

New method for detecting
axion with cylindrical
superconductor

岩崎愛一

arXiv: 2007.09832

暗黒物質のアクシオンを地上で如何にとらえるか？

狙うのはQCDアクシオンの質量

$1\mu\text{eV}\sim 100\mu\text{eV}$

その領域の探査で最先端はADMX
(Axion Dark Matter eXperiment)
他にも様々なアプローチがある。

超伝導体と既存の電波望遠鏡を使用した
アクシオン検出

Haloscope projects (**dark matter axion**);
ADMX, CARRACK, HAYSTAC, ABRACADABRA,
ORGAN, etc.

Helioscope projects (**solar axion**);
CAST, SUMICO, , etc..

Others; **LSW** (**Light Shining through a Wall**),
VMB (**Vacuum Magnetic Birefringence**),
etc

なぜ、アキシオン探査法を考えたか？

天体物理の大きな謎

高速電波バーストはなぜ起こる

(持続時間 1 ミリ秒、周波数 ~ 1 GHz、 10^{40} erg/s)

私のアイデア

「アキシオン星と中性子星（ブラックホールの膠着円盤）との衝突」

電波スペクトルの解析から、

アキシオン質量 $\sim 7 \times 10^{-6}$ eV

アキシオンが見つからない限りこのアイデアを信じてもらえない

ADMXの概要

$$a(t) \propto \cos(t\sqrt{m_a^2 + k^2}) \simeq \cos(m_a t)$$

momentum $k \sim 10^{(-3)} m_a$

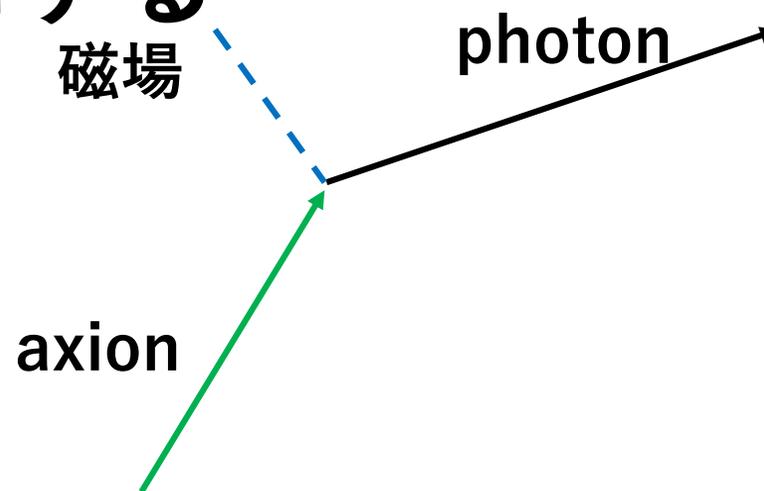
強磁場中でアクシオンを電波に変えて、その電波を観測する

axion-photon coupling

$$L_{aEB} = k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{E} \cdot \vec{B}}{f_a \pi}$$

共鳴管を使用

$$\Phi = |\Phi| \exp(i\theta) \equiv |\Phi| \exp(ia/f_a), \quad a = f_a \theta$$



系を特徴づける微少量

$$a(t) = a_0 \cos(t\sqrt{m_a^2 + p_a^2}) \simeq a_0 \cos(m_a t)$$
$$g \equiv k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t)}{f_a \pi} \sim 10^{-21}$$

暗黒物質 axionの運動量
は m_a の1000分の1

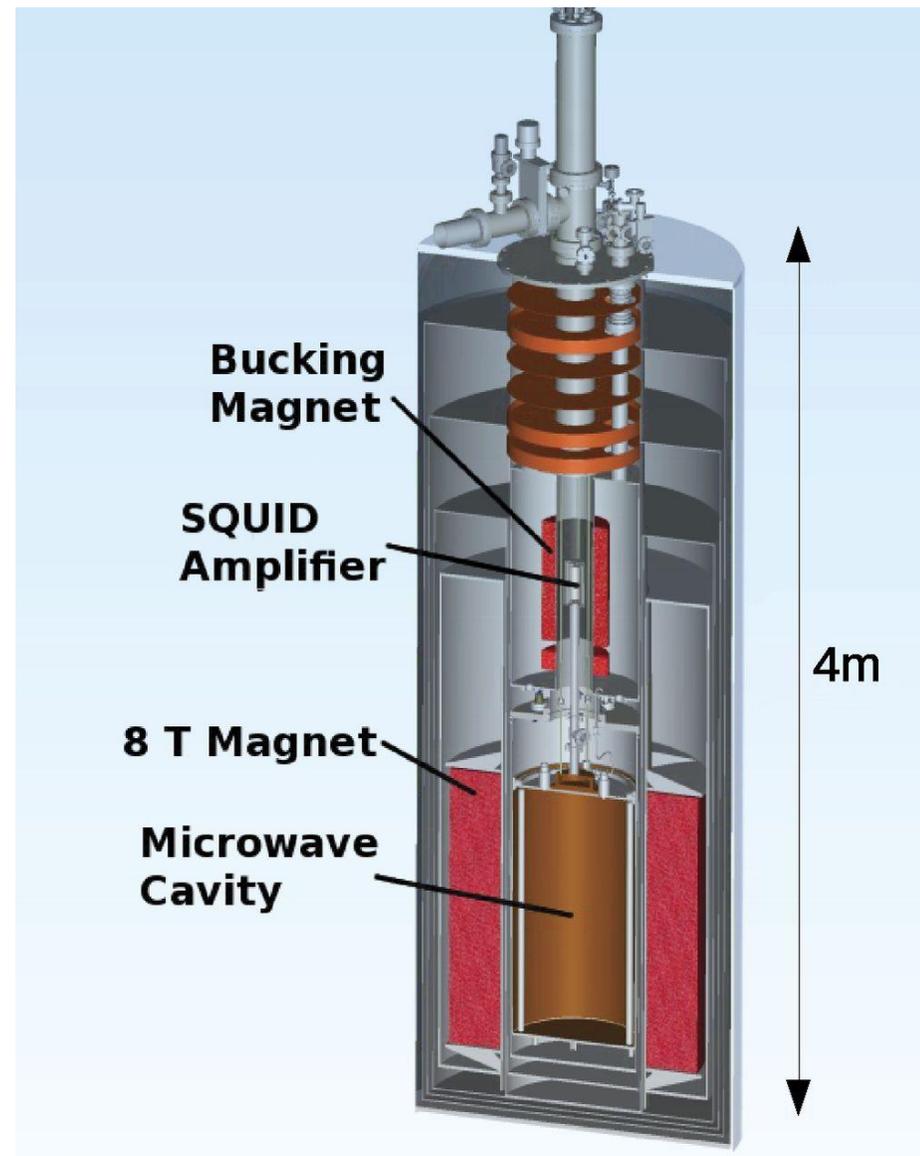
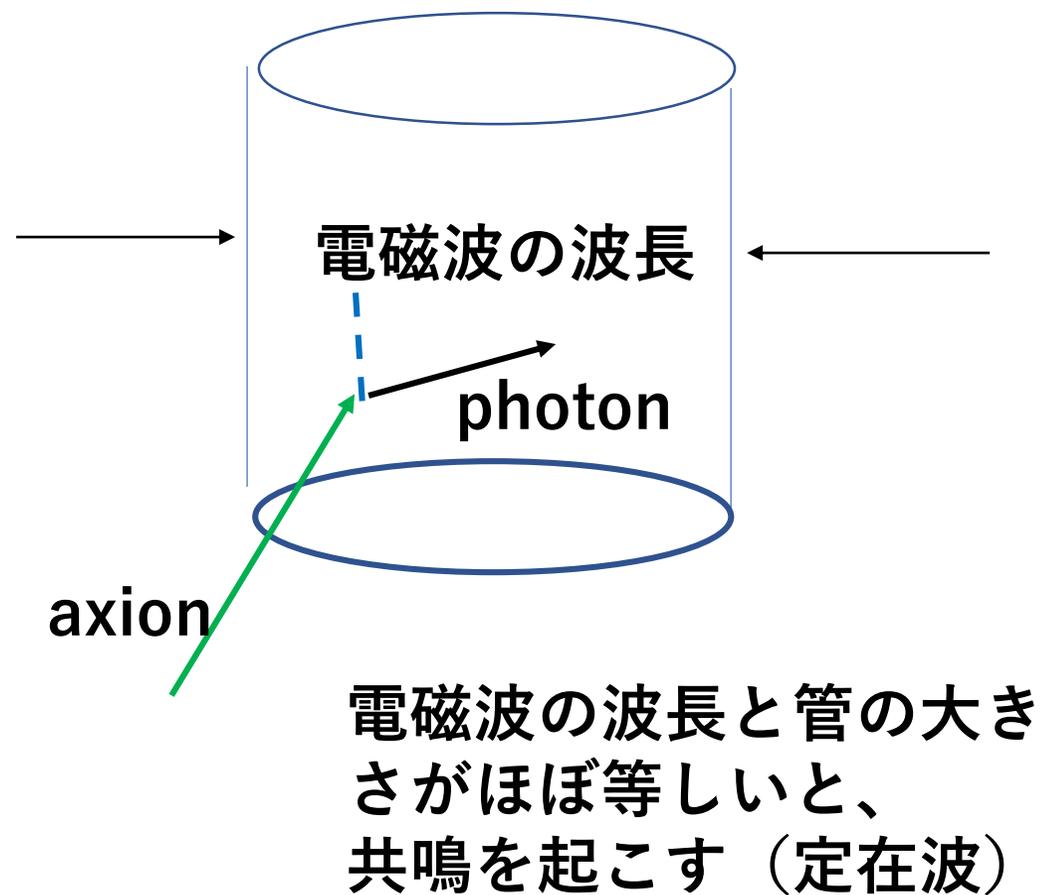
仮定
暗黒物質
アクシオンの密度

$$\rho_a \simeq m_a^2 a^2 \sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3$$

$$m_a f_a \simeq 6 \times 10^{-6} \text{ eV} \times 10^{12} \text{ GeV}. \quad \leftarrow \text{QCD axion}$$

この関係式は、 m_a と f_a の値によらない
(axion mass m_a , axion decay constant f_a)
 $m_a = 1 \mu\text{eV} \sim 100 \mu\text{eV}$ (0.25GHz ~ 25GHz)

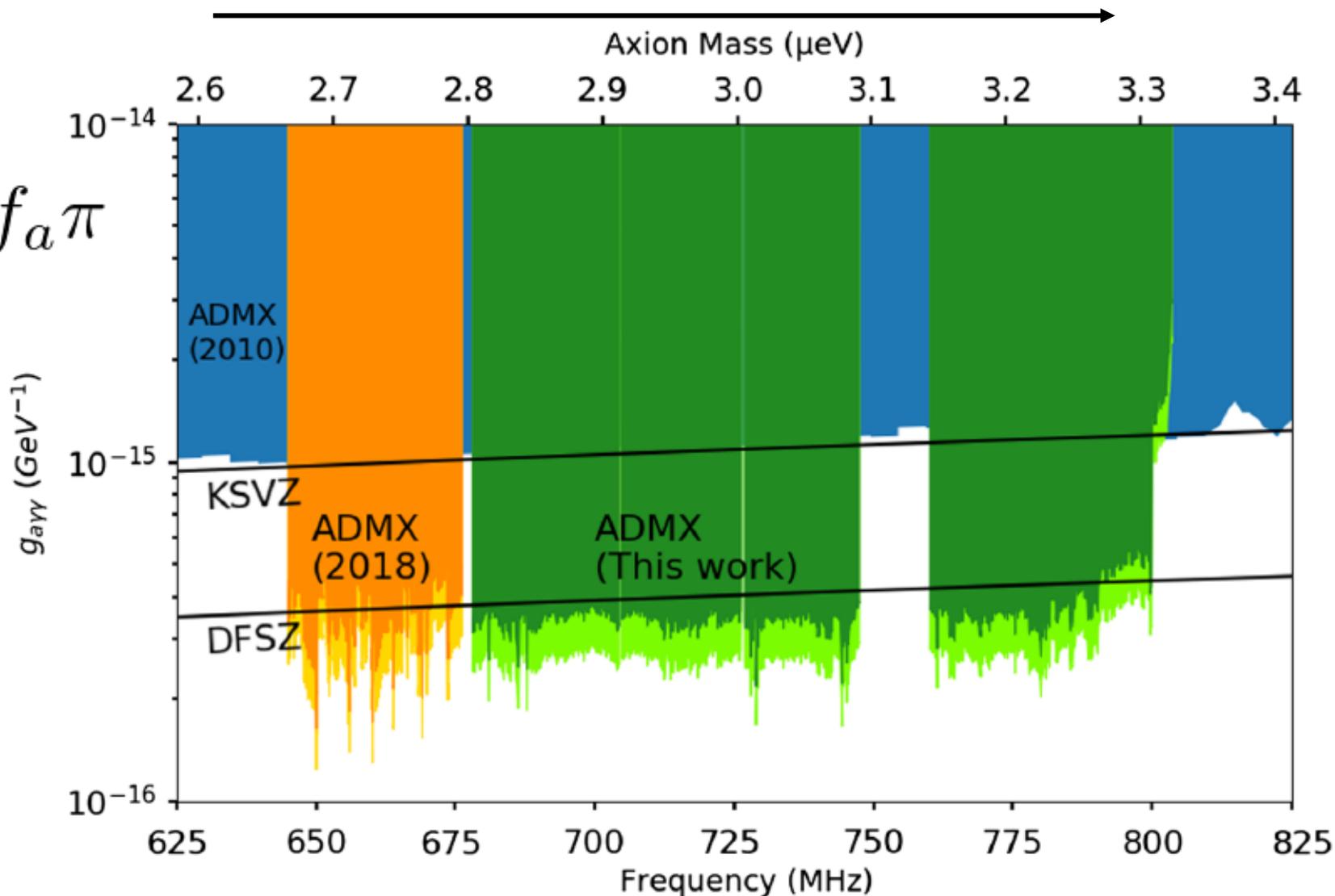
共鳴管 (管のスケールを変えながら電波の存在を探索)



ADMX最近の成果

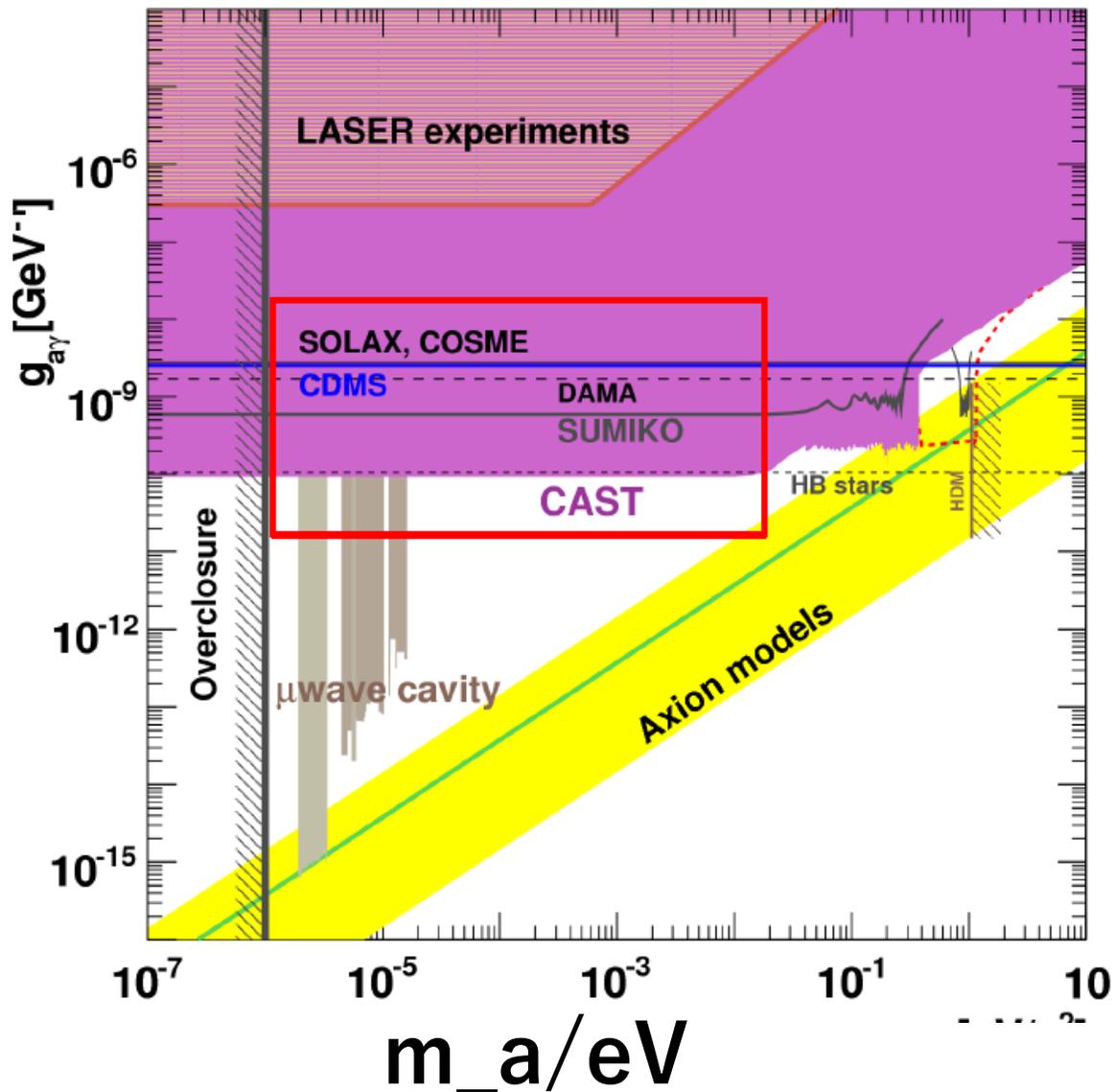
アクシオンの質量 m_a

$$g_{a\gamma\gamma} = k_a \alpha / f_a \pi$$



様々な測定

$$g_{a\gamma\gamma} = k_a \alpha / f_a \pi$$



- 星の進化
- Cosmology
- Laser実験
- **Solar axion search**
- Halo axion search

黄色の領域が
QCDアクシオン

アクションと結合したマックスウェル方程式

$$\vec{\partial} \cdot \vec{E} + \frac{k_a \alpha \vec{\partial} \cdot (a(\vec{x}, t) \vec{B})}{f_a \pi} = 0 \quad , \quad \vec{\partial} \times \left(\vec{B} - \frac{k_a \alpha a(\vec{x}, t) \vec{E}}{f_a \pi} \right) - \partial_t \left(\vec{E} + \frac{k_a \alpha a(\vec{x}, t) \vec{B}}{f_a \pi} \right) = 0,$$
$$\vec{\partial} \cdot \vec{B} = 0 \quad , \quad \vec{\partial} \times \vec{E} + \partial_t \vec{B} = 0.$$

外場 B 中での解（アクション相互作用を小さいとして）

$$\vec{E}_a(r, t) = -k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{B}}{f_a \pi} \sim \cos(m_a t)$$

磁場 B の下で、振動する電場が生成される

新しい提案

$$\vec{E}_a(r, t) = -k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{B}}{f_a \pi} \quad g \equiv k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t)}{f_a \pi} \ll 1$$

磁場があると振動電場が発生



クーパー対
単振動

$$m_c \dot{v} = q E_a \propto \cos(m_a t)$$

(散逸項なし)
 $\sim \tau^{-1} v$



双極子放射

電流密度 $J = q n v = \frac{q^2 E_a n}{m_a m_c}$

$n \sim 10^{22} / \text{cm}^3$

単振動は続く

磁場があると振動電場が発生

$$\vec{E}_a(r, t) = -k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{B}}{f_a \pi} \quad \text{in vacuum}$$

$$\vec{E}_a(\vec{x}, t) = ? \quad \text{in superconductor}$$

アクションと電磁場、そしてギンズブルグ・ランダウモデル (GL model) との結合した系を解く

結果は、真空中と同じ

$$L_{GL} = |(\partial_t - iqA_0)\Phi|^2 - |(\vec{\partial}_x + iq\vec{A})\Phi|^2 - h(|\Phi|^2 - v_0^2)^2$$

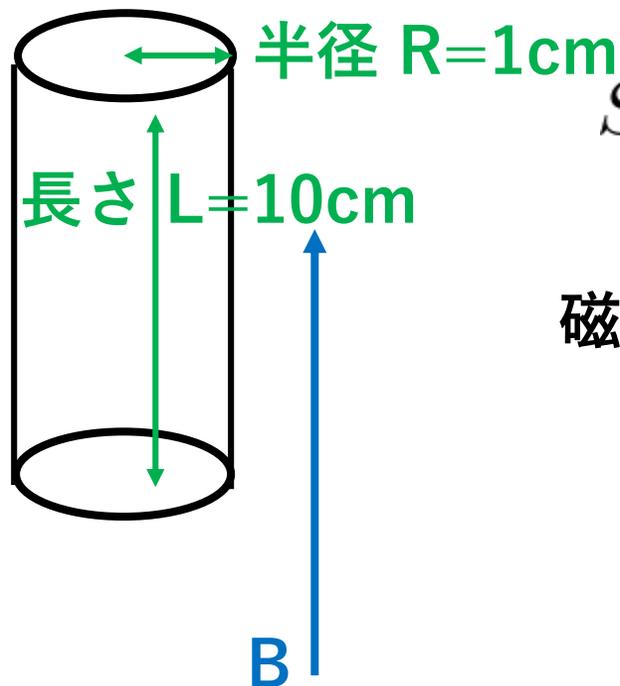
Φ ; クーパー対 $\langle \Phi \rangle = v_0$ 超伝導状態

表面に磁場の侵入

超伝導体

双極子放射
フラックス

超伝導電流が振動
する

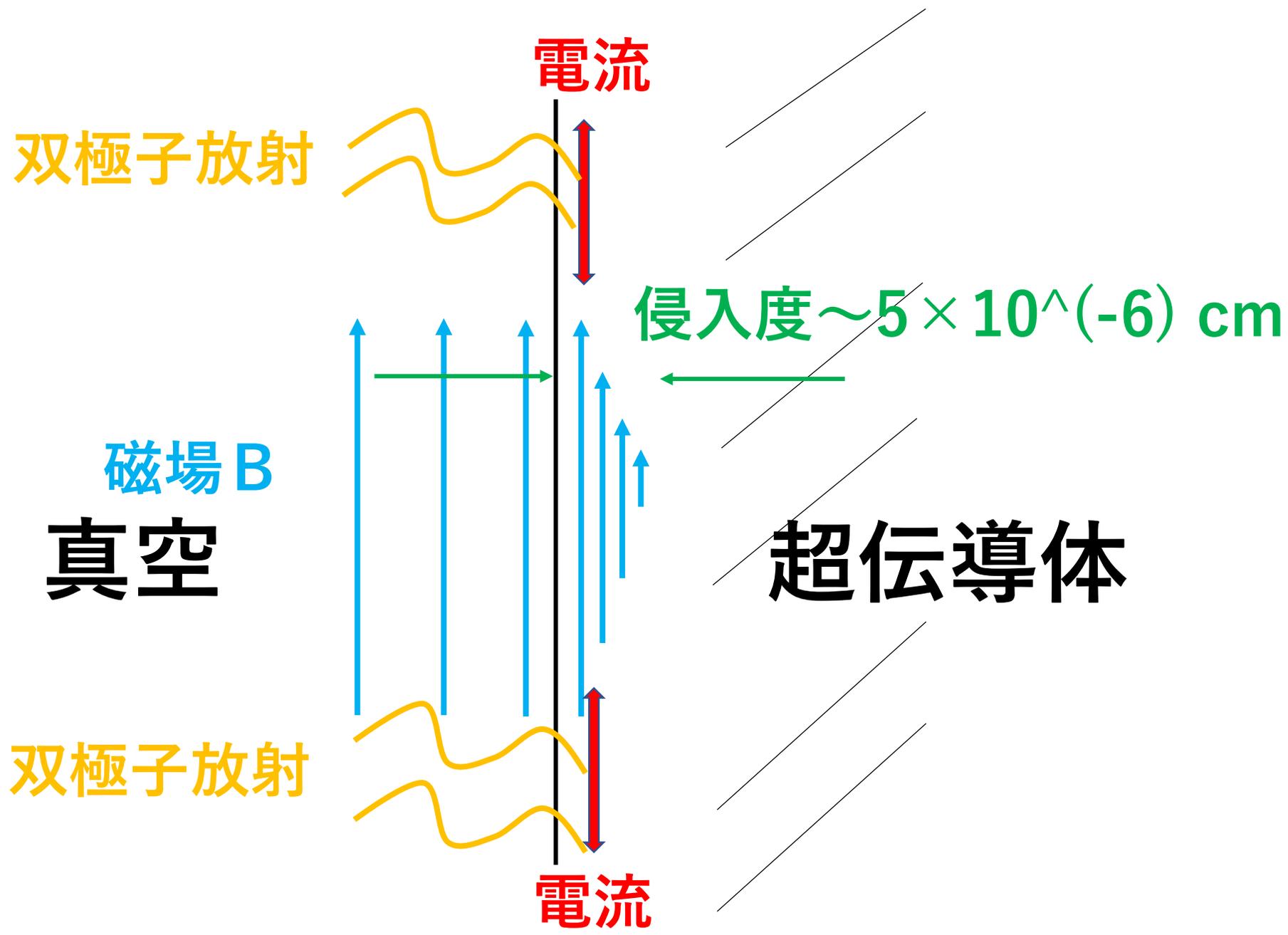


$$S = \frac{m_a^2 (2\pi R L \lambda J)^2}{3}$$

磁場侵入度 $\lambda = \sqrt{\frac{m_c}{q^2 n}}$
 $\sim 5 \times 10^{-6} \text{cm}$

$$S \simeq 4.1 \times 10^{-18} \text{W} \left(\frac{5 \times 10^{-6} \text{cm}}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{B}{3\text{T}} \right)^2 \left(\frac{R}{1\text{cm}} \right)^2 \left(\frac{L}{10\text{cm}} \right)^2 \left(\frac{k_a}{1.0} \right)^2 \left(\frac{\rho_a}{0.3\text{GeV}/\text{cm}^3} \right)$$

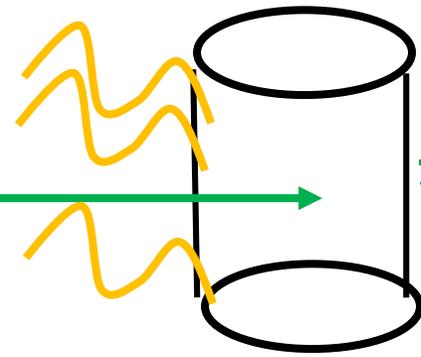
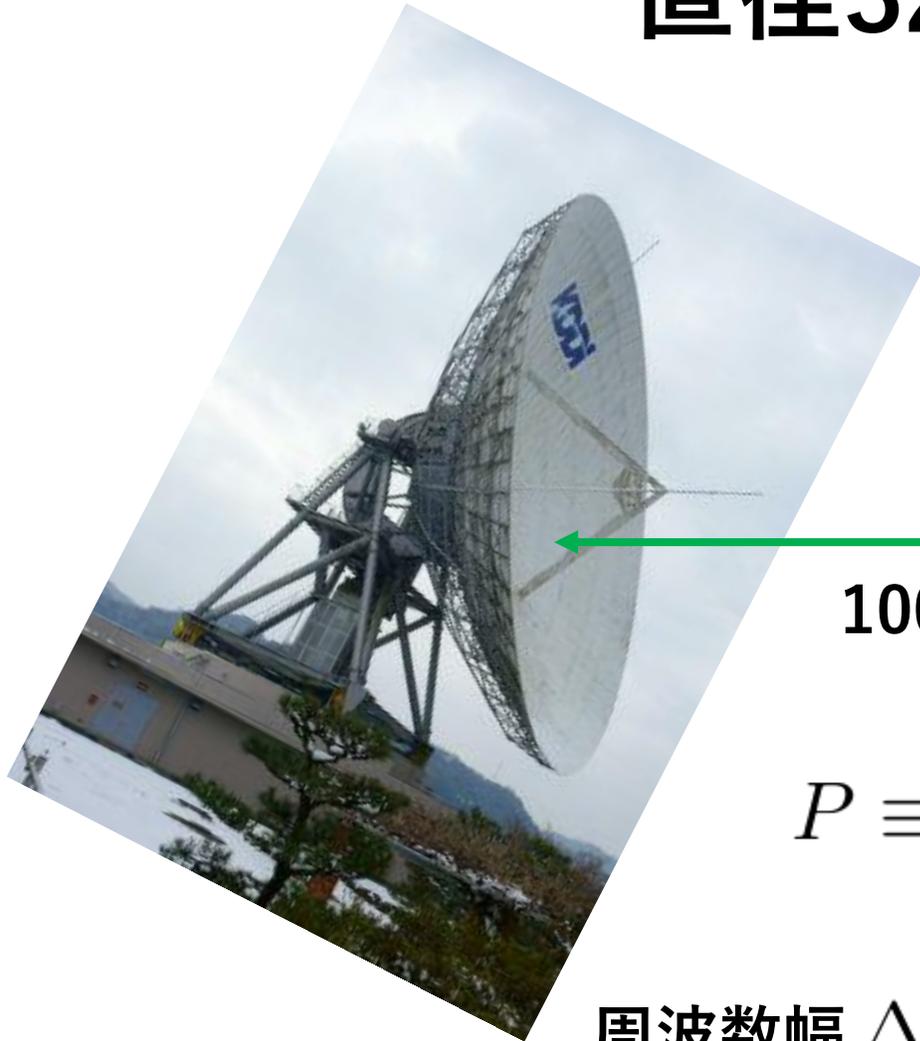
ADMX; 共鳴管で得られるパワー $\sim 10^{-23} \text{W}$ Rhys Rev Lett (2020)



双極子放射の観測

直径32m 100m先に試料を置く

望遠鏡が受けるフラックス
(十分観測可能な強度)



超伝導体

長さ 10cm

100m

$$P \equiv \int \frac{S(\theta, r)}{\Delta\omega} r^2 d\Omega \simeq 0.4 \times 10^{-22} \text{W/Hz},$$

アンテナ温度~1.5K

$$\text{周波数幅 } \Delta\omega \simeq 10^{-6} m_a = 1000 \text{Hz} (m_a / 6 \times 10^{-6} \text{eV})$$

山口32m電波望遠鏡 (2001年；KDDIから国立天文台へ)



観測周波数

6.7GHz, 8GHz

20GHz以上は困難

山口32m電波望遠鏡の検出感度

$$\frac{S}{N} \sim 40 \times \sqrt{\frac{1\text{MHz}}{\delta\omega}} \sqrt{\frac{t}{1\text{s}}} \left(\frac{g_{15}}{m_6}\right)^2 \left(\frac{5 \times 10^{-6}\text{cm}}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{B}{7\text{T}}\right)^2 \left(\frac{R}{2\text{cm}}\right)^2 \left(\frac{l}{20\text{cm}}\right)^2 \left(\frac{\rho_a}{0.3\text{GeV/cm}^3}\right)$$

$$g_{15} \equiv g_{a\gamma\gamma}/(10^{-15}\text{GeV}^{-1}) \quad m_6 \equiv m_a/(10^{-6}\text{eV})$$

$$\mathbf{S/N \sim 4 \text{ for DFSZ axion } \left(\left(\frac{g_{15}}{m_6}\right)^2 \simeq 0.1\right)}$$

雑音温度 = 40 K、試料との距離 = 100m

観測時間 = 1秒 (1000秒)、観測周波数幅 = 1MHz (1GHz)



なぜこれほど強い双極子放射か？

クーパー対の密度が高い
(侵入度 λ が短い)

$$S = \frac{m_a^2 (2\pi R L \lambda J)^2}{3}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{m_c}{q^2 n}}$$

$$S \simeq 4.1 \times 10^{-18} \text{W} \left(\frac{5 \times 10^{-6} \text{cm}}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{B}{3\text{T}} \right)^2 \left(\frac{R}{1\text{cm}} \right)^2 \left(\frac{L}{10\text{cm}} \right)^2 \left(\frac{k_a}{1.0} \right)^2 \left(\frac{\rho_a}{0.3\text{GeV/cm}^3} \right)$$



なぜ超伝導体を使用するか？

普通の導体

$$J = \frac{q^2 E_a n \tau}{m_c}$$

緩和時間 τ が短い

$$\tau : 1/m_a \sim 10^{(-9)} \text{s}$$

$$\tau \sim 10^{(-14)} \text{s} \text{ 銀}$$

超伝導体

$$J = q n v = \frac{q^2 E_a n}{m_a m_c}$$

共鳴管と超伝導体によるfluxの比較

共鳴管

$$S_{cavity} \sim \frac{(g_{a\gamma\gamma} B)^2 V \rho_a}{m_a^2 R_c} \frac{\lambda_a}{\delta_c}$$

$$\lambda_a = 2\pi/m_a \sim 10\text{cm}$$

$$\delta_c \sim 10^{-4}\text{cm} \text{ (銅)}$$

(skin depth)

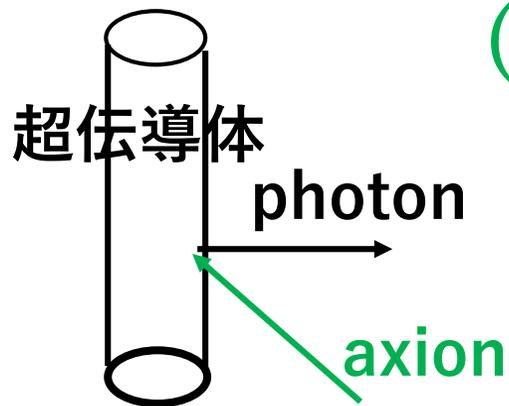
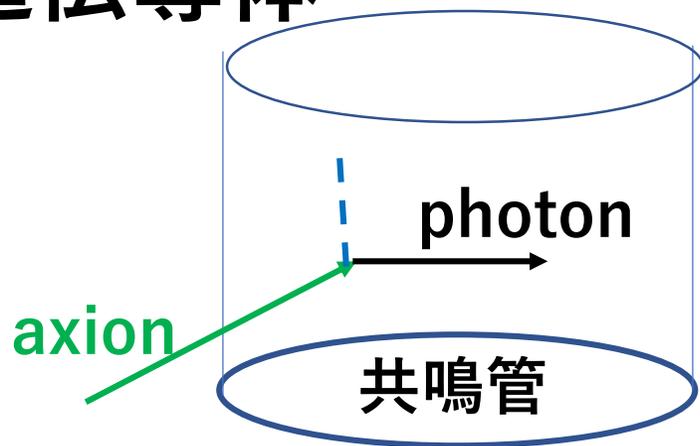
超伝導体

$$S_{tel} \sim \frac{(g_{a\gamma\gamma} B)^2 V \rho_a}{m_a^2 R} \frac{lR}{\lambda^2}$$

$$lR \sim 10\text{cm}^2$$

$$\lambda \sim 10^{-5}\text{cm} \text{ (ニオブスズ)}$$

(penetration depth)



結論

超伝導体を用いたアクシオン探査を提案した。

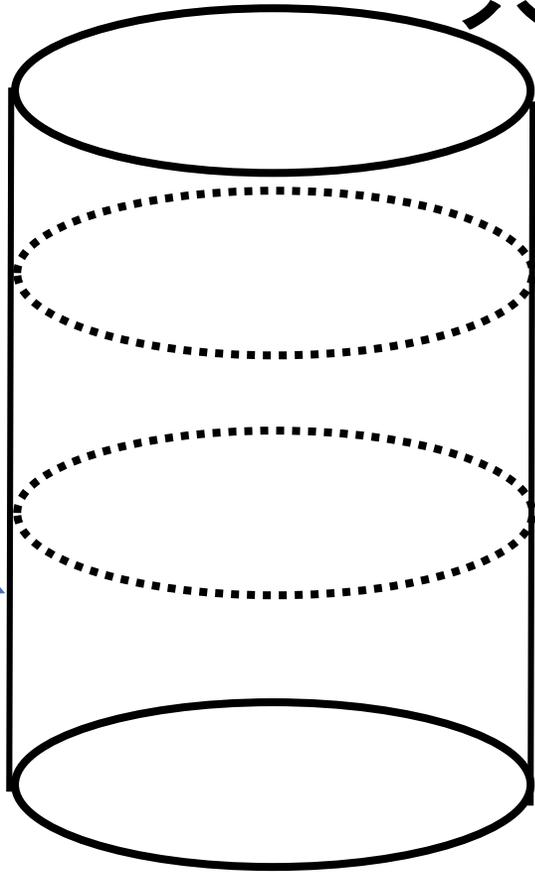
超伝導体中にクーパー対密度が大きいため、それが発する電波の強度は、既存の共鳴管を用いたものより、**4桁ほど強い**。

既存の電波望遠鏡でアクシオンの質量
 $1 \mu\text{eV}$ (0.25GHz)~ $100 \mu\text{eV}$ (25GHz)
(幅広い周波数帯を探査可能)

共鳴管に超伝導体（銅）を使用した時

共鳴管内部の電磁波のエネルギー

超伝導体
(銅)



TM mode

$$U \sim \frac{(g_{a\gamma\gamma} B)^2 V \rho_a}{m_a^4} \times \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 \quad \text{超伝導}$$

$$U \sim \frac{(g_{a\gamma\gamma} B)^2 V \rho_a}{m_a^4} \times \left(\frac{1}{\delta_c}\right)^2 \quad \text{銅}$$

$$\delta_c \sim 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\lambda \sim 10^{-5} \text{ cm}$$

常伝導体

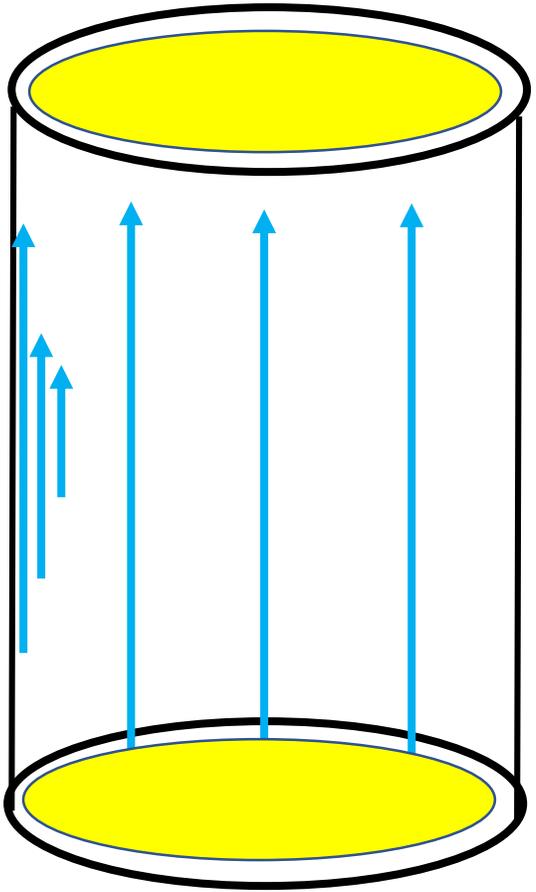
表面電荷 $\sigma_f = E_a$

磁場侵入

内部電場発生

$$\vec{E}_a(r, t) = -k_a \alpha \frac{a(\vec{x}, t) \vec{B}}{f_a \pi}$$

内部電場
は遮蔽される



発生する電流は小さい
 $\partial_t \sigma_f = \partial_t E_a = m_a E_a$

超伝導電流は大きい
 $J = qnv = \frac{q^2 E_a n}{m_a m_c}$

$n \sim 10^{22} / \text{cm}^3$