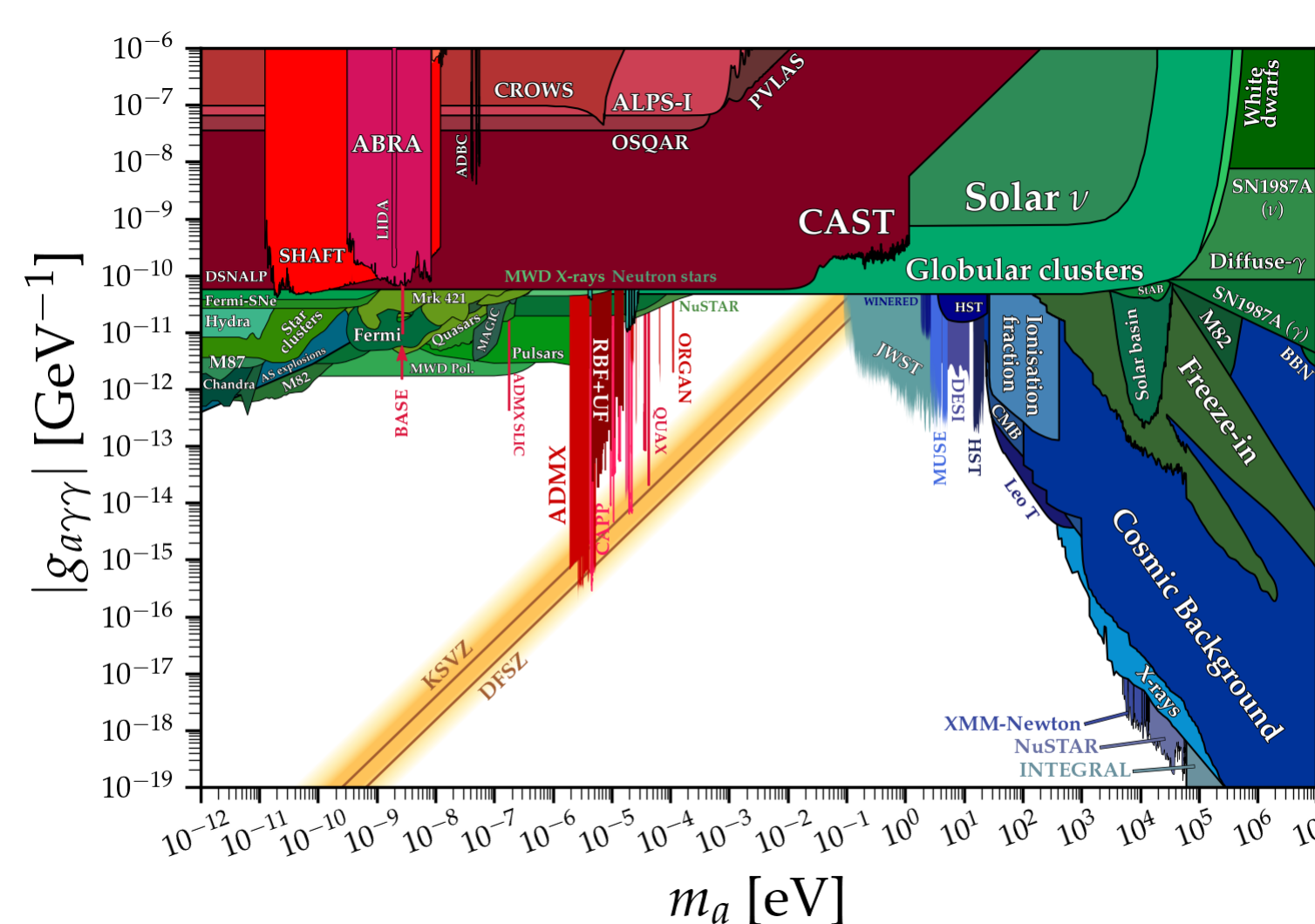
$$E_{\text{DM}} = g_{a\gamma\gamma} B_0 \frac{\sqrt{2\rho_{\text{DM}}}}{m_{\text{DM}}}$$

ρ_{DM} : DM エネルギー密度
 m_{DM} : DM 質量 B_0 : 静磁場

$$\simeq 7.9 \times 10^{-12} \frac{\text{V}}{\text{m}} \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-11} \text{ GeV}^{-1}} \right) \left(\frac{B_0}{1 \text{ T}} \right) \left(\frac{m_{\text{DM}}}{1 \text{ meV}} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_{\text{DM}}}{0.45 \text{ GeV cm}^{-3}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

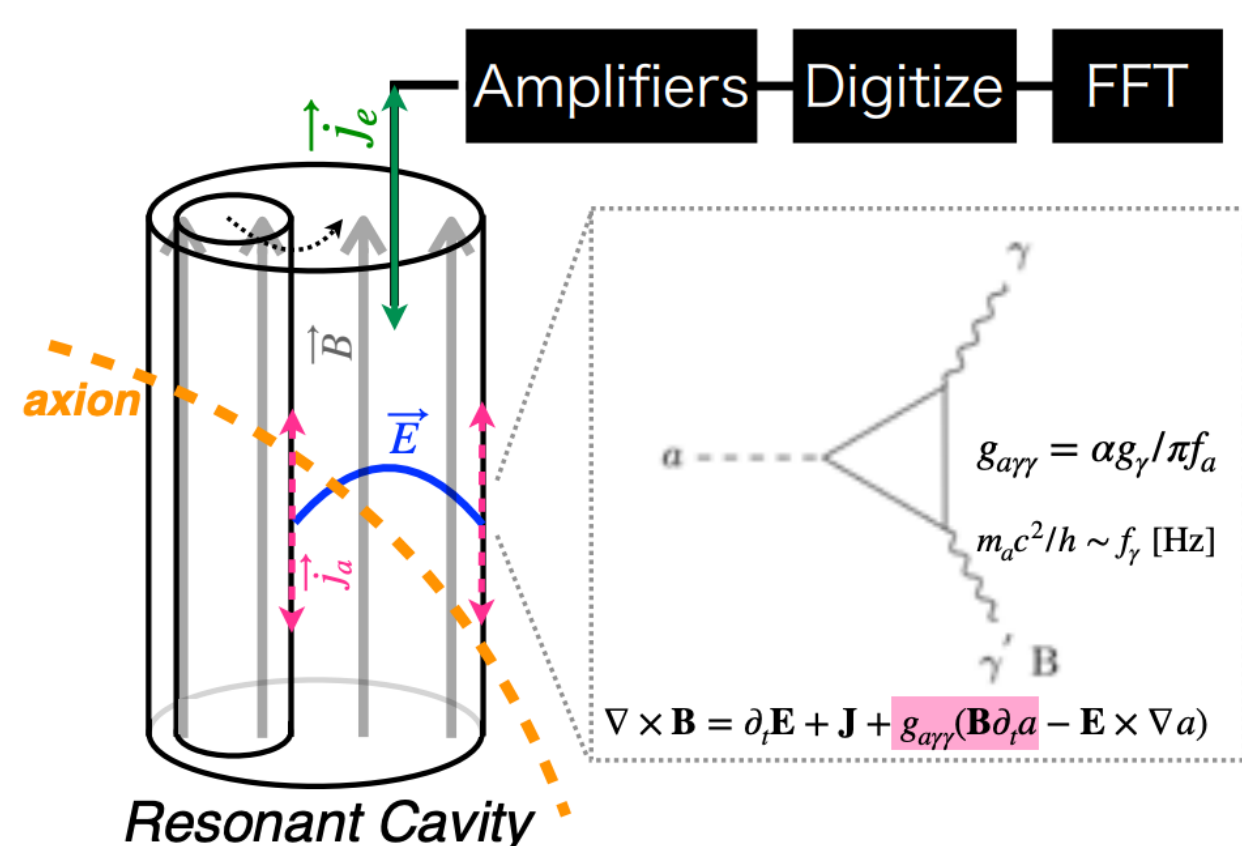
小さすぎる!! 検出するには何らかの増幅機構が必要。

▶ アクシオン暗黒物質探索の現状



<https://cajohare.github.io/AxionLimits/docs/ap.html>

Haloscope: 空洞共振による増幅

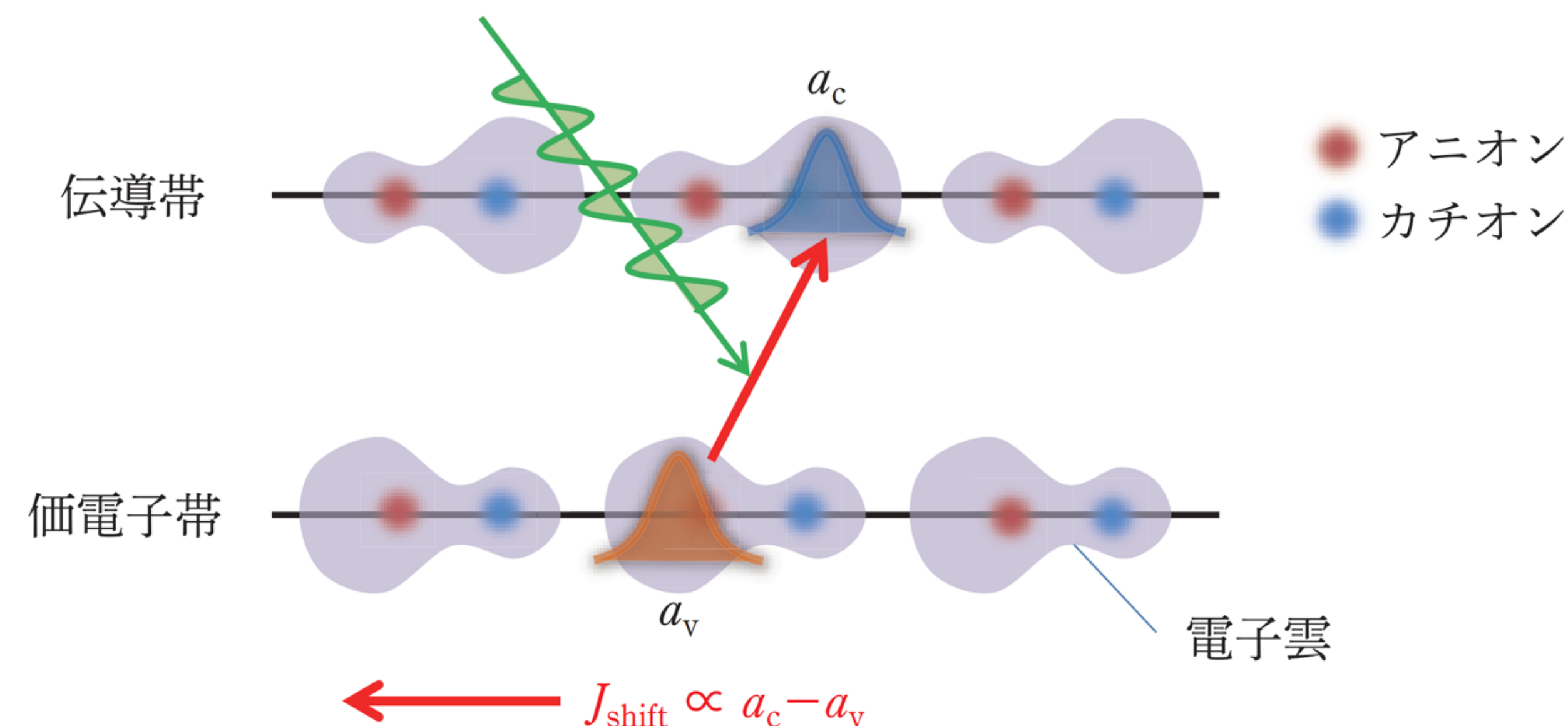


<https://www.jahep.org/hepnews/2021/40-4-2-ADMX.pdf>

2. シフト電流

▶ 従来の太陽光発電とは異なる光電流現象

電子の光励起→波動関数の空間的シフト→電流発生



https://www.jstage.jst.go.jp/article/oubutsu/90/2/90_98/_pdf

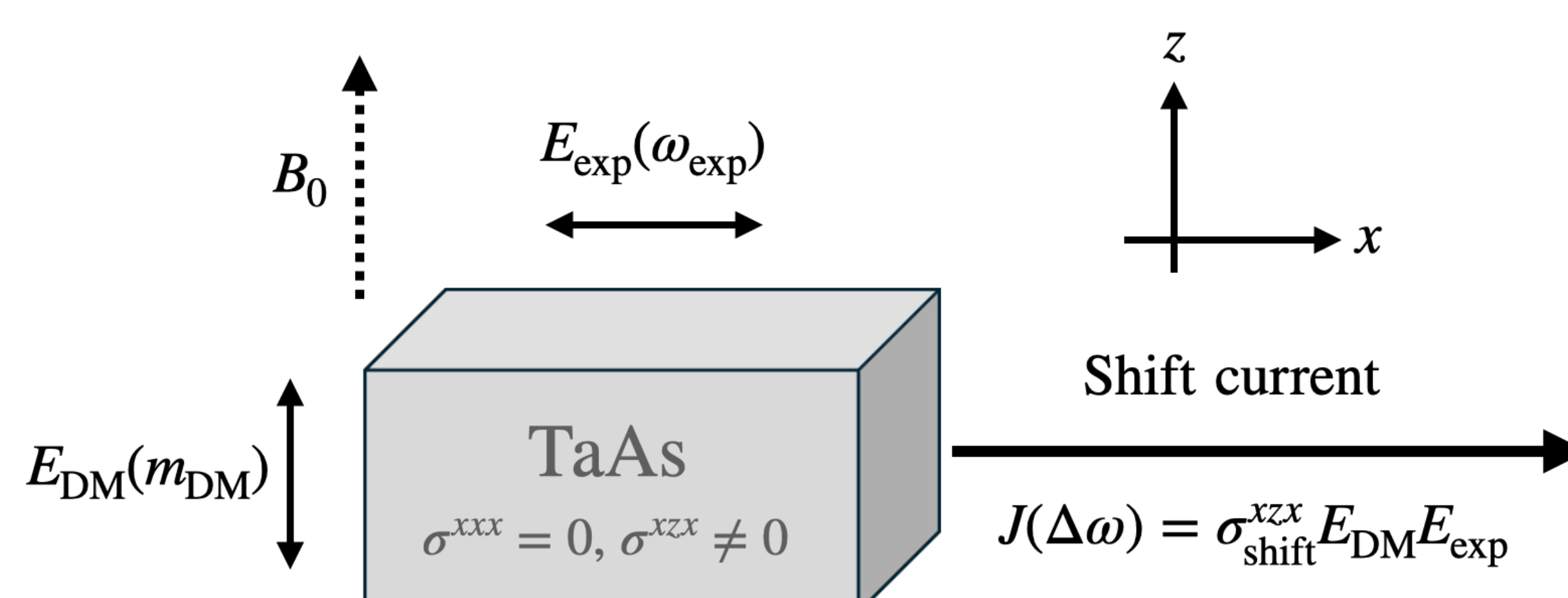
▶ 重要な性質

- ・2次の非線形応答→2つの入力電場のうち片方をアクシオン由来電場、もう片方を強い実験電場にする事で、測定可能な大きさの信号を得る。
- ・非散逸性→広帯域のアクシオン暗黒物質測定が可能。

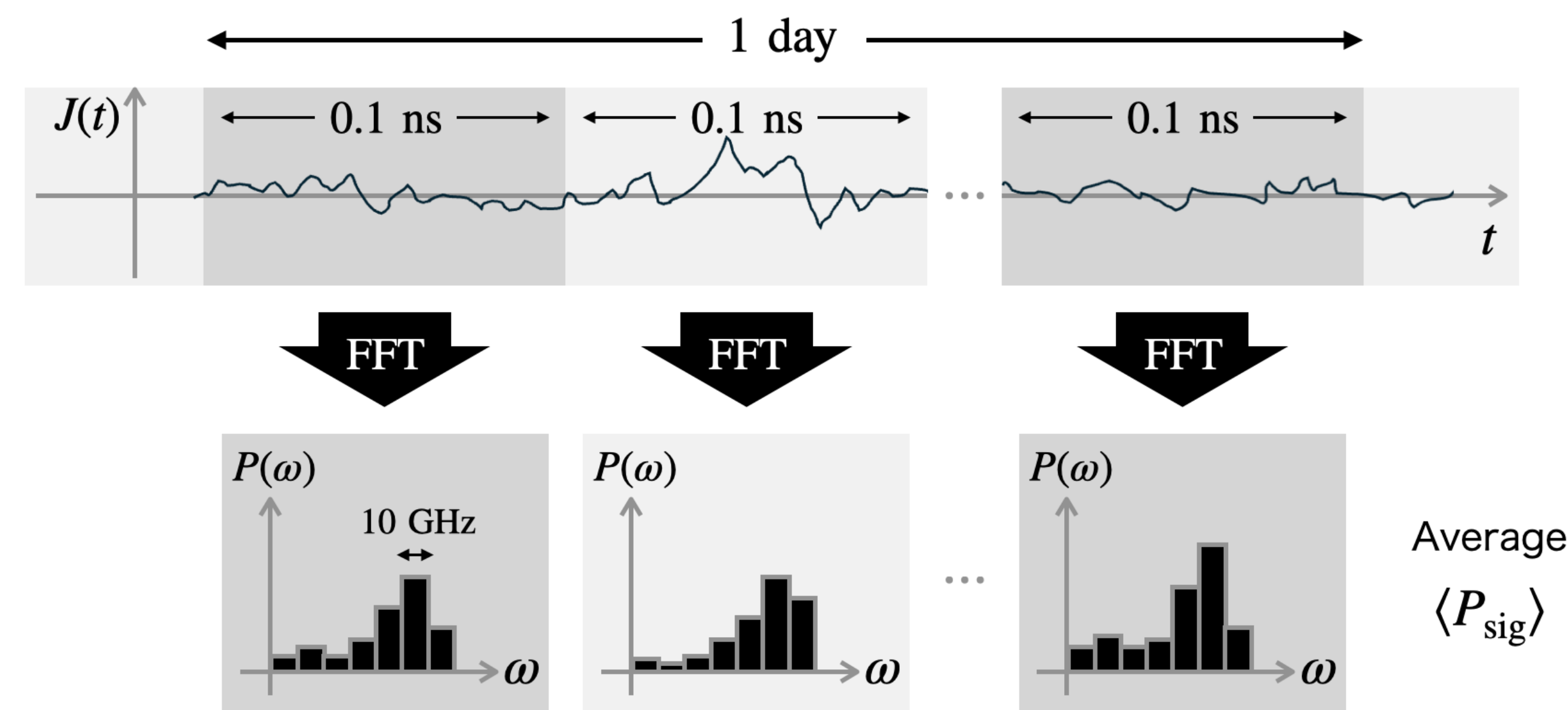
3. アクシオン暗黒物質探索セットアップ

▶ ワイル半金属TaAsに静磁場と強い振動電場を印加

ミラー対称性($x \rightarrow -x$)を利用してバックグラウンドを除去。



▶ 電流の時間発展をフーリエ変換し平均をとる



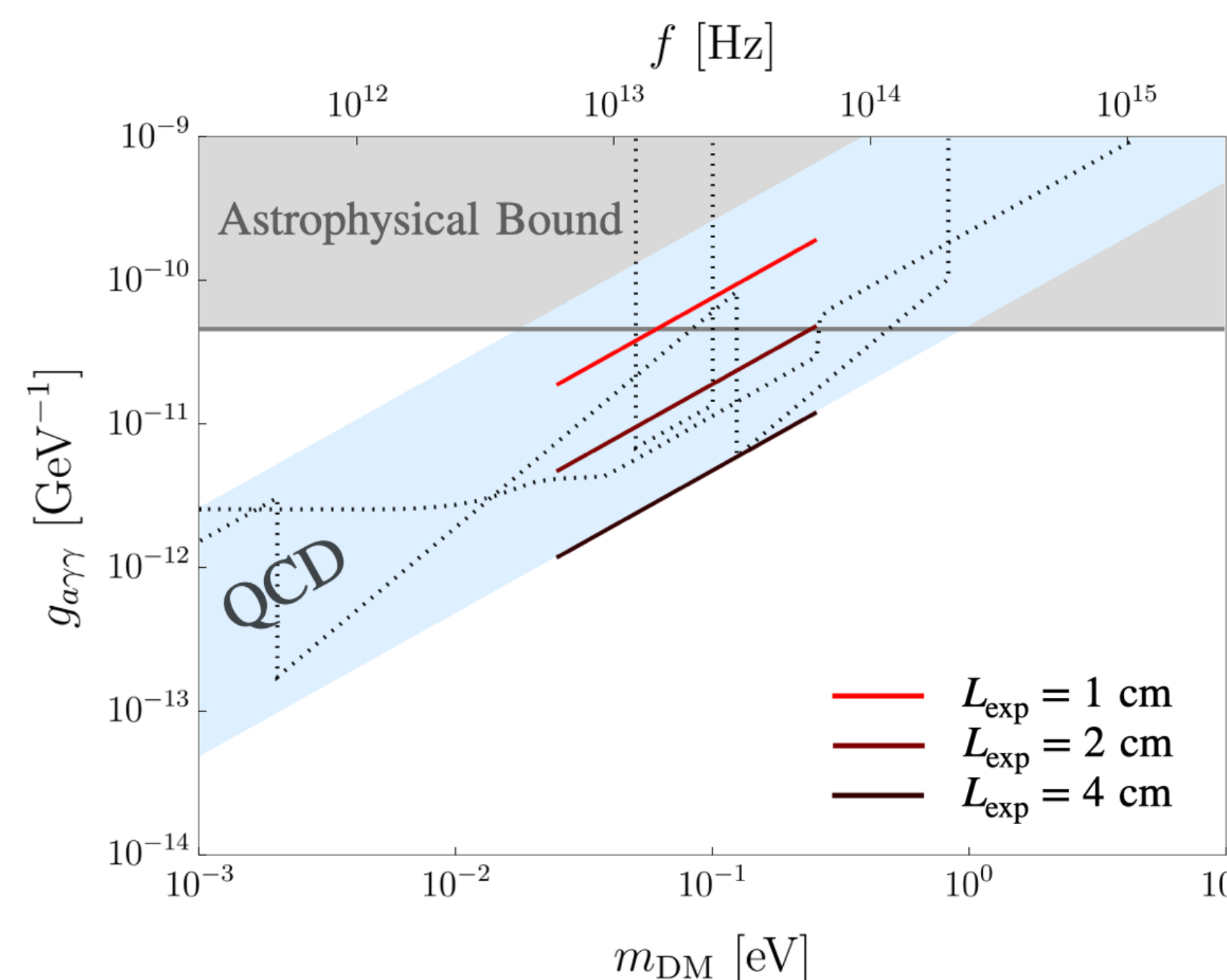
▶ アクシオン由来シフト電流の強度見積もり

$$\langle P_{\text{sig}} \rangle = \frac{1}{2} R_{\text{exp}} |\sigma_{\text{shift}}^{xzx}|^2 E_{\text{DM}}^2 E_{\text{exp}}^2 L_{\text{exp}}^4$$

R_{exp} : 抵抗 L_{exp} : サイズ

$$\simeq 6.2 \times 10^{-15} \mu\text{W} \left(\frac{R_{\text{exp}}}{50 \Omega} \right) \left(\frac{\sigma_{\text{shift}}^{xzx}}{200 \mu\text{A/V}^2} \right)^2 \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-11} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \times \left(\frac{B_0}{1 \text{ T}} \right)^2 \left(\frac{m_{\text{DM}}}{1 \text{ meV}} \right)^{-2} \left(\frac{\rho_{\text{DM}}}{0.45 \text{ GeV cm}^{-3}} \right) \left(\frac{E_{\text{exp}}}{10^8 \text{ V/m}} \right)^2 \left(\frac{L_{\text{exp}}}{1 \text{ cm}} \right)^4$$

▶ アクシオン暗黒物質探索領域



・Jonson-Nyquistノイズを仮定し、1 mKで1日測定した場合のSNR=1ラインを図示。

・TaAs のバンド構造が、アクシオン暗黒物質の検出可能な質量領域を決定。

・実験電場の周波数を変えて測定を繰り返す。(合計 約300日)

▶ 結論

- ・理論的には25~350 meV アクシオン暗黒物質を探索可能。
- ・実験的な電場に強い仮定を置いており、実現に向けての課題は多い。