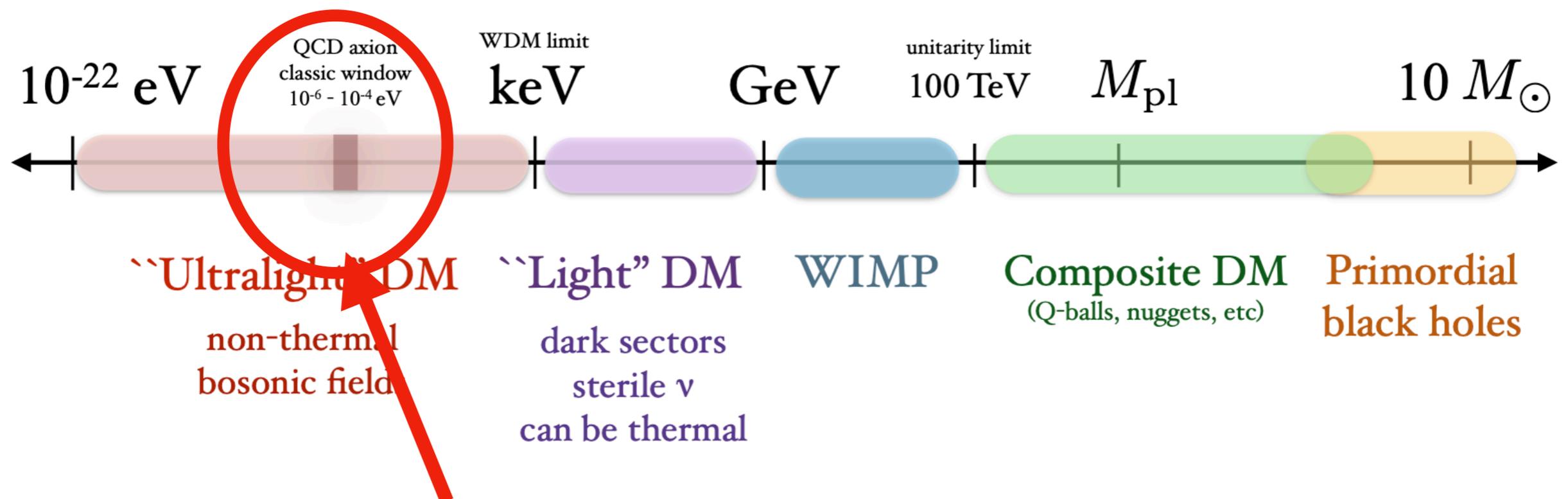




ミリ波分光で網羅する 質量40—1200 μeV の波状ダークマター 超軽量

安達俊介 京都大学白眉センター

幅広いダークマターの質量スケール



最近実験が活発な超軽量DM

μeV – meV **未開拓なスケール**

- ① ダークフォトン
- ② アクシオン (ALP 含む)

超軽量な候補①:

ダークフォトン



超軽量な候補①:

ダークフォトン

- 光とのみわずかに反応・転換する未発見粒子

* 超弦理論のモデル、High-scale inflation model

- 重要なパラメータ $\left\{ \begin{array}{l} \bullet m: \text{質量} \\ \bullet \chi: \text{ダークフォトンと実光子の「結合定数」} \end{array} \right.$

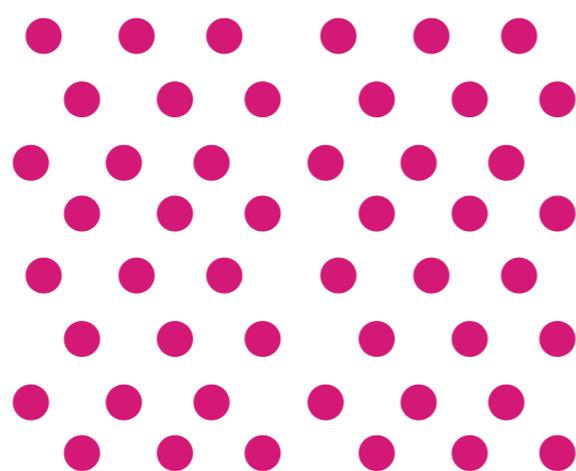
ダークフォトン

質量 $m \approx \mu\text{eV} - \text{meV}$

コヒーレントな光

見えないが
たくさん存在

$\sim O(10^{12})$ 個/cm³



低い効率 χ^2 で転換



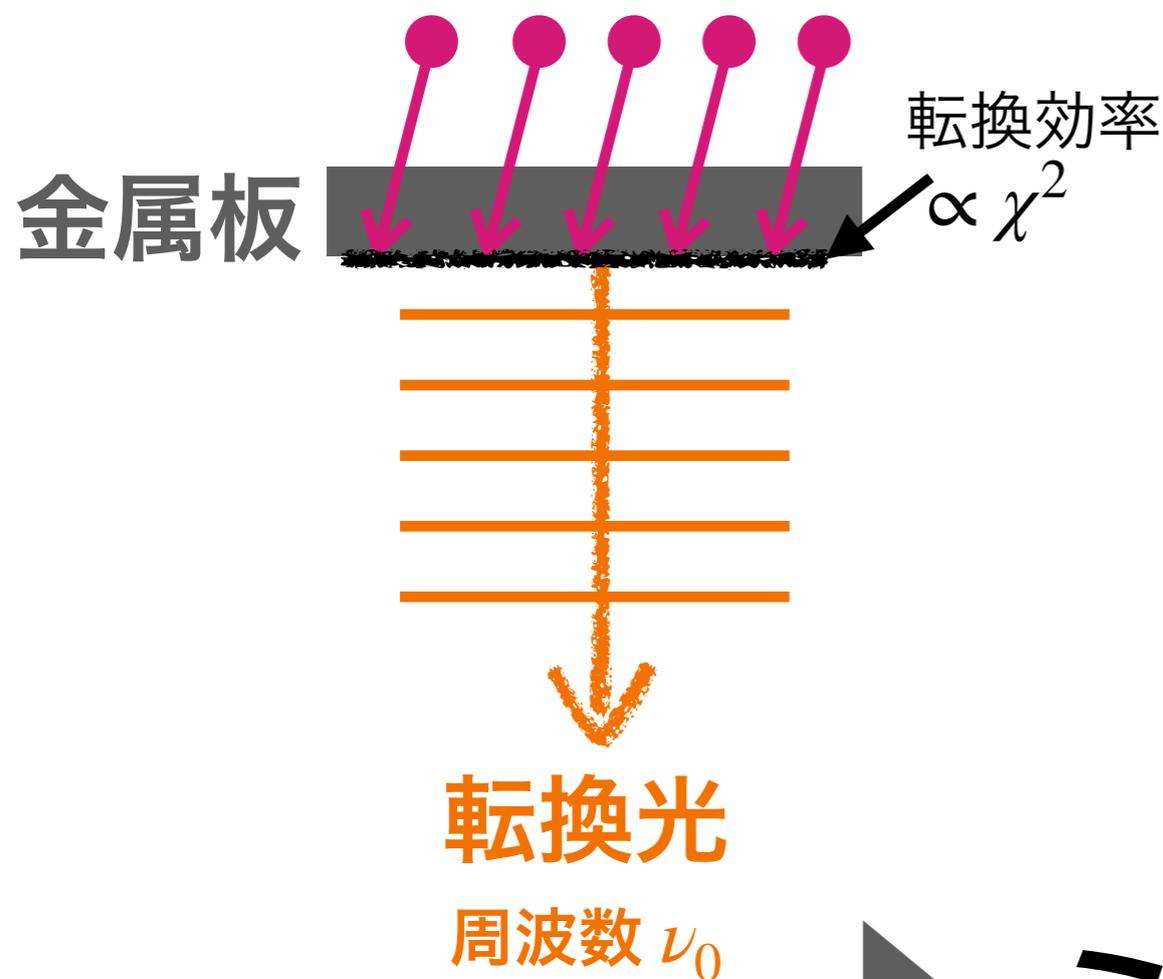
これを
観測する!

ダークフォトンの光への転換

ダークフォトン

質量 m

光との相互作用によって金属表面で「微弱な」転換光を「垂直に」放出



- エネルギー保存 $h\nu_0 = mc^2$ より質量 m は転換光の周波数 ν_0 に一対一対応

$$m=100 \mu\text{eV} \Leftrightarrow 24 \text{ GHz}$$

ミリ波帯域(10—300 GHz)
の光

ミリ波受信機を用いたダークマター実験

ど す え - ダブルアール

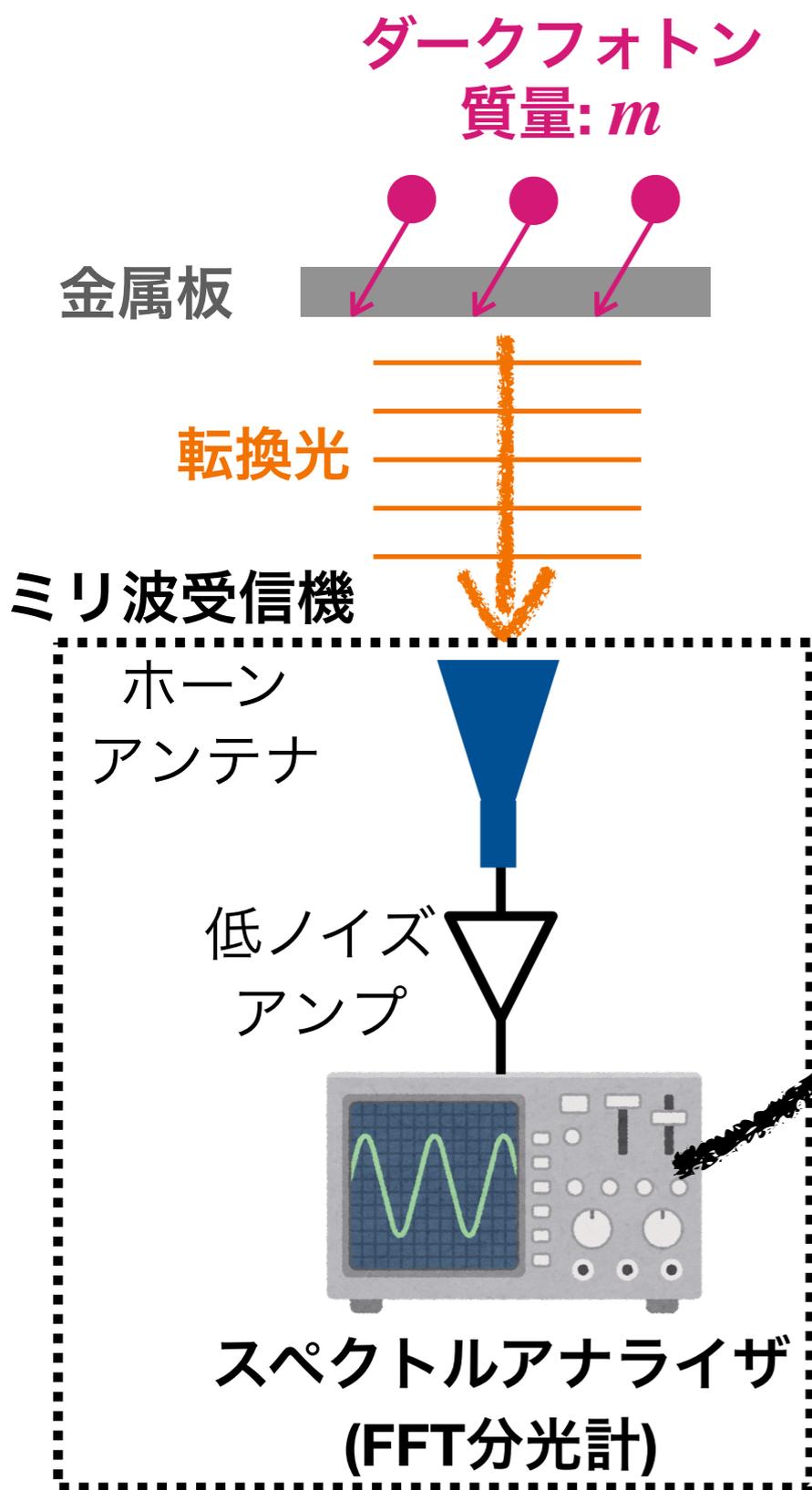
DOSUE-RR 実験

Dark-photon dark-matter **O**bserving **S**ystem
for **U**n-**E**xplored **R**adio-**R**ange

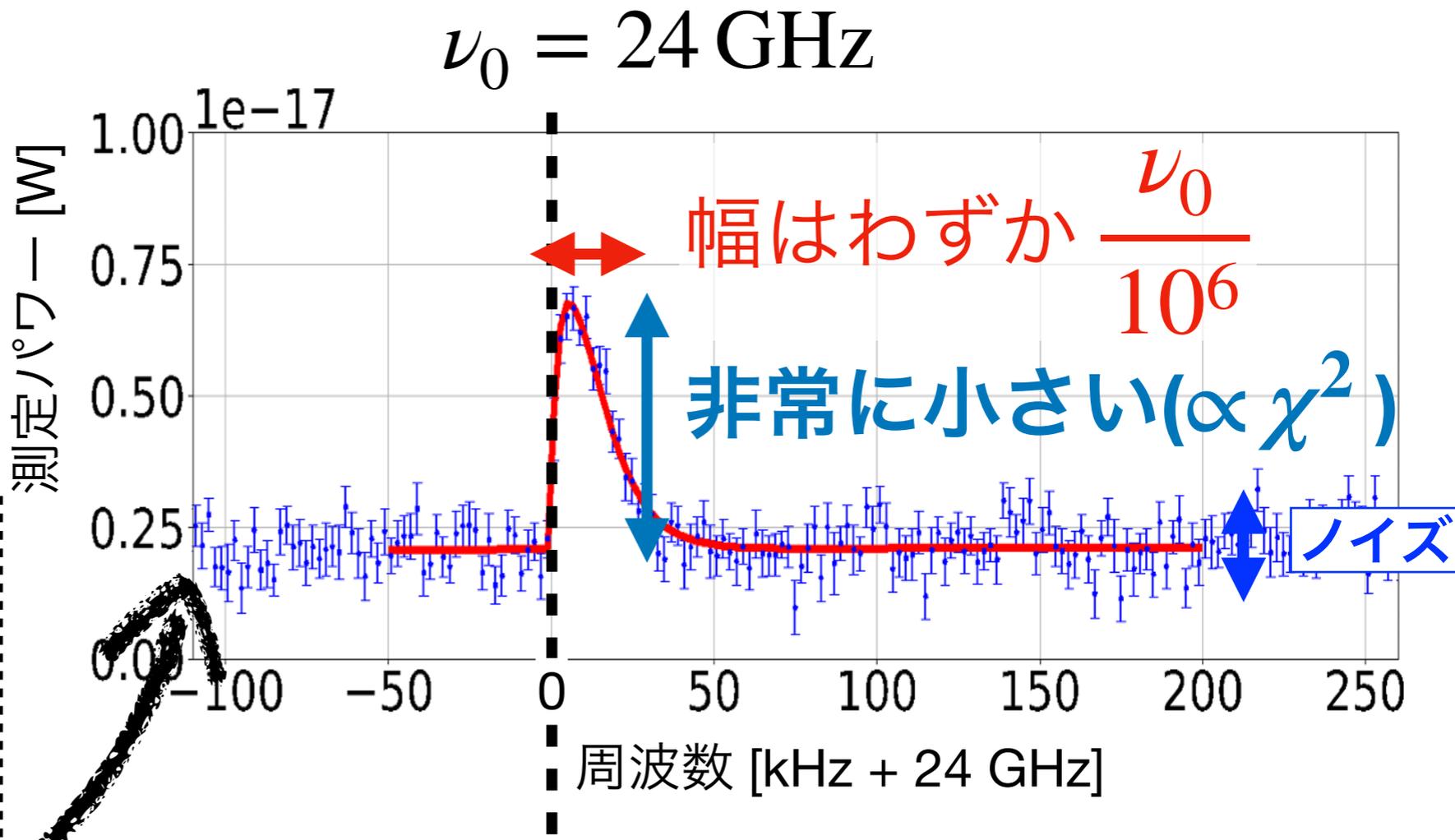


ミリ波受信機での分光を
活用して、広く探索！

転換光の検出原理

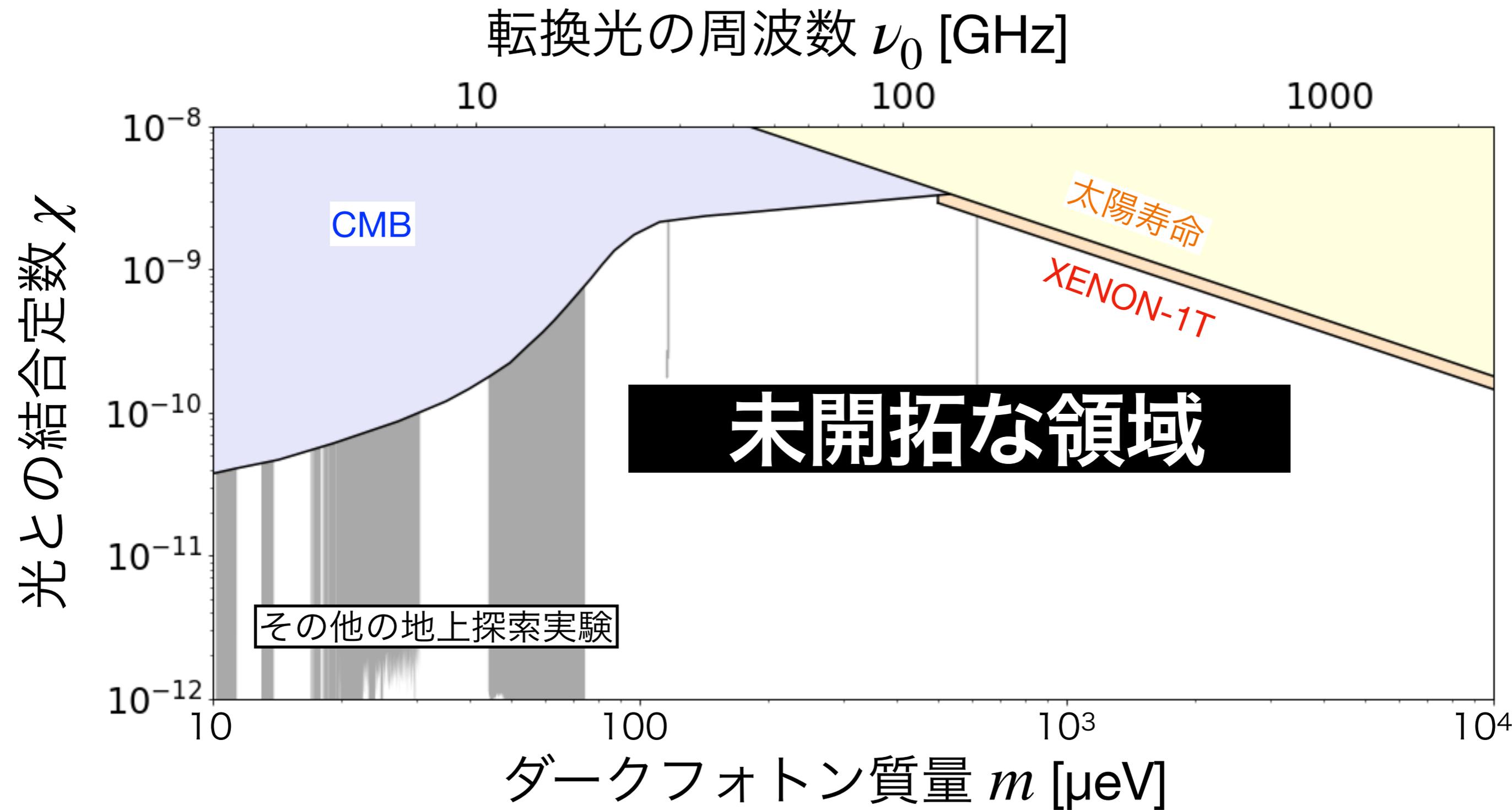


信号の周波数スペクトル @ $m = 100 \mu\text{eV}$



- 信号の幅はダークマターの小さな運動量の大きさに対応

ダークフォトンに対する制限



ダークフォトンに対する制限 in 2020

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

1000

光との結合定数 χ

10^{-8}

10^{-9}

10^{-10}

10^{-11}

10^{-12}

High scale inflation model

Phys. Rev. D 93, 103520 (2016).

超弦理論のモデル $\chi \sim 10^{-12} - 10^{-9}$

JCAP 1206, 013 (2012)

その他の地上探索実験

ダークフォトン質量 m [μeV]

10

100

10^3

10^4

ダークフォトンに対する制限

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

1000

光との結合定数 λ

10^{-8}

CMB

10^{-9}

太陽寿命

XENON-1T

10^{-10}

10^{-11}

その他の地上探索実験

ここを探索する!

10^{-12}

10

100

10^3

10^4

ダークフォトン質量 m [μeV]

DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数 ν_0 [GHz]

10

100

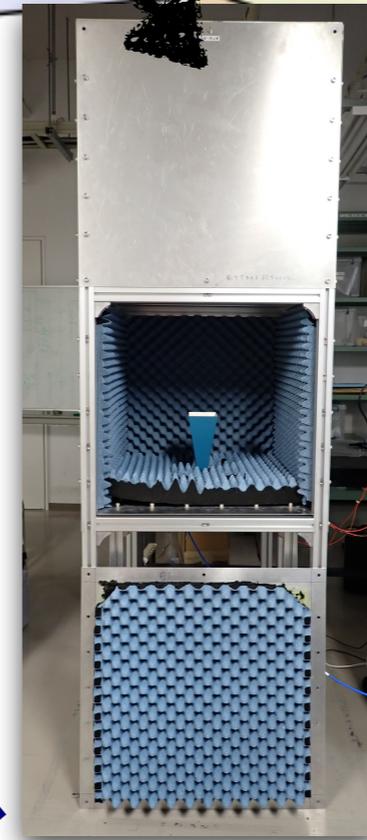
1000

光との結合定数 χ

10^{-8}
 10^{-9}
 10^{-10}
 10^{-11}
 10^{-12}

10-18 GHz
PRD 109.012008

18-26.5 GHz
PRL 130.071805



ダークフォトン質量 m [μeV]

10

100

10^3

10^4

18-26.5 GHz でのセットアップ

冷やして
低ノイズに

クライオスタット

スペクトル
アナライザ

RFケーブル (同軸ケーブル)

アルミ板

窓

真空
チェンバー

30K槽

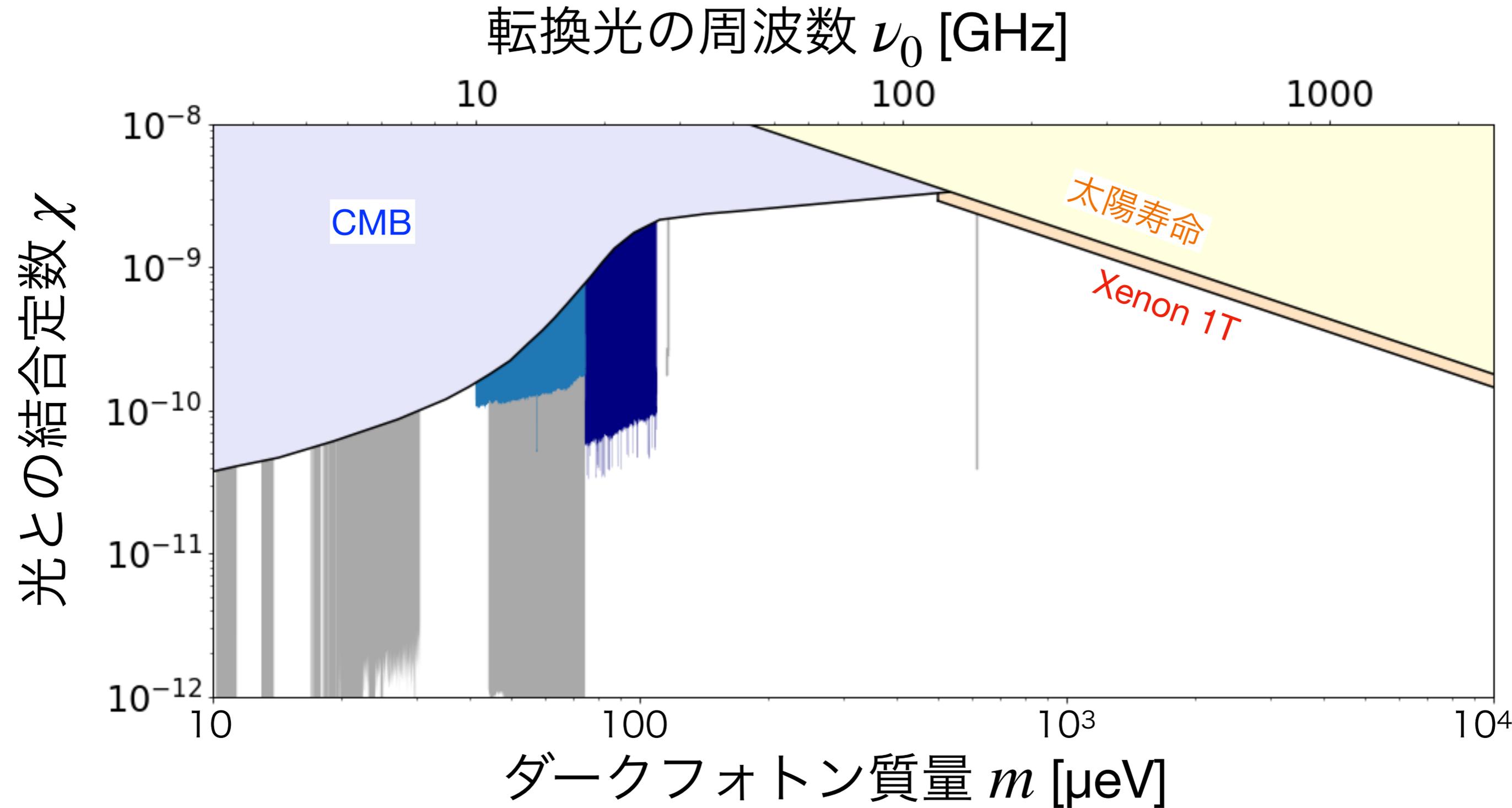
3K槽

ホーン
アンテナ

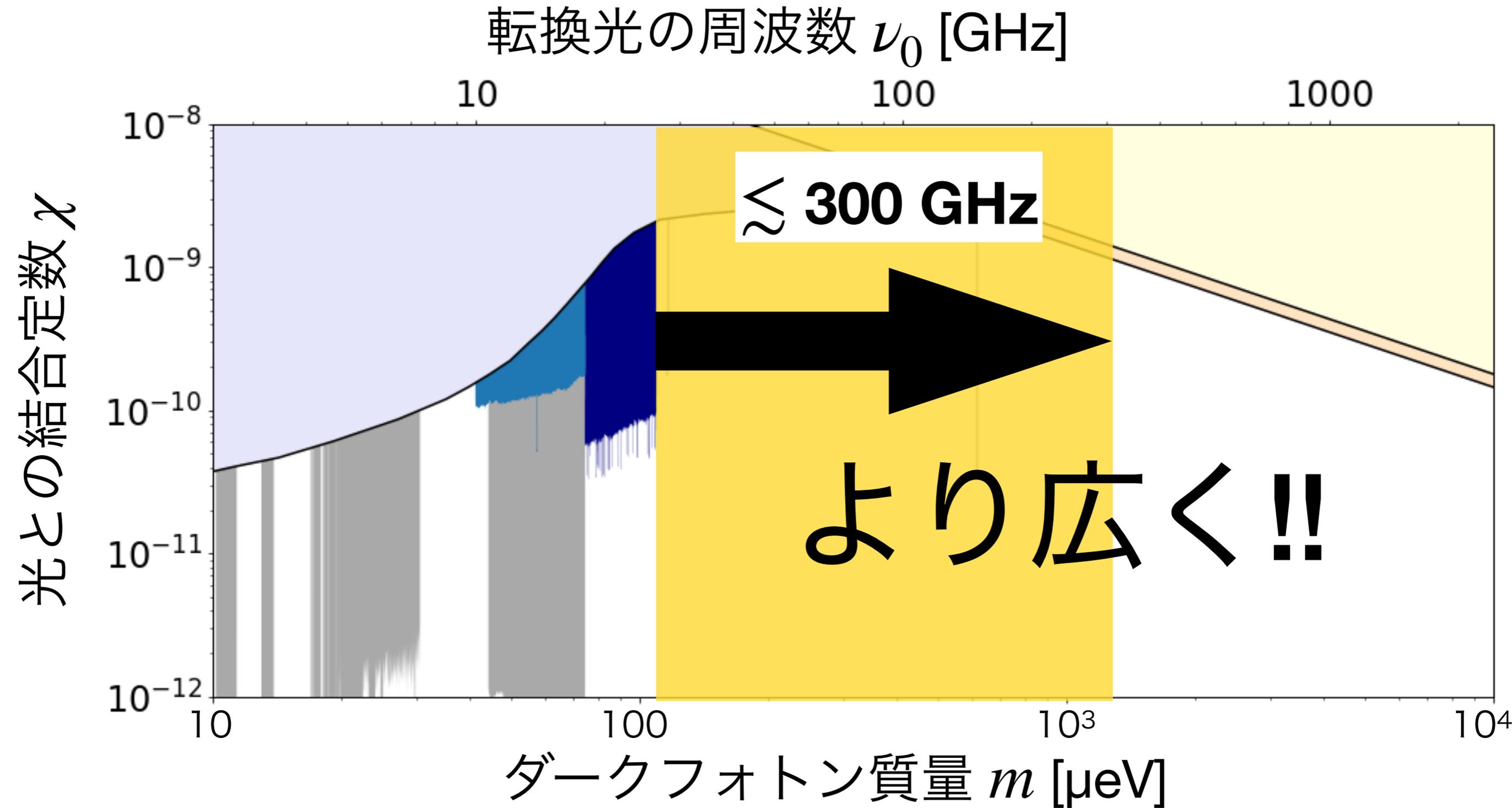
冷凍機

DOSUE-RR の現状

DOSUEのこれまでの結果



DOSUEのこれまでの結果



周波数帯域の規格

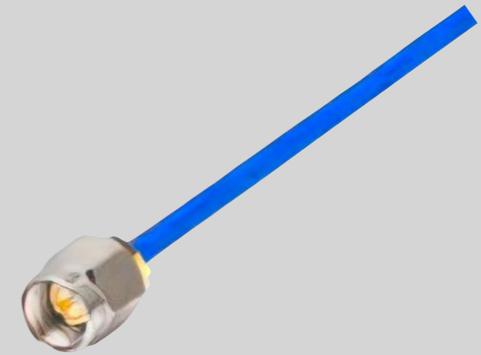
一つの部品でカバーできる帯域に限界がある

特に、信号を伝送するものの規格

規格	周波数の帯域
J-band	10—18 GHz
K-band	18—26.5 GHz
Q-band	33—50 GHz
V-band	50—75 GHz
W-band	75—110 GHz
D-band	110—170 GHz
Y-band	170—260 GHz

探索済み

同軸ケーブル
(低周波 < 30 GHz)



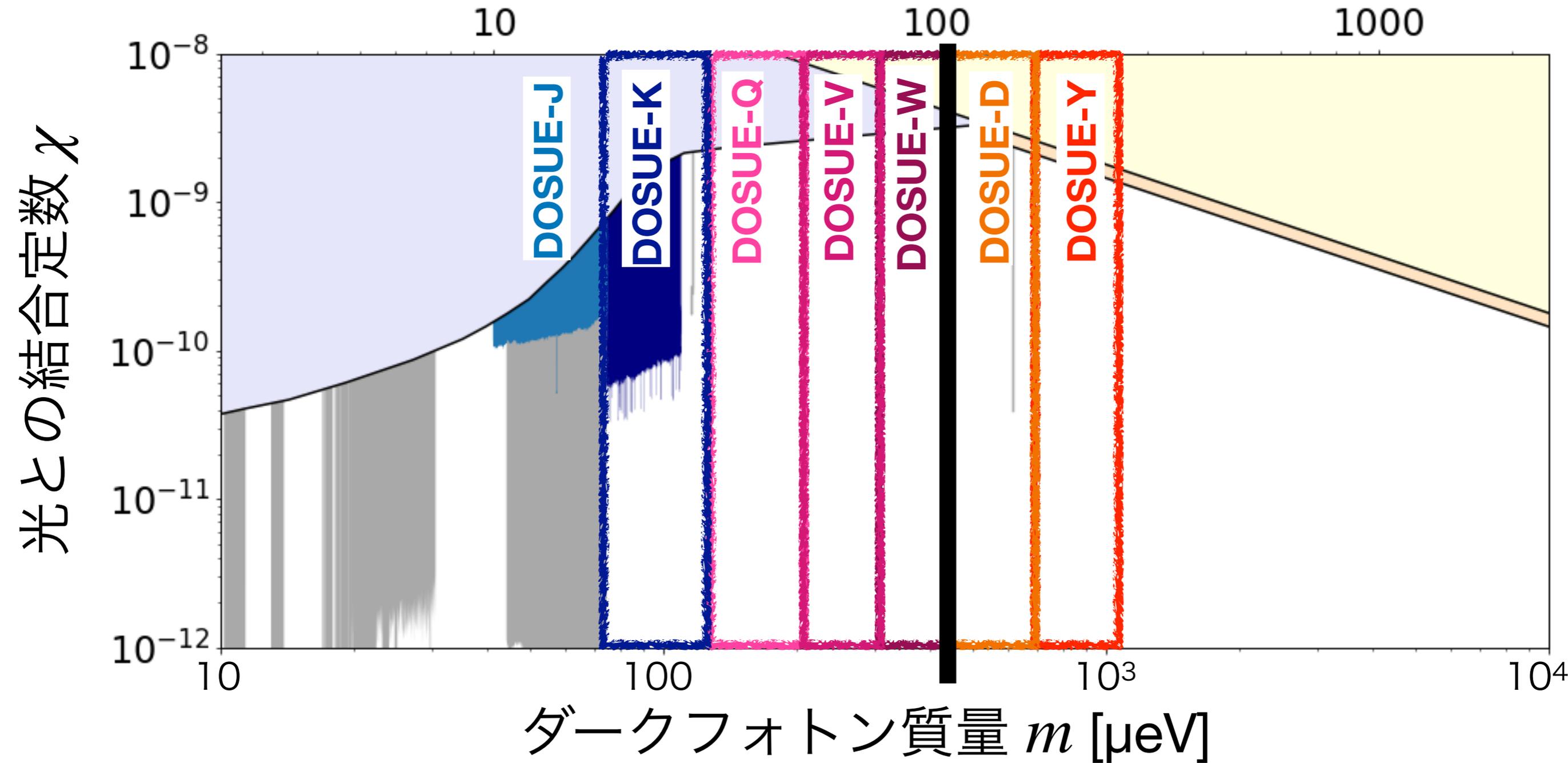
導波管
(高周波 > 30 GHz)



高周波ほど小さい導波管になる

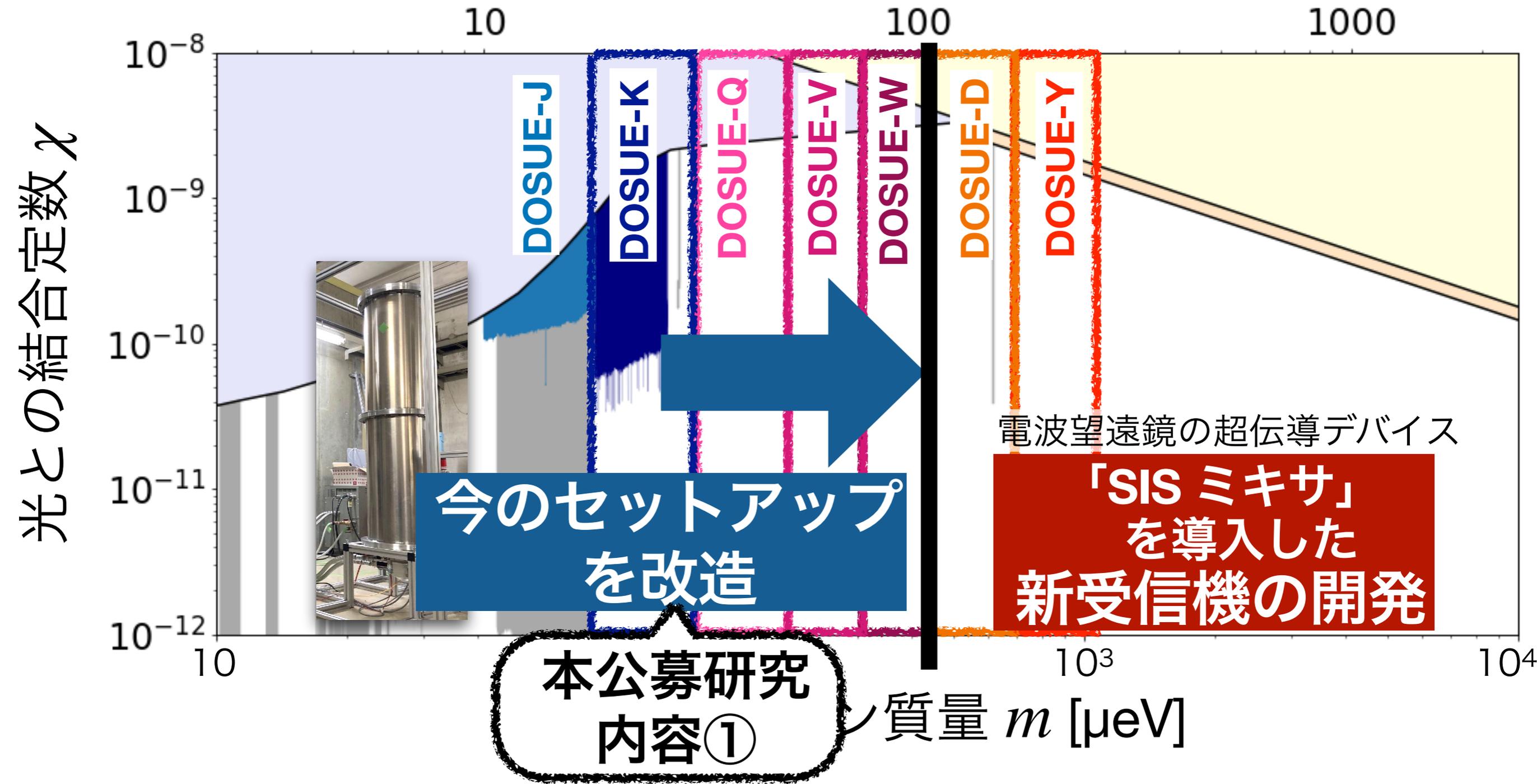
周波数を網羅する戦略

転換光の周波数 ν_0 [GHz]



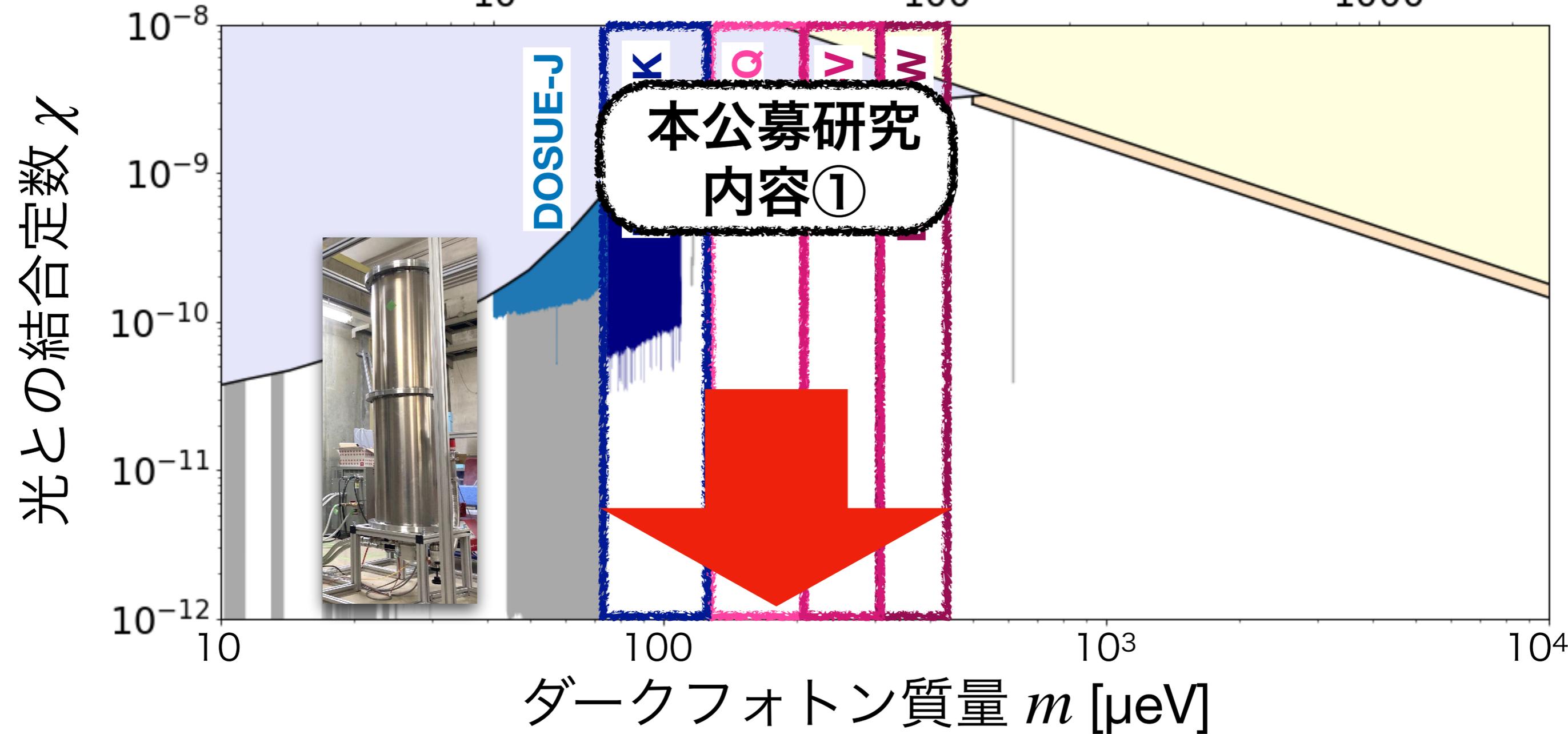
周波数を網羅する戦略

転換光の周波数 ν_0 [GHz]



深さ方向には？

轉換光の周波数 ν_0 [GHz]

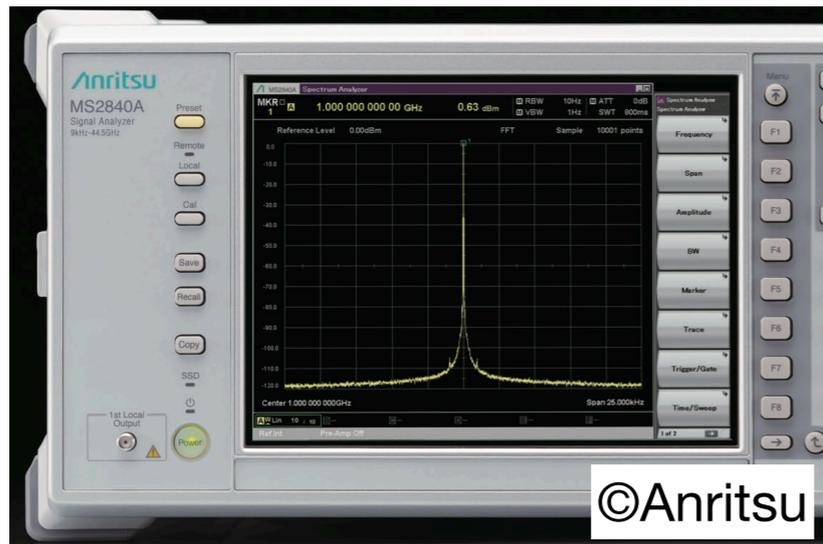


FFT 分光計の広帯域化

RFSoc を用いた分光計の開発も行なっている

FPGA, CPU, 4Gbps ADC/DAC が
1チップに内蔵されたもの

市販分光計
(スペクトルアナライザ)



2 MHz 帯域

➔
× 2000倍

開発した FFT 分光計



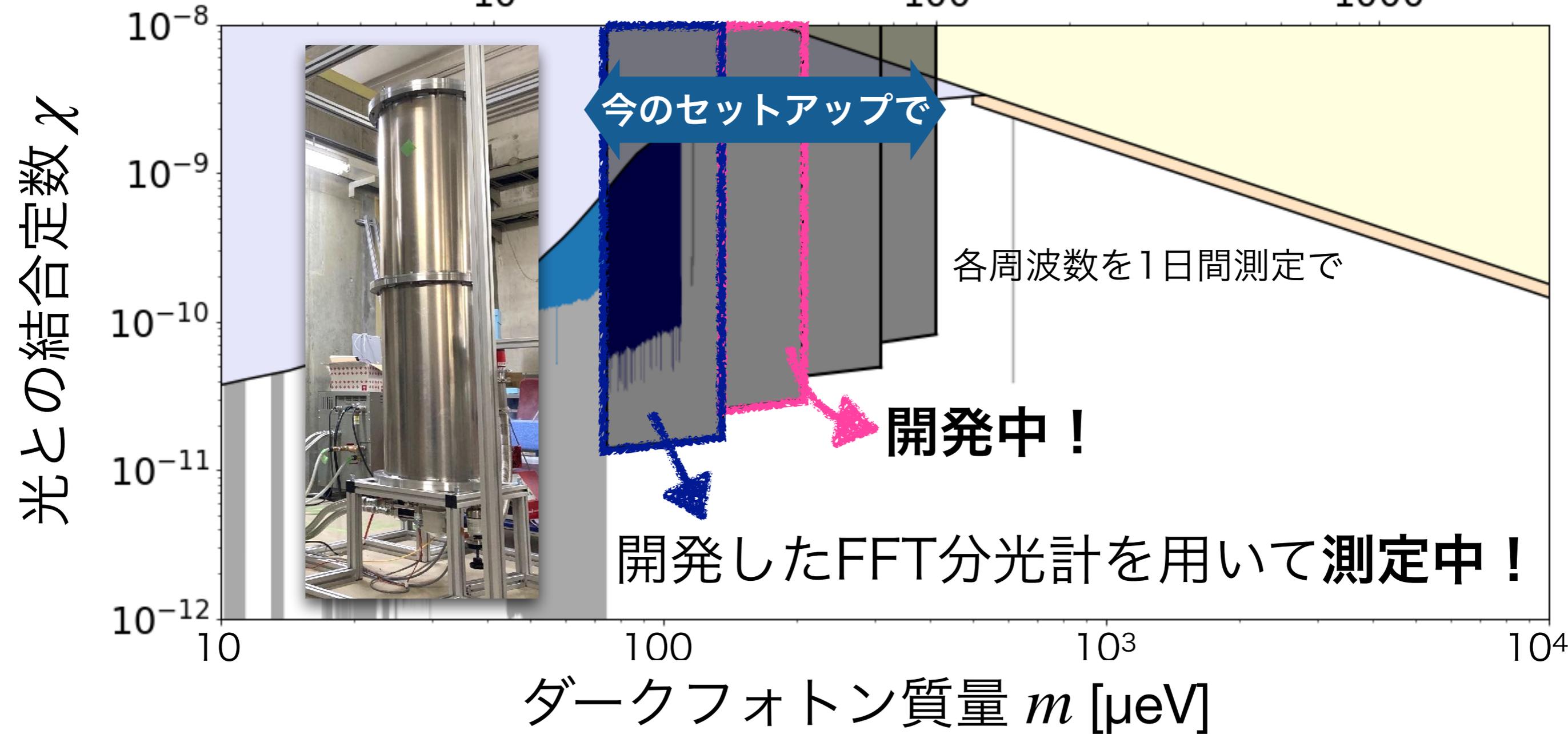
帯域幅: 4 GHz

測定効率の向上 = 測定時間の改善

* χ の感度 $\propto t^{1/4}$ 。従来の測定時間 24 秒。

どんどん進行中！

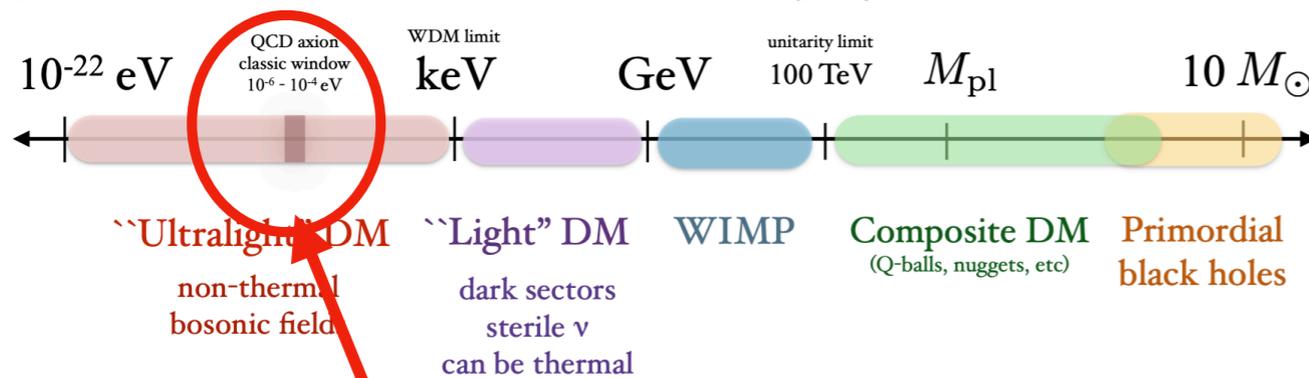
転換光の周波数 ν_0 [GHz]



超軽量な候補②:

アクシオン

幅広いダークマターの質量スケール



最近実験が活発な超軽量DM
μeV–meV **未開拓なスケール**

① ダークフォトン

② アクシオン(ALP含む)

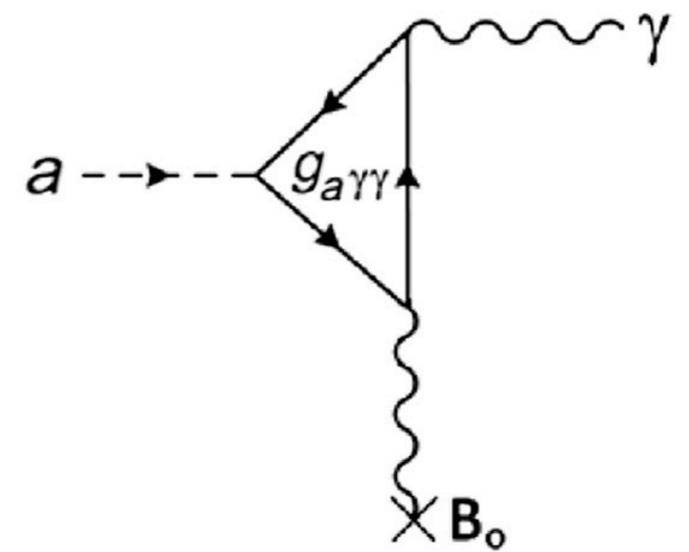


せっかくなら
こっちもやりたいよね。

アクシオンの探索方法

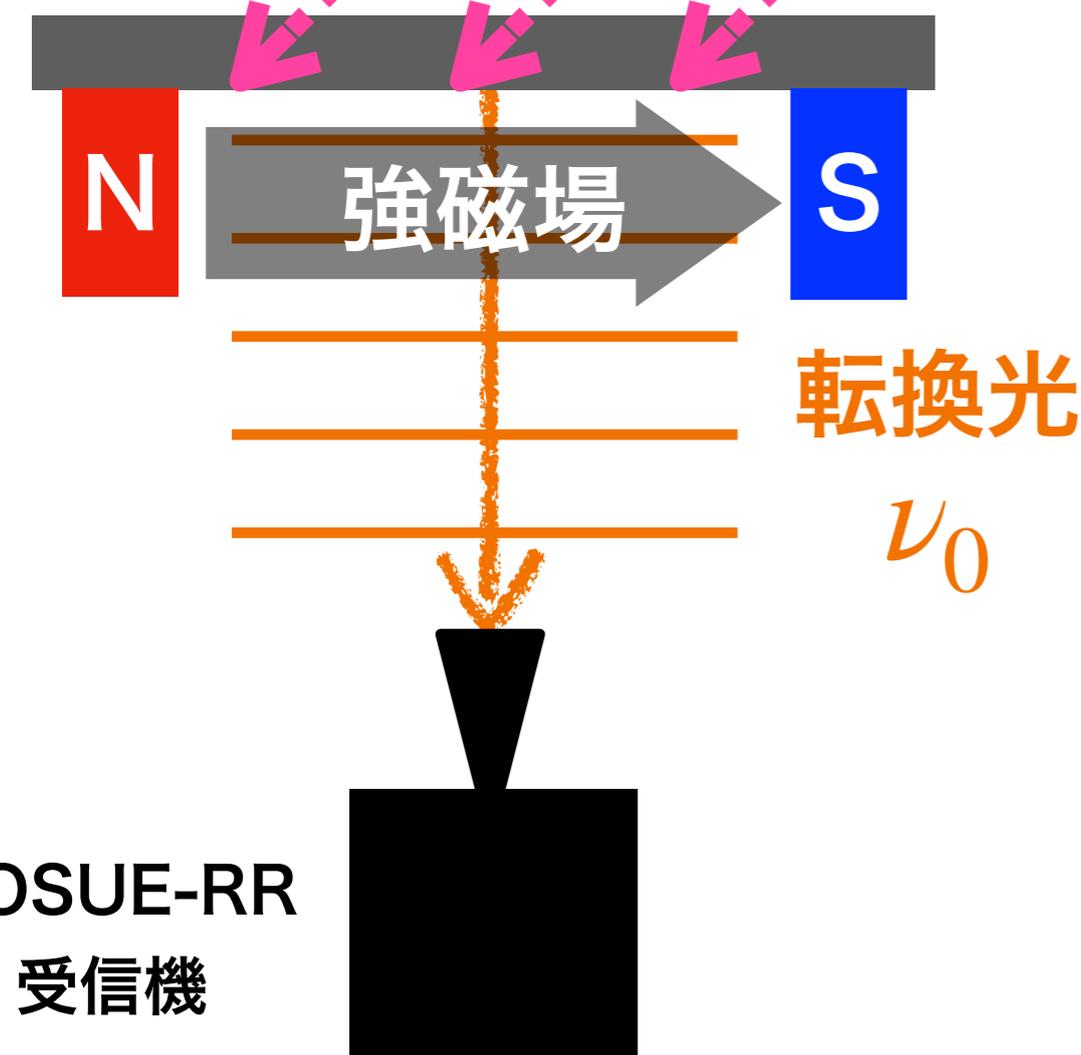
電磁場との3点結合 $g_{a\gamma\gamma}$ を持ち、

磁場中でダークフォトンと同じように光を放出



アクシオン m_a

金属板



- エネルギー保存 $h\nu_0 = m_a c^2$
- 垂直に放射
- $g_{a\gamma\gamma}$ に対する感度

$$\propto \frac{1}{B_{\parallel} [T]} \left(P_{\text{noise}} [W] \frac{1}{A_{\text{antenna}} [\text{m}^2]} \right)^{\frac{1}{2}}$$

強磁場が重要!

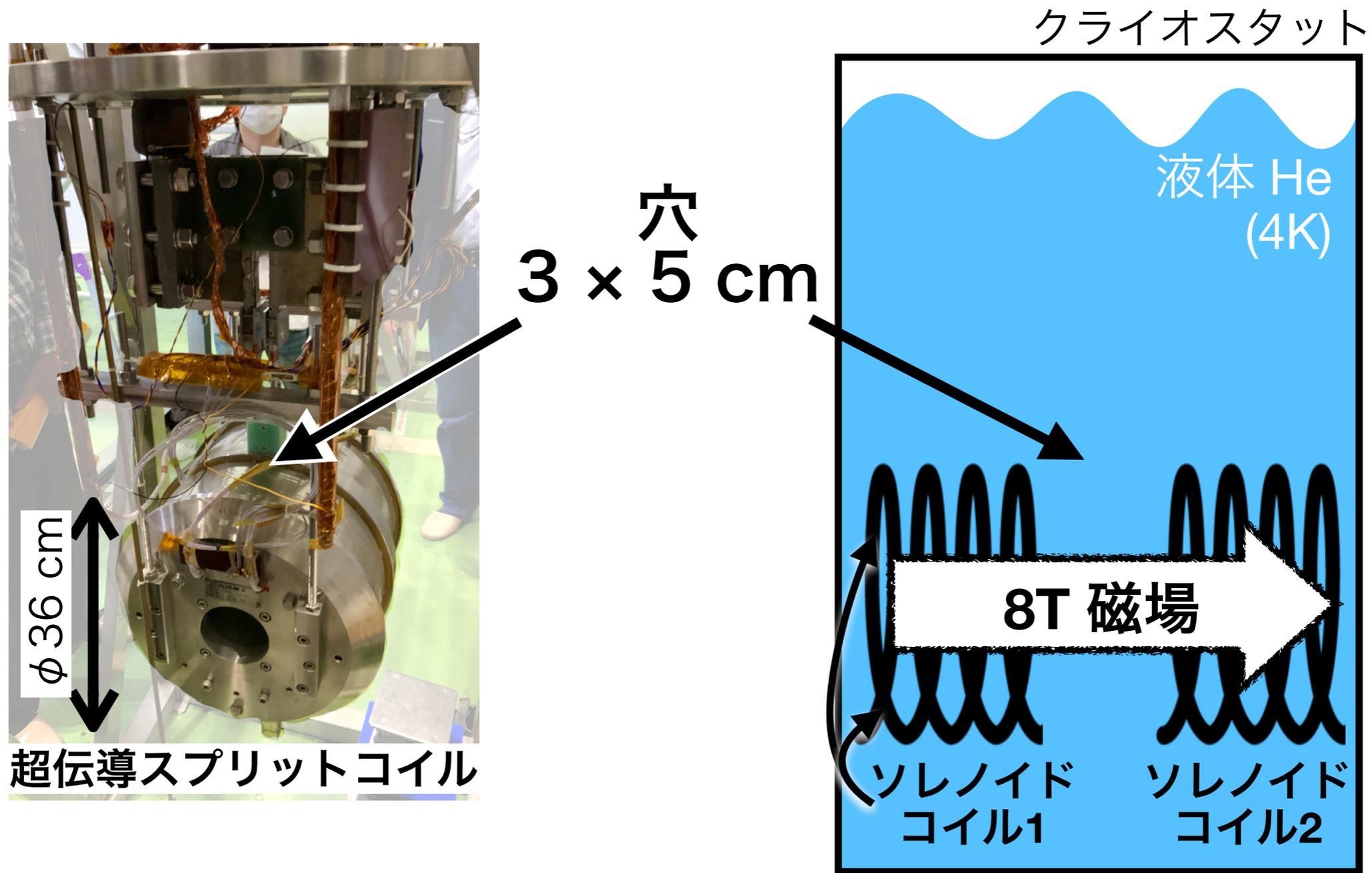
低ノイズ P_{noise} と大きいアンテナ A_{antenna} も

DOSUE-RR
受信機

超伝導磁石と受信機の組み合わせ

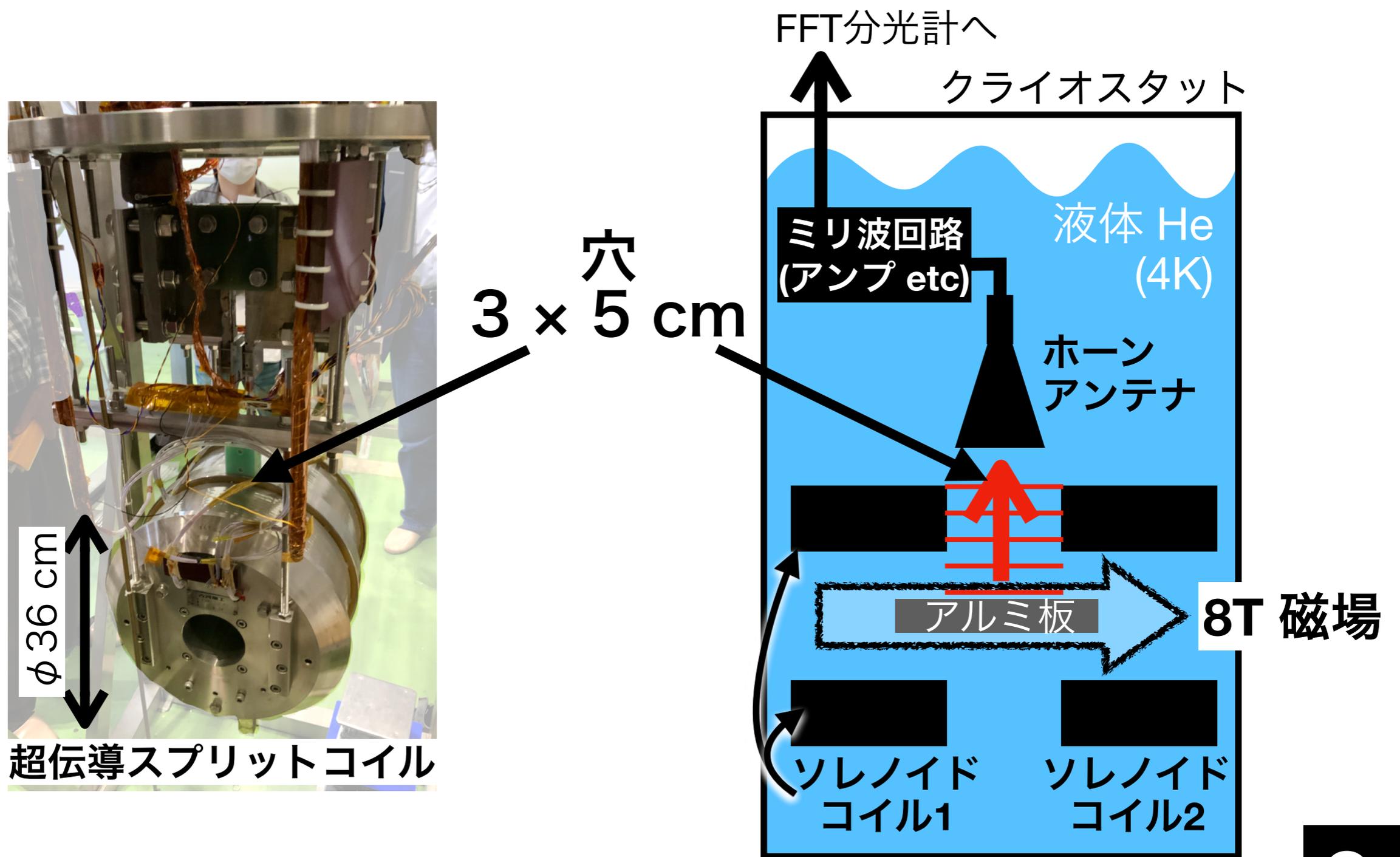
超伝導スプリットコイル 8T @ 核融合研究所(岐阜)の採用

ソレノイドコイルを並べた、間に隙間があるコイル

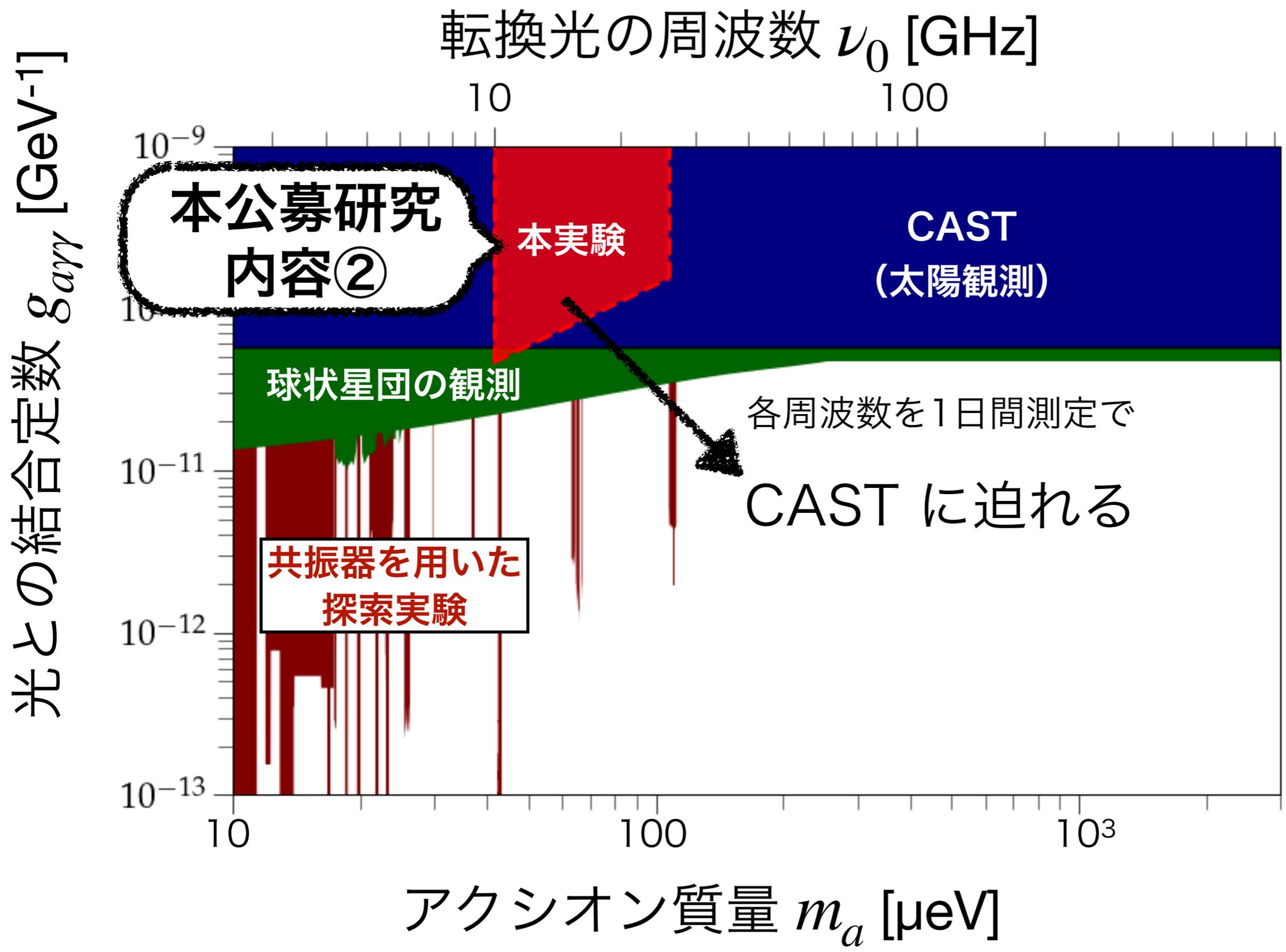


強磁場と受信機の組み合わせ

DOSUEの内部を超伝導マグネットのクライオスタットに搭載

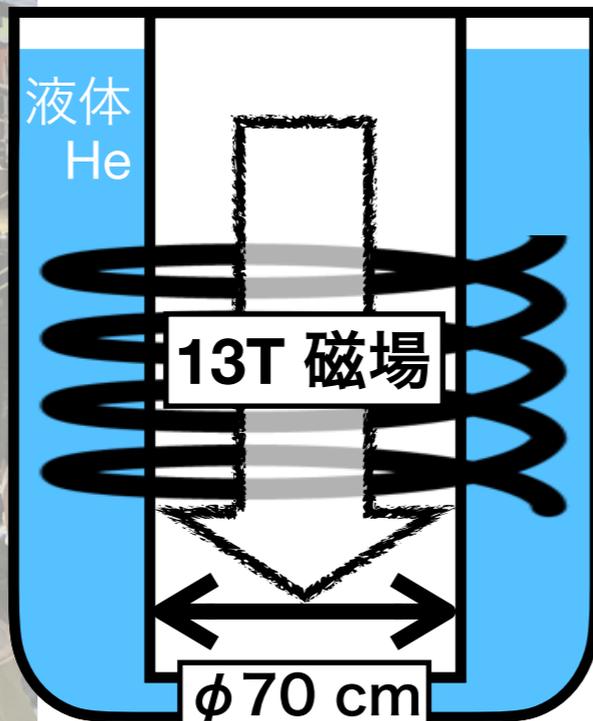
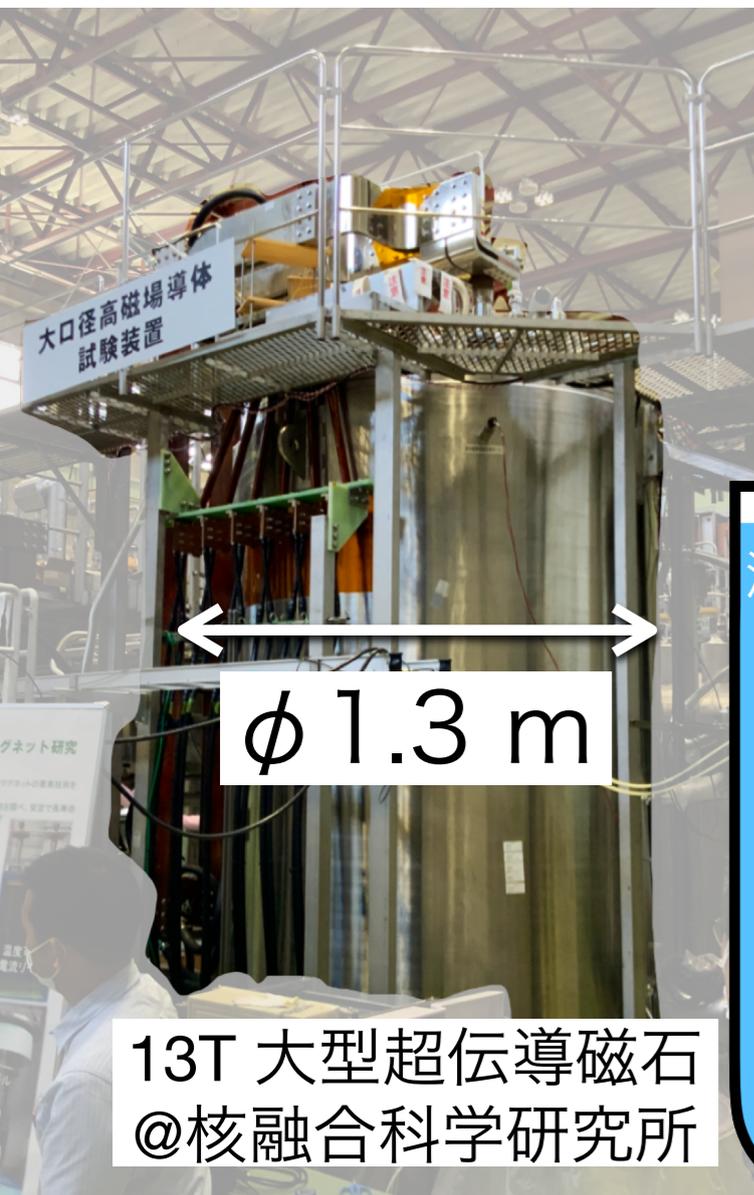


初探索の感度



超伝導磁石との組み合わせが 確立すれば...

• g_{arr} に対する感度 $\propto \frac{1}{B_{\parallel}[\text{T}]} \left(P_{\text{noise}}[\text{W}] \frac{1}{A_{\text{antenna}}[\text{m}^2]} \right)^{\frac{1}{2}}$

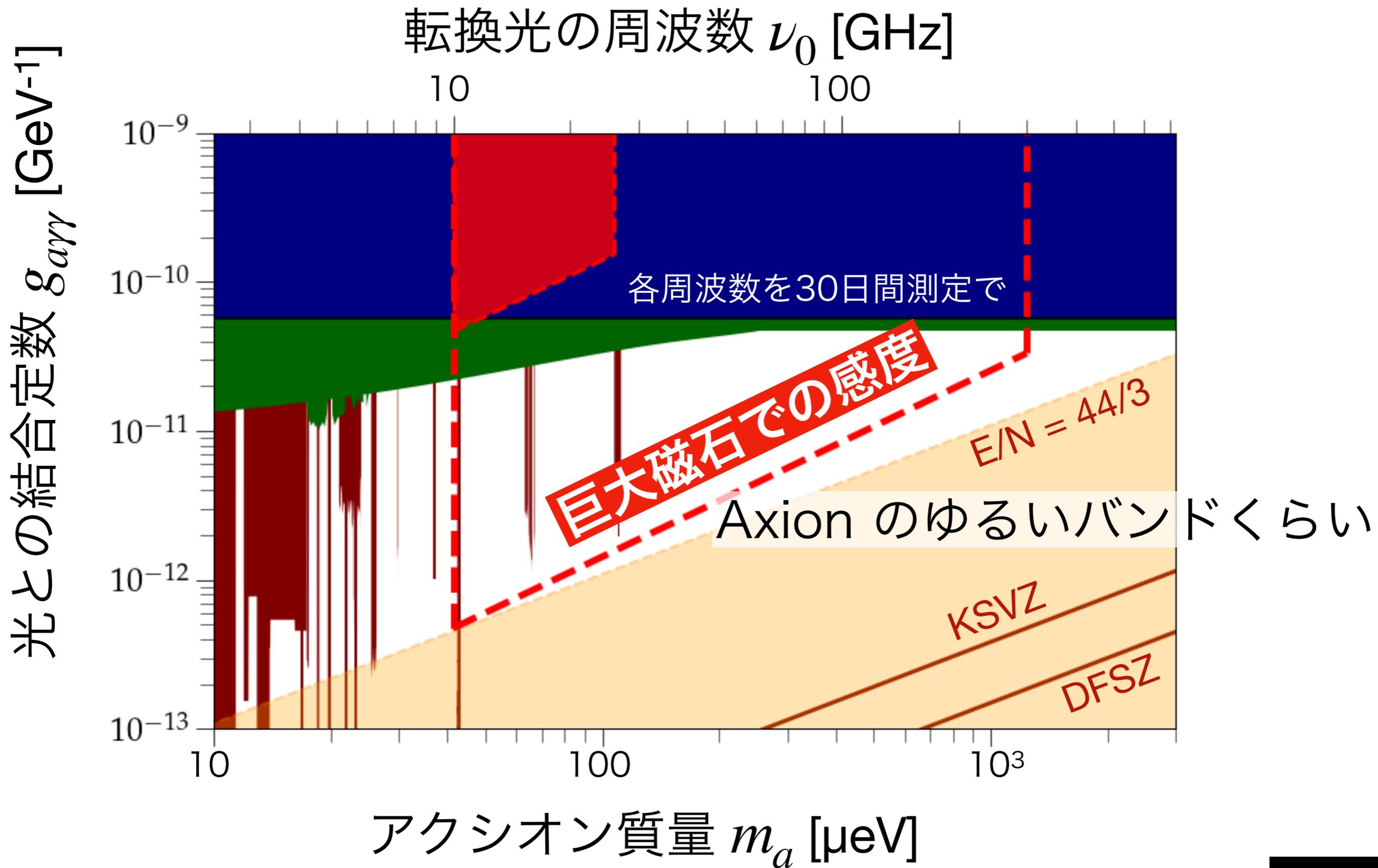


いかに大面積で転換させるか？

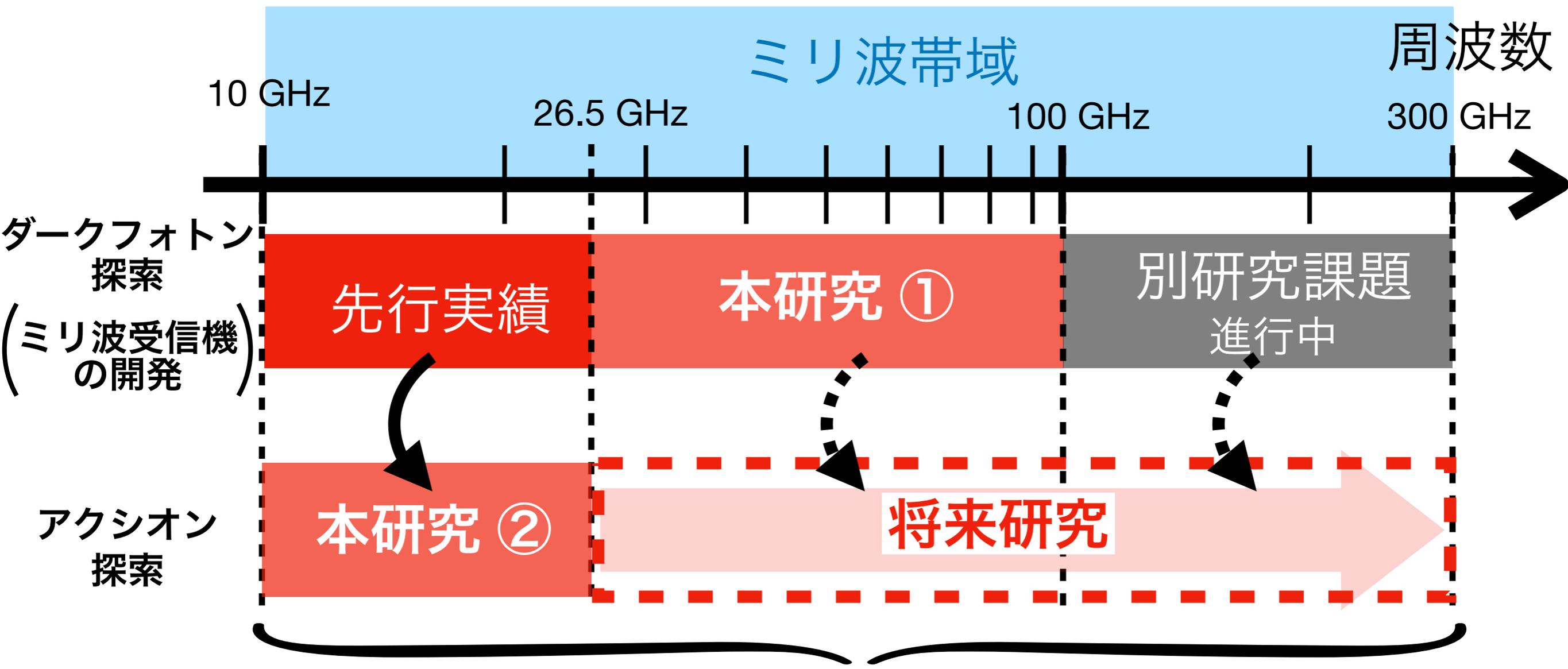
例えば、1 m 級の
大型超伝導磁石が使えれば...

$3 \times 5 \text{ cm}^2 \rightarrow 100 \times 100 \text{ cm}^2$
 $\times 600 \text{ 倍}$

巨大磁石での感度



DOSUE-RR 全体計画 (周波数)



**ダークフォトンもアクションも
ミリ波帯域をフルカバー**

まとめ

- 超軽量ダークマター探索にミリ波受信機を応用して広い質量領域($40\text{--}1200\ \mu\text{eV}$)を攻める
- 本公募では
 - $40\text{--}410\ \mu\text{eV}$ ($10\text{--}100\ \text{GHz}$) でのダークフォトンの網羅
 - 超伝導磁石を組み合わせたアクシオン探索の確立を目指す
- 最終的には、ダークフォトンもアクシオンも広く深く！