

# ミリ波を用いてダークマターを探す

どすえ - ダブルアール

## DOSUE-RR 実験の今後の展望

安達俊介  
(京大白眉センター)

# 自己紹介: 安達 俊介

## やってきた実験

- LHC-ATLAS 実験 (元 ICEPP)
  - SUSY 粒子の探索

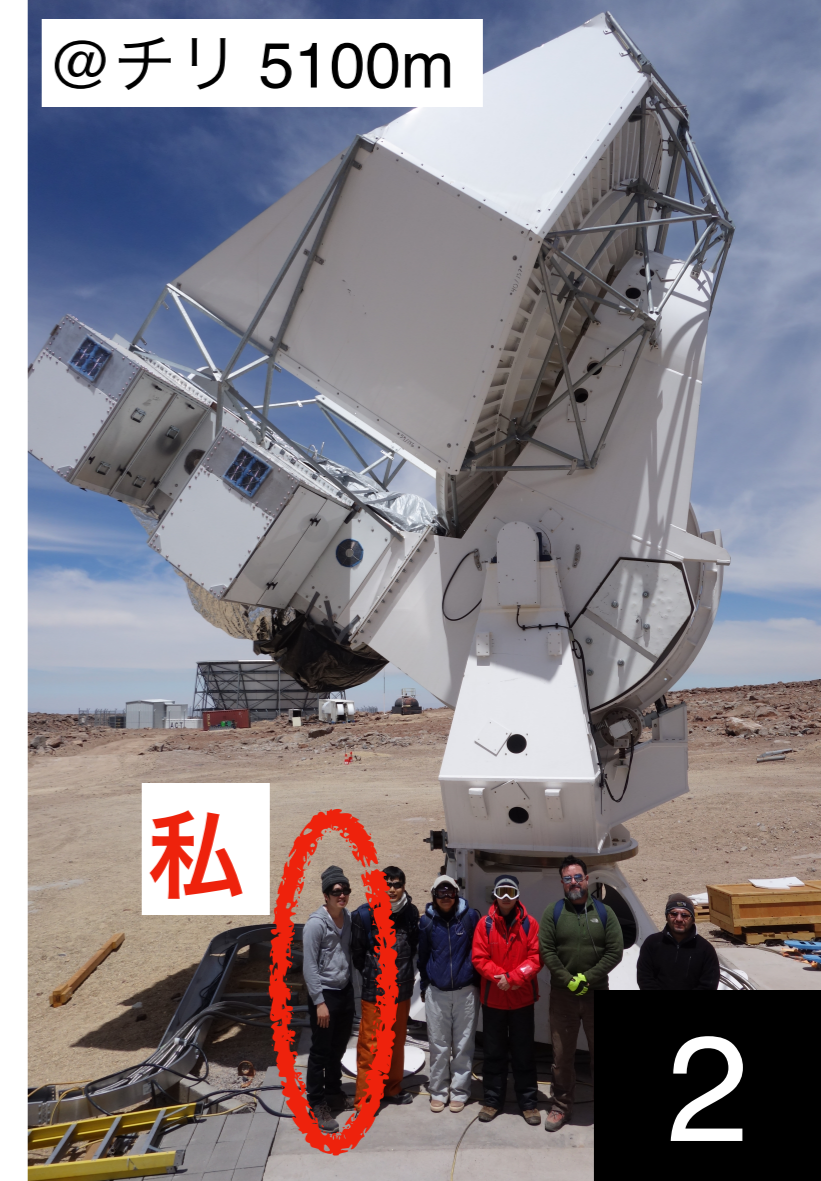
## やっている実験

- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測実験
  - Simons Observatory 実験 @ チリ
  - 主に望遠鏡の開発
- ミリ波を用いたダークマター探索実験  
「DOSUE-RR」

@LHC地下100m



@チリ 5100m



私

2

# 自己紹介: 安達 俊介

## やってきた実験

- LHC-ATLAS 実験 (元 ICEPP)
  - SUSY 粒子の探索

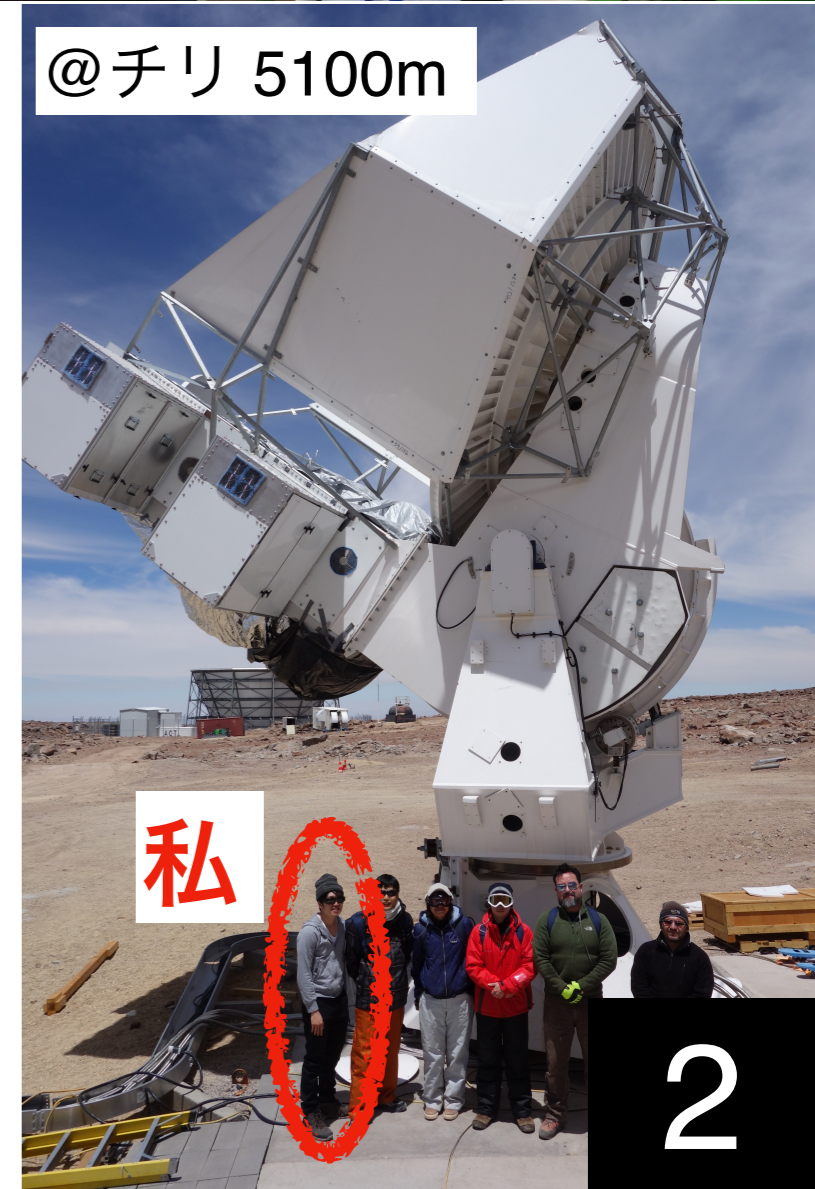
## やっている実験

- 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測実験
  - Simons Observatory 実験 @ チリ
  - 主に望遠鏡の開発
- ミリ波を用いたダークマター探索実験

「DOSUE-RR」

お友達作り  
に来ました

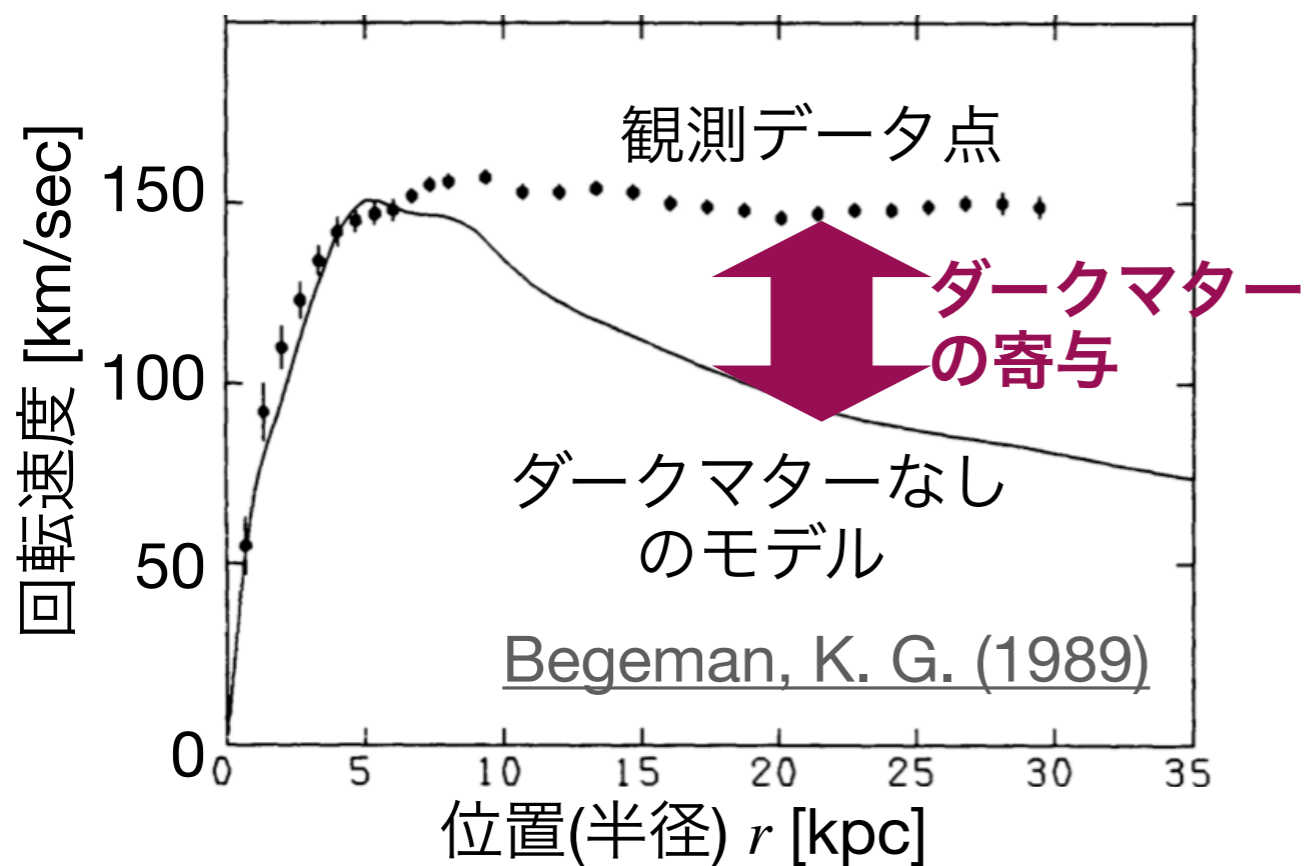
人材探し



# ダークマター

重力相互作用をする(質量がある)が他の反応をほぼしない  
ダークマターの重力の寄与は宇宙観測でよく測られている。。

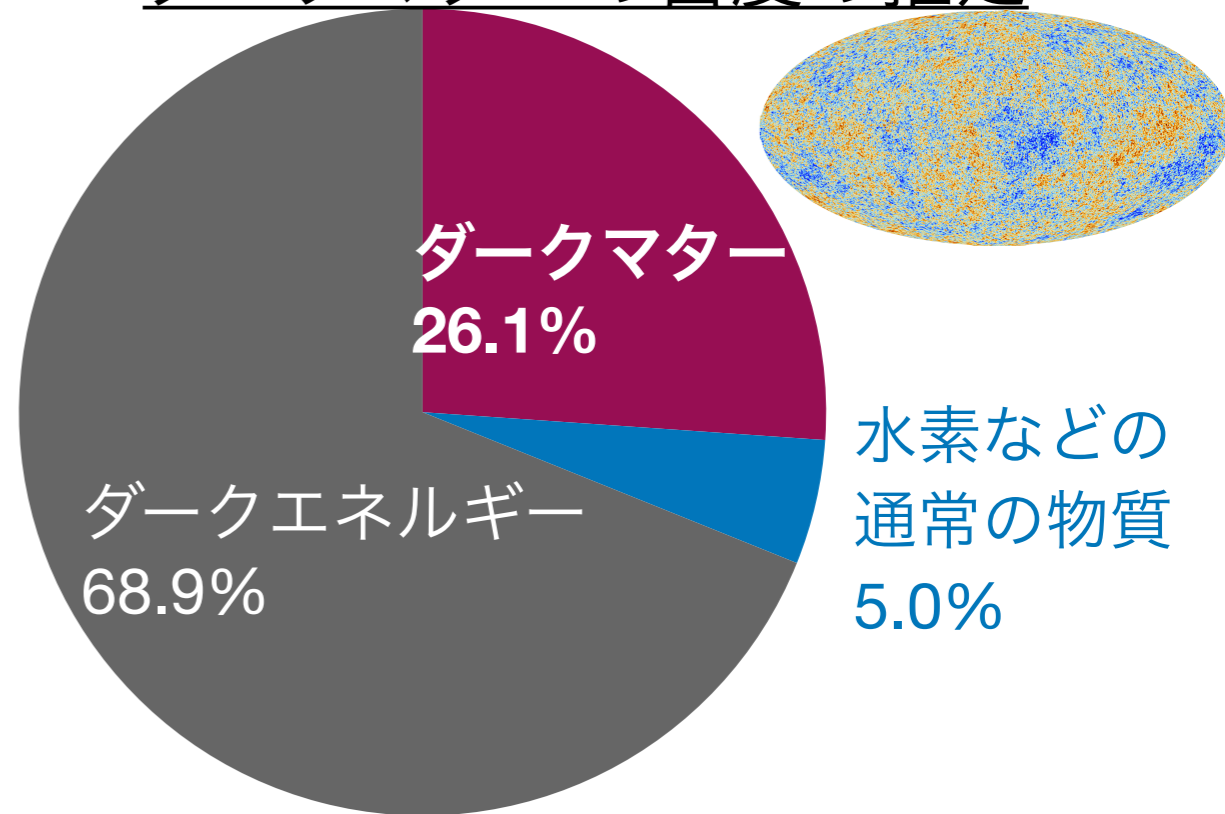
## 銀河の回転曲線



銀河に局在!

## 宇宙背景放射(CMB)の観測による

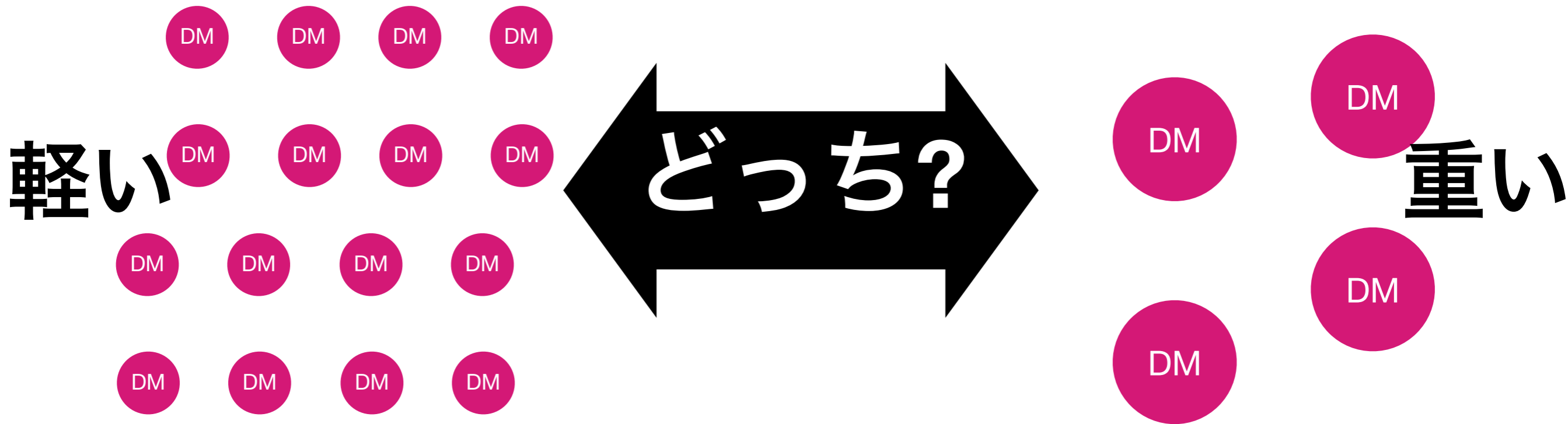
### ダークマターの密度の推定



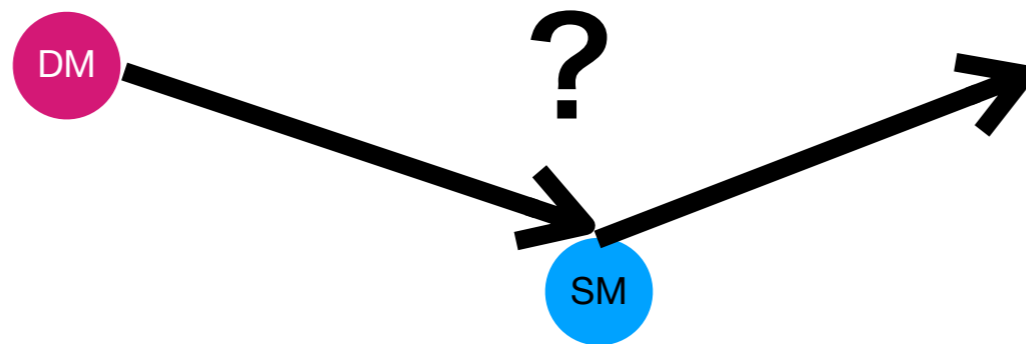
ダークマターの密度も既知!

# ダークマターの謎

- 1個の質量  $m$  は不明 ( $\Leftrightarrow$  数密度は不明)

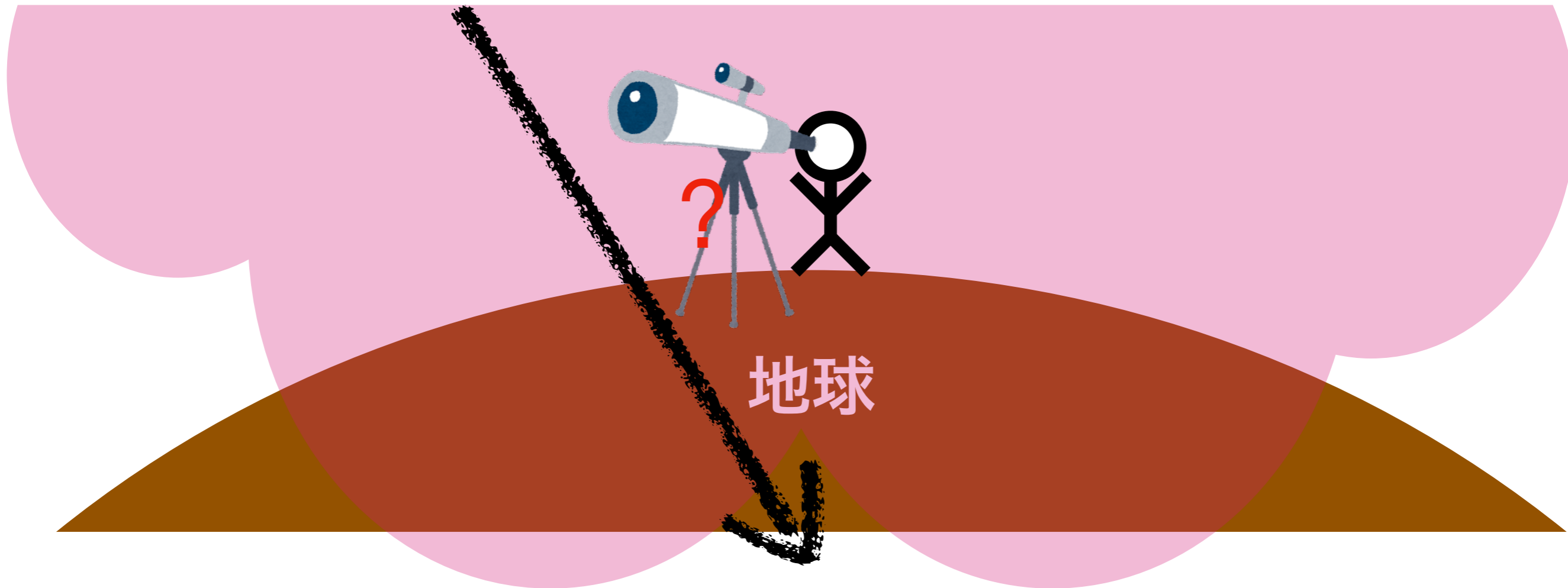


- 重力以外での相互作用をするのか？ その大きさは？



素粒子物理で重要なパラメータが不明

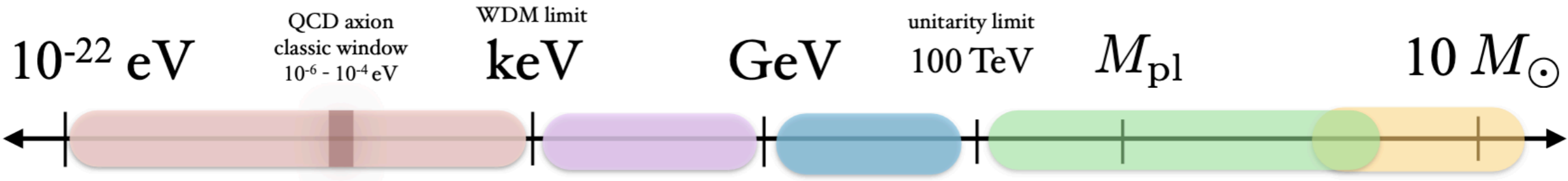
# 我々はダークマターの中を通過している



どうにか検出してその性質を知りたい

- 質量
- 他の物質との反応方法

# 超幅広いダークマターの質量スケール



“Ultralight” DM  
non-thermal  
bosonic fields

“Light” DM  
dark sectors  
sterile  $\nu$   
can be thermal

WIMP

Composite DM  
(Q-balls, nuggets, etc)

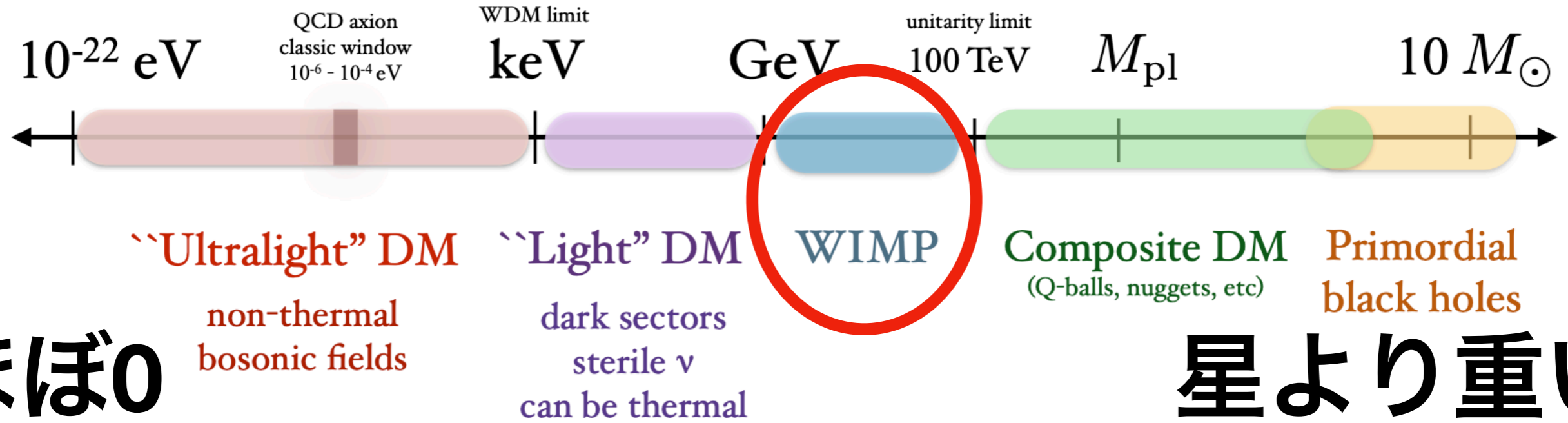
Primordial  
black holes

ほぼ0

星より重い

XENON

# 超幅広いダークマターの質量スケール

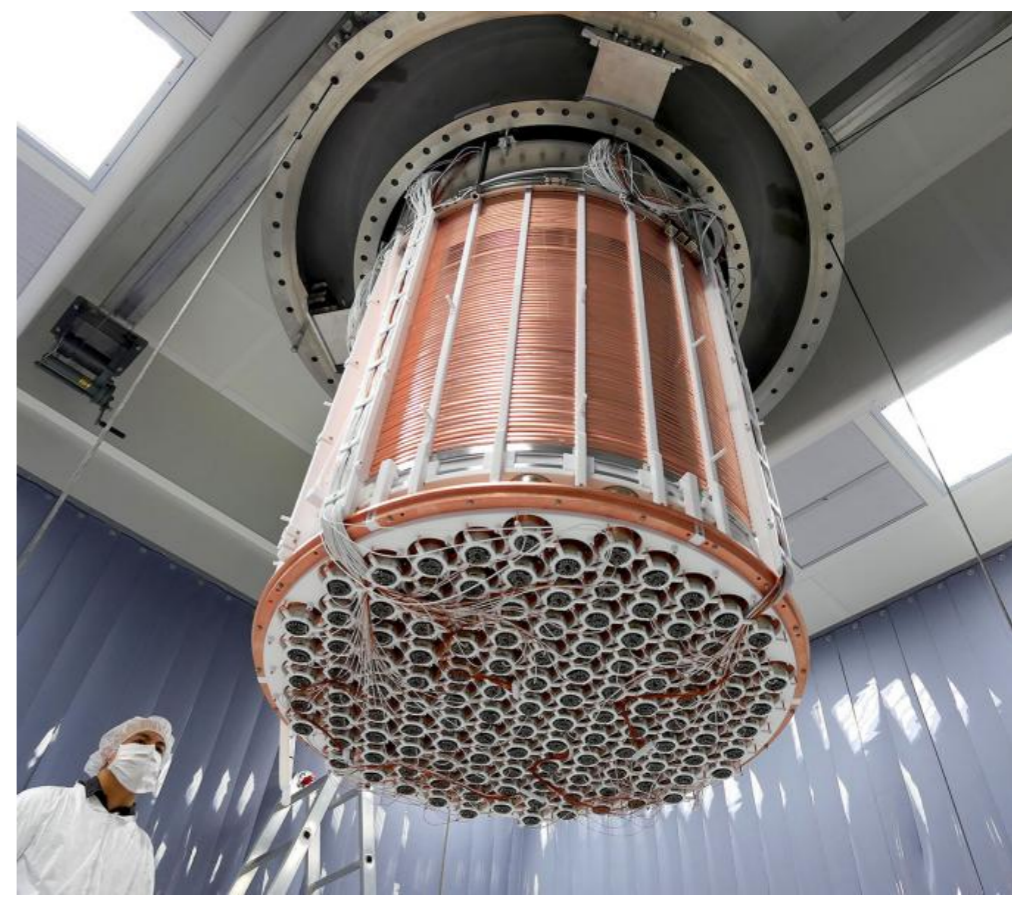


ほぼ0

星より重い

いわゆるDM直接探索は  
 “WIMP”で O(GeV)  
 未だ発見ならず

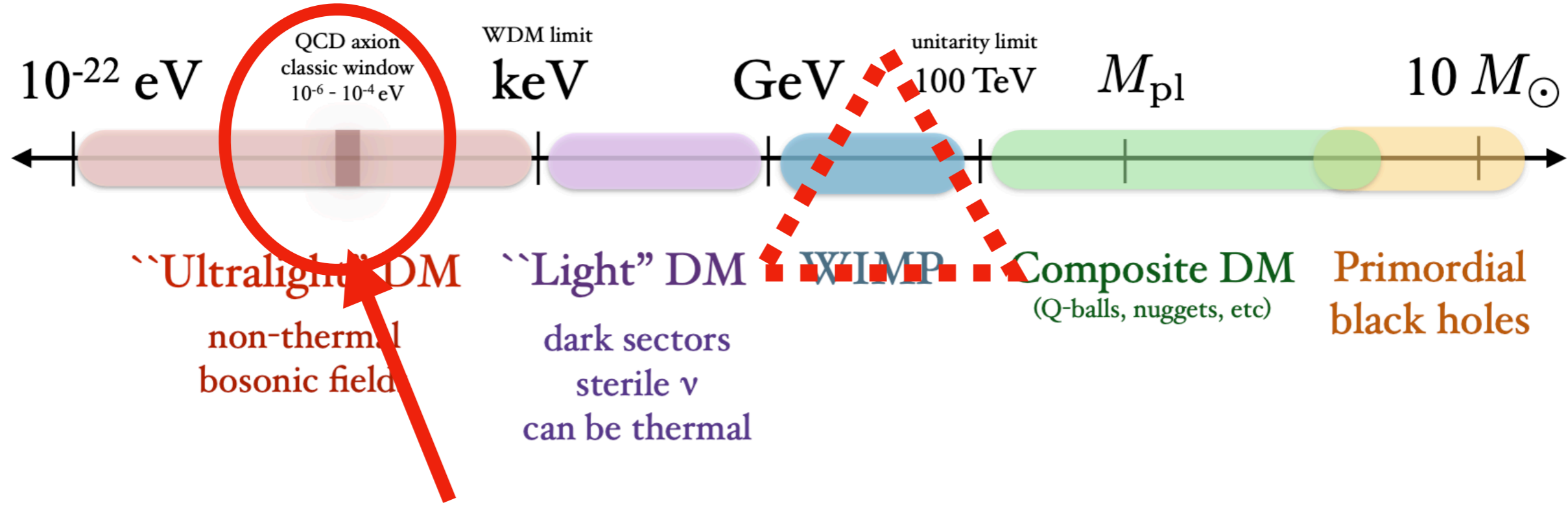
他のスケールにも  
 目を向けては？



XENON



# 超幅広いダークマターの質量スケール



最近注目を集めている

超軽量DM  
 $\mu\text{eV} - \text{meV}$

ダークフォトン  
 アクシオン  
 Axion-Like Particle..

**未開拓なスケール**

注目するダークマター候補:

# 超軽量なダークフォトン

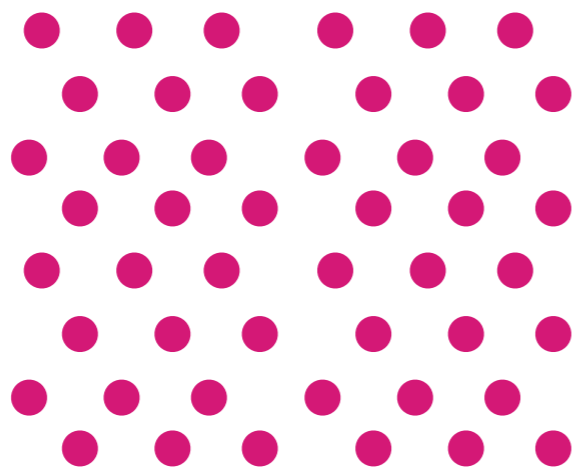
- ・ 光とのみわずかに反応・転換する未発見粒子
- ・ 重要なパラメータ  $\left\{ \begin{array}{l} \cdot m: \text{質量} \\ \cdot \chi: \text{ダークフォトンと実光子の「結合定数」} \end{array} \right.$

ダークフォトン

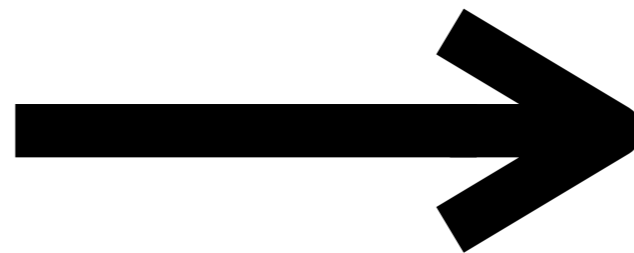
質量  $m \approx \mu\text{eV} - \text{meV}$

見えないが  
たくさん存在

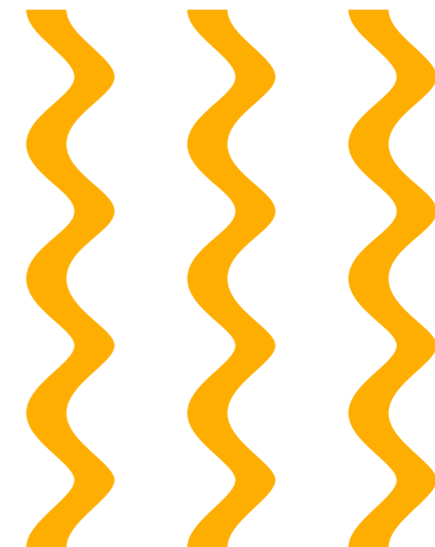
$\sim O(10^{12})$  個/cm<sup>3</sup>



低い効率  $\chi^2$  で転換



実光子



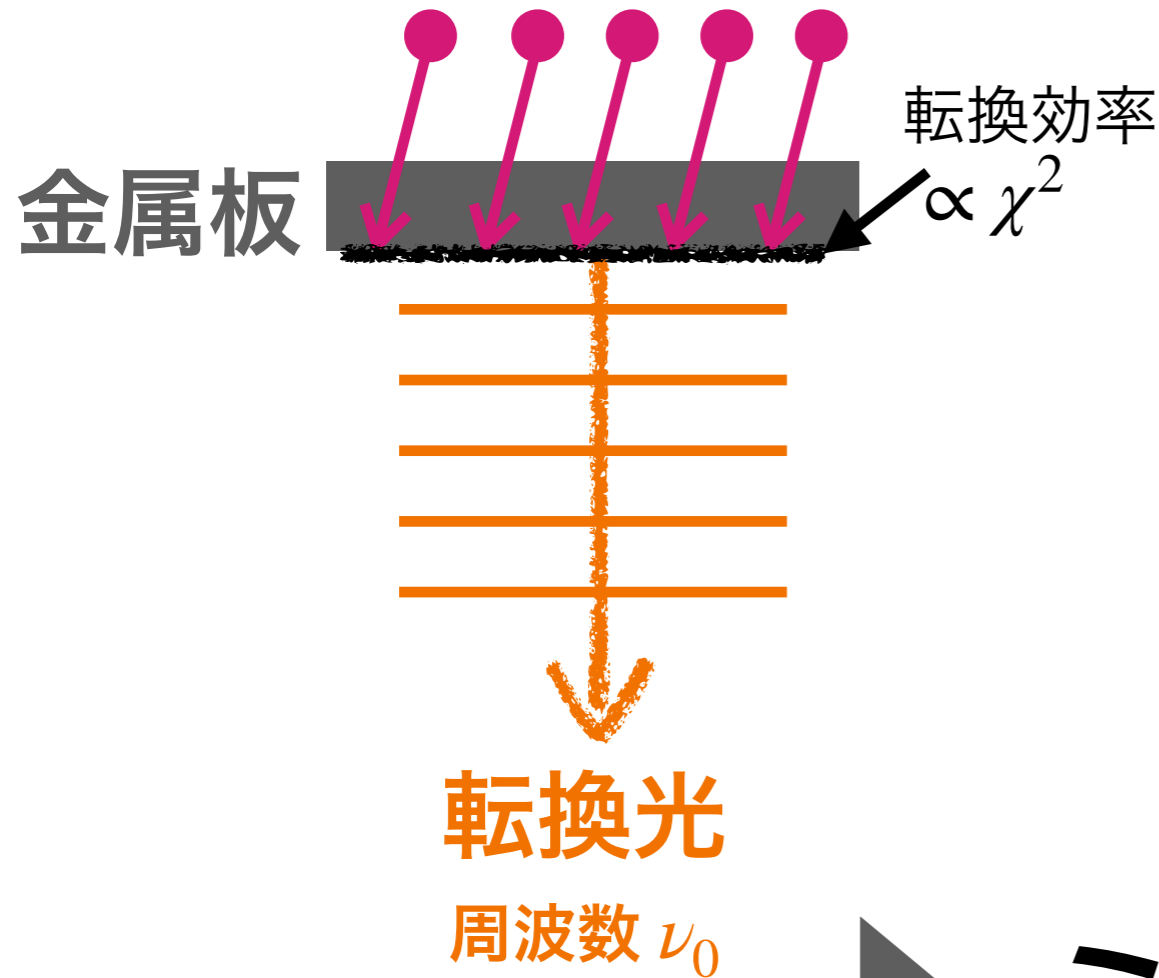
これを  
観測する!

# ダークフォトンの光への転換

ダークフォトン

質量  $m$

光との反応によって金属表面で  
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  $\nu_0$  に一対一対応

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

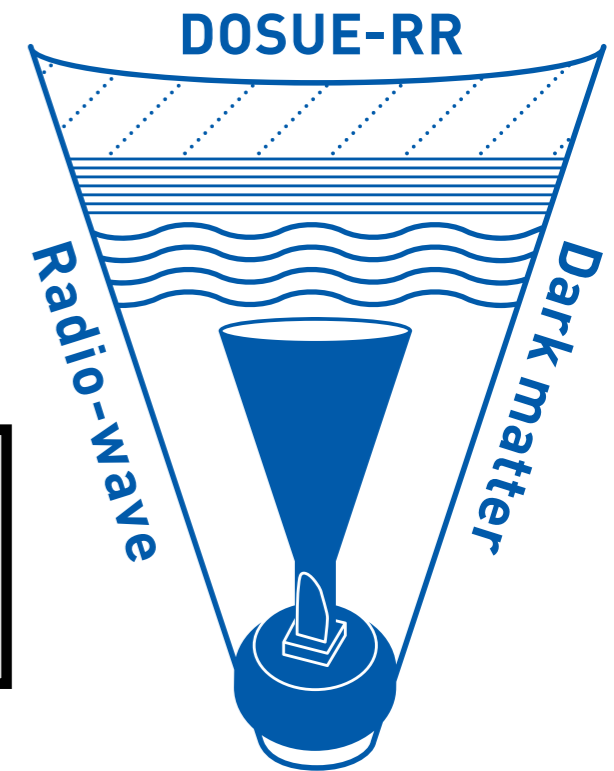
ミリ波帯域(10—300 GHz)  
の光

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

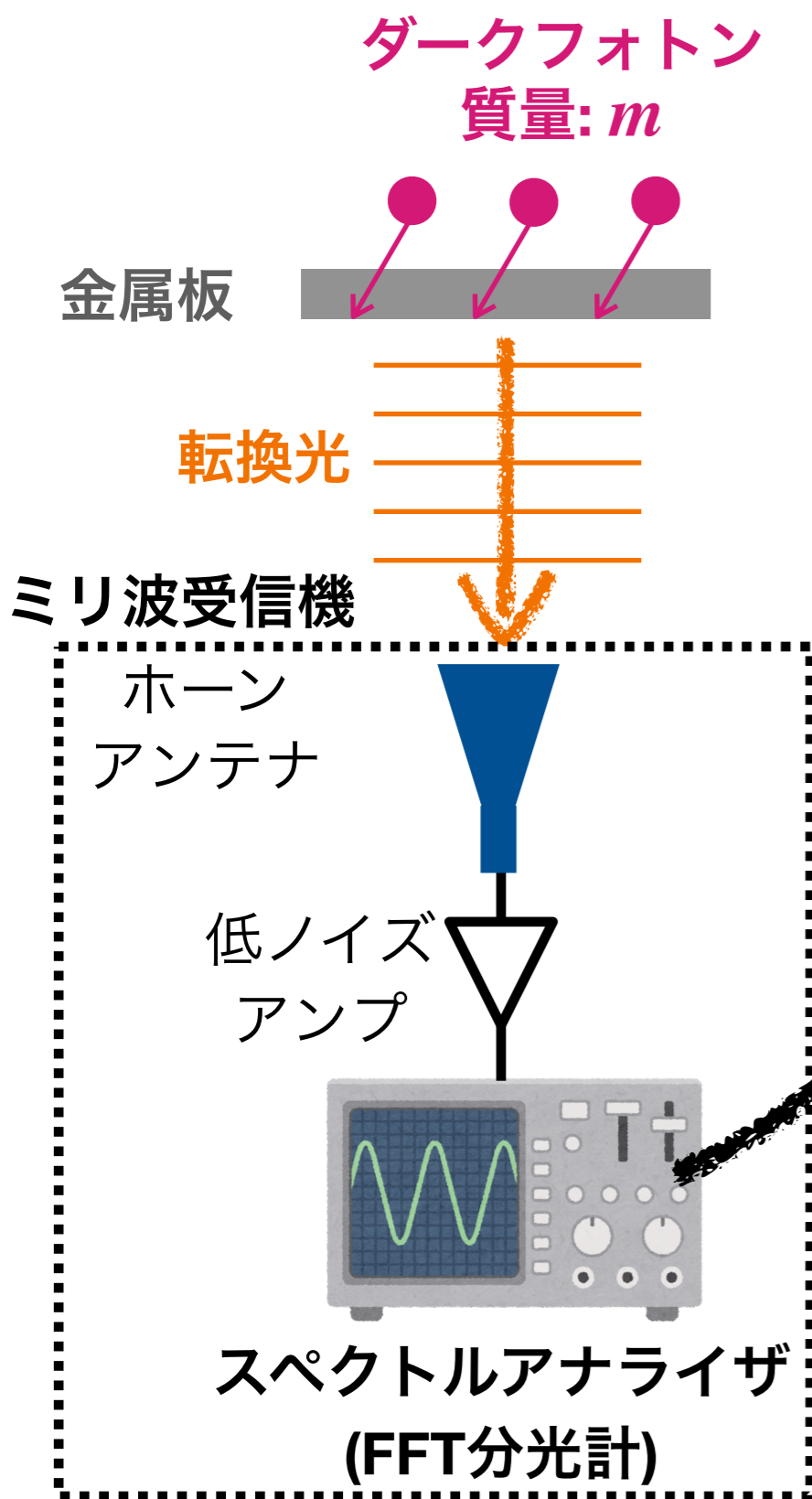
# DOSUE-RR 実験

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

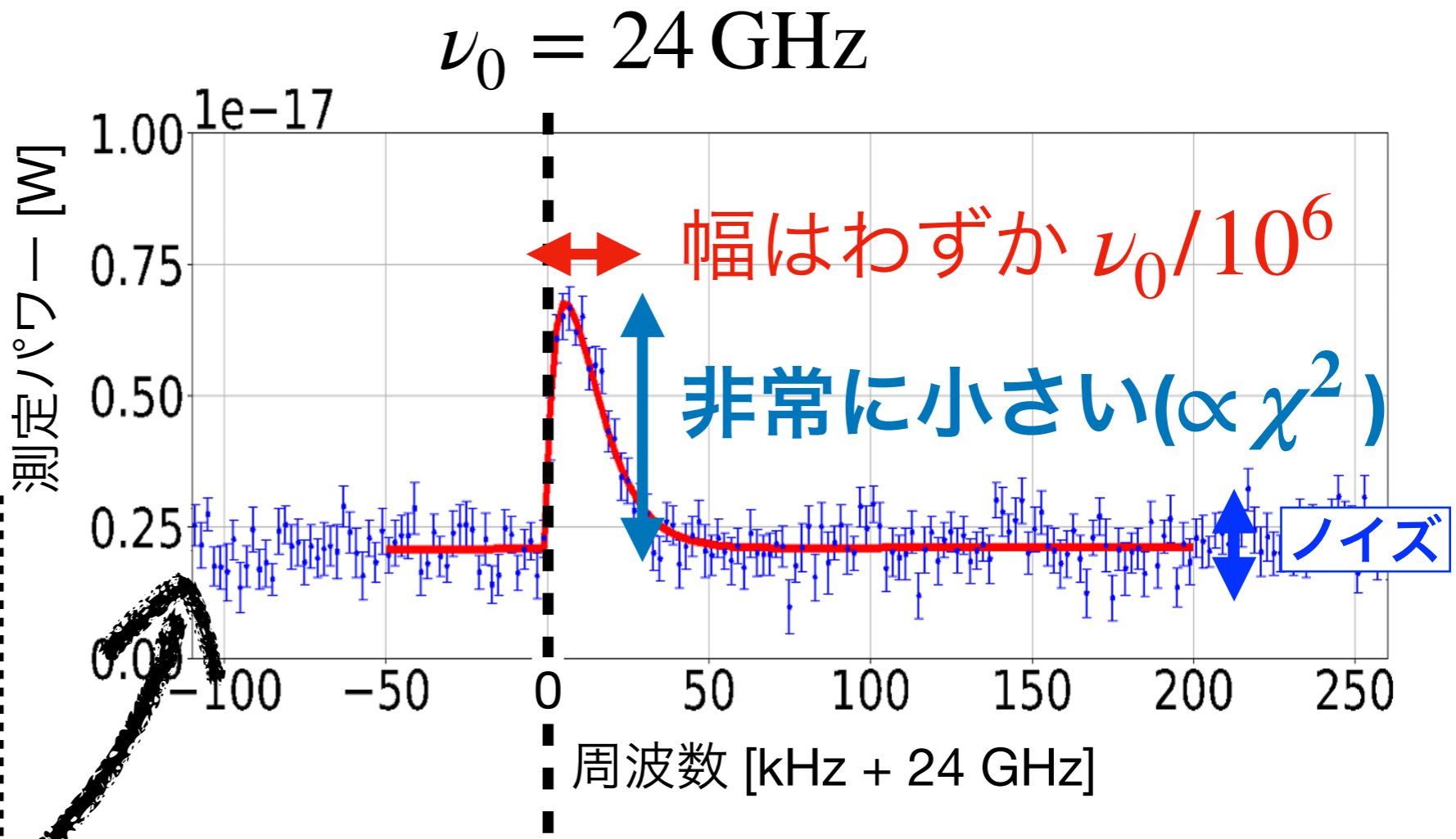


2020 年から開始

# 転換光の検出原理



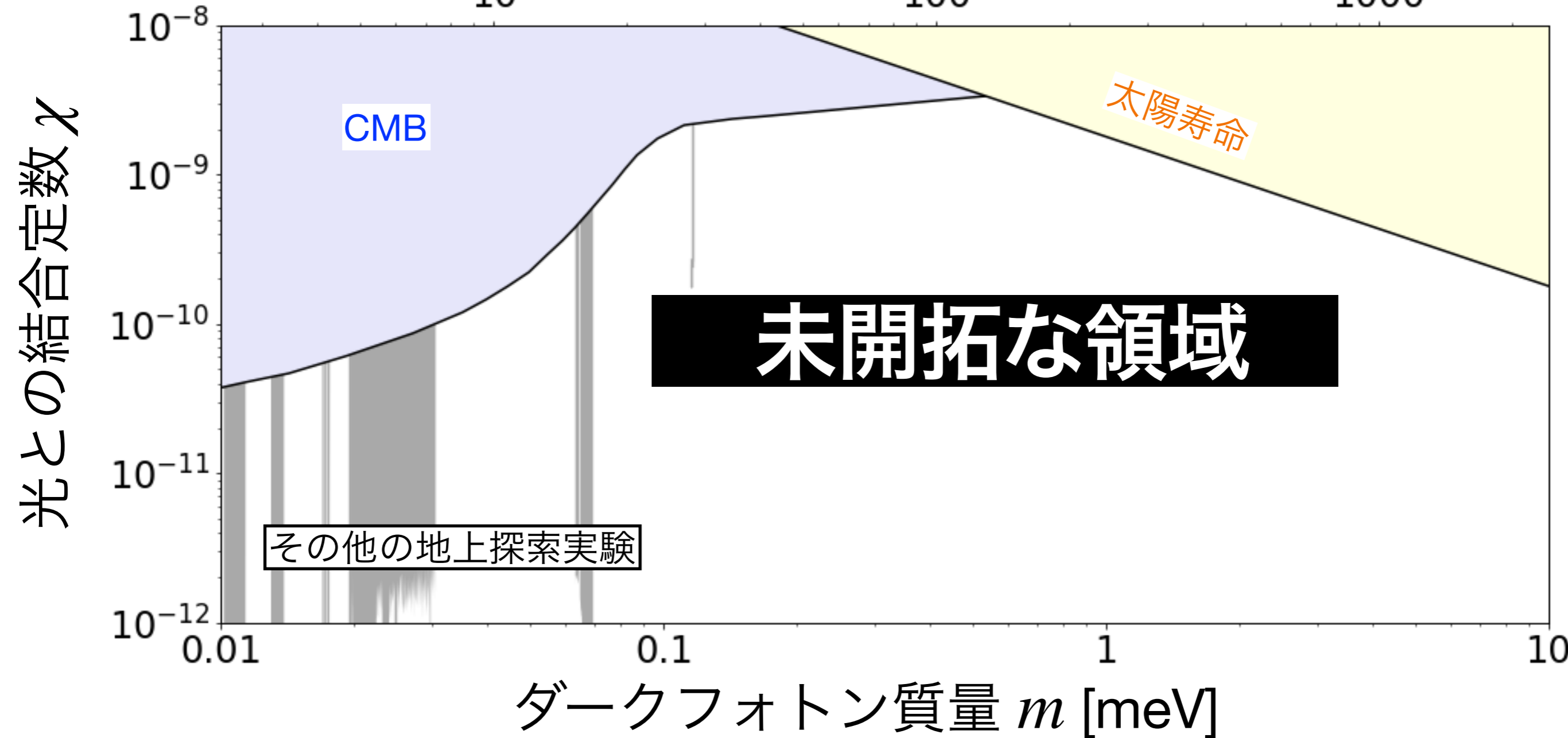
信号の周波数スペクトル @  $m = 100 \mu\text{eV}$



- 信号の幅はダークマターの運動量の分布を反映
- 形はダークフォトンの速度分布がマクスウェル・ボルツマン分布であるとして定まる

# ダークフォトンに対する制限 in 2020

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



# ダークフォトンに対する制限 in 2020

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]

10

100

1000

光との結合定数  $\chi$

$10^{-8}$

$10^{-9}$

$10^{-10}$

$10^{-11}$

$10^{-12}$

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  $m$  [meV]

0.01

0.1

1

10

# ダークフォトンに対する制限 in 2020

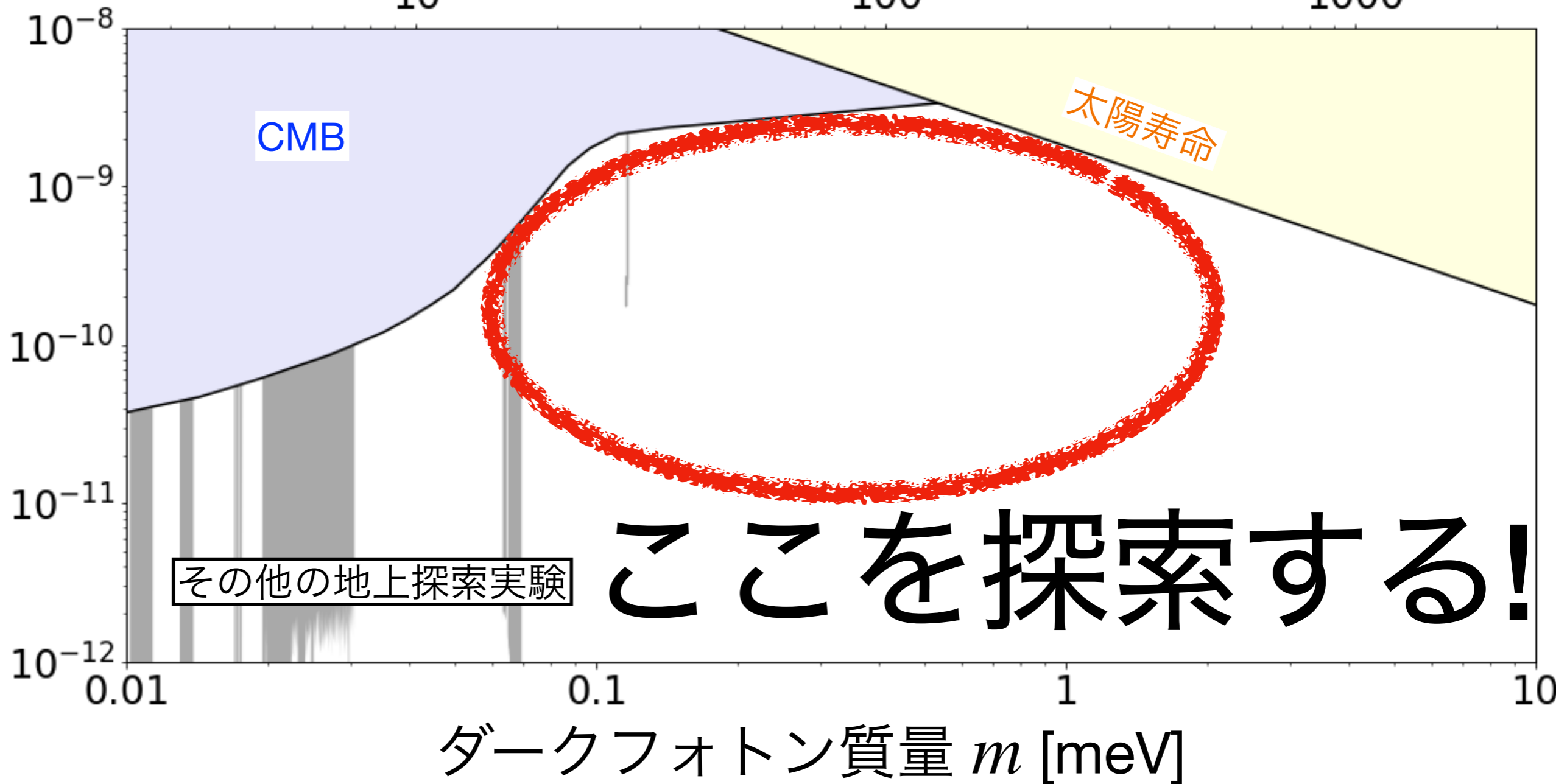
転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]

10

100

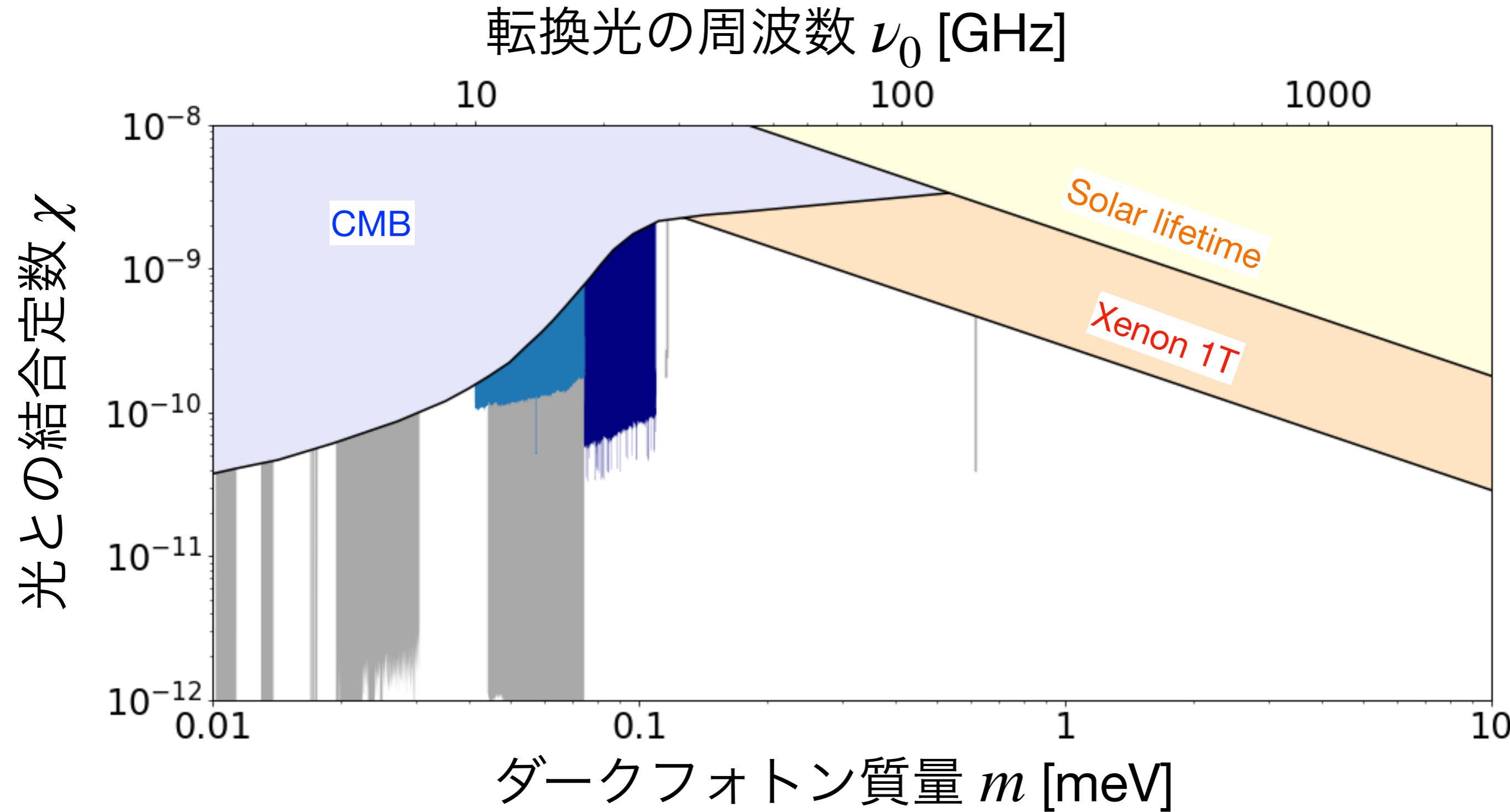
1000

光との結合定数  $\kappa$

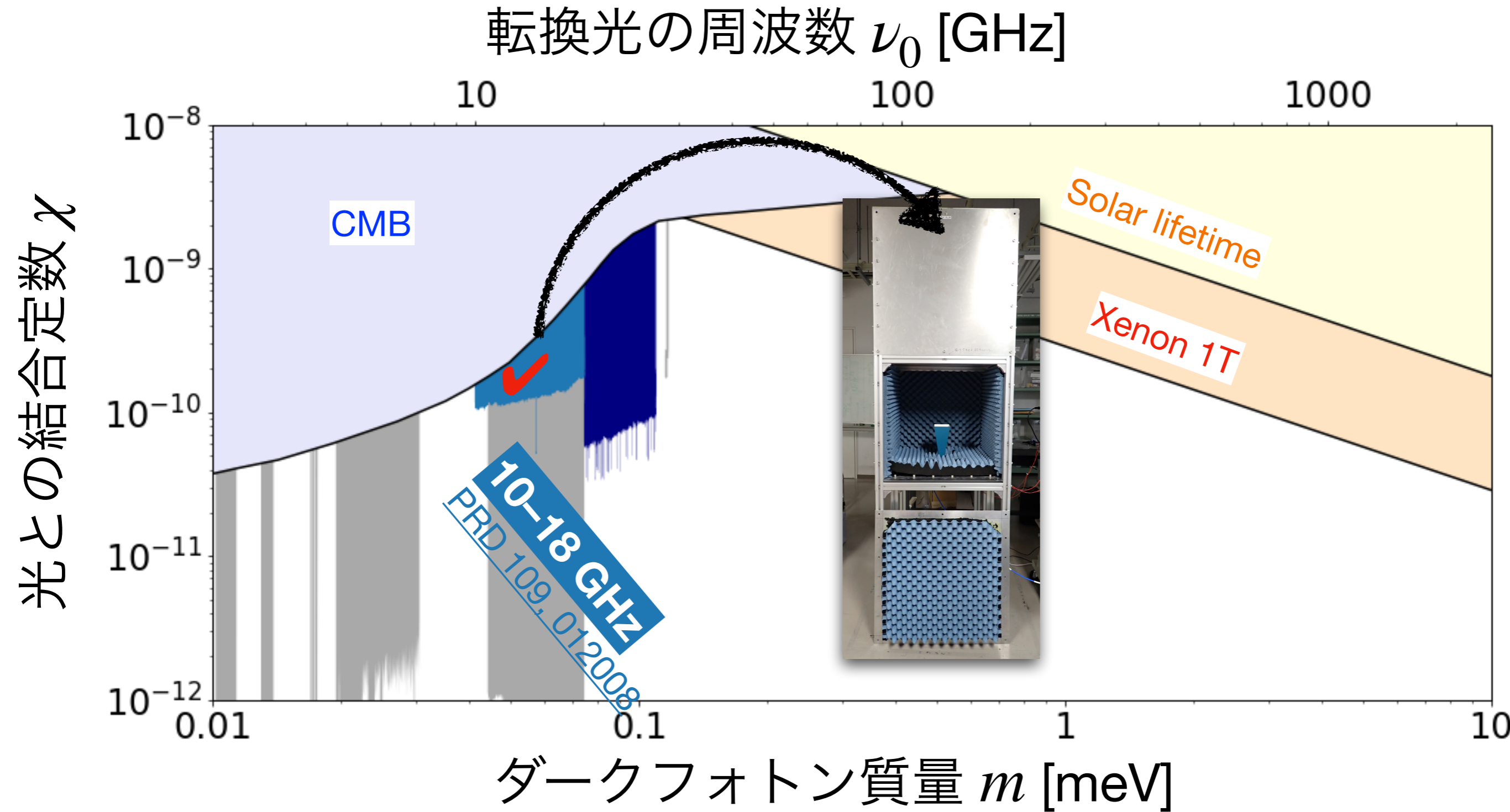




# DOSUEのこれまでの結果

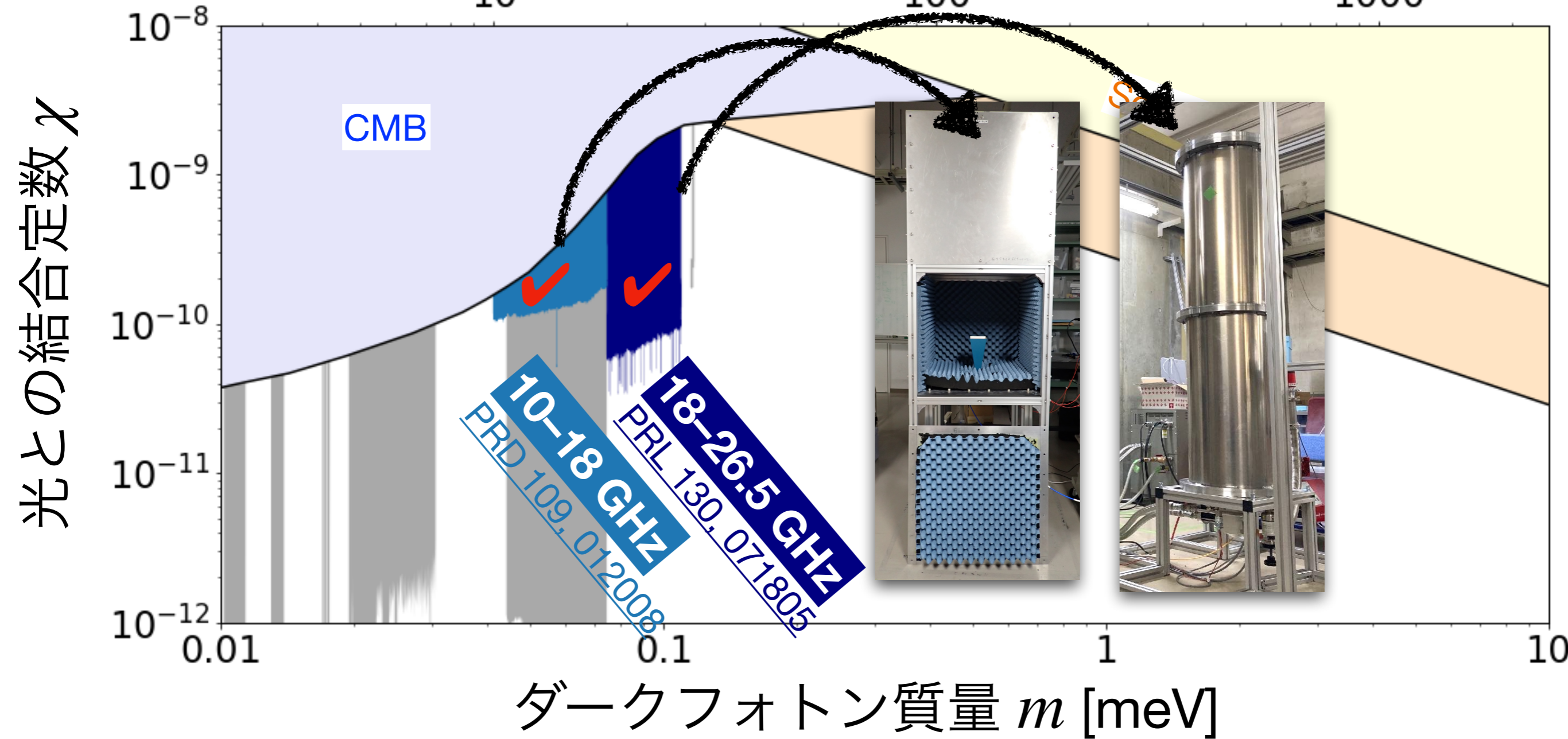


# DOSUEのこれまでの結果

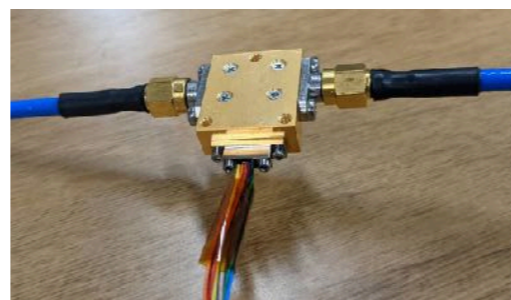
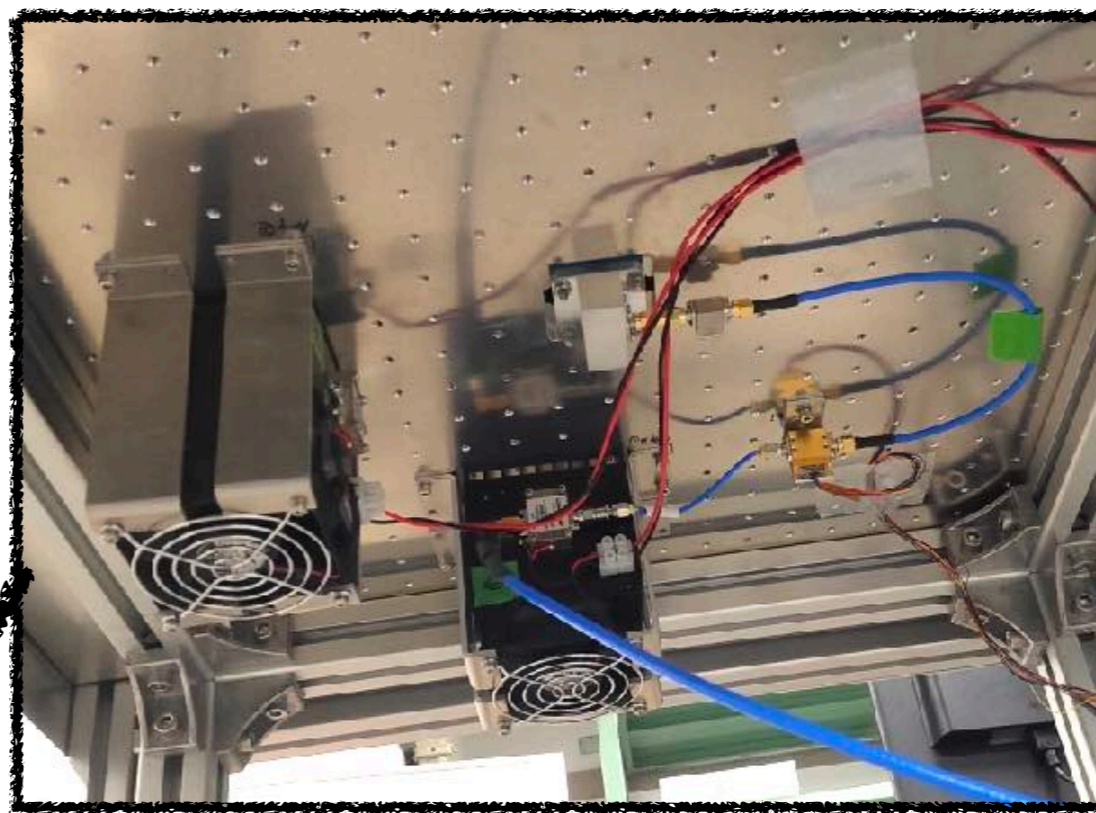
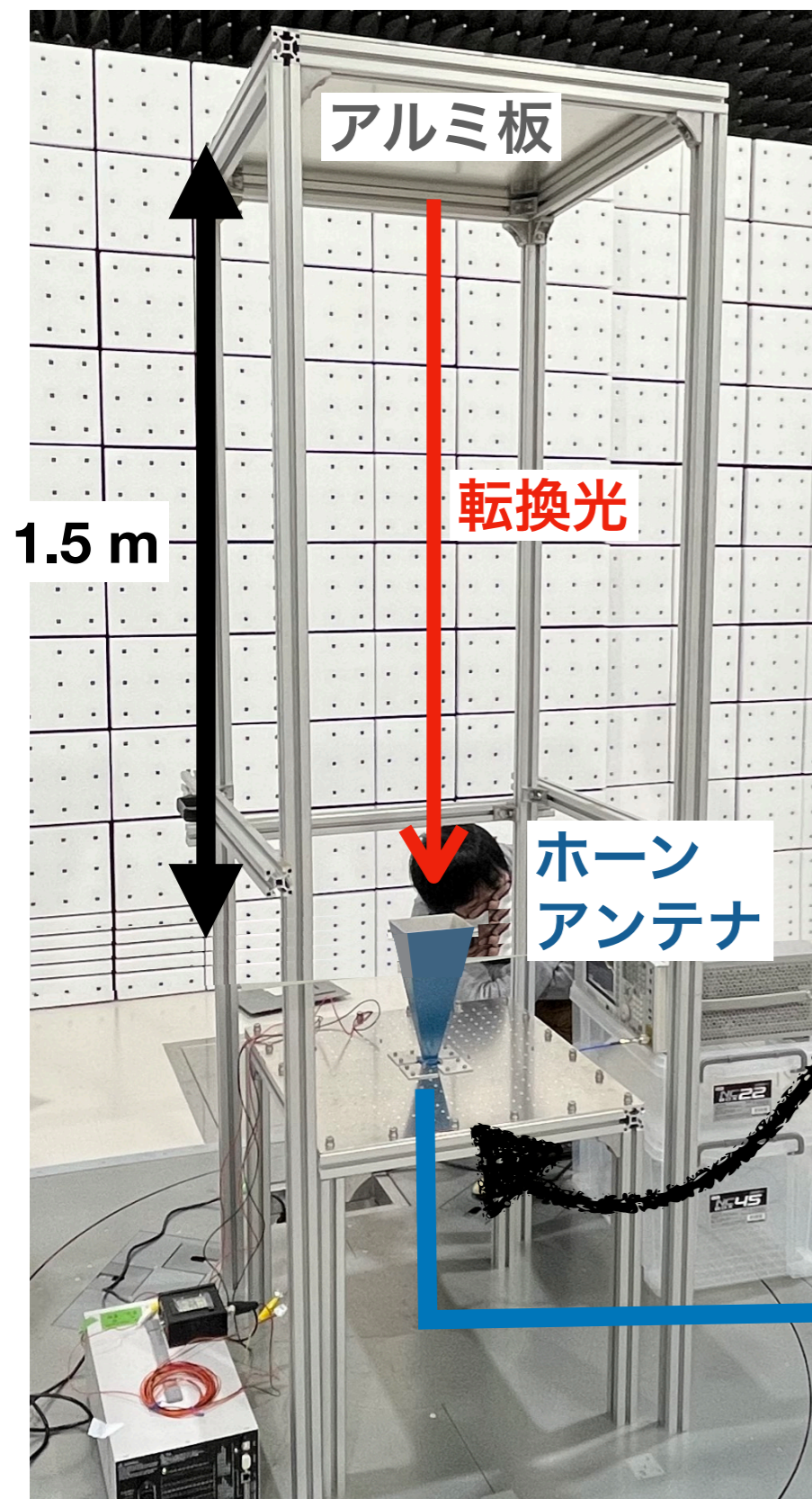


# DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



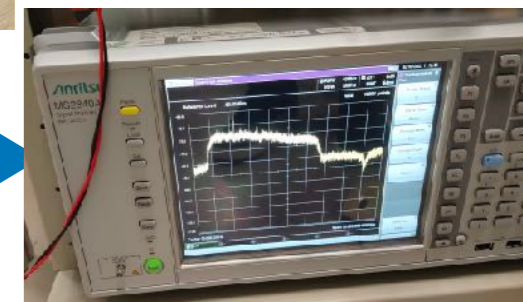
# 10-18 GHz でのセットアップ



スペクトル  
アナライザ  
アンリツ MS2840A

低ノイズアンプ  
+34dB

アンプ  
+38 dB



# 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

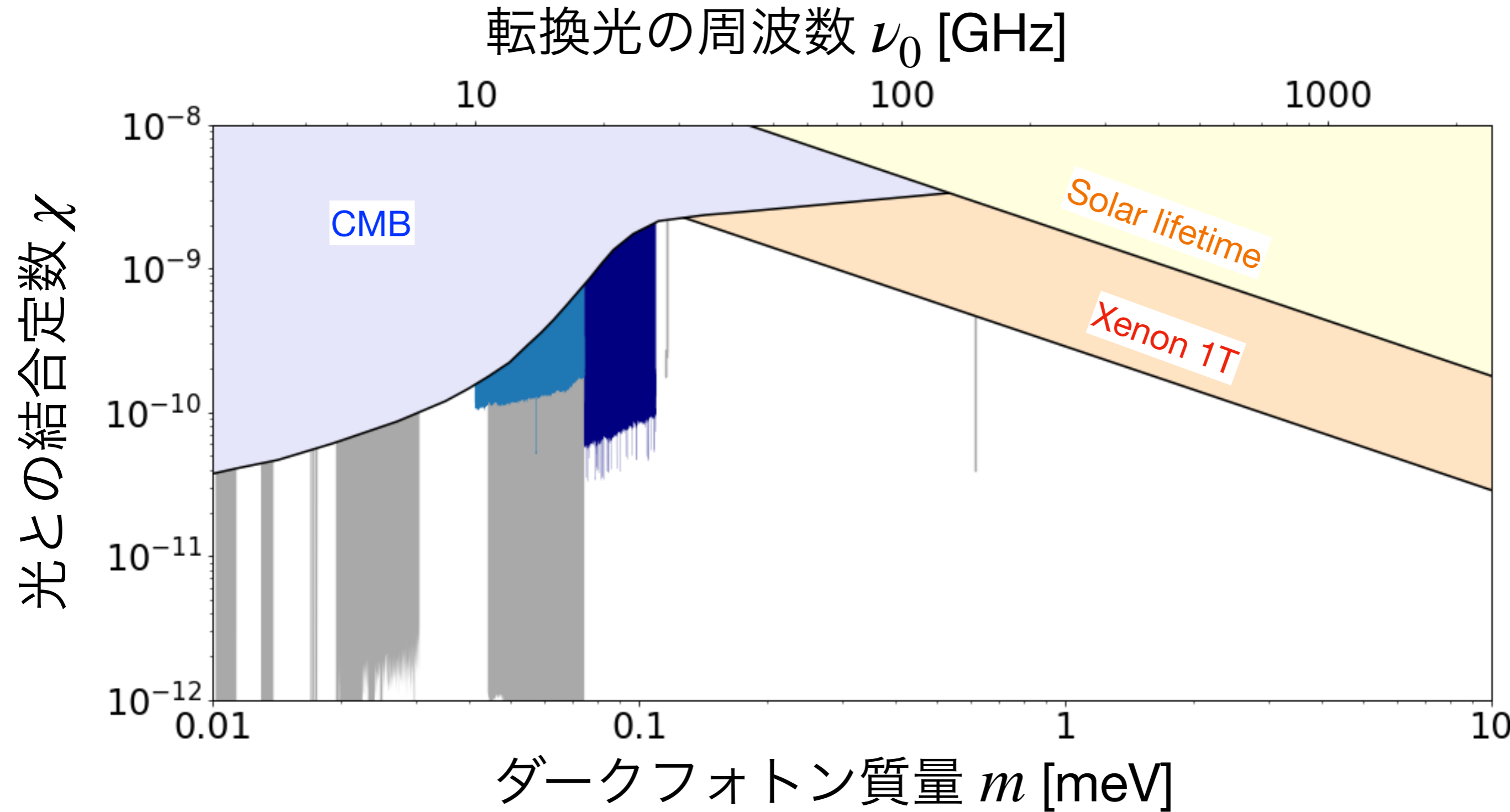
3K槽

ホーン  
アンテナ

冷凍機

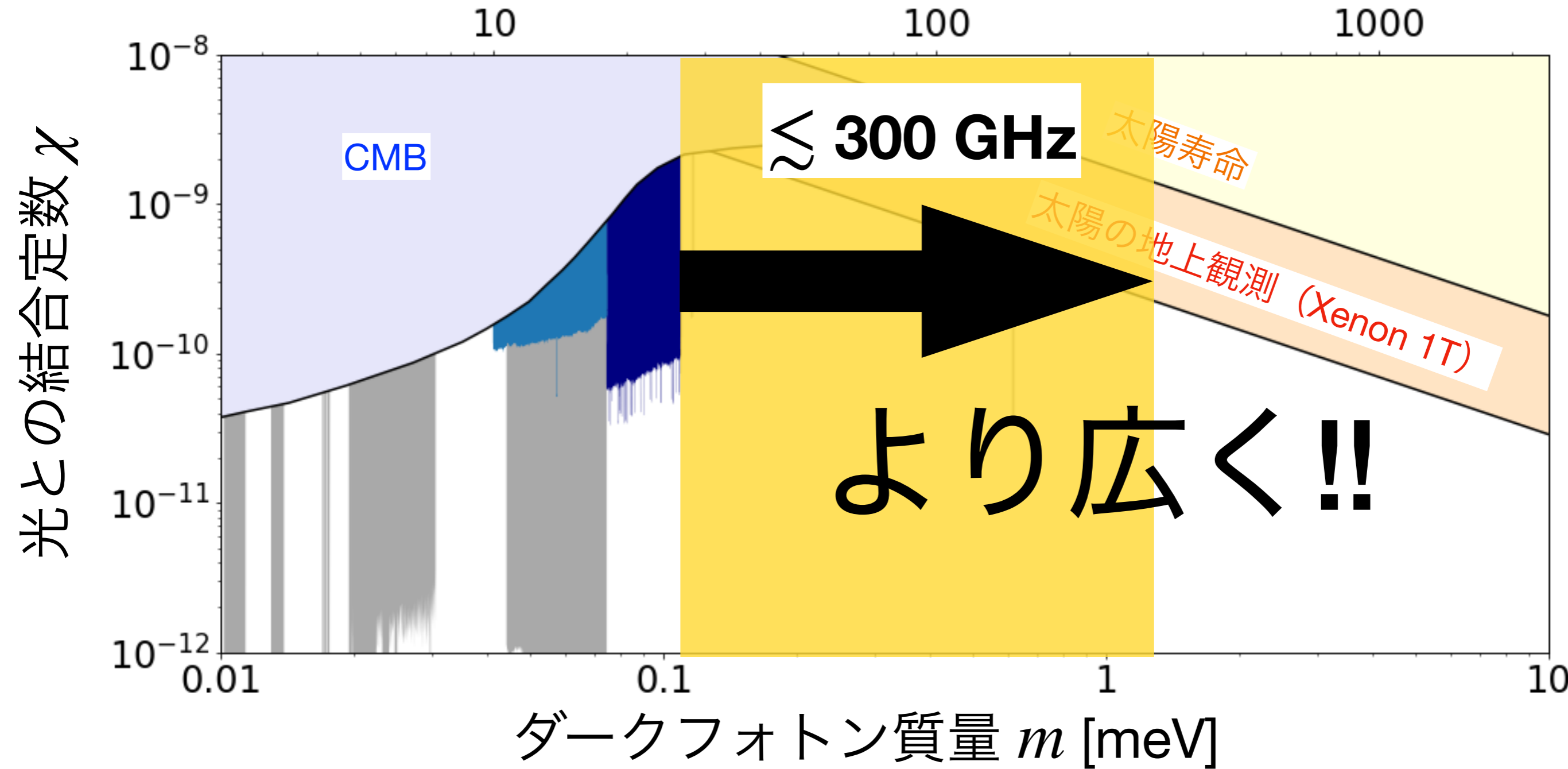
# DOSUE-RR のこれから

# DOSUEのこれまでの結果



# DOSUEのこれまでの結果

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]





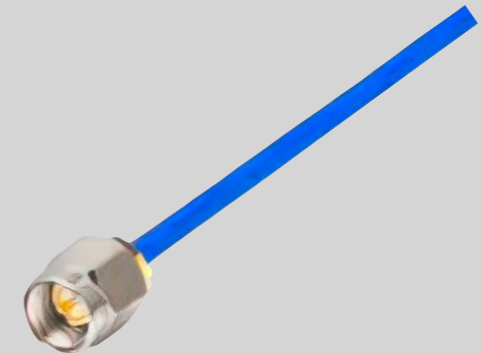
# 周波数帯域の規格

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

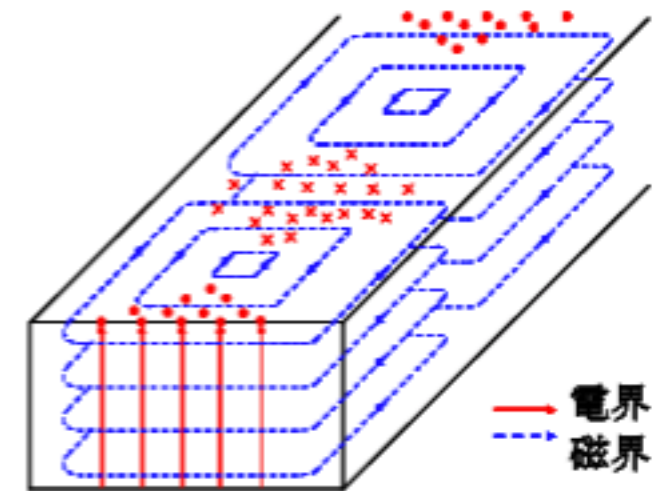
規格	周波数の帯域
<b>J-band</b>	10—18 GHz
<b>K-band</b>	18—26.5 GHz
<b>Q-band</b>	33—50 GHz
<b>V-band</b>	50—75 GHz
<b>W-band</b>	75—110 GHz
<b>D-band</b>	110—170 GHz
<b>Y-band</b>	170—260 GHz

探索済み

同軸ケーブル  
(低周波 < 30 GHz)



導波管  
(高周波 > 30 GHz)

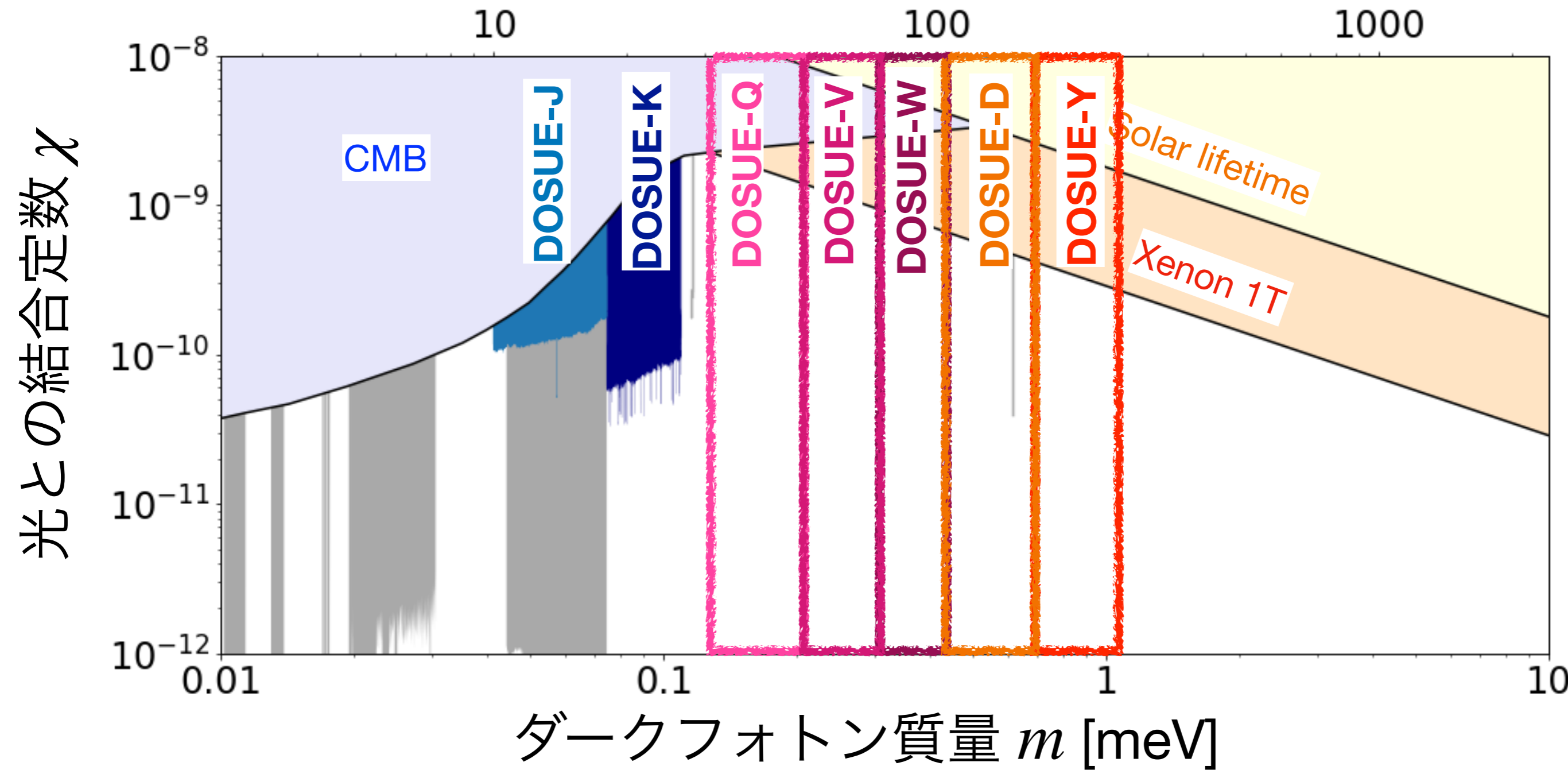


(b) TE<sub>10</sub>モードの電磁界

高周波ほど小さい導波管になる

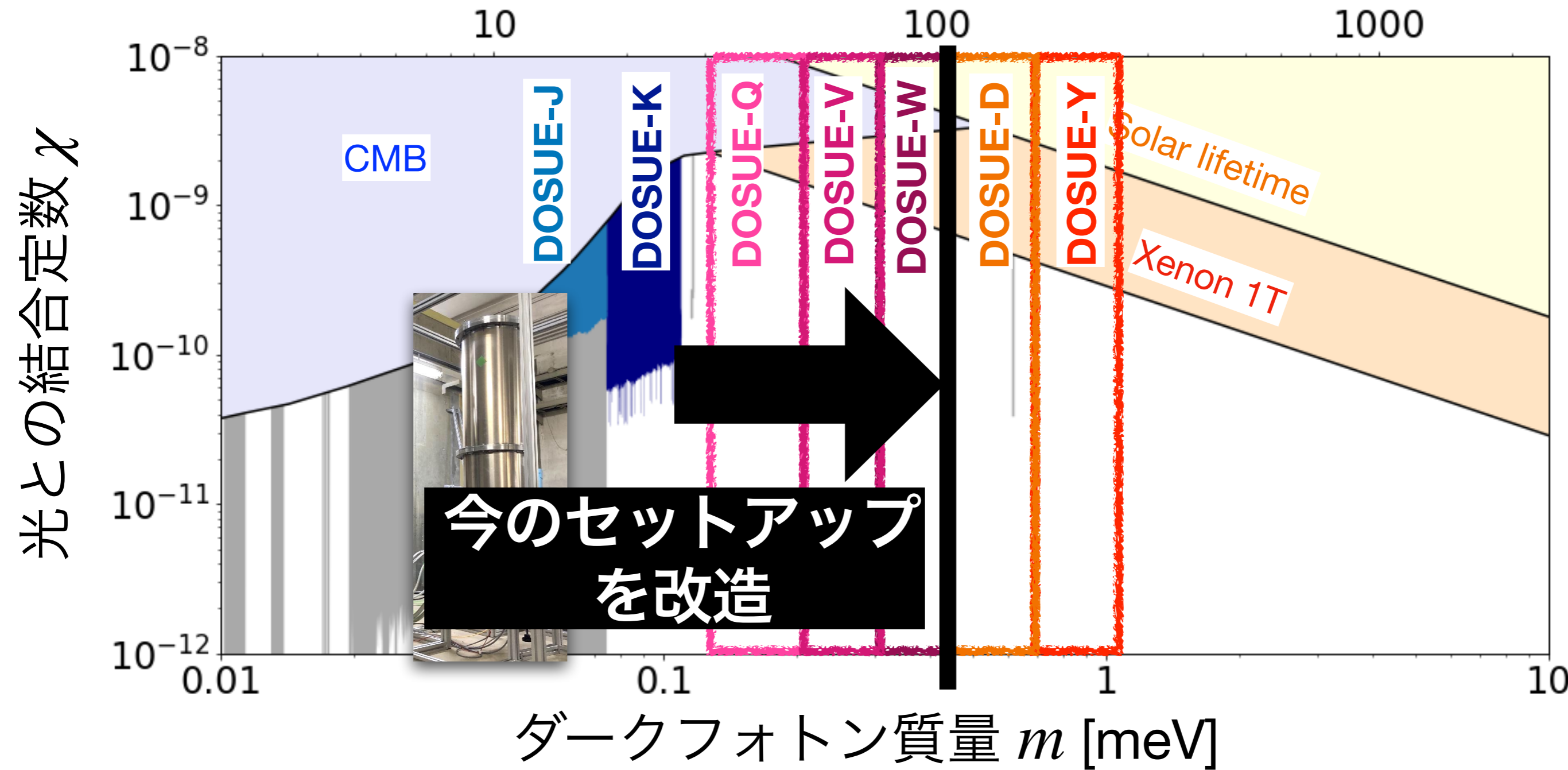
# 周波数を網羅する戦略

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



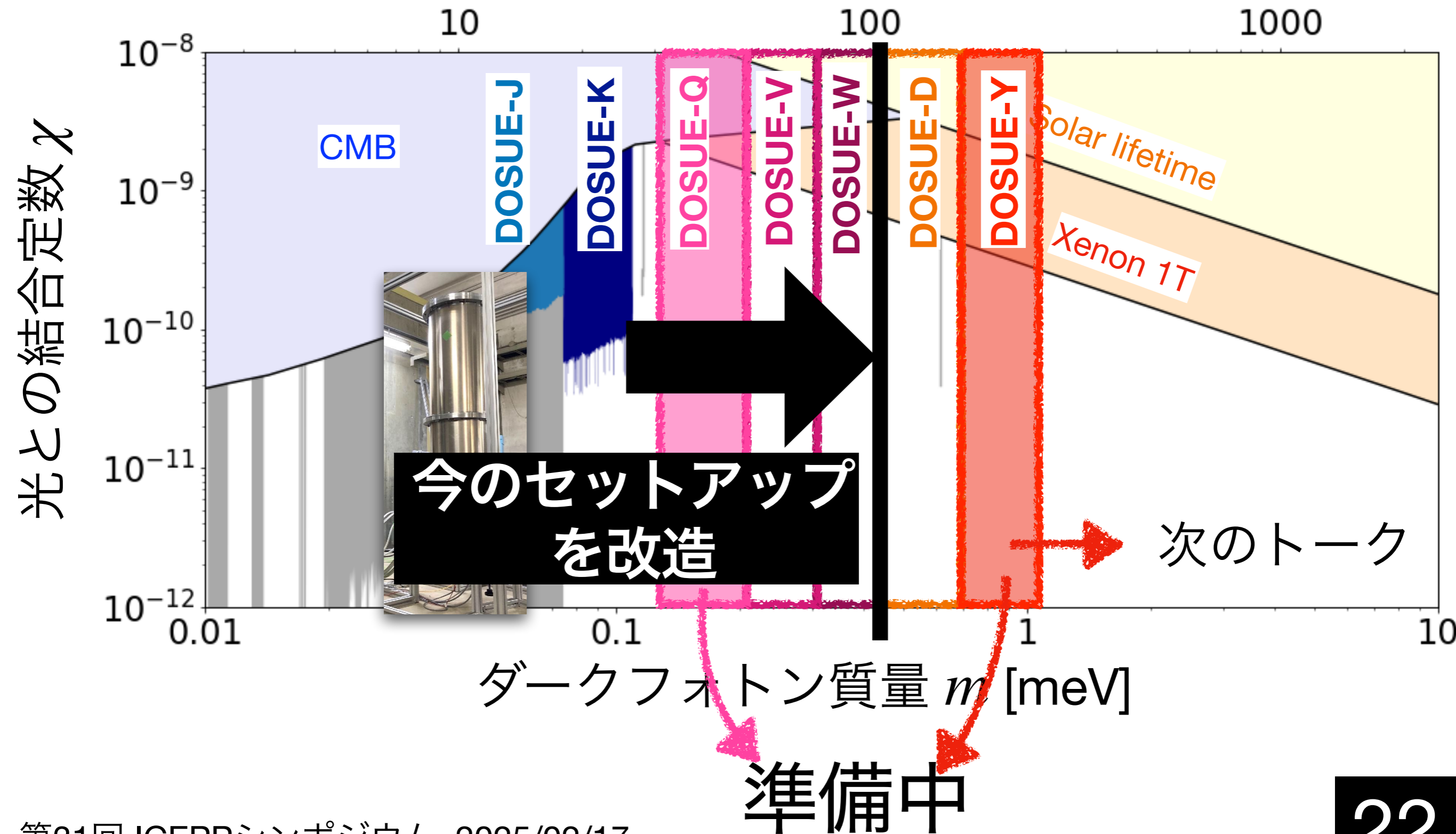
# 周波数を網羅する戦略

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



# 周波数を網羅する戦略

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



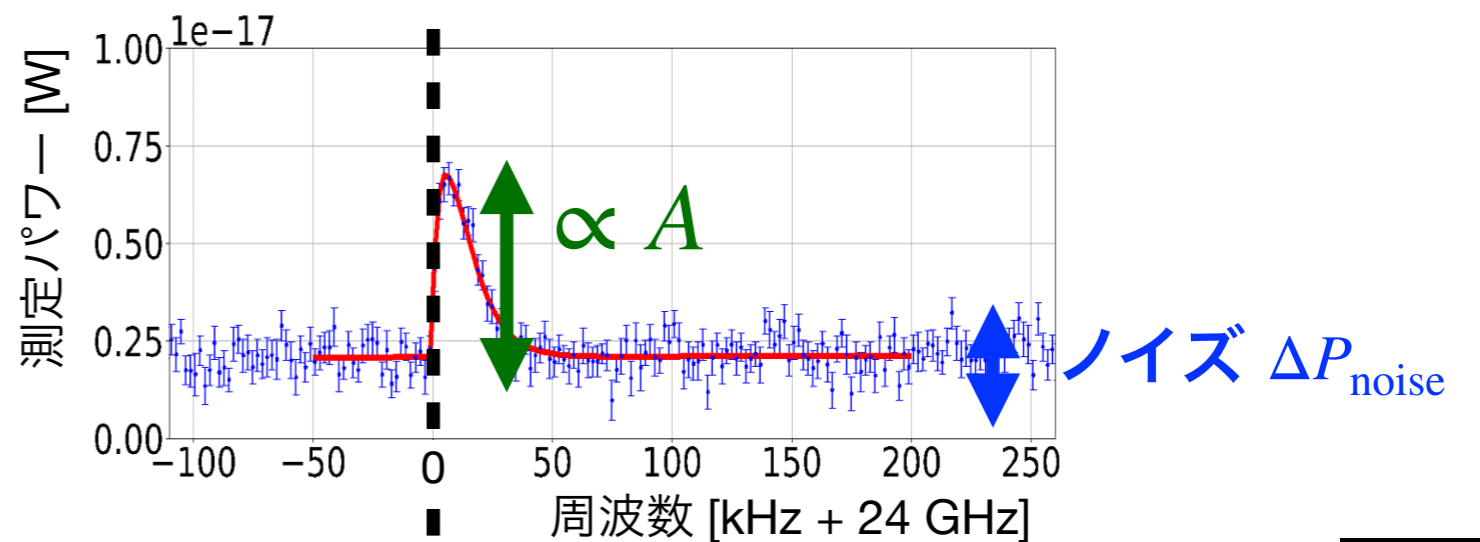
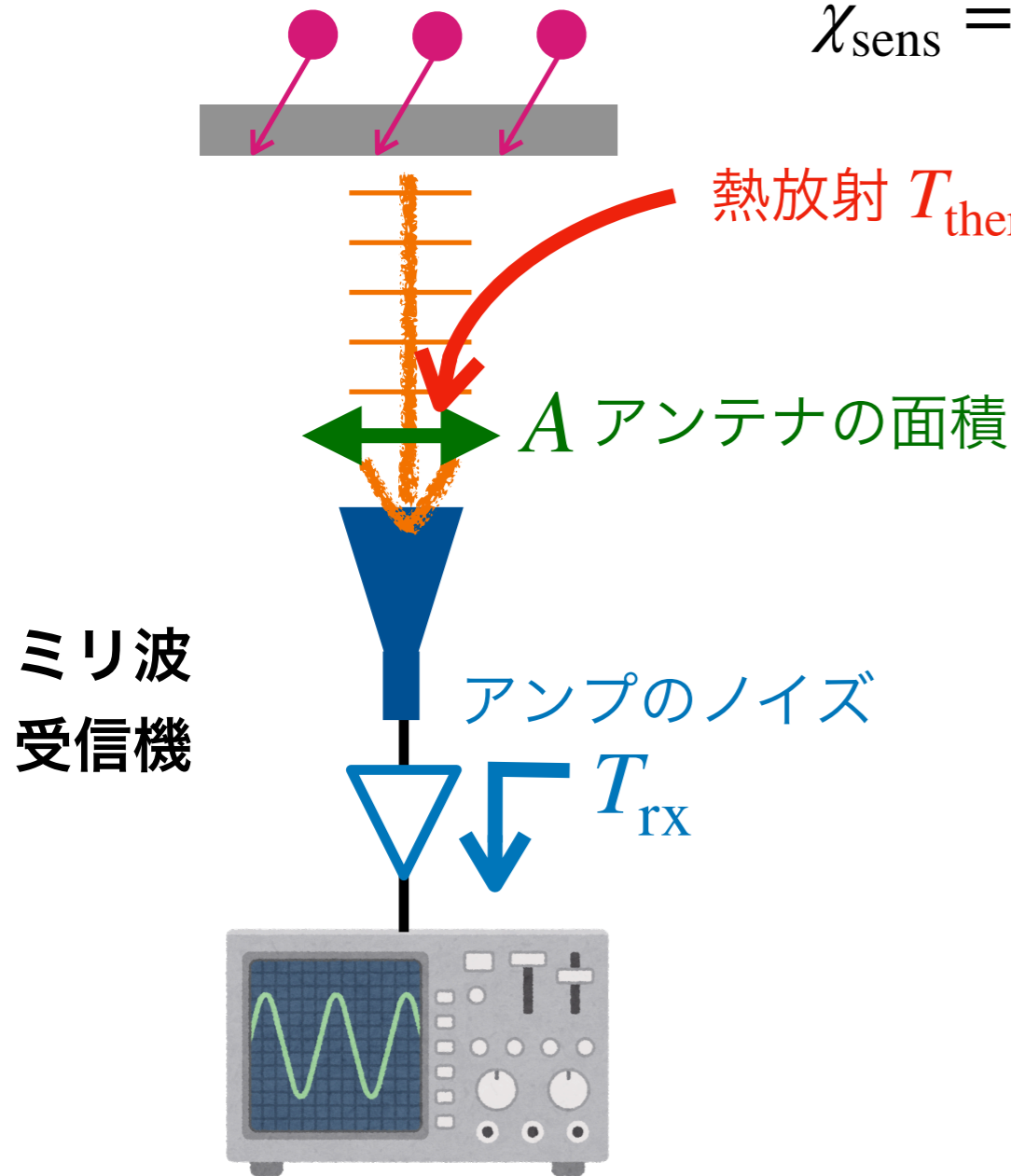
# 実験の感度

$$\chi_{\text{sens}} = 4.5 \times 10^{-14} \left( \frac{\Delta P_{\text{noise}}}{10^{-23} \text{ W}} \frac{1 \text{ m}^2}{A} \frac{0.3 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{\text{DM}}} \right)^{1/2}$$

次のトーク



カテゴリ	内訳
低ノイズ $\Delta P_{\text{noise}} \propto \frac{T_{\text{rx}} + T_{\text{therm}}}{\sqrt{t}}$	<div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">アンプのノイズ (<math>T_{\text{rx}}</math> [K])</div> アンテナに入る熱放射 ( $T_{\text{therm}}$ [K])
広い転換光の面積	アンテナの面積 $A$

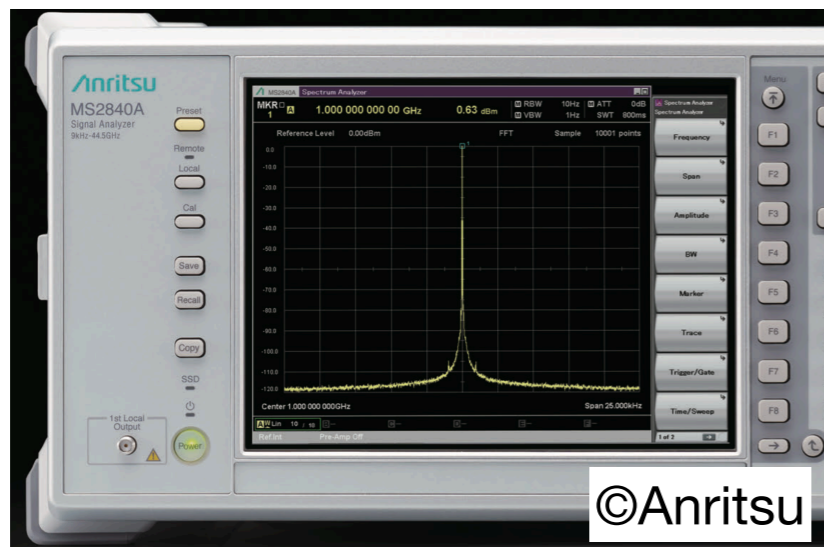


# 改善1: FFT 分光計の広帯域化

スペクトルアナライザでは帯域が狭く効率が悪いので  
RFSoc を用いたFFT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

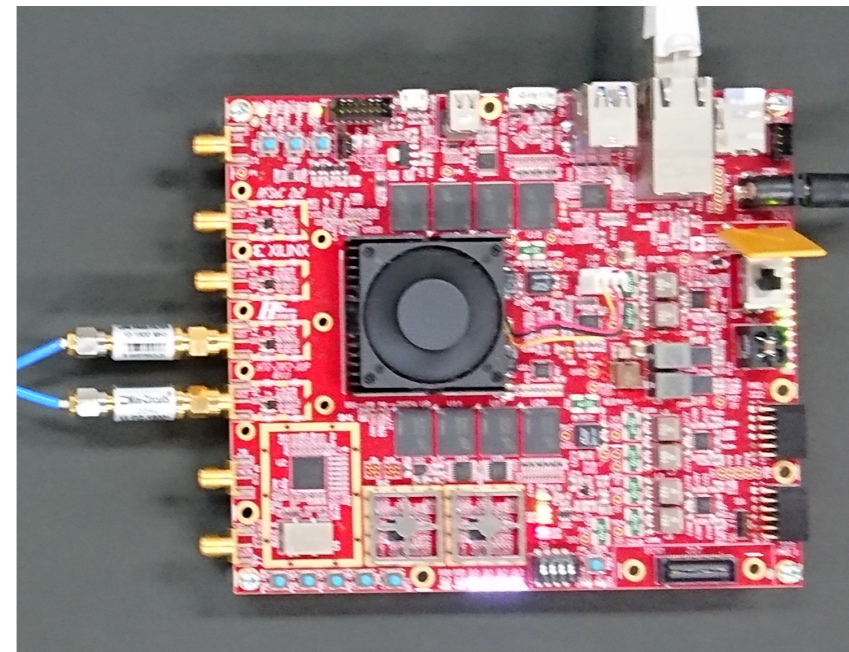
スペクトルアナライザ



2 MHz 帯域

× 2000倍

開発した  
FFT 分光計



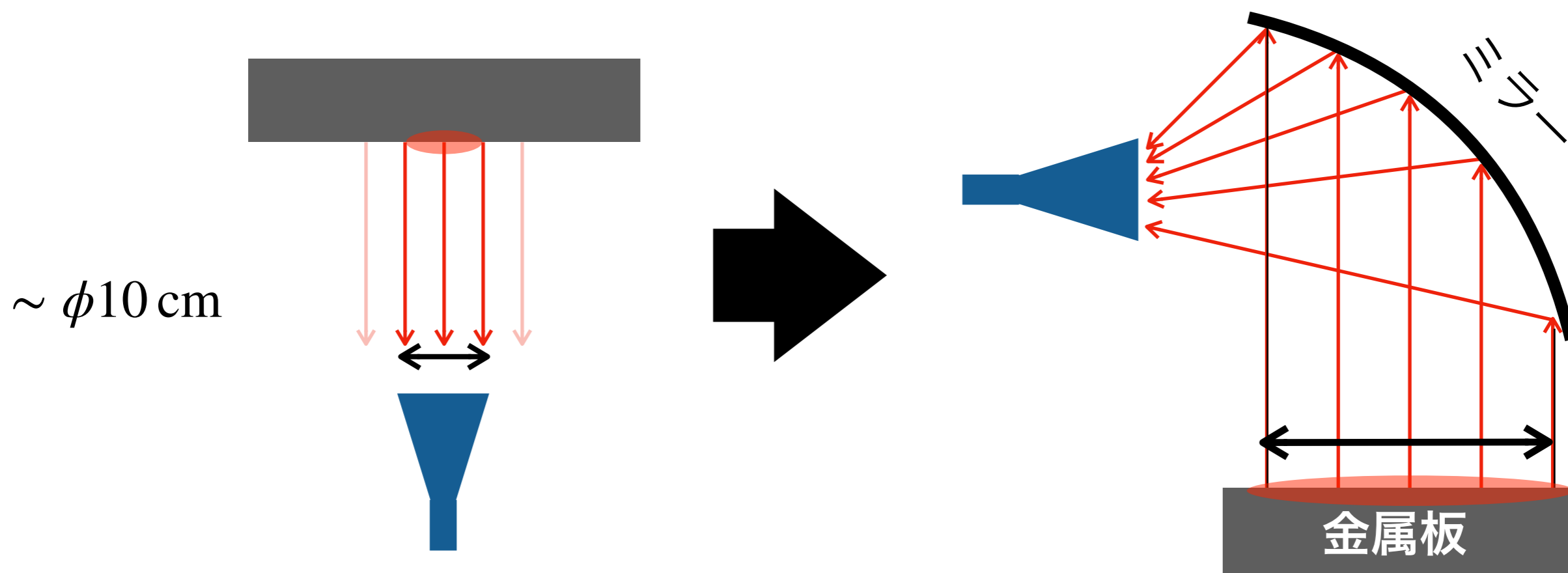
4 GHz 帯域

測定効率の向上 = 測定時間の改善

# 改善2: 光を集める量を増やす

アンテナがより広い転換光を見ることができれば  
面積の分だけ  $\lambda$  への感度が向上する

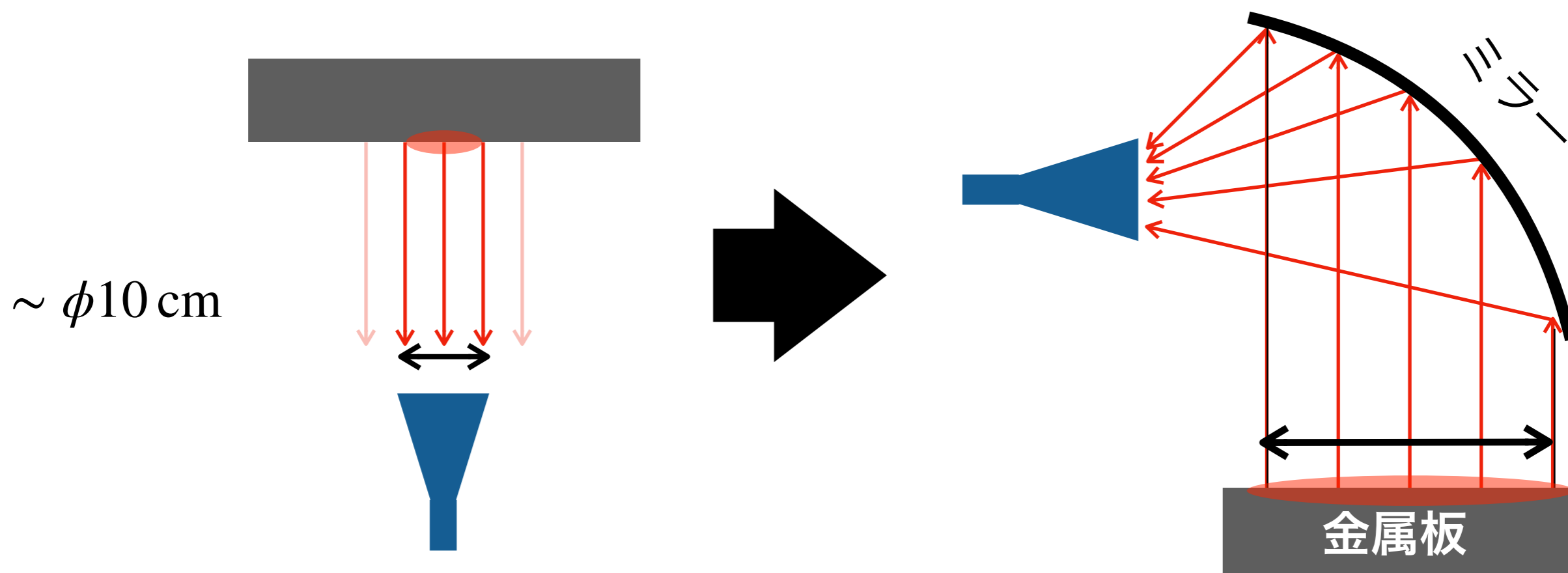
- **今まで:** アンテナが感度を持つ金属板はせいぜいアンテナの開口面積ほど
- **改善方法:** ミラーで広い金属板からの転換光をアンテナに集光



# 改善2: 光を集める量を増やす

アンテナがより広い転換光を見ることができれば  
面積の分だけ  $\lambda$  への感度が向上する

- 今まで: アンテナが感度を持つ金属板はせいぜいアンテナの開口面積ほど
- 改善方法: ミラーで広い金属板からの転換光をアンテナに集光

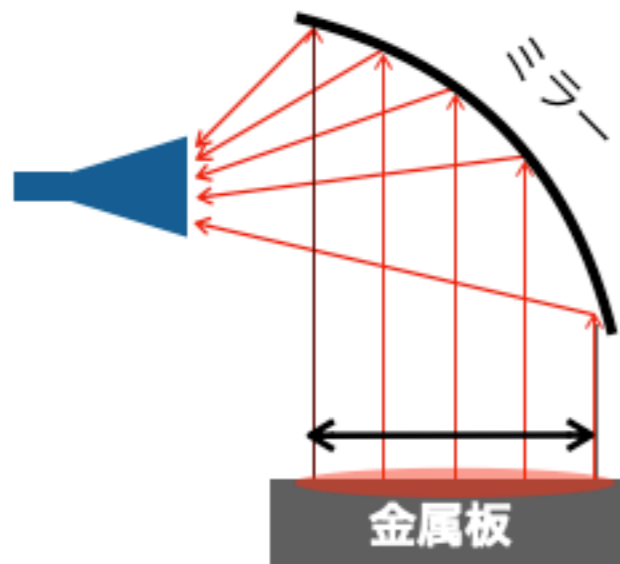
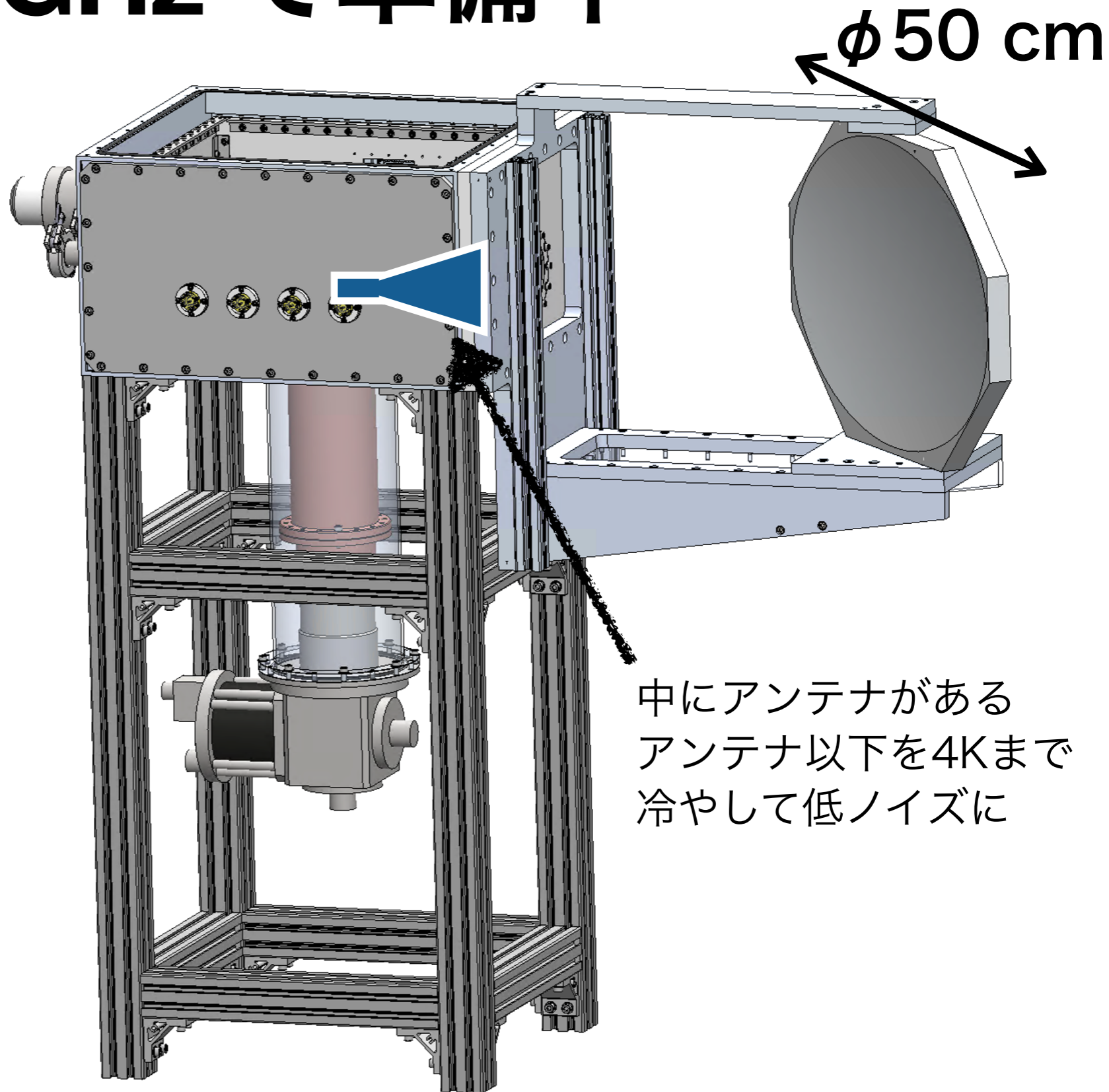
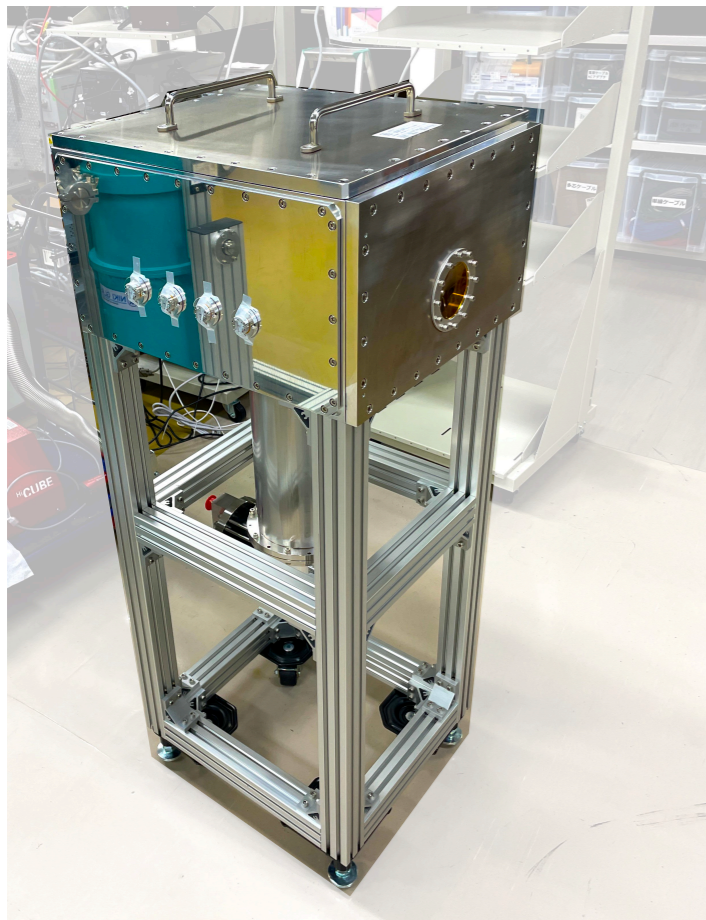


**信号強度の強化**



# Y-band ~200 GHz で準備中

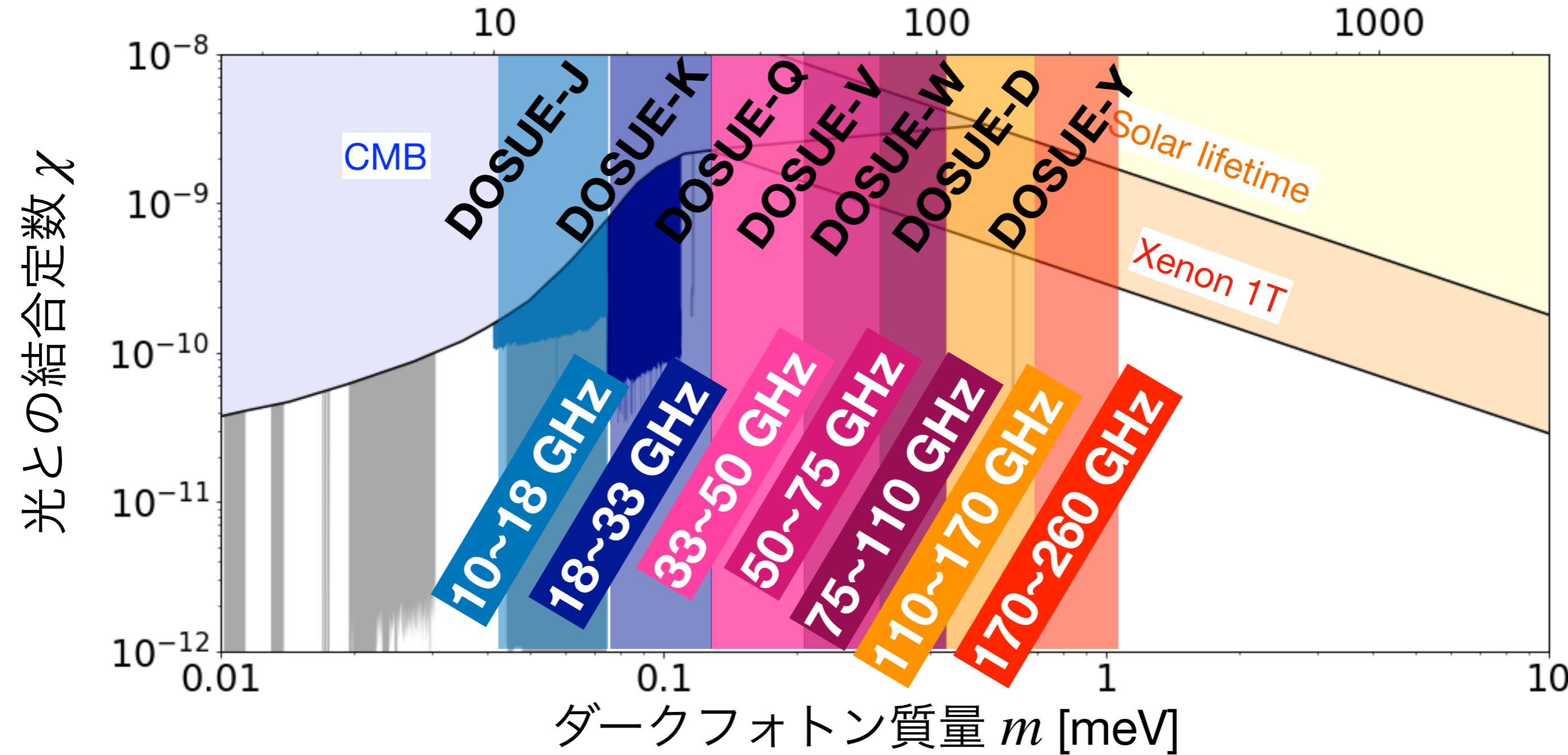
受信機部分(外側だけ)



中にアンテナがある  
アンテナ以下を4Kまで  
冷やして低ノイズに

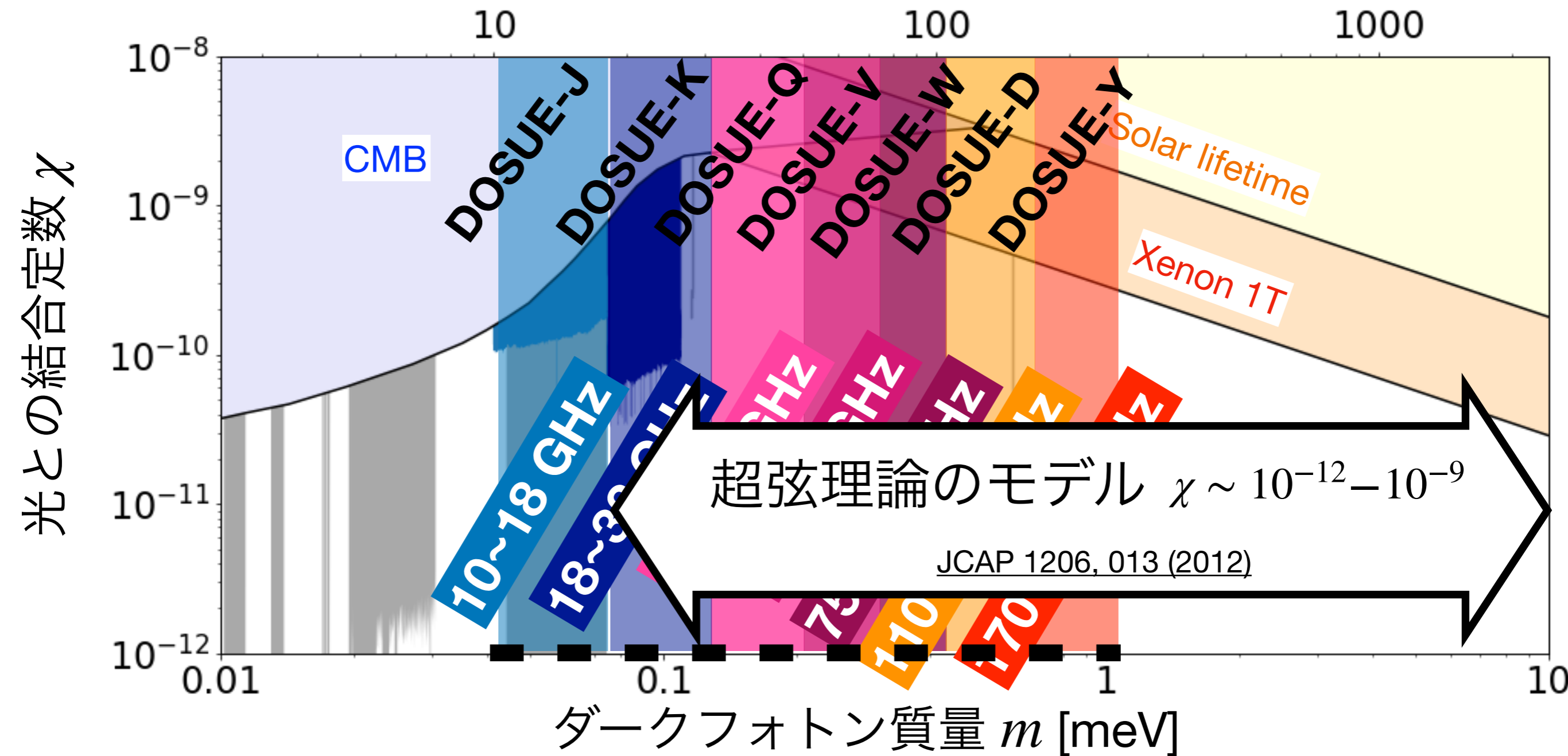
# DOSUE-RR の計画

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]



# DOSUE-RR の計画

転換光の周波数  $\nu_0$  [GHz]

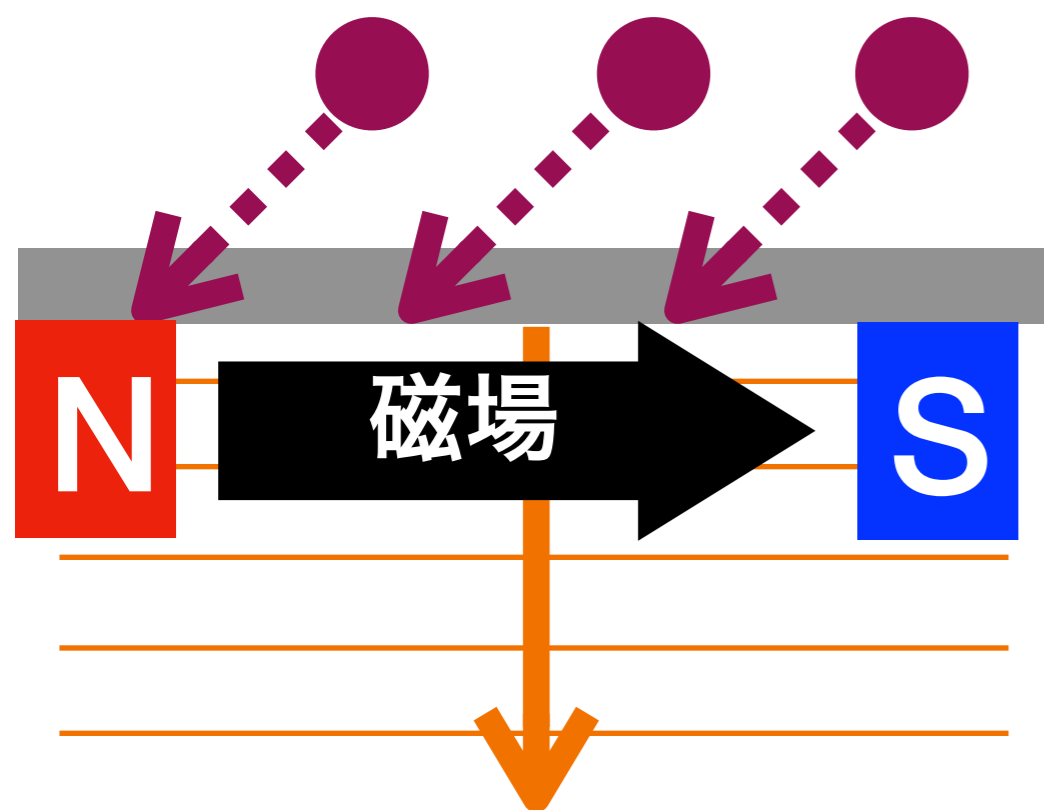


**$\chi \sim 10^{-12}$  をターゲットに  
ミリ波帯域(10—300 GHz)を網羅を目指す!**

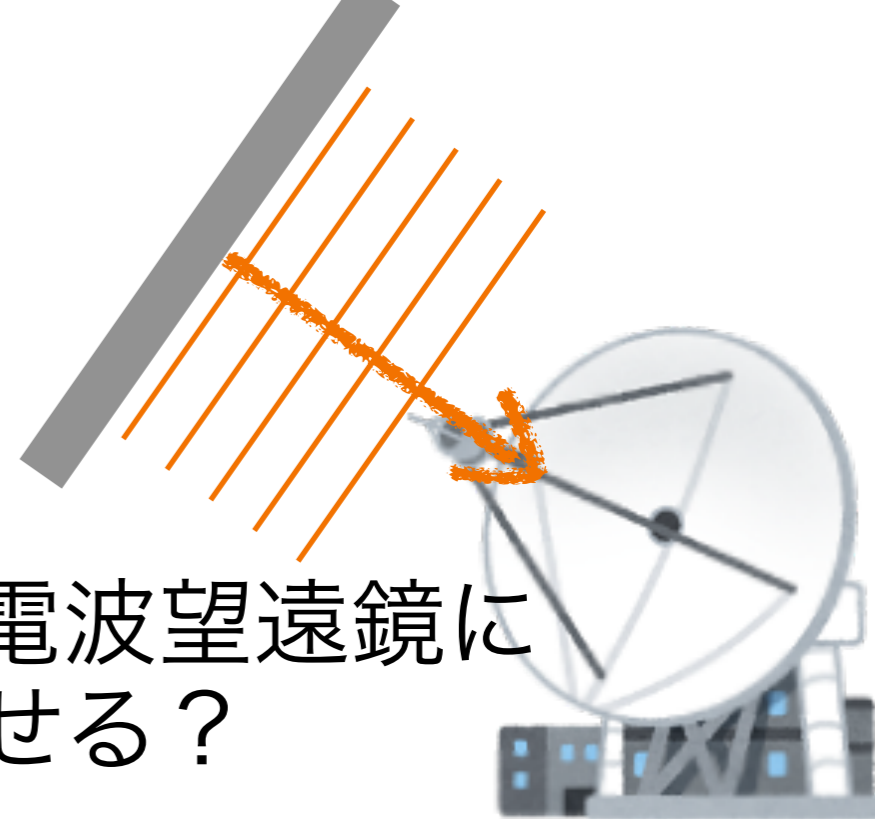
# さらには??

アクシオン(ALP)探索

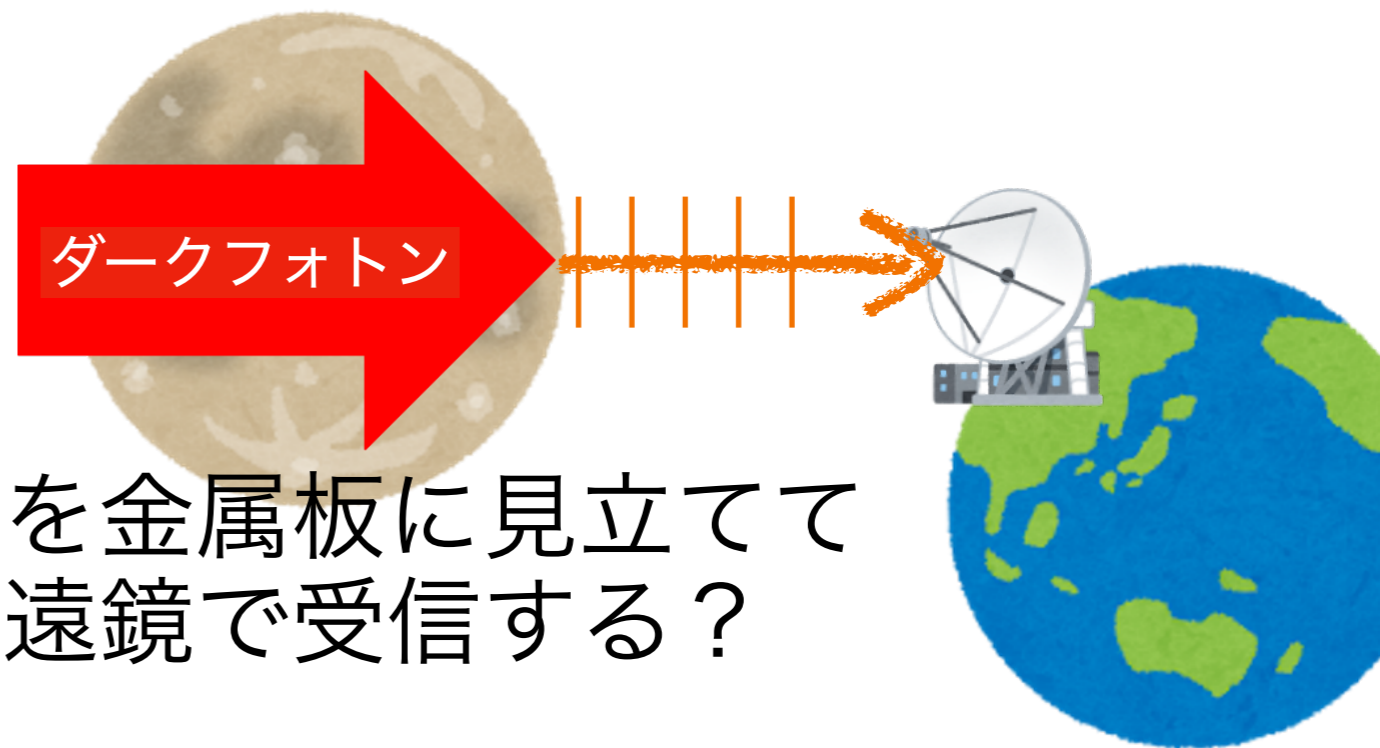
アクシオン(ALP)



空いている電波望遠鏡に  
金属板を見せる?



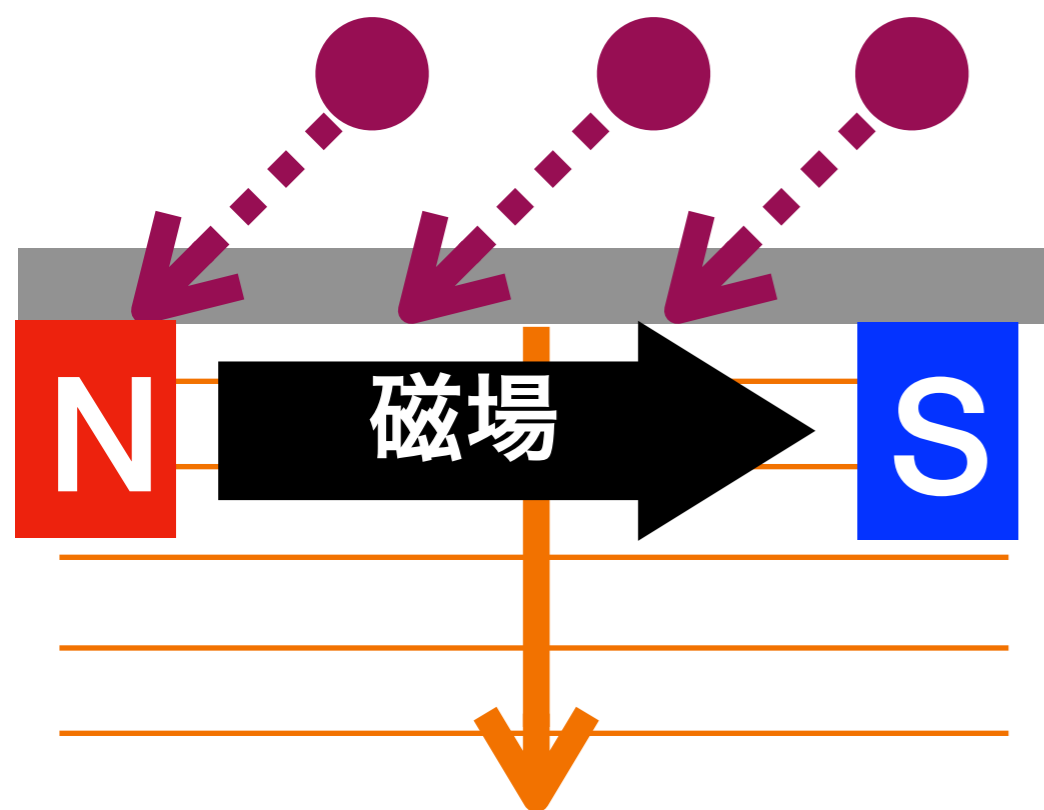
月を金属板に見立てて  
望遠鏡で受信する?



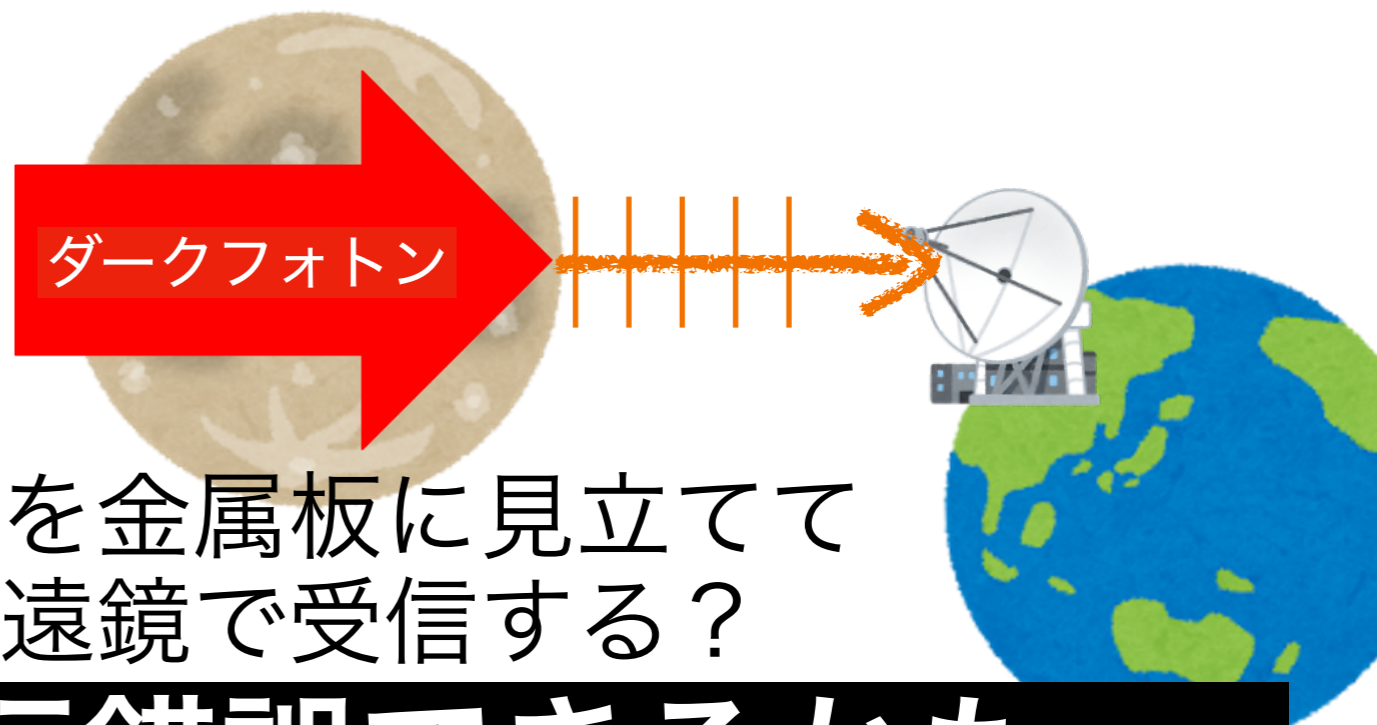
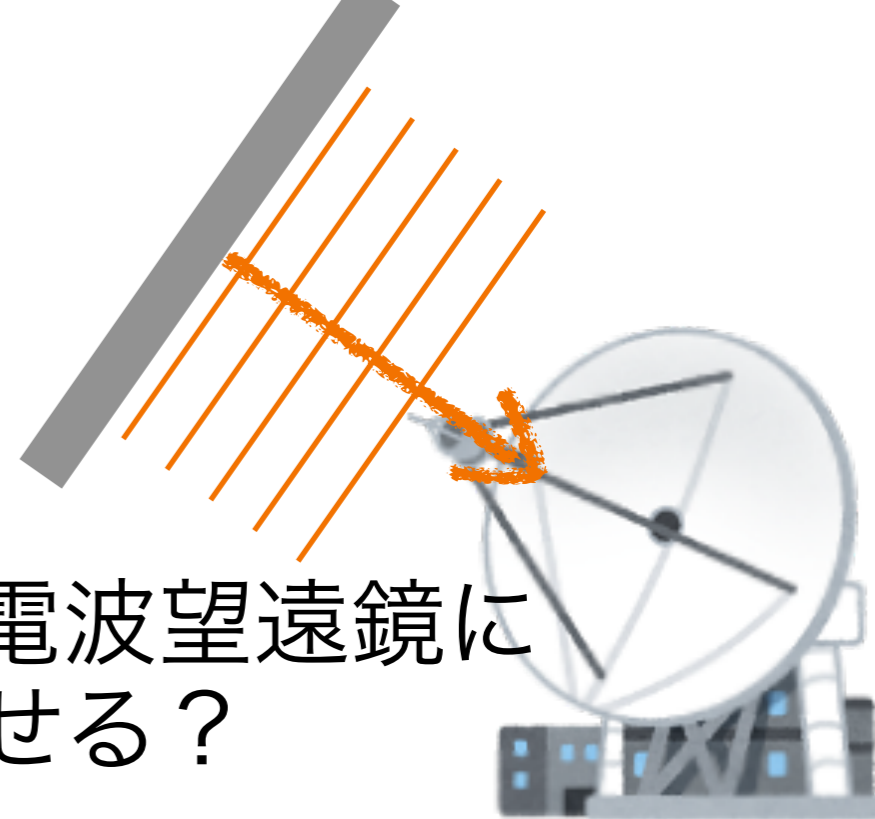
# さらには??

アクシオン(ALP)探索

アクシオン(ALP)



空いている電波望遠鏡に  
金属板を見せる?



月を金属板に見立てて  
望遠鏡で受信する?

**面白い実験を試行錯誤できるかも**

# 最後に

ダークマター探索にミリ波受信機を応用した新しい手法で取り組んでいます。

まだまだやることはたくさんあるのでいつでも参加者募集中です。（CMBも）

興味あれば、ぜひ懇親会でお話ししましょう！  
私は明日帰りますが。

# Backup

# ダークフォトン (DP)

- DOSUE-RR のターゲット: Dark-Photon Dark-Matter
- 光との結合定数: **Kinetic mixing  $\chi$**
- $m_{\text{DP}} \neq 0$  の質量固有状態として、通常の電磁場と混合状態を作る

Mass =  $m_{\text{DP}}$  state (Dark photon)



微弱な振動電場を持つ ( $\propto \chi$ )

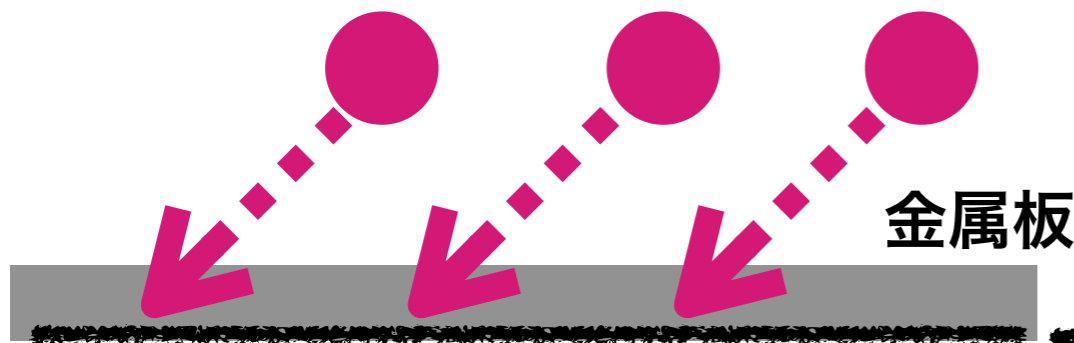
$$\vec{E}_{\text{DP}} = -\partial_0 \vec{A}_{\text{DP}} = i\chi\omega_{\text{DP}} \vec{X}_0 \exp\{-i(\omega_{\text{DP}}t - \vec{k} \cdot \vec{x})\}$$



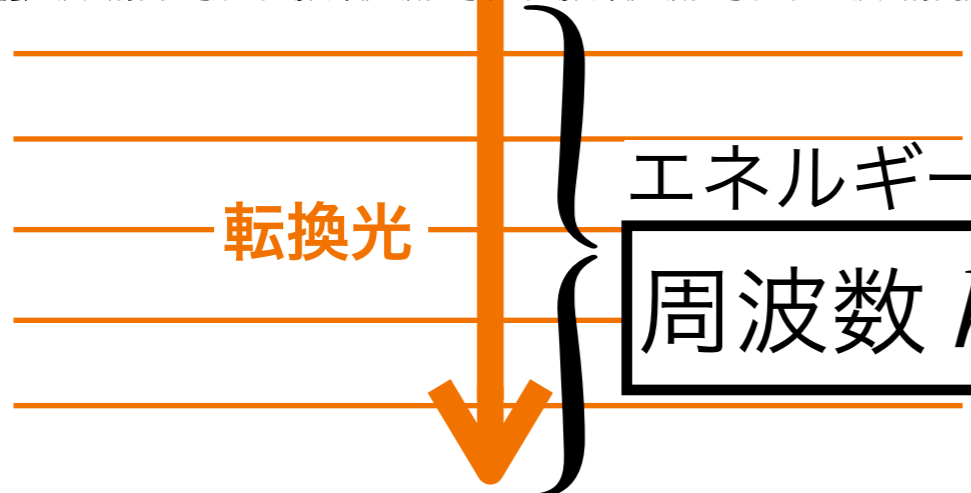
# ダークフォトンの光への転換

電磁氣的境界(金属表面)で境界条件を満たす転換光を放出!

ダークマターとして漂う  
ダークフォトン: 質量  $m_{DP}$



$$E_{\parallel} = 0$$
$$E_{\parallel} = E_{DP, \parallel} + E_{\gamma, \parallel} = 0$$



エネルギー保存則

$$\text{周波数 } h\nu_0 \sim \text{ダークフォトン質量 } m_{DP}c^2$$

\* $\nu_{DM}$  が小さいことを加味すると運動量は $\sim 0$

ほぼ垂直に放射! ( $\theta < 0.06^\circ$ )

ある周波数  $\nu_0$  の  
コヒーレントな光

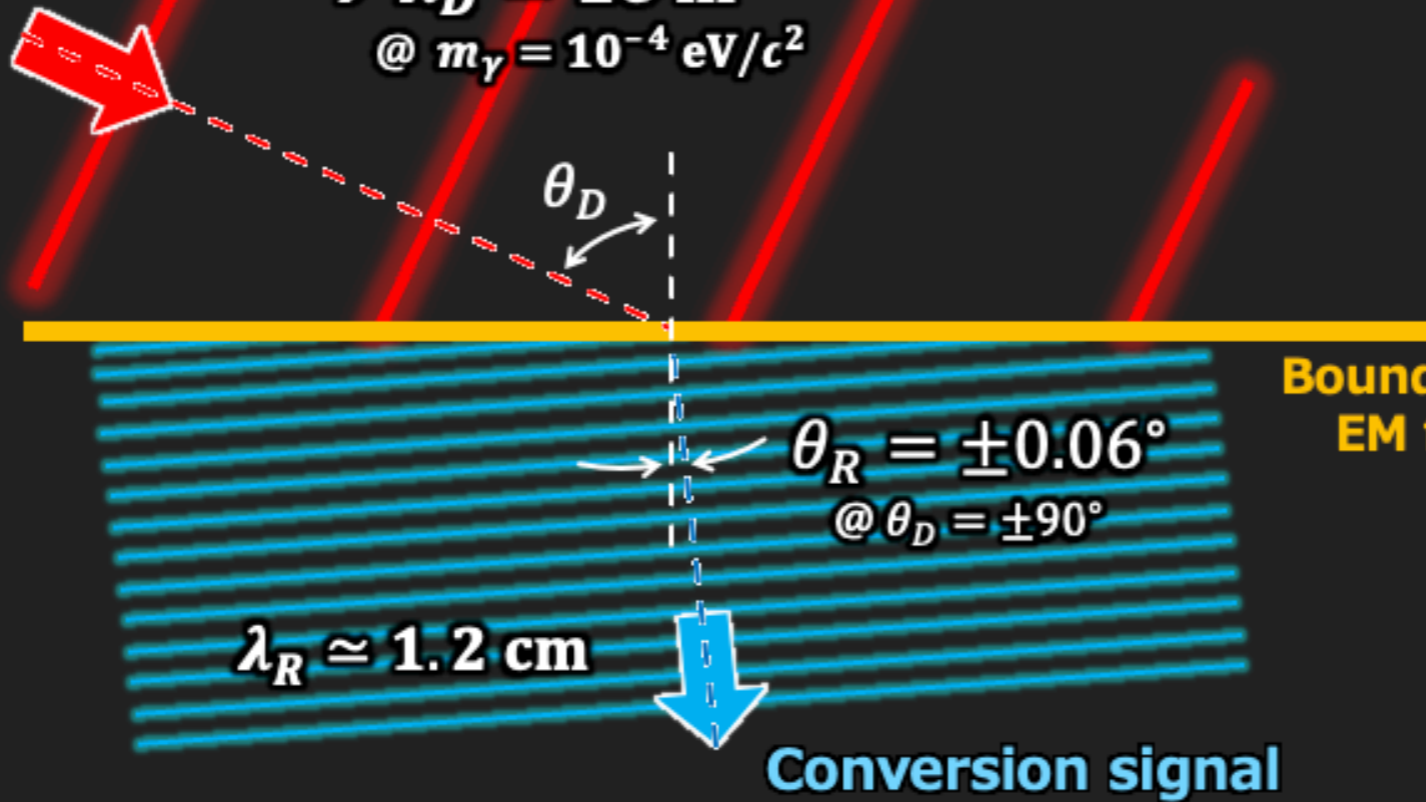
**Wavy-DM**

$$v_D \approx 220 \text{ km/s}$$
$$\rightarrow \lambda_D \approx 16 \text{ m}$$
$$@ m_\gamma = 10^{-4} \text{ eV}/c^2$$

Direction of conversion signal follows Snell's law with respect to insertion angle and speed of wavy-DM.

$$\frac{\sin \theta_D}{\sin \theta_R} = \frac{v_D}{c}$$

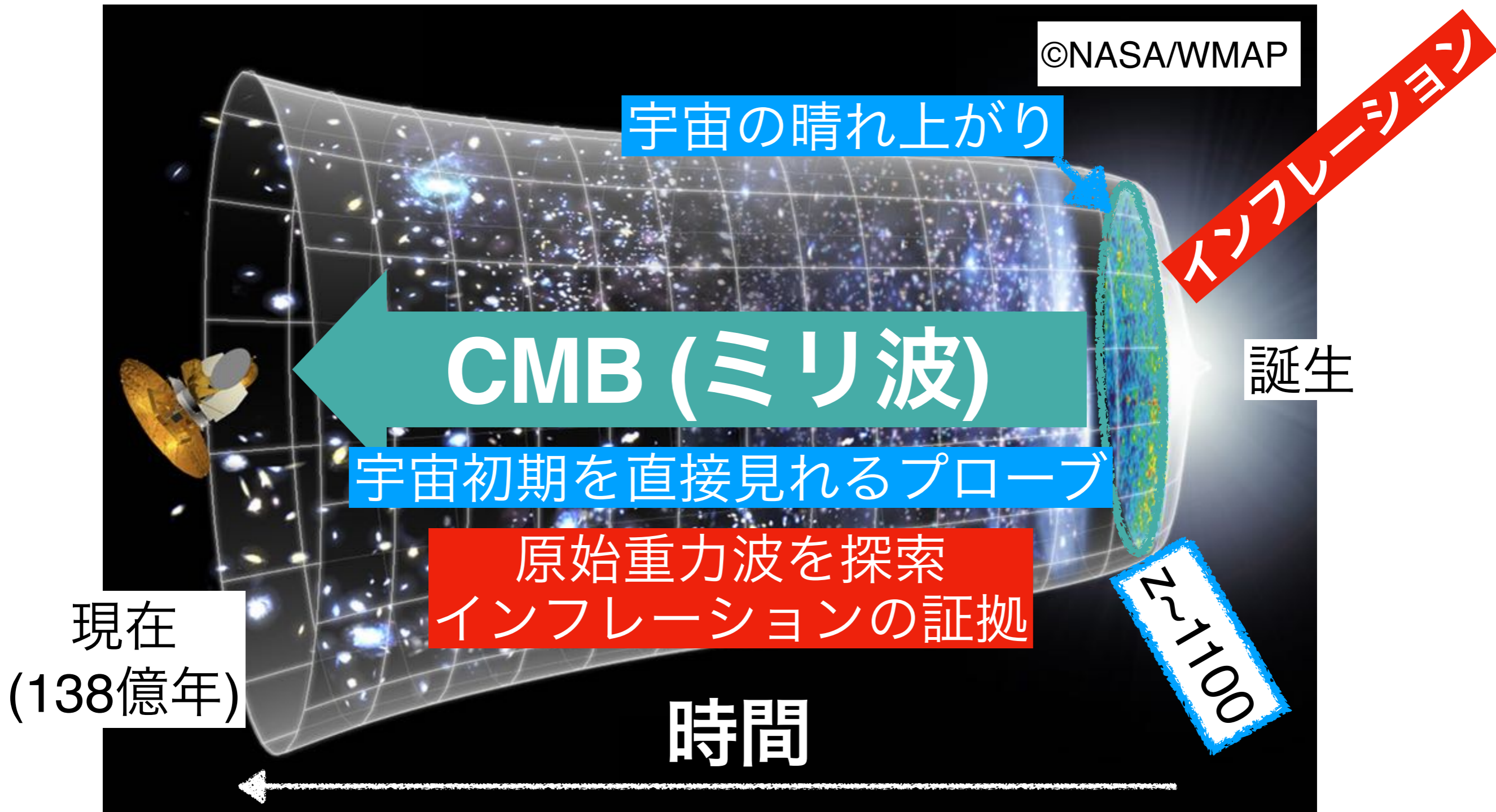
$c$ : speed of light



# 宇宙背景マイクロ波背景放射 CMB

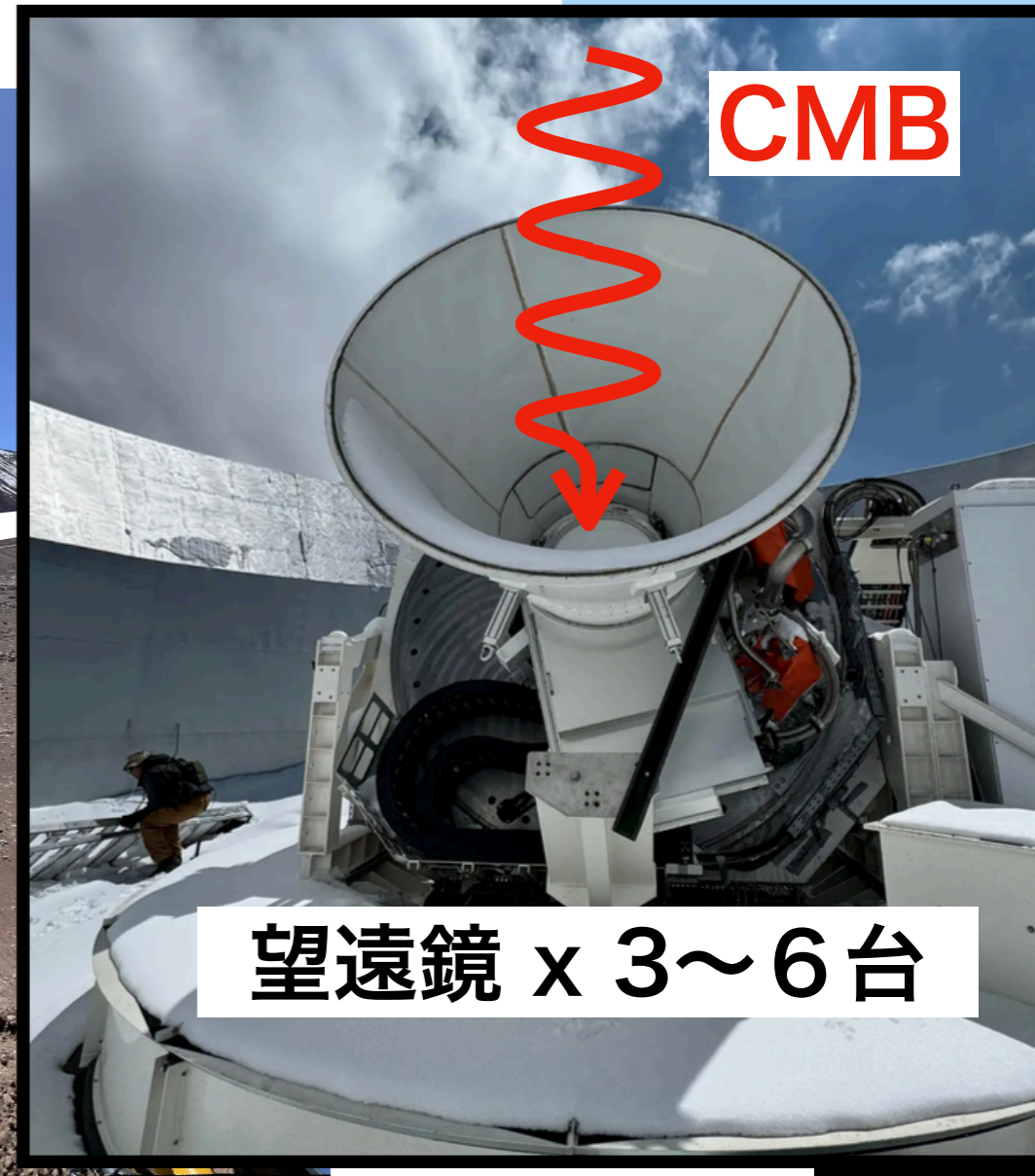
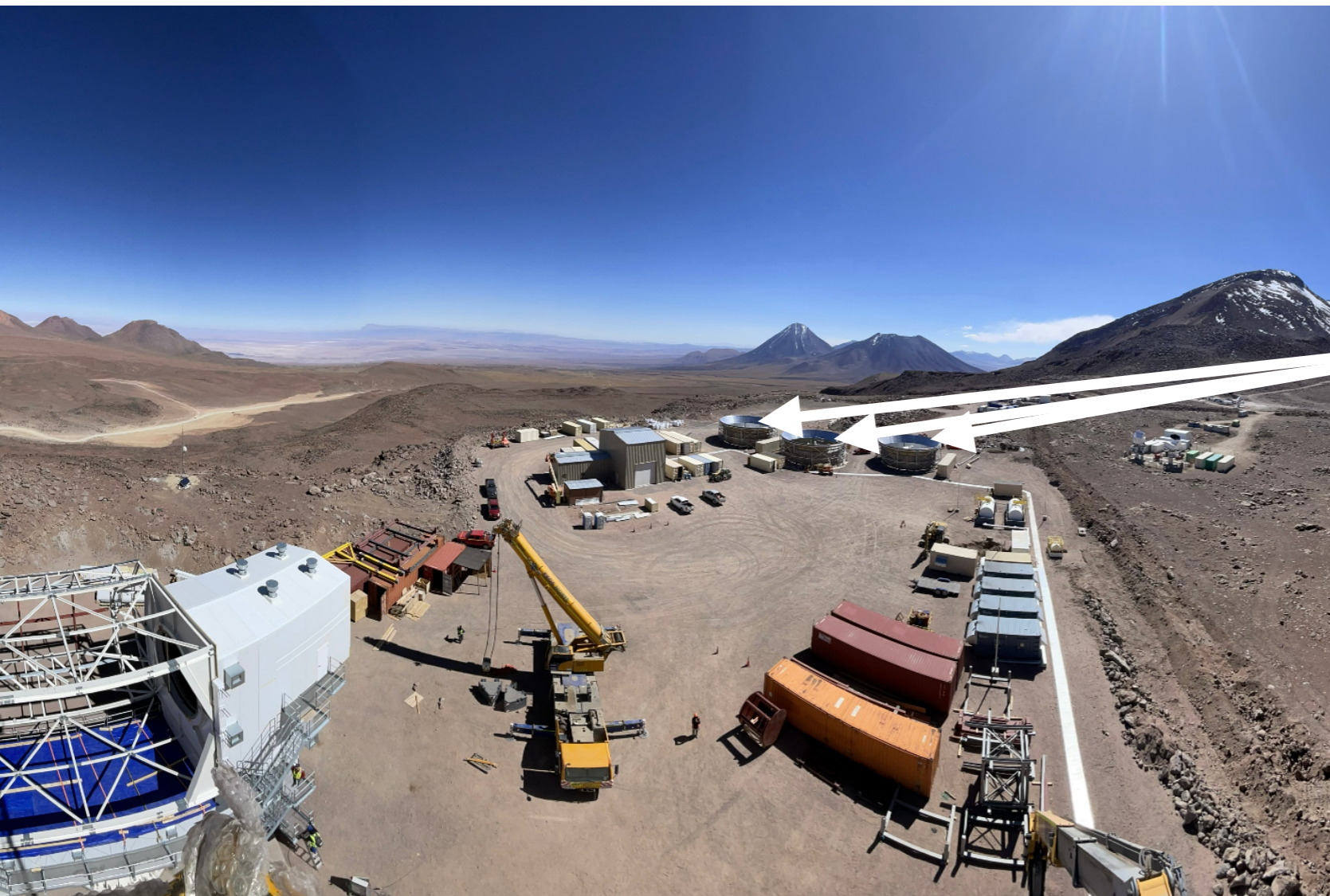
Cosmic Microwave Background

©NASA/WMAP



# Simons Observatory 実験

- ・ 場所：チリのアタカマ砂漠の高地 (5200m)
- ・ コラボレーション：12 国 / ~60 機関 / ~300 人
- ・ 複数台の望遠鏡で幅広いサイエンスを網羅!



CMB

望遠鏡 x 3~6 台

# 目標の精度

arxiv.1907.08284

原子重力波 B-mode  
(インフレーションの痕跡)

角度スケール

90°

1°

0.2°

0.1°

0.05°

ニュートリノ

$$\sigma(r) = 0.3 \times 10^{-2}$$

$$\sigma(\sum_i m_{\nu_i}) = 40 \text{ meV}$$

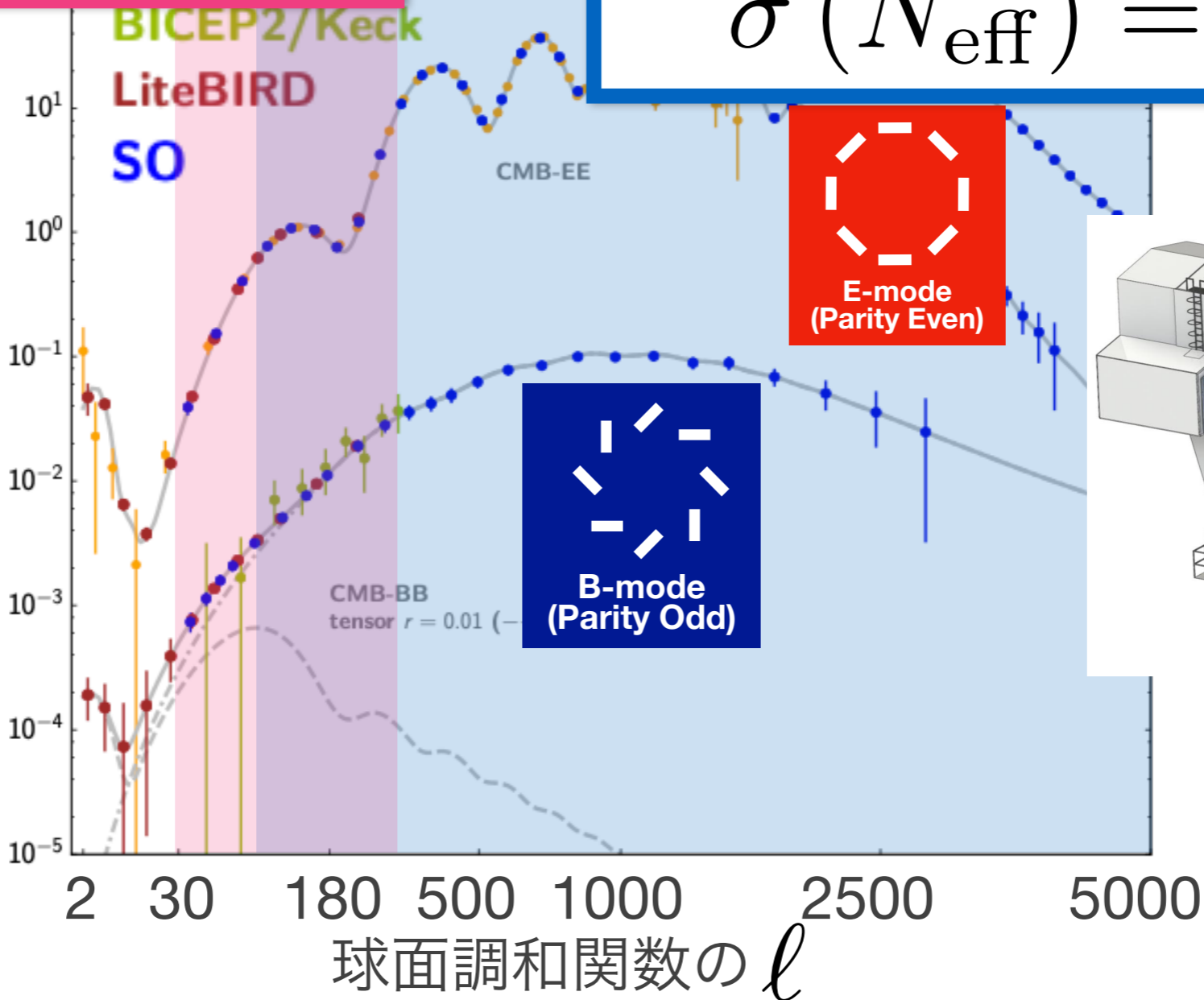
\*他実験の結果も用いて得られる精度

$$\sigma(N_{\text{eff}}) = 0.07$$

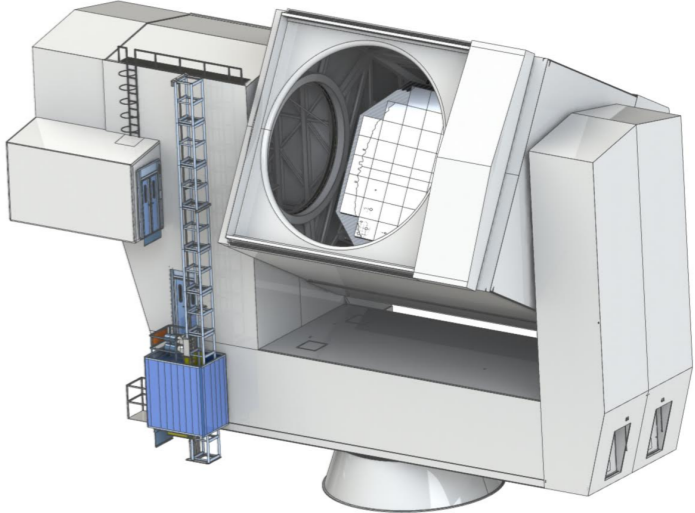
SAT



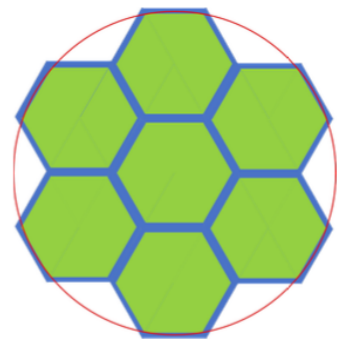
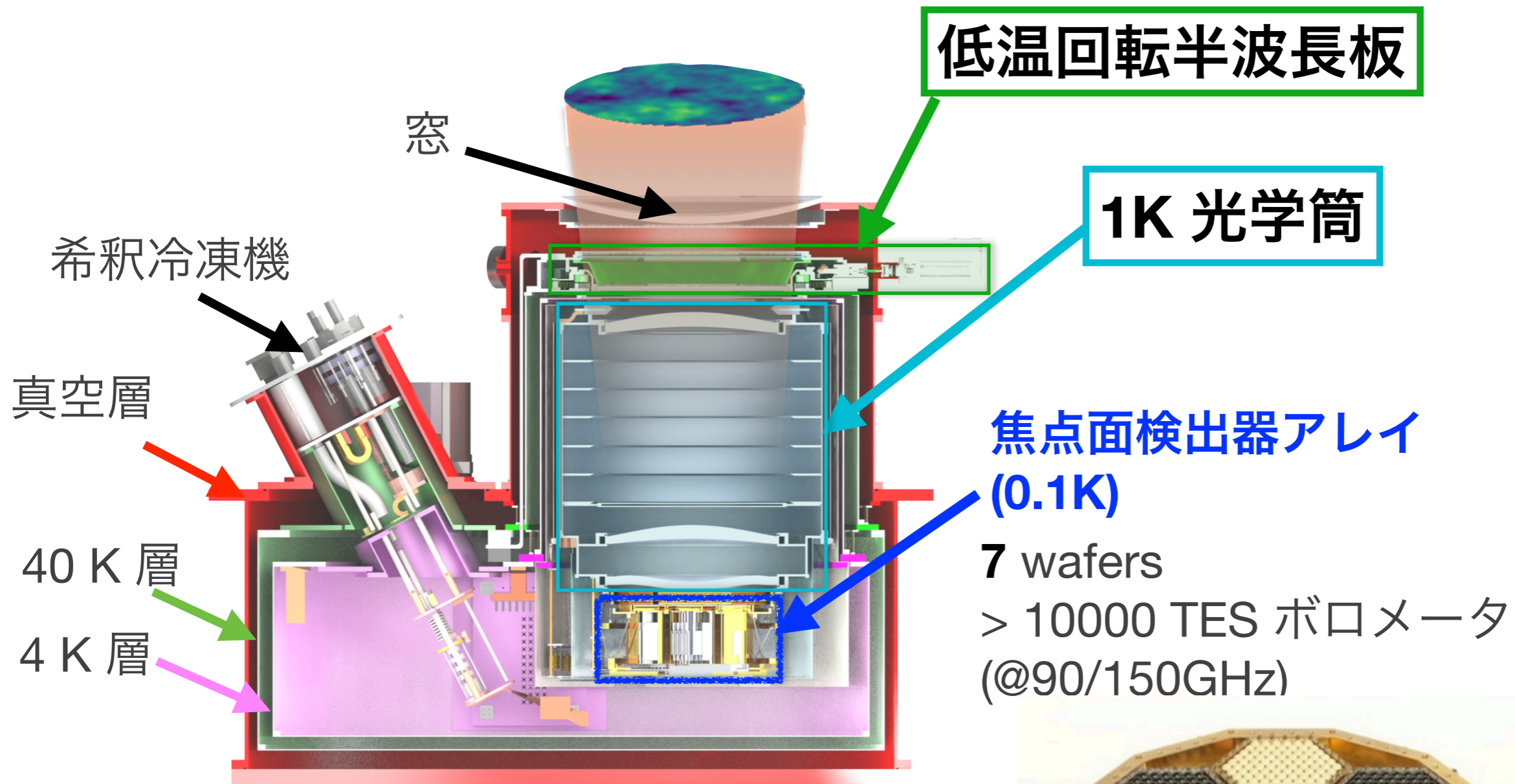
CMBの大きさ  $\ell(\ell+1)C_\ell/(2\pi)$



LAT



# SAT 受信機



注) 別実験の似た  
検出器アレイ

