

超伝導体を用いた暗黒物質ア クシオンの新しい探査法

二松学舎大

岩崎愛一

Phys. Lett. B 811(2020)

Nucl. Phys. B963 (2021)

arXiv:2107.06514

様々なアクシオン探査が行われてきたが、微弱なシグナルのため、遅々として進んでいない。

(精密科学的手法が必要)

ここで提案する「超伝導を用いた探査」では、そのシグナルを5桁以上上げることが出来るため、一気に進展すると予想される

現在、このアイデアは、BRASS (DESY)で採用され、実験準備が進んでいる

(ハンブルグ大とDESYで 新たな計画、東北大と京大でも計画進行)

宇宙の20%は、暗黒物質；正体は？

WIMP(weakly interacting massive particle)

たぶん可能性は低い

(すでに10年間以上もの探査で発見されていない)

Axion (特に、QCD axion)

もっとも可能性が高い

(strong CP問題 の自然な解、暗黒物質)

アクシオンの質量制限 $10^{-6}eV \sim 10^{-3}eV$

どんな探査が行われているか？

Haloscope (dark matter axion);

**ADMX, CARRACK, HAYSTAC, ABRACADABRA,
BRASS, MADMAX, ORGAN, Dance, etc.**

Helioscope (solar axion);

CAST, SUMICO, , etc..

Others (地上でaxionを作る) ;

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

主に用いられるプロセス (プリマコフ効果)

アクシオンを磁場中で電波に変える

axion-photon coupling

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

extremely small $\sim 10^{-21}$

非常に小さいので検出が難しい

magnetic field

axion

photon (電波)

電波の振動数 = アクシオンの質量

0.25GHz ~ 250GHz

Resonant cavity(ADMX, etc.)

ADMX(Axion Dark Matter eXperiment)

Sikivieにより
提案された(1983)

magnetic field

共鳴管中でアクシオン
からの電波を増幅する

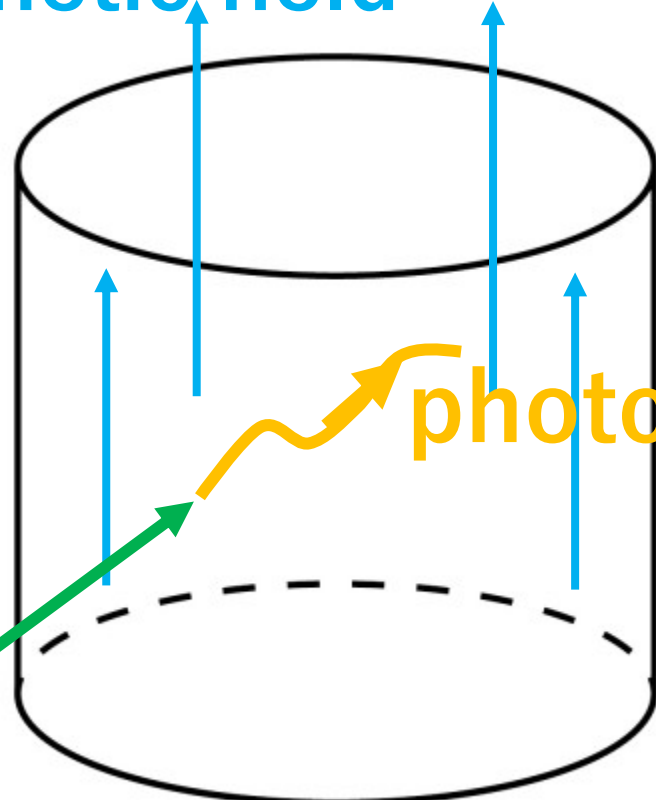
axion

photon

cavity
(cupper)

大きなアクシオン質量
探査には不向き

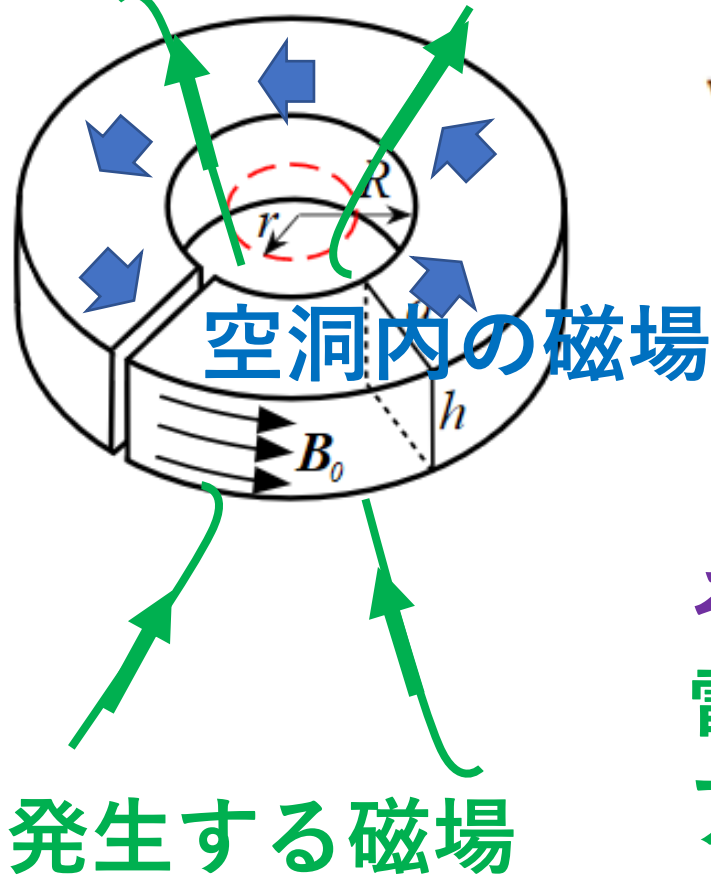
アクシオンの質量に合わせ、共鳴管
の大きさを変える必要がある



ABRACADABRA

(A Broadband/Resonant Approach to Cosmic Axion Detection with an Amplifying B-field Ring Apparatus)

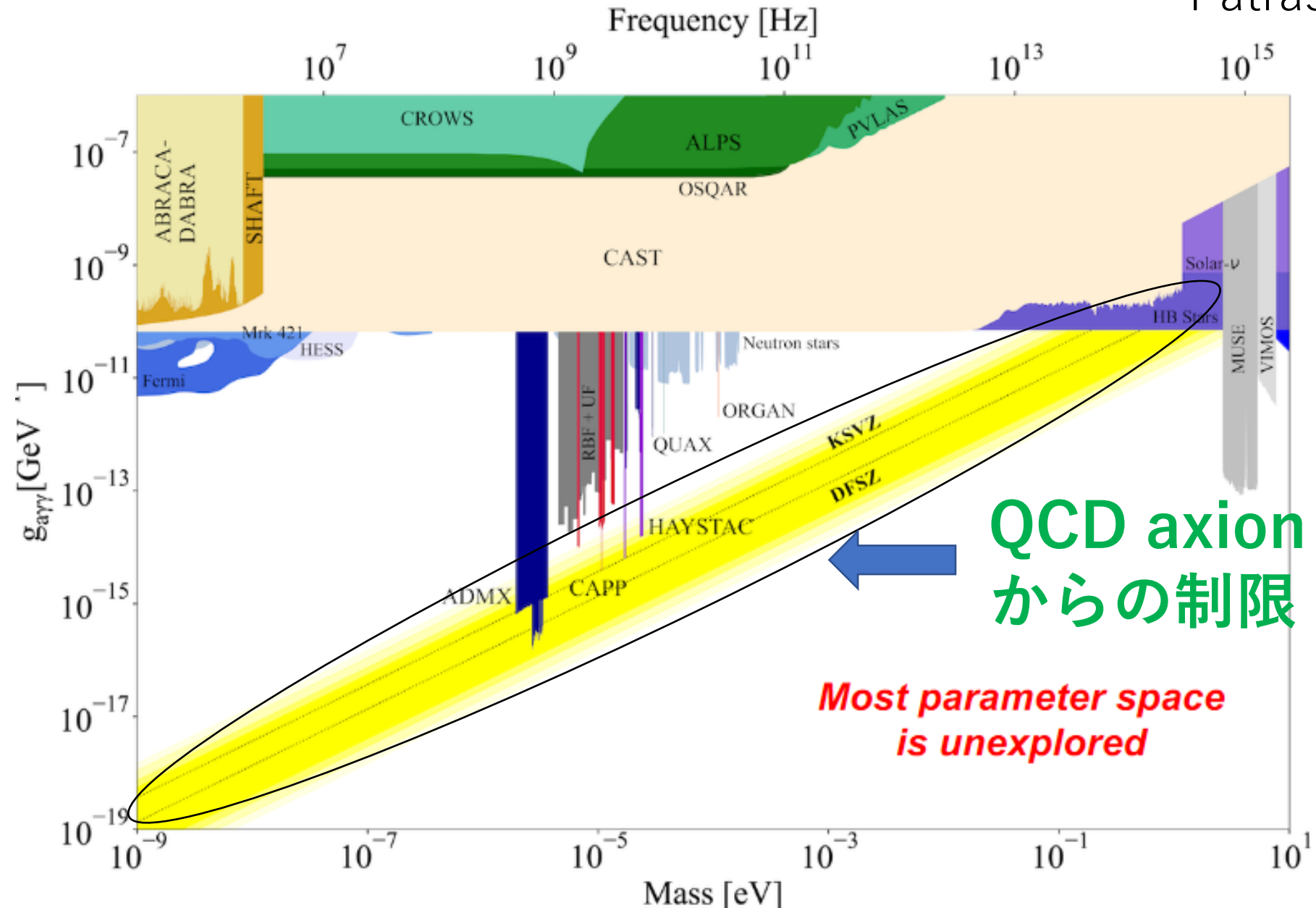
Axion induced electric current



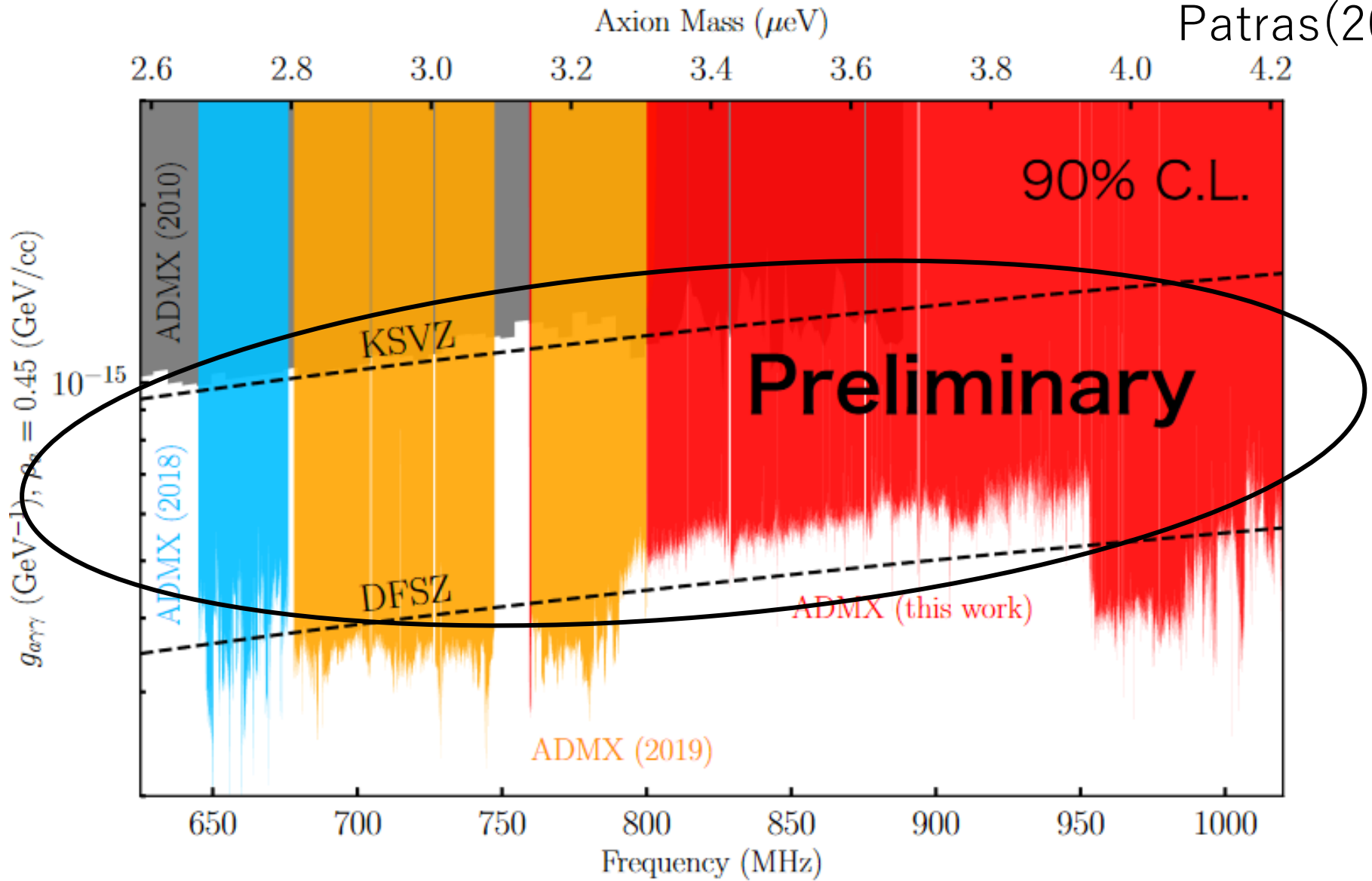
$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - g_{a\gamma\gamma} \left(\mathbf{E} \times \nabla a - \mathbf{B} \frac{\partial a}{\partial t} \right),$$

$$\vec{J}_a = g_{a\gamma\gamma} \vec{B} \partial_t a(t)$$

ドーナツ状の空洞内に円状の磁場をかけ、
それによるアクシオン電流 $\vec{J}_a = g_{a\gamma\gamma} \vec{B} \partial_t a(t)$
電流が生み出す 振動磁場を検出
アクシオンが 磁場中で磁場を生成



T. Nitta
Patras(2021)



QCD axion
からの制限

Modified Maxwell equations

$$\begin{aligned} \vec{\partial} \cdot \vec{E} + \underline{g_{a\gamma\gamma} \vec{\partial} \cdot (a(\vec{x}, t) \vec{B})} &= 0, & \vec{\partial} \times \left(\vec{B} - \underline{g_{a\gamma\gamma} a(\vec{x}, t) \vec{E}} \right) - \partial_t \left(\vec{E} + \underline{g_{a\gamma\gamma} a(\vec{x}, t) \vec{B}} \right) &= 0, \\ \vec{\partial} \cdot \vec{B} &= 0, & \vec{\partial} \times \vec{E} + \partial_t \vec{B} &= 0. \end{aligned}$$

a solution under external magnetic field \vec{B}
with the assumption $g_{a\gamma\gamma} a(\vec{x}, t) \ll 1$

$$\vec{E}_a = -g_{a\gamma\gamma} a(t) \vec{B}(x)$$

electric field generated

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

真空解

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

for dark matter axion

超伝導体とアクシオン

Ginzburg-Landau model

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

Cooper pair

$$q = 2e$$

electric charge of Cooper pair

Axion photon coupling

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

We solve Maxwell equations coupled with Cooper pair in GL model and axion under external magnetic field assuming extremely small axion-photon coupling

Modified Maxwell equations

$$\vec{\partial} \cdot \vec{E} + g_{a\gamma\gamma} \vec{\partial} \cdot (a(\vec{x}, t) \vec{B}) + 2q^2 A_0 |\Phi|^2 + iq\Phi^\dagger \partial_t \Phi + C.C. = 0,$$

$$-\vec{\partial} \times (\vec{B} - g_{a\gamma\gamma} a(\vec{x}, t) \vec{E}) + \partial_t (\vec{E} + g_{a\gamma\gamma} a(\vec{x}, t) \vec{B}) - 2q^2 \vec{A} |\Phi|^2 + iq\Phi^\dagger \vec{\partial} \Phi + C.C. = 0,$$

$$\vec{\partial} \cdot \vec{B} = 0, \quad \vec{\partial} \times \vec{E} + \partial_t \vec{B} = 0.$$

vacuum $\langle \Phi_c \rangle = 0$

superconductor $\langle \Phi_c \rangle = v$

penetration depth

when $g_{a\gamma\gamma} a(t) = 0$

マ이스ナー効果 $\lambda = \sqrt{\frac{1}{2q^2 v_0^2}}$

$-\vec{\partial} \times \vec{B} - 2q^2 \vec{A}_0 |\Phi|^2 = -\vec{\partial} \times \vec{B} - 2q^2 \vec{A}_0 v_0^2 = 0 \rightarrow \underline{B_z(x) = B_0 \exp(-x/\lambda)}$ for $x \geq 0$

Axion との相互作用を考慮すると、上の解からのずれ

$$\Phi = \Phi_0 + \delta\Phi \quad \text{and} \quad \vec{A} = \vec{A}_0 + \delta\vec{A} \quad \text{with} \quad \vec{B} = \vec{\partial} \times \vec{A}_0$$

$$\vec{E}_a = (0, 0, -\partial_t \delta A_z) \quad \text{外部磁場の方向と同じ}$$

$$E_z = \omega \left(A'_0 \sin(\omega t) - A''_0 \cos(\omega t) \right) \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) - g_{a\gamma\gamma} a(t) B_z$$

外部から侵入する電波



内部に発生する電場 $\vec{E} = -g_{a\gamma\gamma} a(t) \vec{B}(x) \propto \cos(m_a t) \exp(-x/\lambda)$

超伝導体内の部解

$$\vec{E}_a = -g_{a\gamma\gamma} a(t) \vec{B}(x)$$

The electric field makes Cooper pairs oscillate in superconductor according to the equation of motion

$$m_c \dot{v} = 2eE_a \propto \cos(m_a t) \quad m_c = 2m_e$$

mass of Cooper pair

the oscillating electric current induced

$$J = 2en_c v = \frac{(2e)^2 E_a n_c}{m_a m_c} = \frac{\vec{J}_a = g_{a\gamma\gamma} m_a \vec{B} a(t)}{(m_a \lambda)^{-2}} J_a$$

$\lambda = \sqrt{\frac{m_c}{(2e)^2 n_c}} \simeq 8 \times 10^{-6} \text{ cm}$

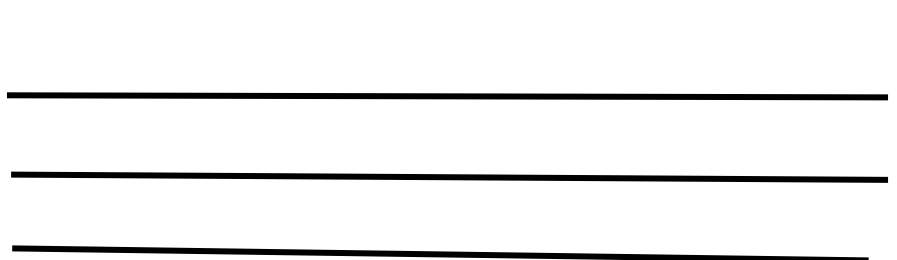
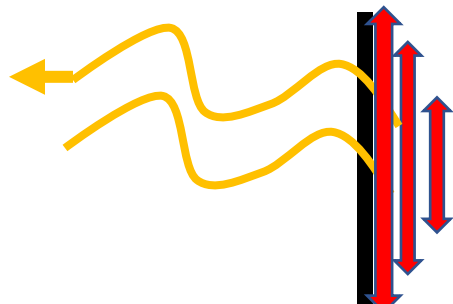
penetration depth
Nb₃Sn

$(m_a \lambda)^{-2} \sim 10^{12}$ for $m_a = 10^{-5} \text{ eV}$
 $n_c \sim 10^{22} / \text{cm}^3$

enhancement factor

oscillating current of Cooper pair

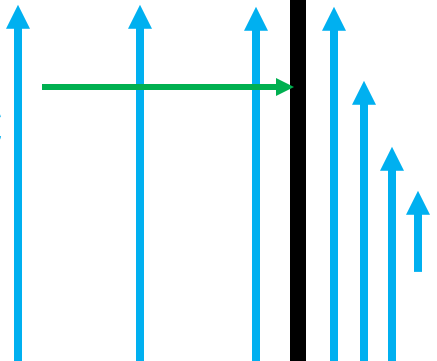
dipole radiation



Penetration depth

$\simeq 8 \times 10^{-6} \text{ cm}$

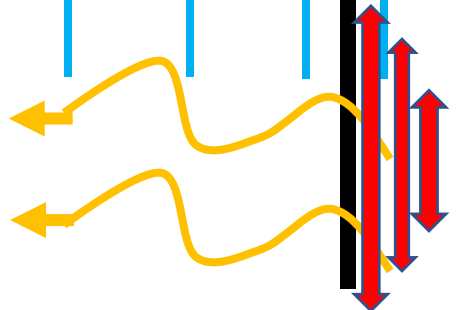
magnetic field B



Vacuum

Superconductor

dipole radiation



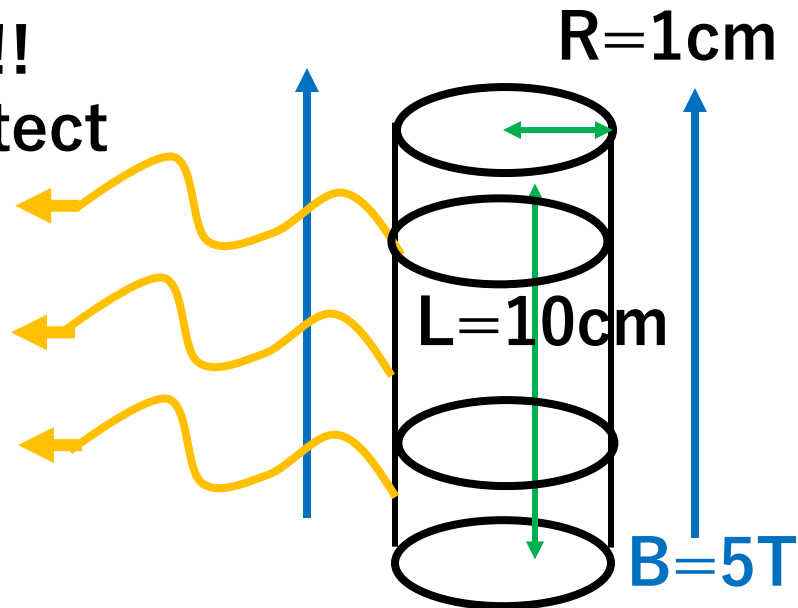
oscillating current of Cooper pair

円柱状の超伝導体; Axionの質量によらない

power of dipole radiation independent of axion mass

$$S \sim 4 \times 10^{-18} \text{W} \left(\frac{8 \times 10^{-6} \text{cm}}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{B}{5 \text{T}} \right)^2 \left(\frac{R}{1 \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{L}{10 \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{k_a}{1.0} \right)^2 \left(\frac{\rho_a}{0.3 \text{GeV/cm}^3} \right)$$

very large !!
Easy to detect



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

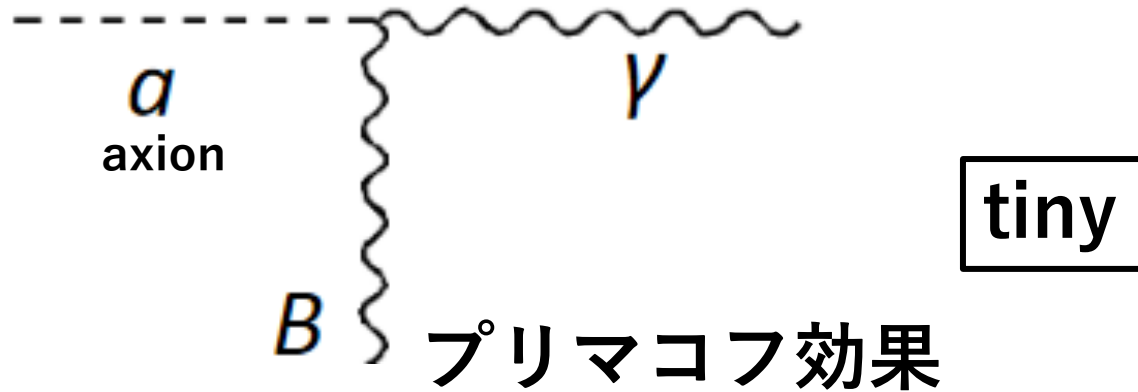
Penetration depth of e.g. Nb₃Sn

$$\lambda = \sqrt{\frac{m_c}{(2e)^2 n_c}} \simeq 8 \times 10^{-6} \text{cm}$$

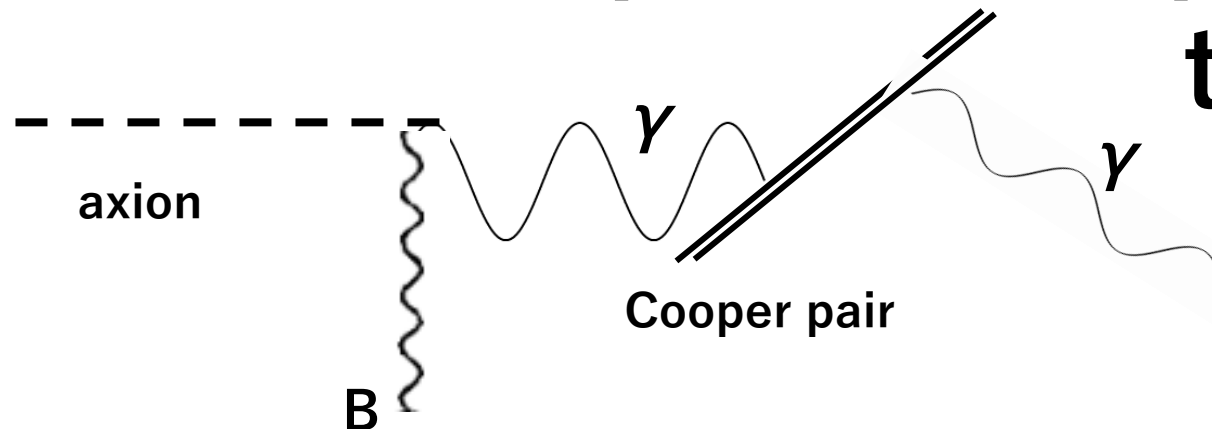
$S \sim 10^{-14} \text{W}$ for $R = 10 \text{cm}, L = 100 \text{cm}$

Power in resonant cavity $\sim 10^{(-23)} \text{W}$ ADMX at resonant point

Almost of all experiments for axion search use the process



We use the process suppressed by the factor $\alpha \simeq 1/137$



It apparently seems to be more tiny

But, we have enhancement factors

large number of Cooper pair $n_c \sim 10^{22}/\text{cm}^3$

radiations are coherent

(flux $\propto n_c^2$)

Our process is not suppressed,

the magnitude $\propto \alpha^2 n_c^2$

The signal is not tiny

特徴

放射強度が5桁以上大きい

共鳴を利用するのと異なり、アクションの質量を探查するのに、系の大きさを調整する必要がない

ブロードバンドな受信機で幅広い周波数を探查できる

power of dipole radiation in normal conductor

$$S_{cond} = \frac{m_a^2 (2\pi R l \delta J_{cond})^2}{3}$$

$$\simeq 2.8 \times 10^{-20} \text{W} \left(\frac{2 \times 10^{-4} \text{cm}}{\delta} \right)^2 \left(\frac{m_a}{4 \times 10^{-6} \text{eV}} \right) \left(\frac{B}{5 \text{T}} \right)^2 \left(\frac{R}{1 \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{l}{10 \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{\rho}{0.3 \text{GeV}} \right) \left(\frac{k_a}{1.0} \right)^2$$

skin depth for radiation with frequency $m_a/2\pi$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{m_a \sigma}} \quad \sigma = \text{electric conductivity}$$

$\sim 10^{-4} \text{cm}$ for $m_a = 6 \times 10^{-6} \text{eV}$ (e.g. copper)

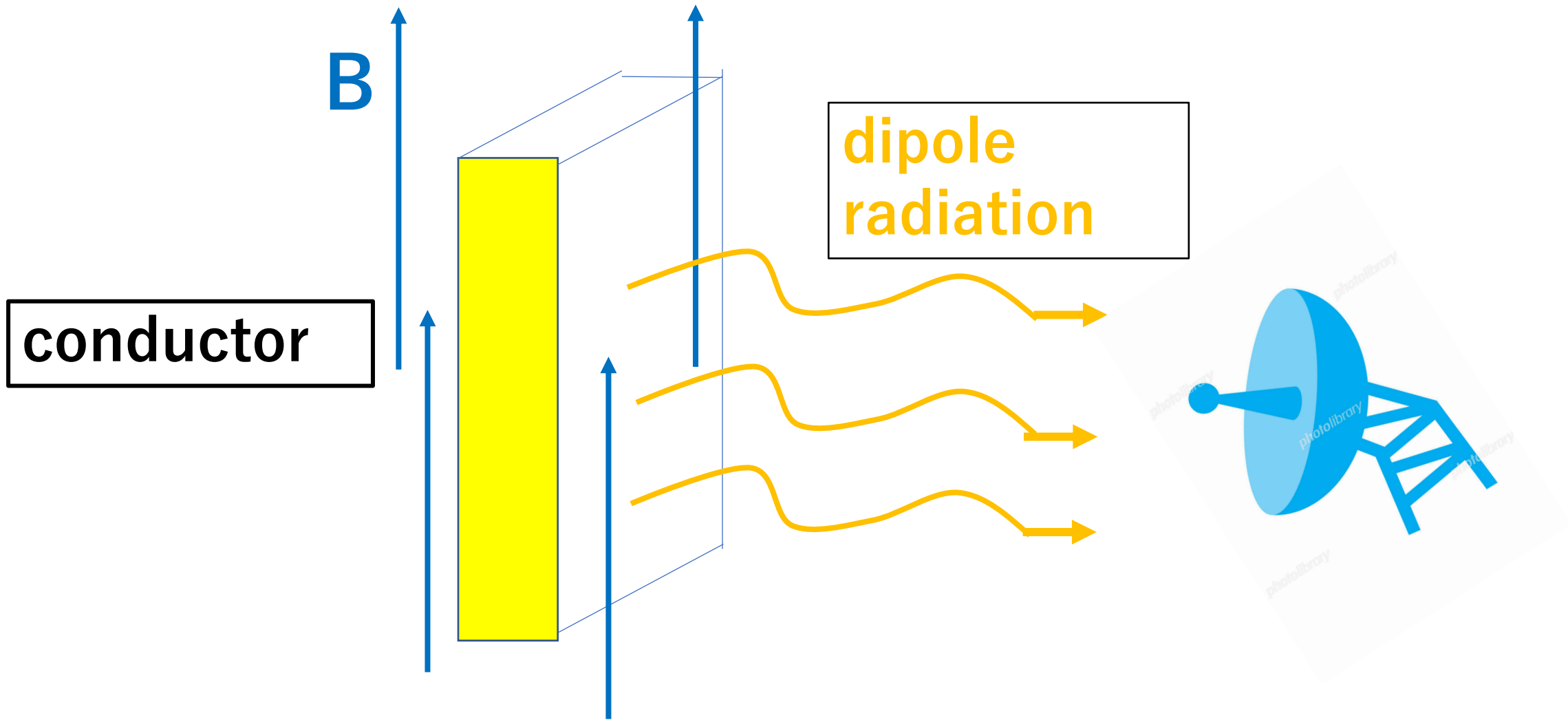
$$J_{cond} = \sigma E_a = \left(m_a \delta \right)^{-2} J_a \quad \text{current flowing in skin depth}$$

enhancement factor

$$J_{sup} = \left(m_a \lambda \right)^{-2} J_a \quad \text{current flowing in penetration depth}$$

BRASS(DESY and Hamburg)

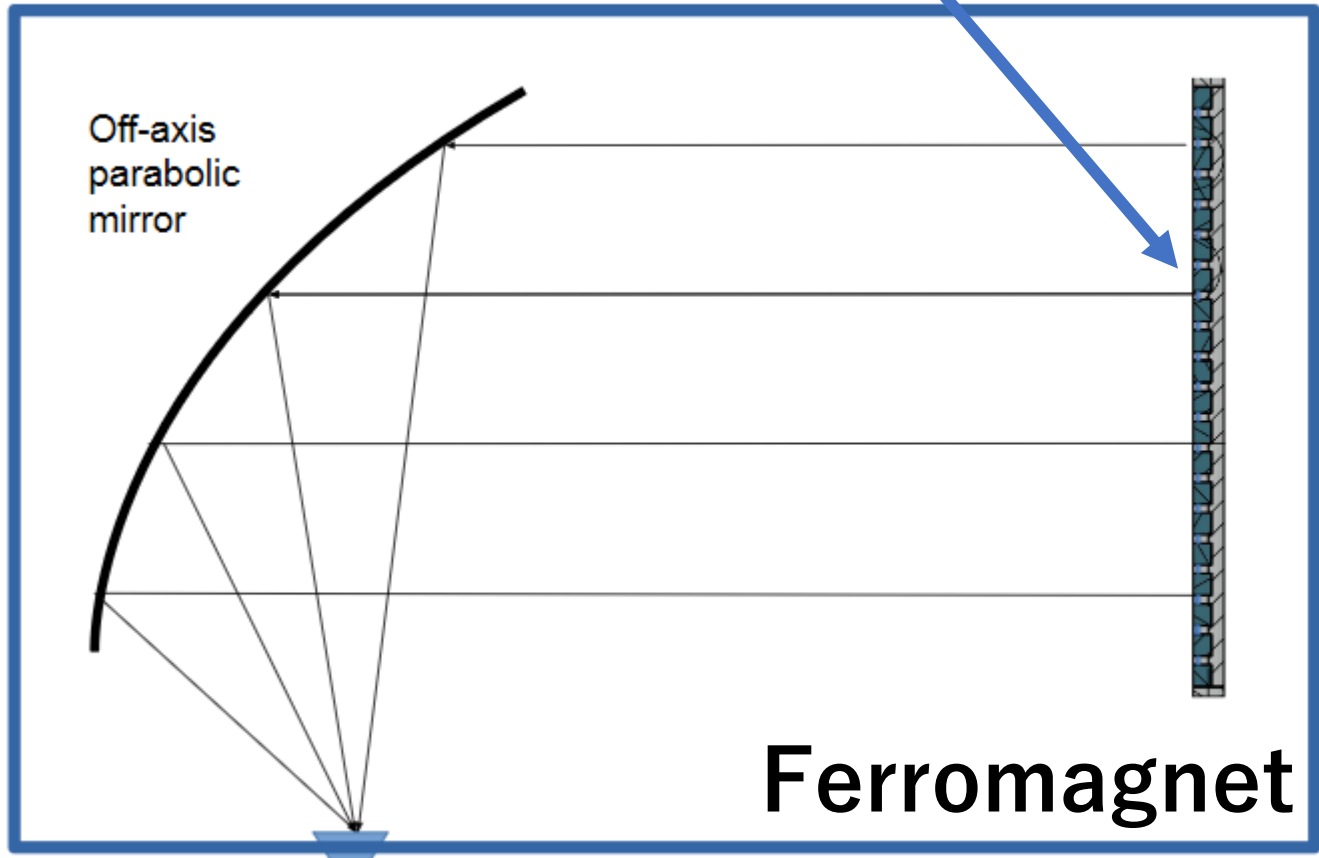
私のアイデアを採用



BRASS (Broadband Radiometric Axion SearchS)

new version using conductor (private communication)

Cryogenic cooler



Off-axis parabolic mirror

detector

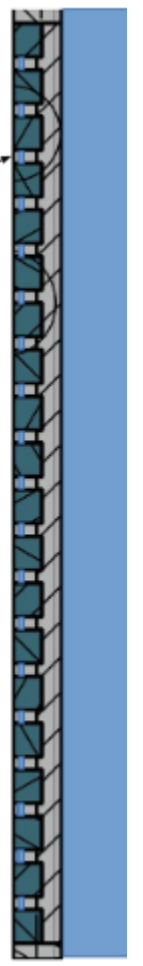
Ferromagnet in original version

Superconducting material filled in the gaps

パネル



BRASS reflector and receiver system



1. Magnet panel

The conversion panel is made from the highest grade of N55 permanent magnets. The panel is 50cm x 48cm. The gap between two magnet is around 6.5mm. The magnetic field strength between the gap is 0.8 Tesla.

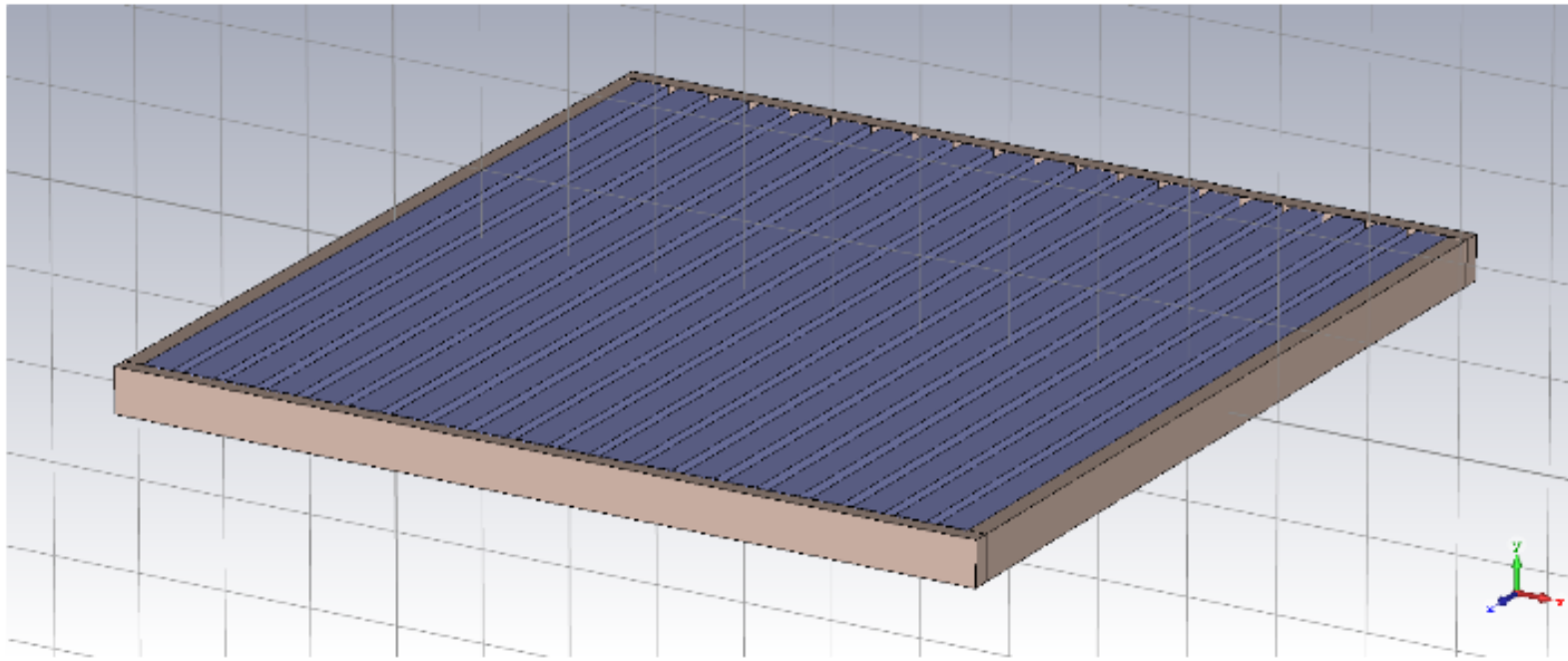
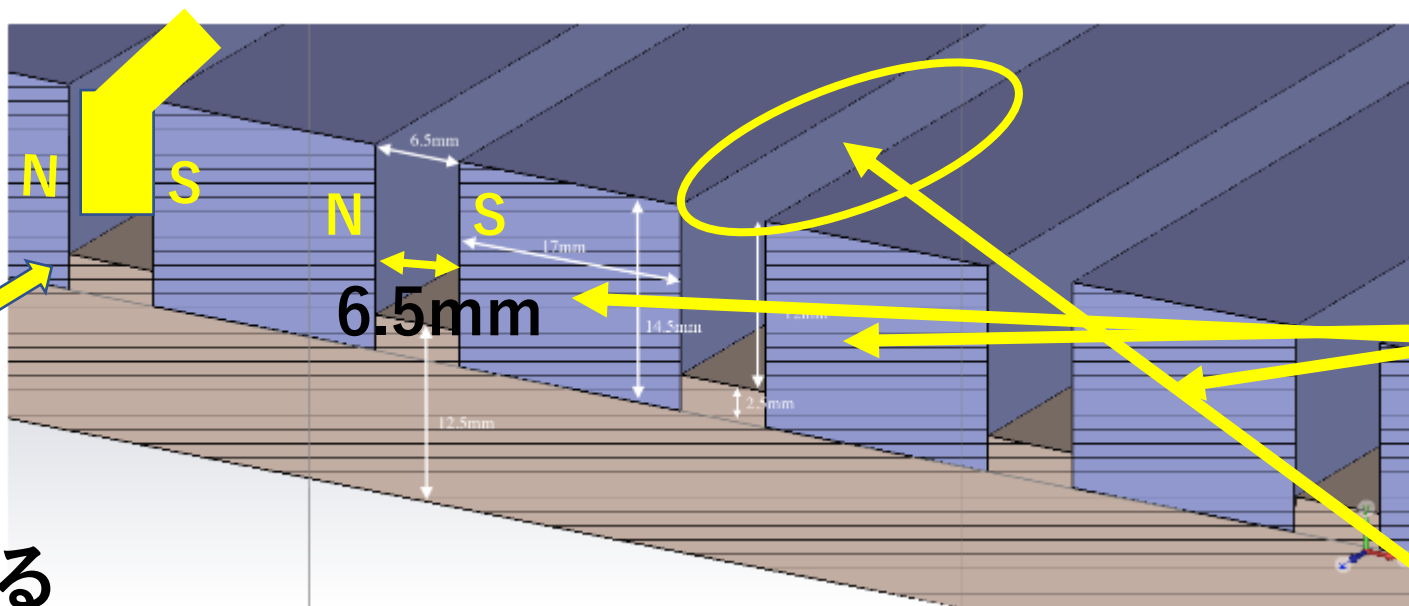


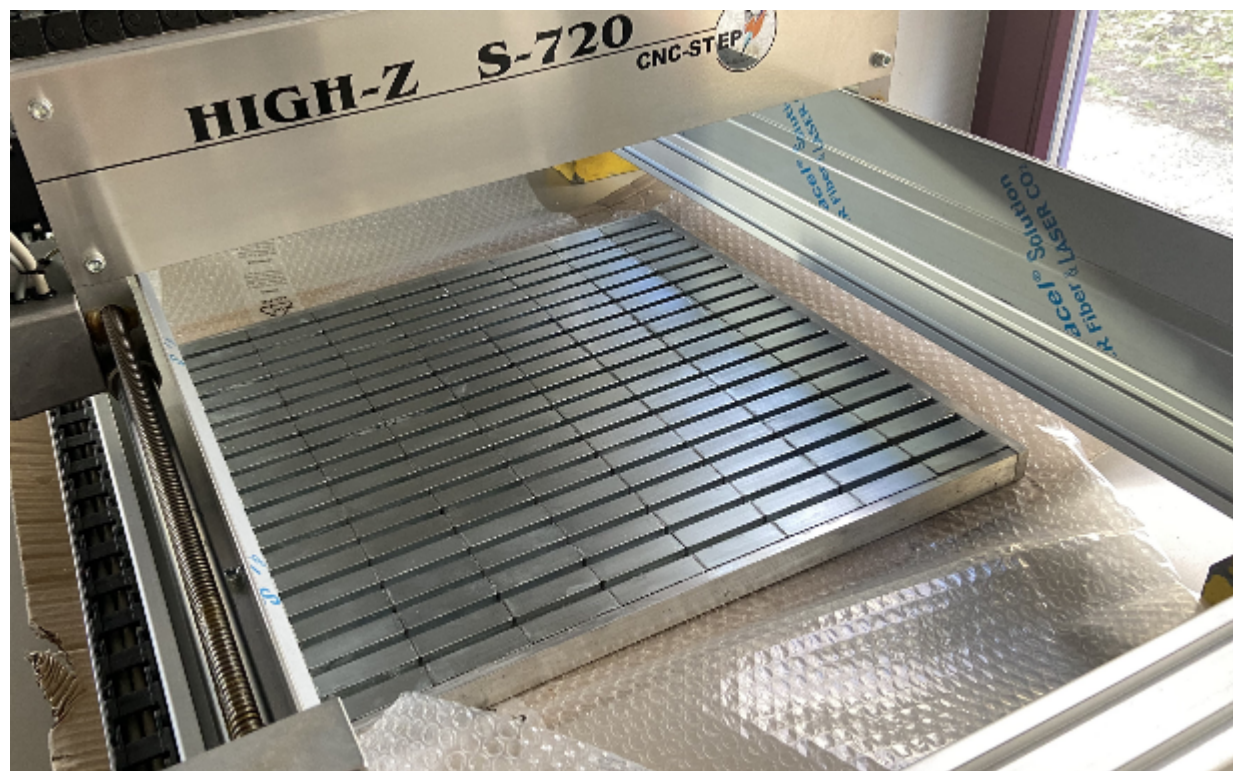
Fig. 1: The design for the magnet array for RDACC Binary profile

パネル

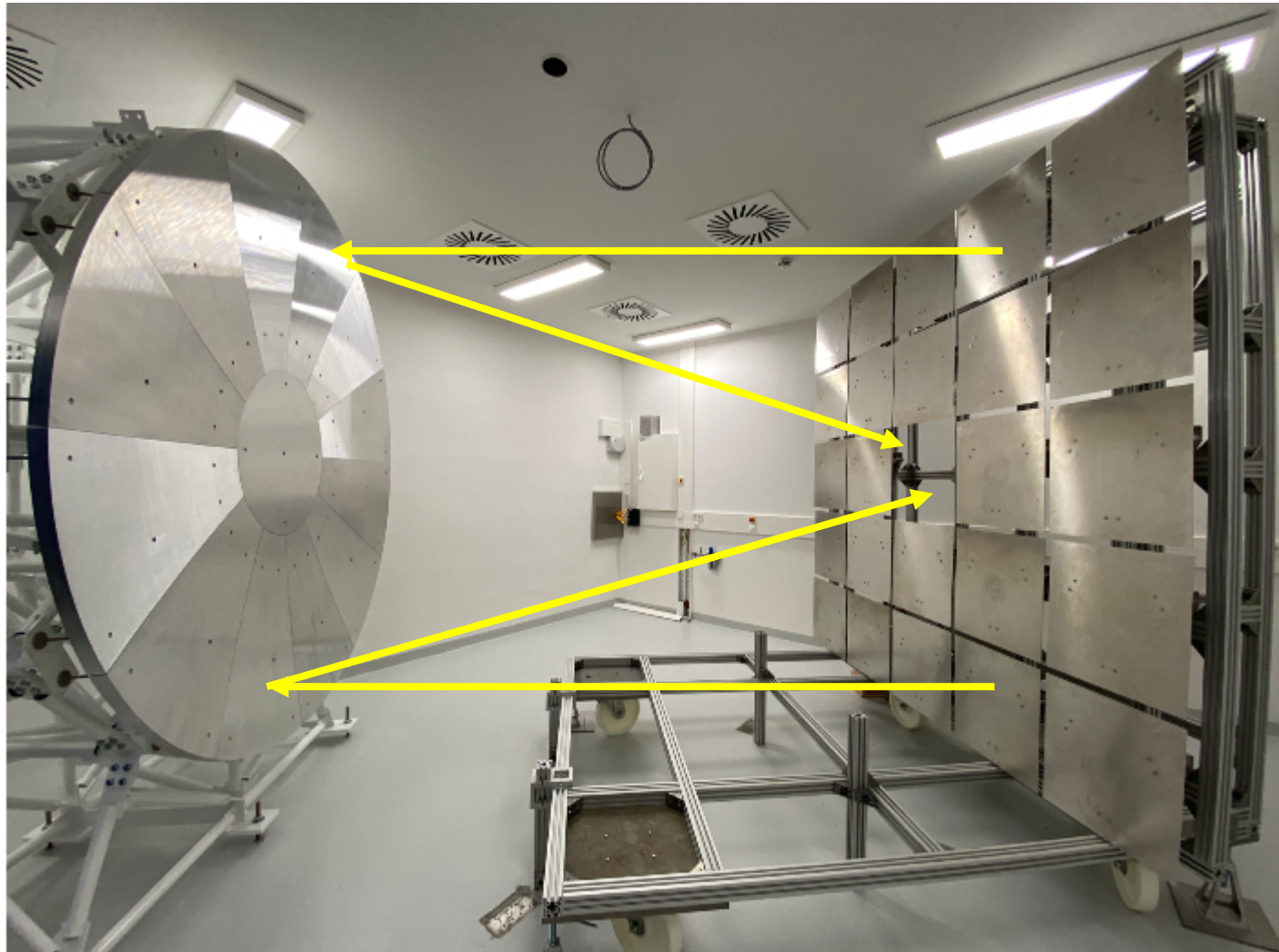


磁石の間隙
に銅をつめる
(my idea)

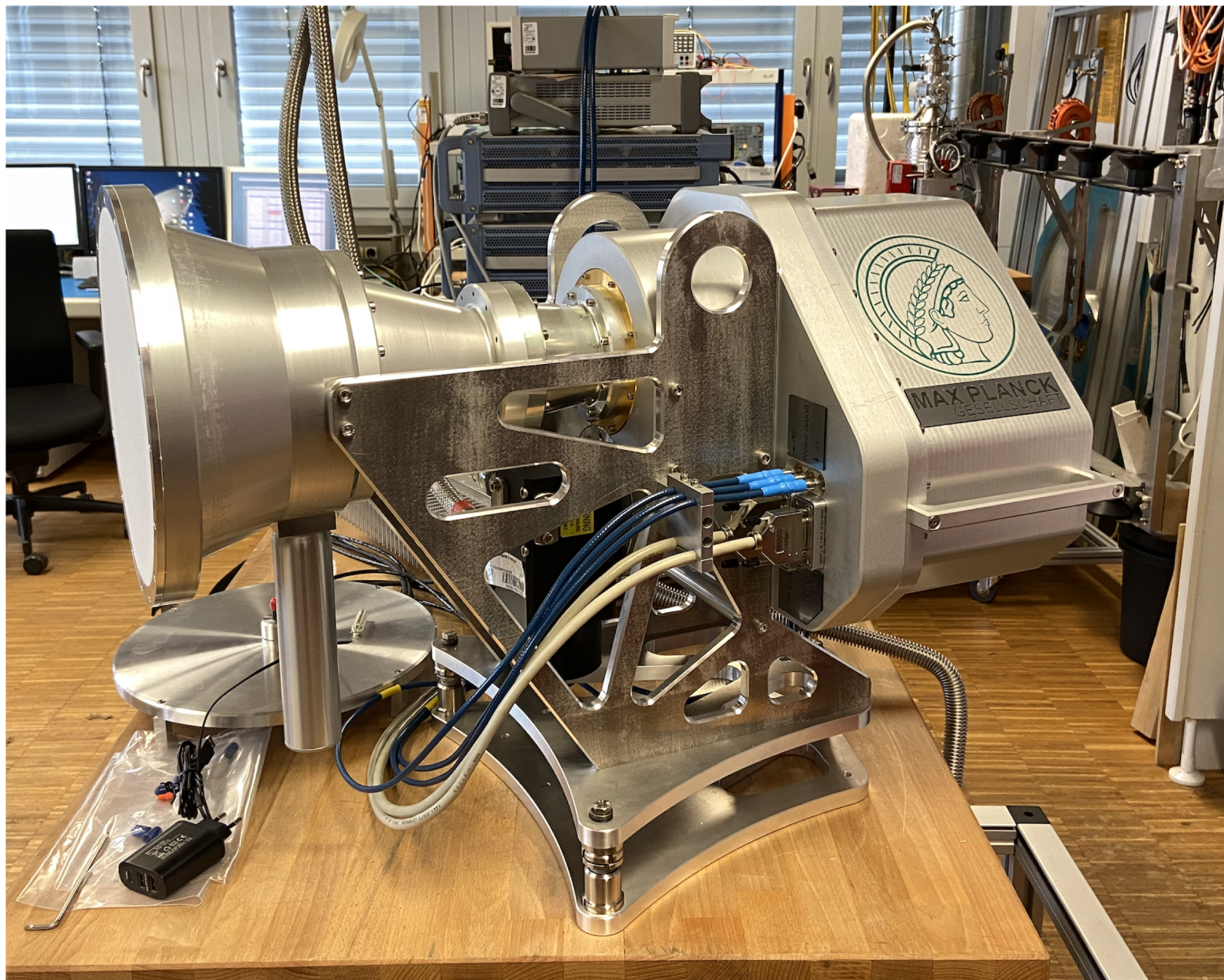
パネルの構造
強磁性体
0.8T



axion -> radiation
conversion in
vacuum
(original idea)



反射板と
パネル



アンテナ
(受信機)
MAX PLANCK

12GHz~18GHz

$10^{(-5)}\text{eV} \sim$
 $10^{(-4)}\text{eV}$

結論

磁場中の超伝導体から、暗黒物質アクションによる強い電波放射がある。
(簡単な実験設備)

従来の電波強度より 5 桁以上大きい

ブロードバンドな受信機で幅広い周波数を同時に探査できる