



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

ミリ波帯域でのダークフォトン探索 — DOSUE-RR 実験 —

安達俊介, 小高駿平, 末野慶徳, 本多俊介, 鈴木惇也
隅田土詞, 田島治
(京都大学)



ミリ波帯域でのダークフォトン探索 — DOSUE-RR 実験 —

Dark-photon Observing System
for UnExplored Radio Range

安達俊介, 小高駿平, 末野慶徳, 本多俊介, 鈴木惇也

隅田土詞, 田島治

(京都大学)

目次

- 自己紹介
- ダークフォトン
- 過去実験の探索領域
- 探し方
- 先行実験の測定系
- ノイズについて
- 本実験セットアップ
- 予想感度
- 予定
- まとめ

自己紹介

- 安達 俊介 (学振PD@京都大学)
 - 主な研究: CMB (宇宙マイクロ波背景放射) 実験
 - 現在は Simons Observatory (SO) 望遠鏡
という望遠鏡開発がメイン



[日本物理学会 9/14 SM会場午後]

自己紹介

- 安達 俊介 (学振PD@京都大学)
 - 主な研究: CMB (宇宙マイクロ波背景放射) 実験
 - 現在は Simons Observatory (SO) 望遠鏡
という望遠鏡開発がメイン



[日本物理学会 9/14 SM会場午後]

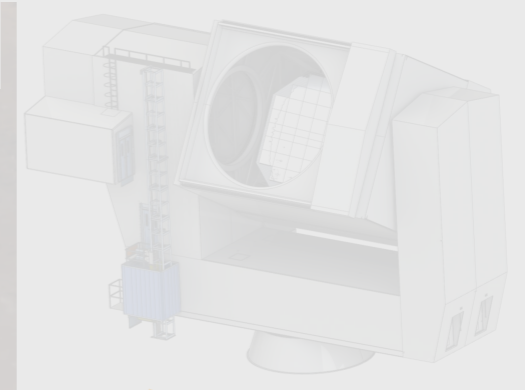
自己紹介

- 安達 俊介 (学振PD@京都大学)
 - 主な研究: CMB (宇宙マイクロ波背景放射) 実験
 - 現在は Simons Observatory (SO) 望遠鏡という望遠鏡開発がメイン



Small Aperture Telescopes x3 (SAT)

Large Aperture Telescope (LAT)



**CMB望遠鏡のノウハウを活かした
ミリ波帯域ダークフォトン探索にも取り組んでいる**

DOSUE-RR実験

物理学会 9/14 SM会場午後]

ダークマター候補としてのダークフォトン

- WISP (weakly interacting slim particle) の CDM になるダークフォトン(DP)を仮定できる
- 新しい U(1) 対称性を標準理論に導入
 - $\Rightarrow X$ (DP)という新しい粒子が追加

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}X_{\mu}X^{\mu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + J^{\mu}A_{\mu},$$

新しい項

X の質量

結合定数

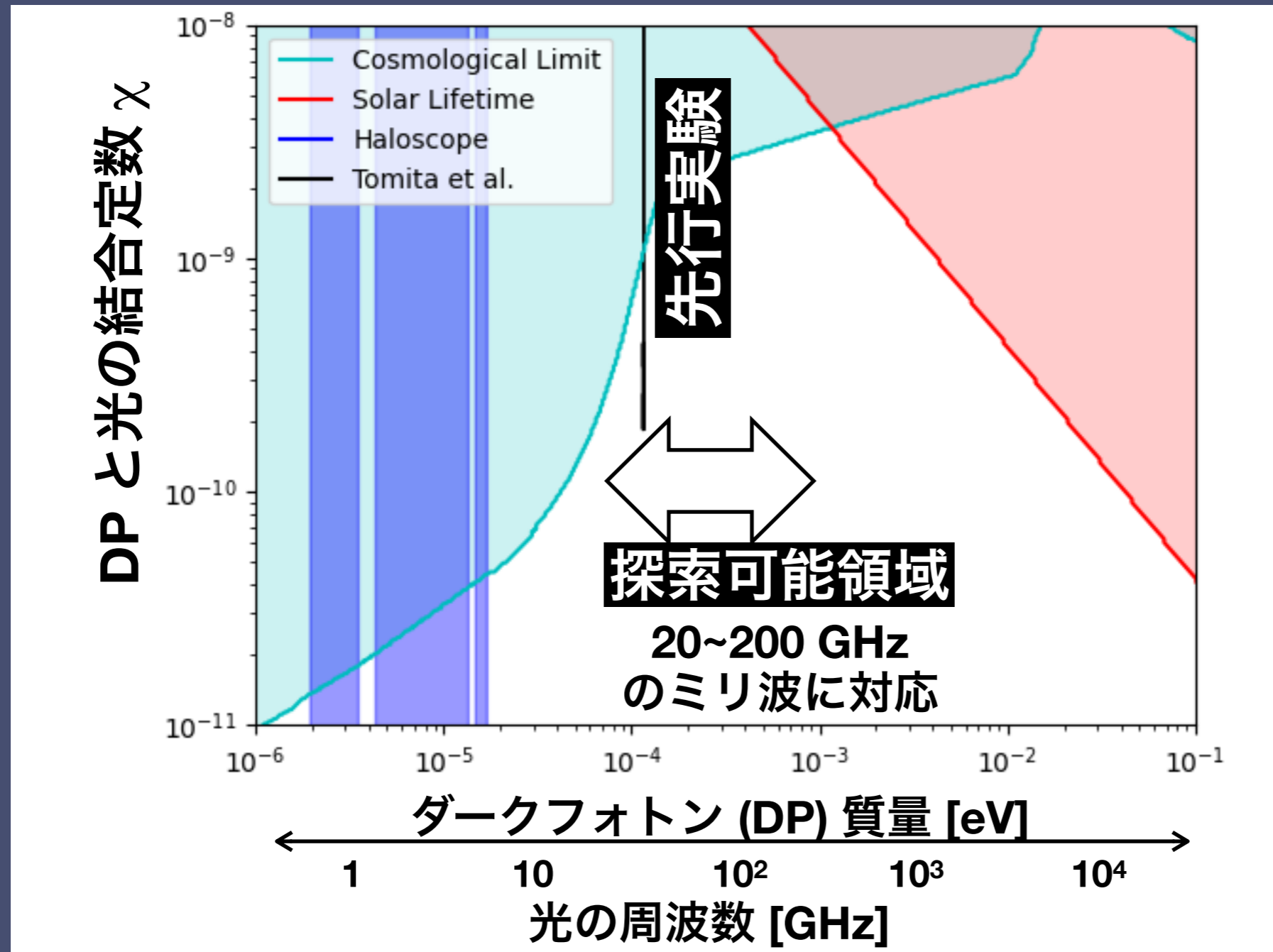
光 (F)

との相互作用

- $(m_{\gamma'}, \chi)$ の2つが未知のパラメータ * γ' が DP
- $m_{\gamma'}$: DP の質量
- χ : DP と実光子との結合定数

過去実験の探索領域

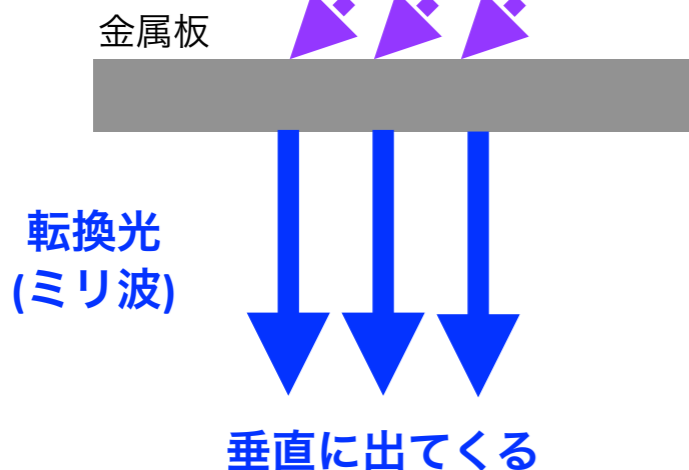
[N. Tomita et. al., arXiv:2006.02828 \(2020\)](#)



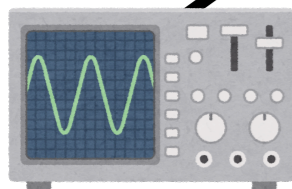
- ミリ波領域は未開のエネルギー領域 (Unexplored)!!
- 20GHz ~ 200GHz 帯は CMB での得意分野

ダークフォトンの探し方

ダークフォトン(DP)



ホーン
アンテナ

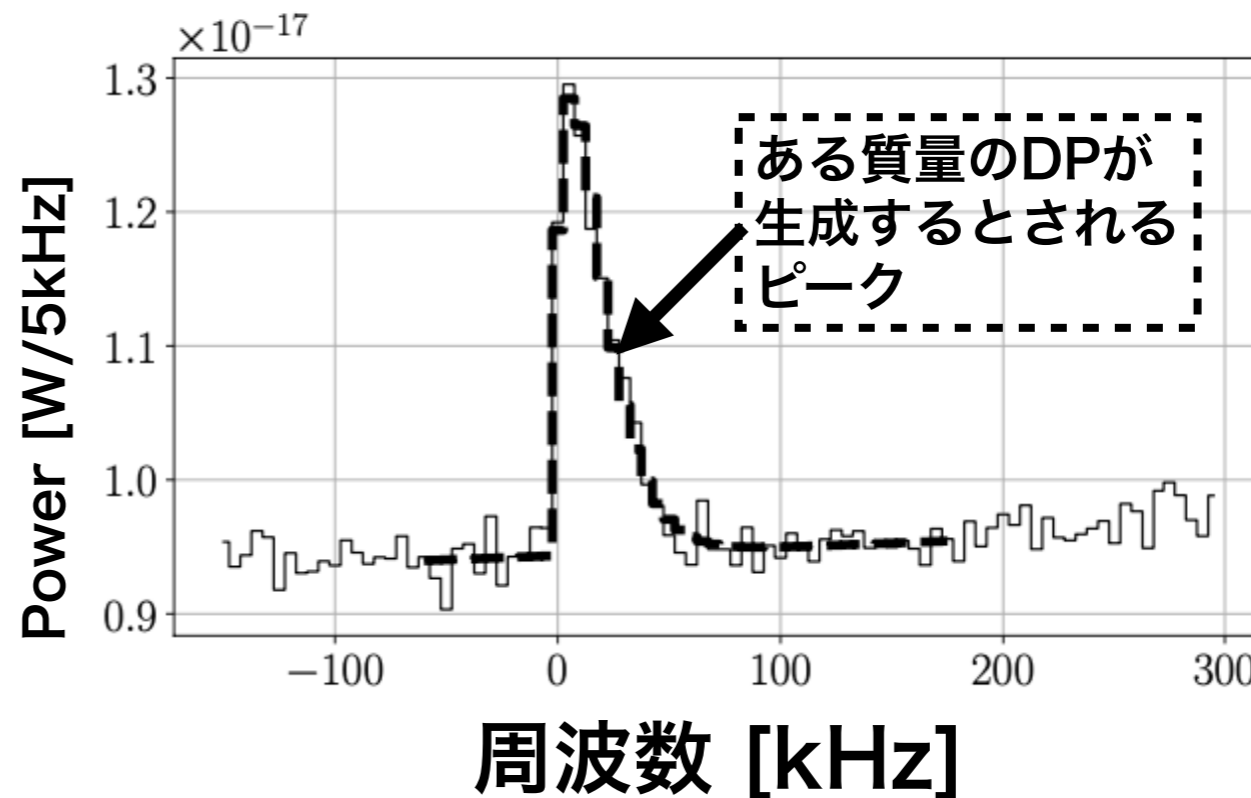


- ・ 金属面で光に変換され垂直にミリ波が出てくる
⇒ 金属板=光源として探索可能!!

$$\nu(v_{\text{DM}}, m_{\gamma'}) = \frac{1}{h} \frac{m_{\gamma'}}{\sqrt{1 + (v_{\text{DM}}/c)^2}}$$

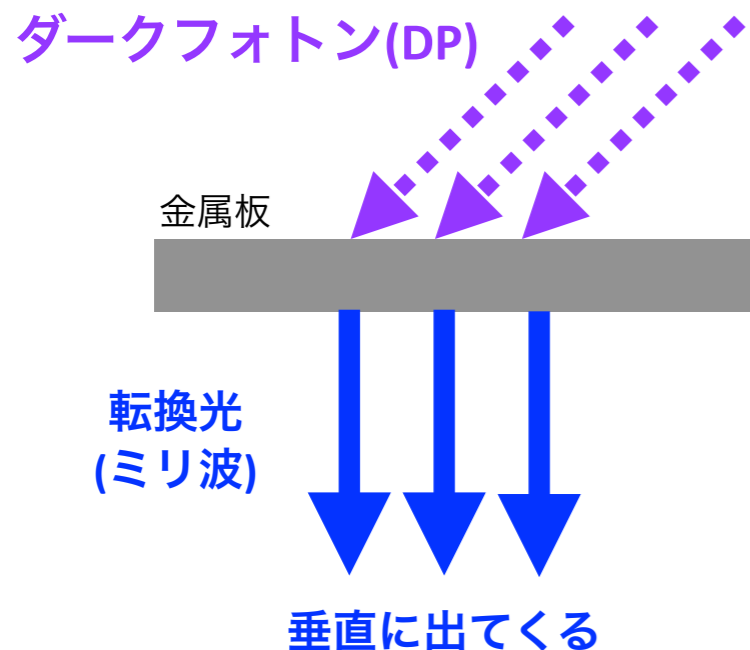
- ・ $m_{\gamma'} \Leftrightarrow$ 光の周波数(ν)で1対1対応
⇒ 周波数のピーク探索ができる!!

スペアナで取得する周波数スペクトル (シミュレーション)



先行実験の測定系

[N. Tomita et. al., arXiv:2006.02828 \(2020\)](#)



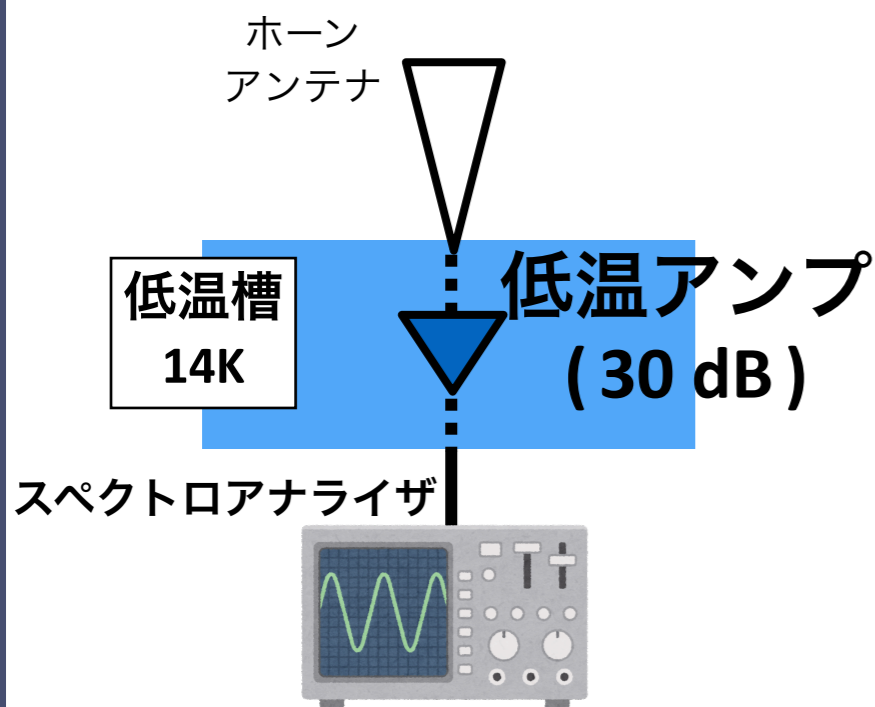
低温アンプで
Low ノイズ & High ゲイン を達成

・ $T_{\text{アンプ}} = 10 \text{ K}$ (\propto ノイズ)

- ・ $T_{\text{アンプ}}$ は周りの $T_{\text{低温槽}} = 10 \text{ K}$ に依存

ただし、

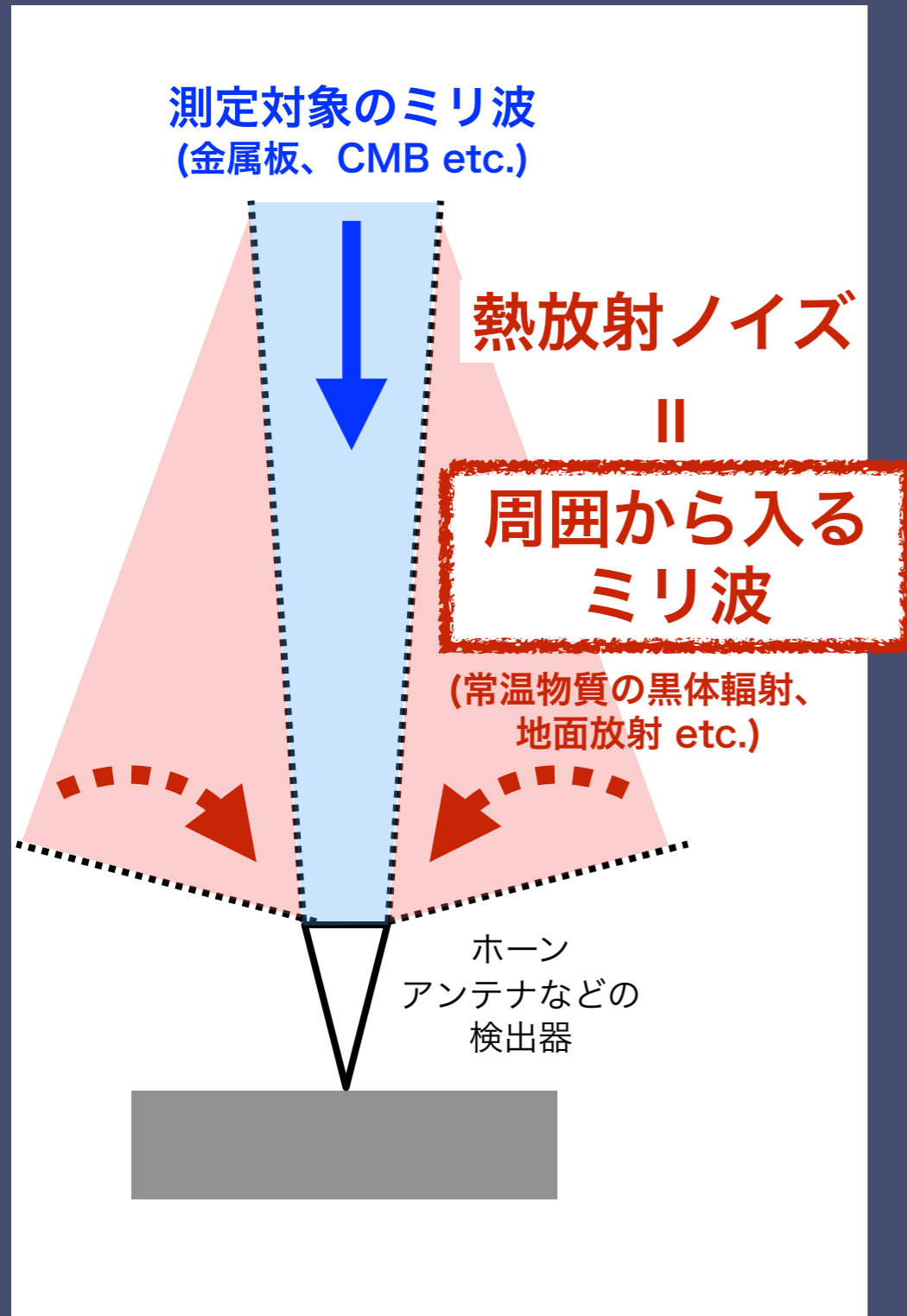
アンテナに入ってくる **熱放射ノイズ** がある



・ $T_{\text{熱放射}} = 140 \text{ K}$ **主要ノイズ**

- ・ 空の放射: 30~40K
- ・ 周りの常温物質の熱放射: 300K

熱放射ノイズ

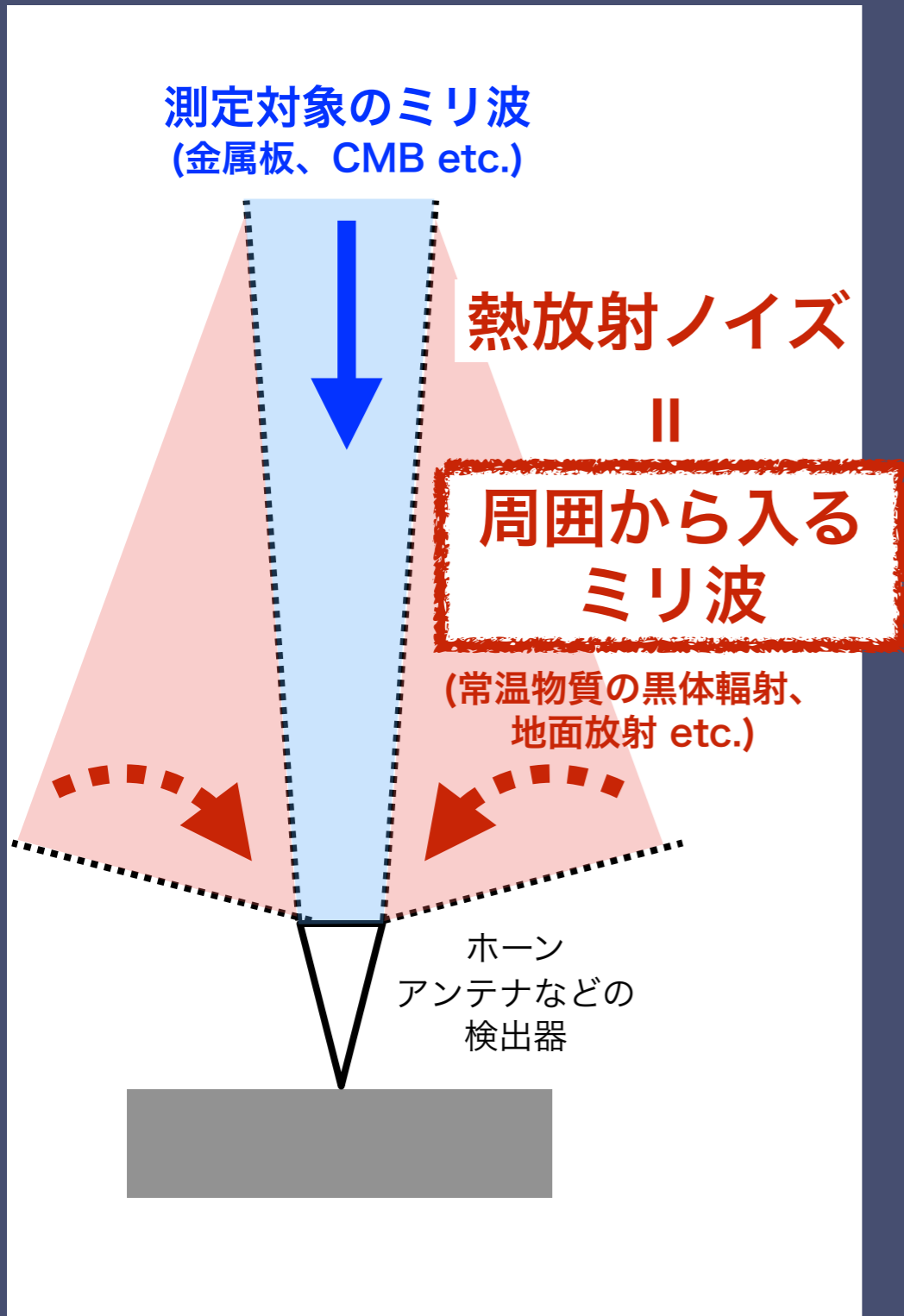


熱放射ノイズ

= 周囲から入ってくる不要なミリ波

- ・ ミリ波領域ではあらゆる物質の熱放射(300K)がノイズ源
- ・ 空を見ても30K相当の無視できないノイズ
- ・ アンテナは外側の光もある程度拾ってしまう (Side-lobe)
- ・ 測定対象方向以外が低温物質を見ることでノイズを抑制可能

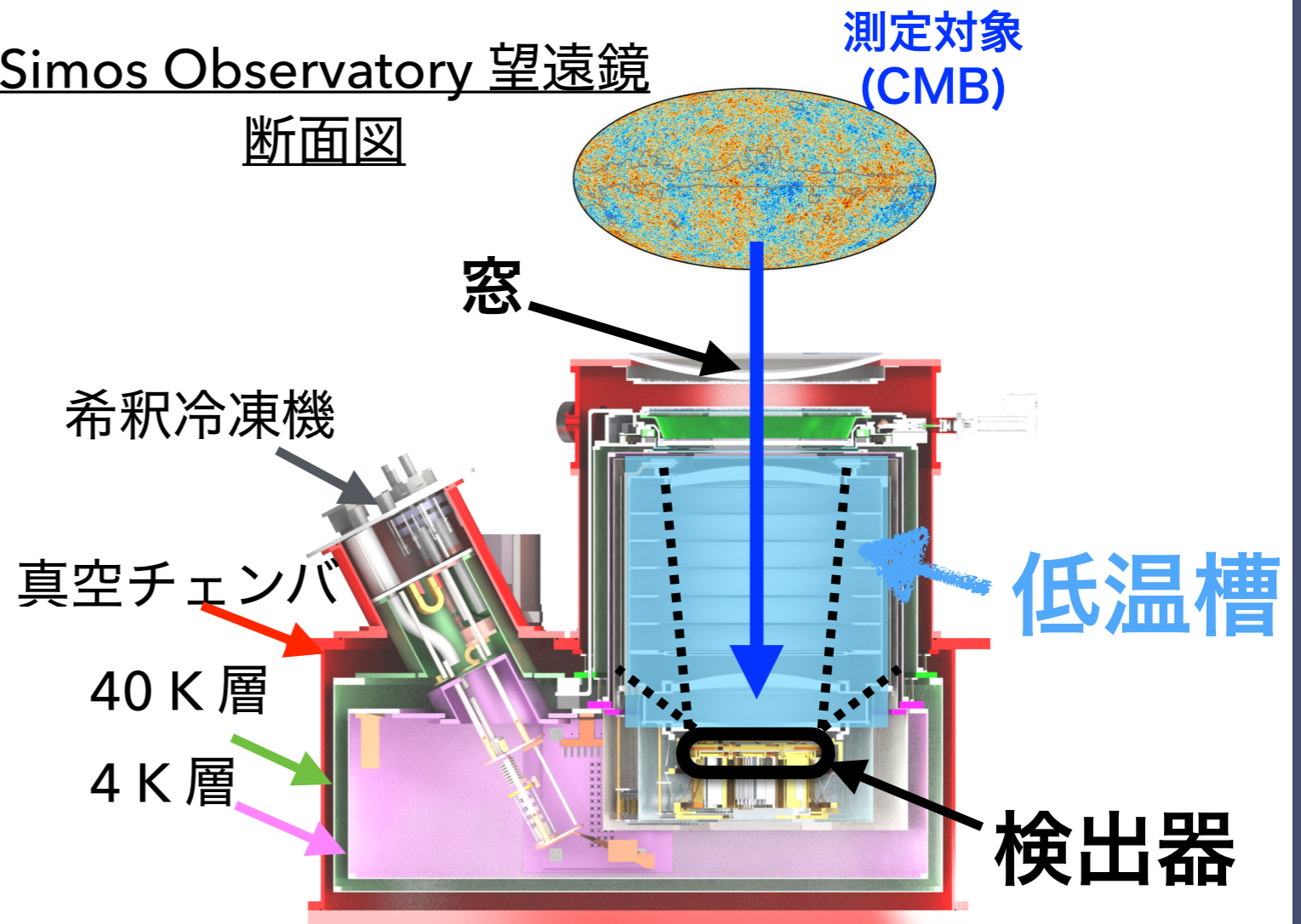
熱放射ノイズ



CMB望遠鏡では

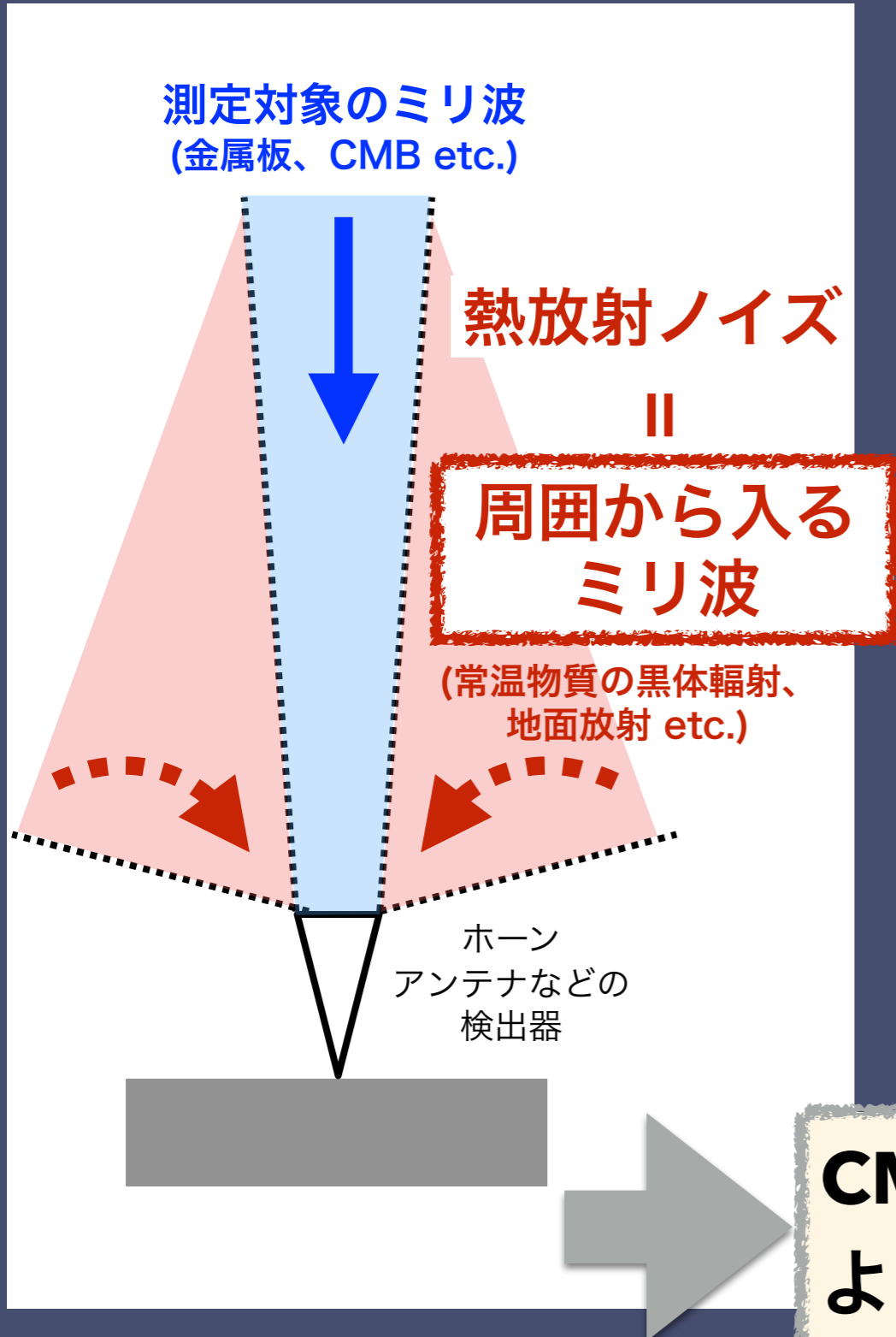
Simos Observatory 望遠鏡

断面図



検出器の前面を低温槽にすることで
測定対象の周りも低温物質を見て
熱放射ノイズを抑制!!

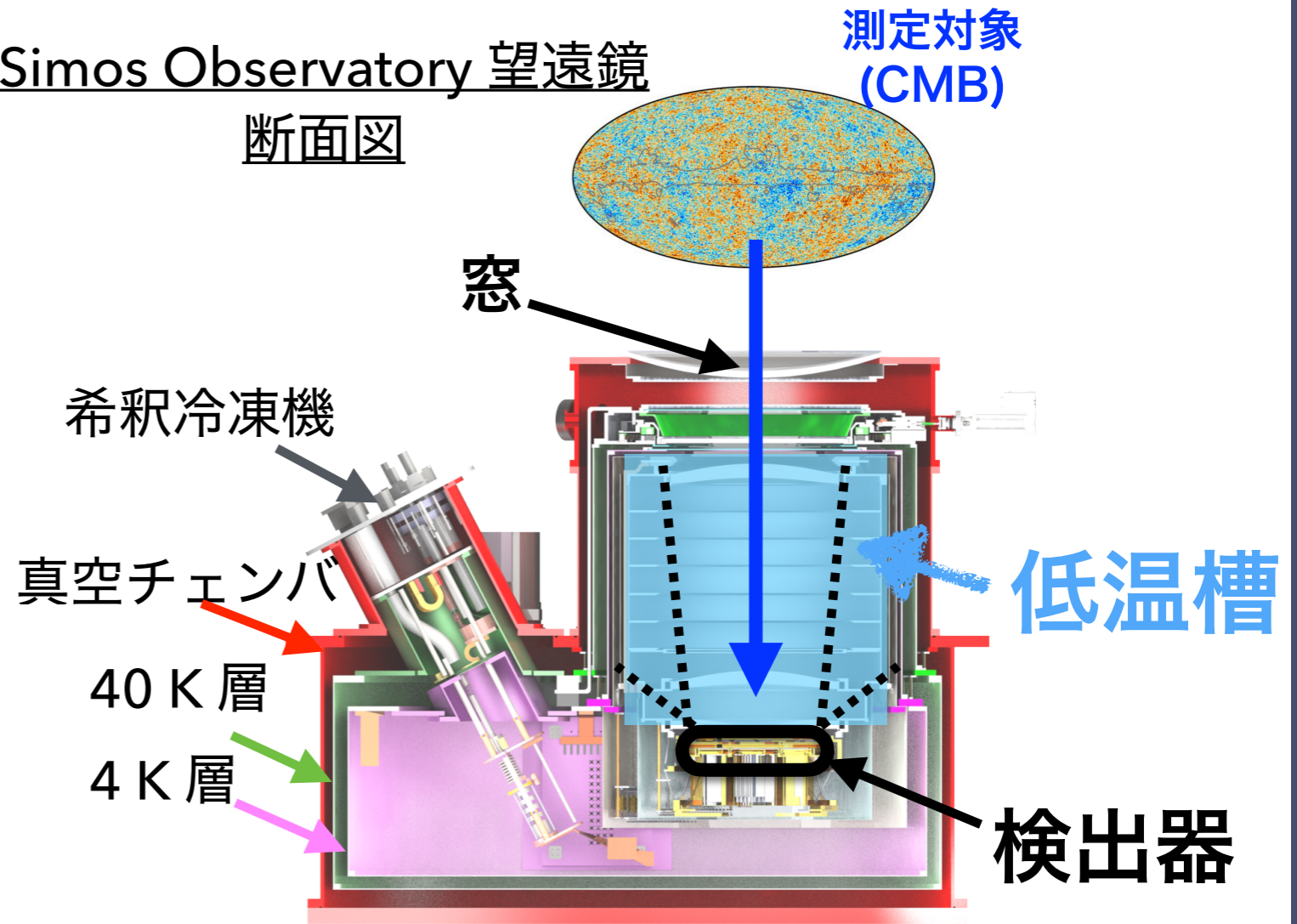
熱放射ノイズ



CMB望遠鏡では

Simos Observatory 望遠鏡

断面図



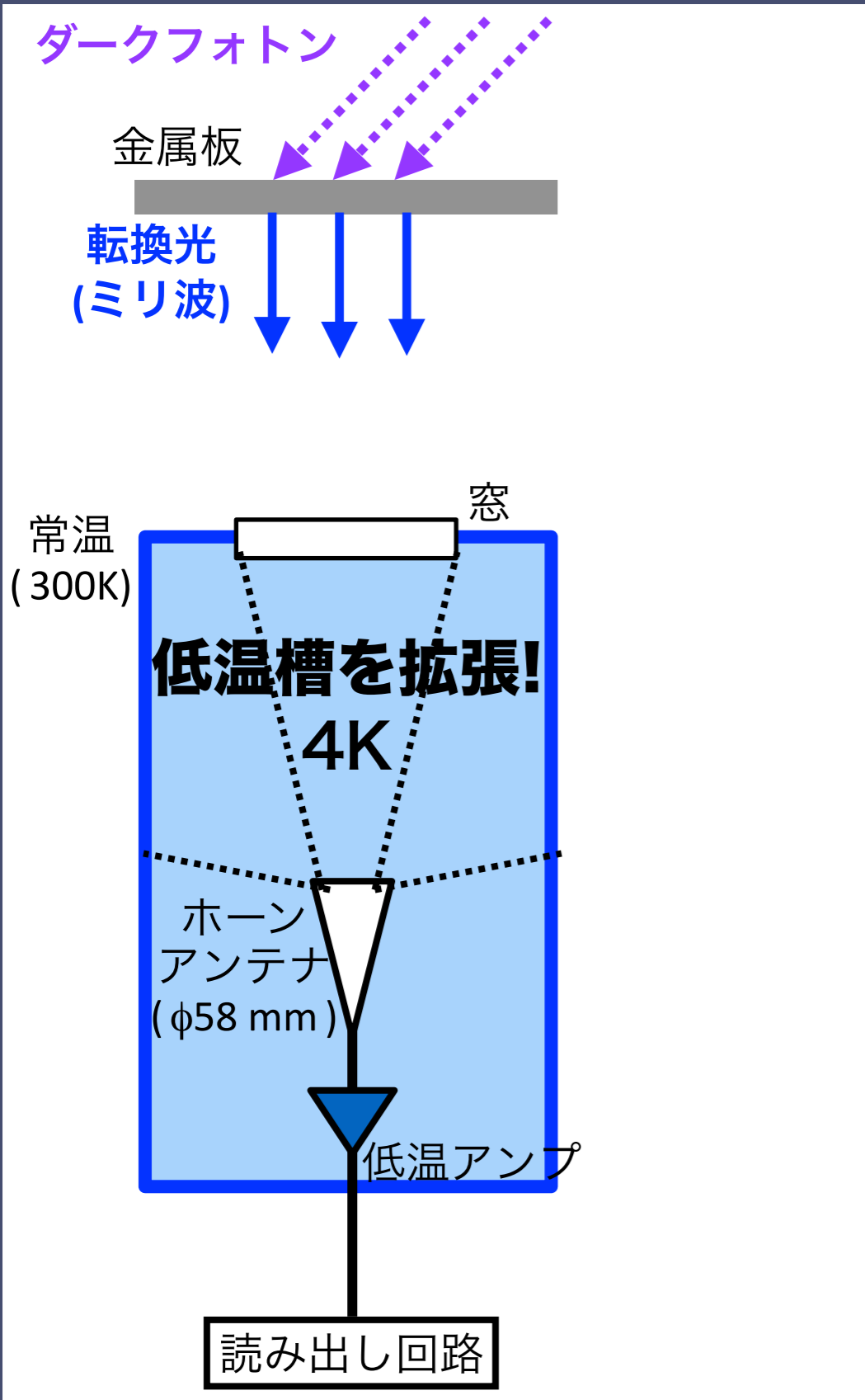
検出器の前面を低温槽にすることで
測定対象の周りも低温物質を見て
熱放射ノイズを抑制!!

**CMB望遠鏡を模して熱放射ノイズを抑制し
より高感度での探索を目指す!!**

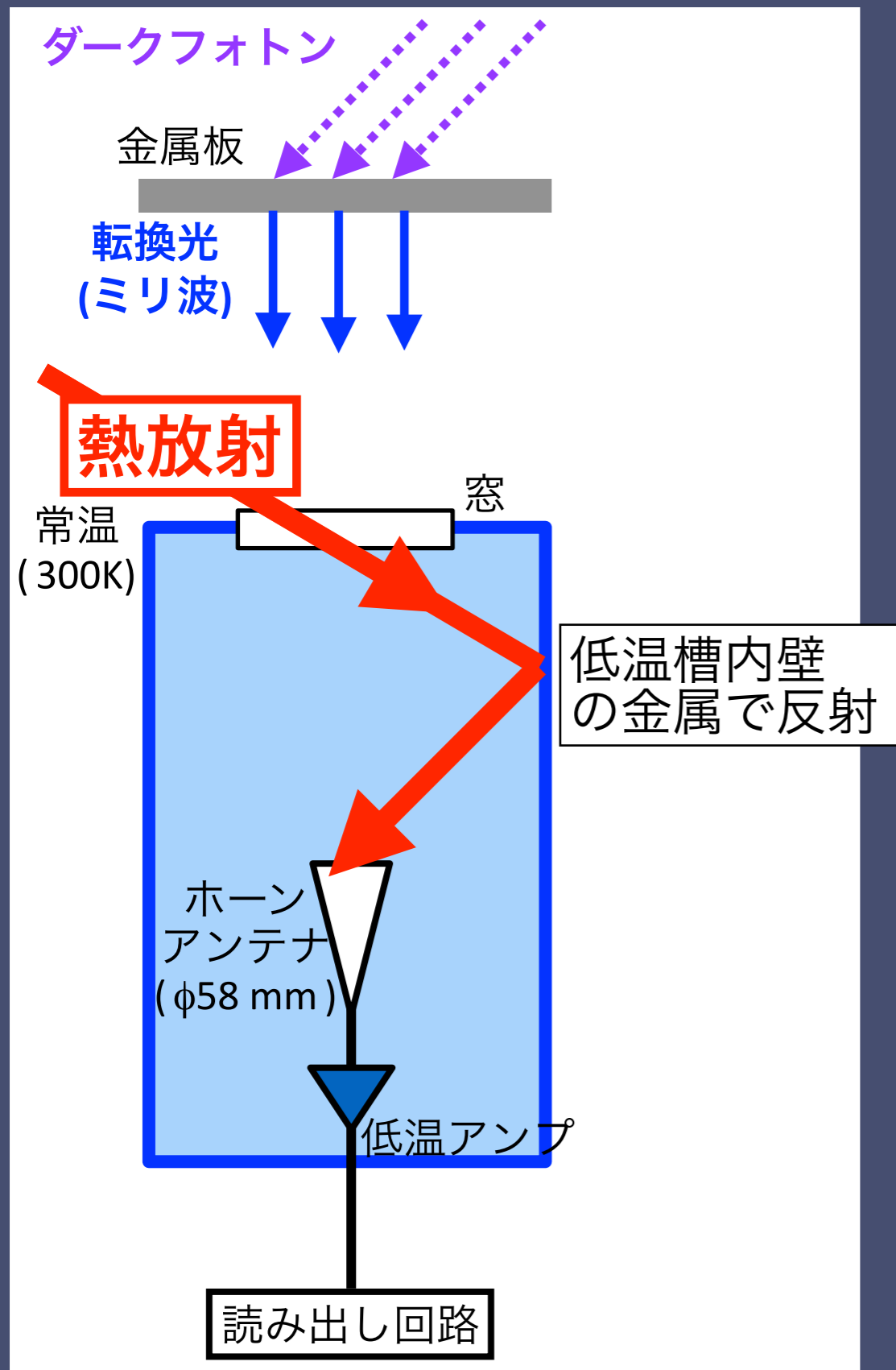
本実験セットアップ

低温槽を拡張し

- ・ アンテナも冷却
- ・ 金属板以外は低温槽を見る



本実験セットアップ

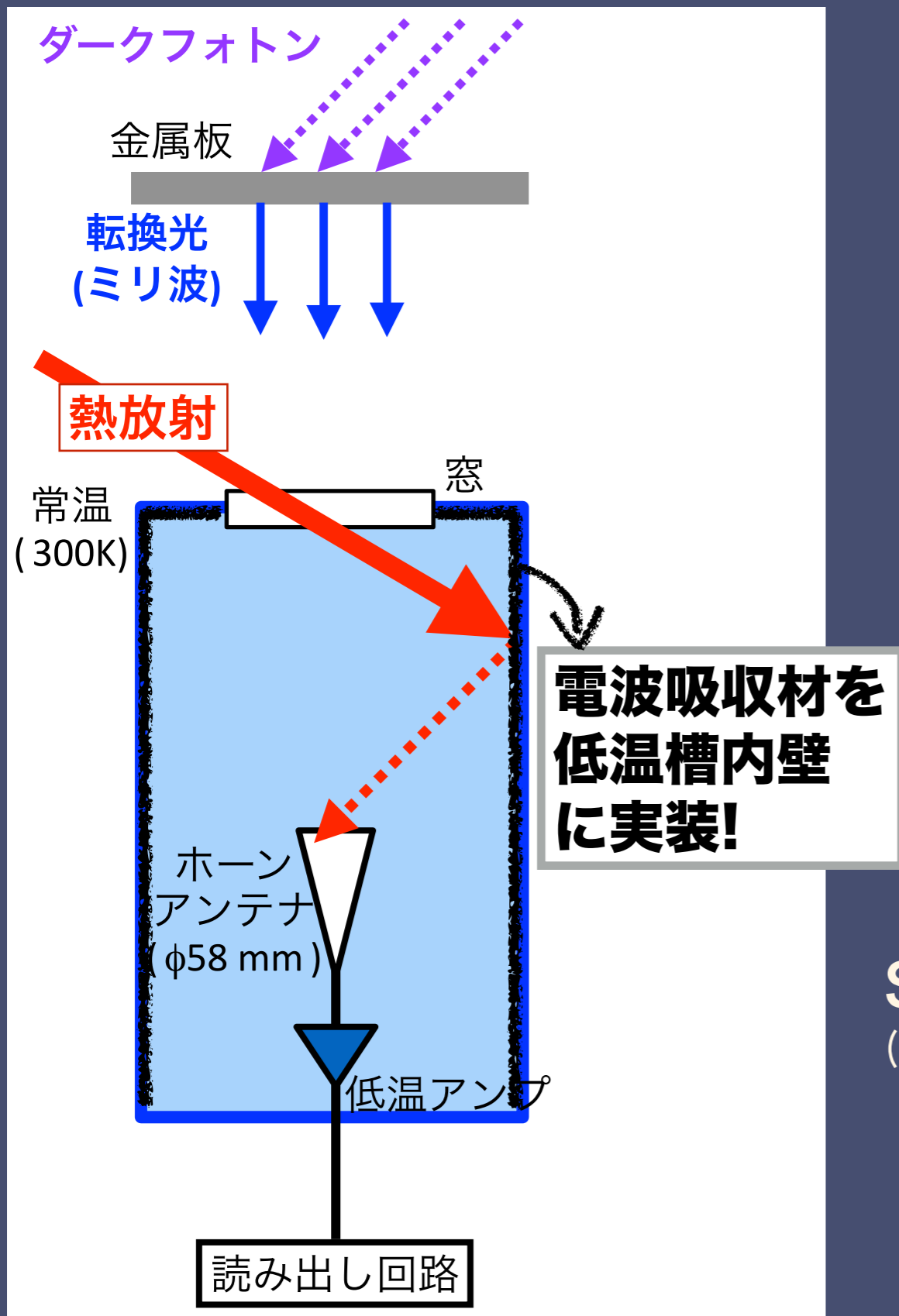


低温槽を拡張し

- ・ アンテナも冷却
- ・ 金属板以外は低温槽を見る

このままでは
内壁で反射した**迷光**が入ってくる
⇒ 結局、外の300K を見ることに...

本実験セットアップ



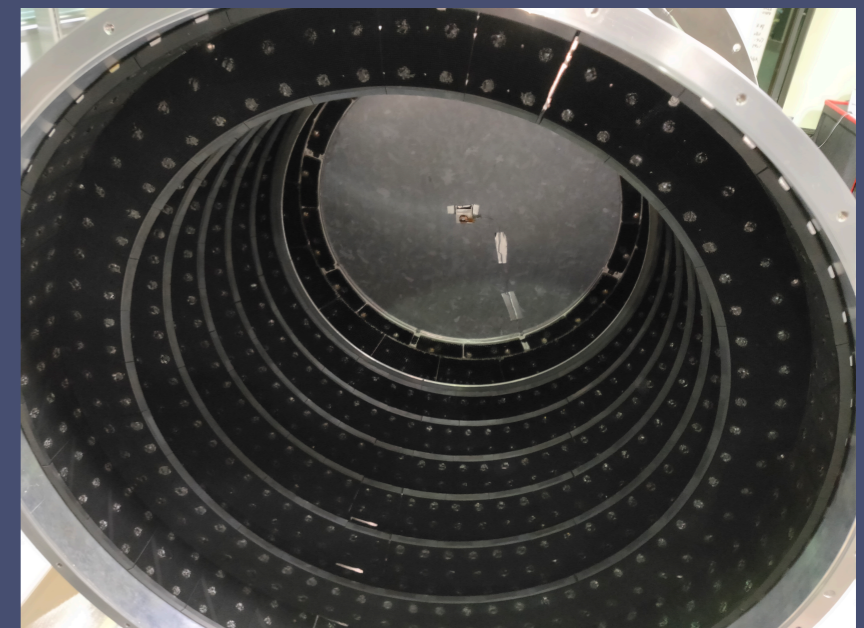
低温槽を拡張し

- ・ アンテナも冷却
- ・ 金属板以外は低温槽を見る

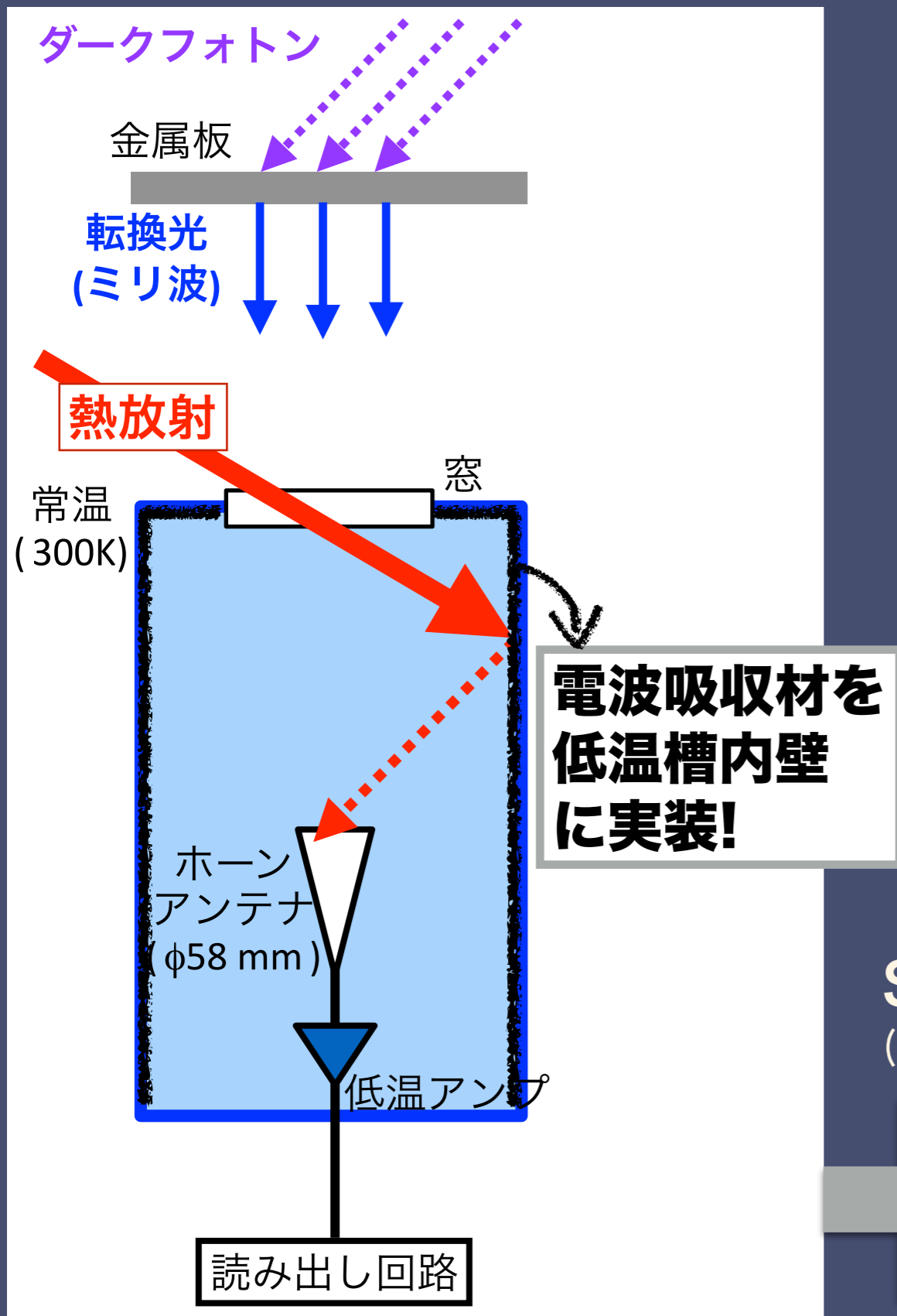
このままでは
内壁で反射した**迷光**が入ってくる
⇒ 結局、外の300K を見ることに...

CMB ではこれを防ぐために
電波吸収材で内壁を覆う

SO 望遠鏡内壁
(バッフルリングがある)



本実験セットアップ



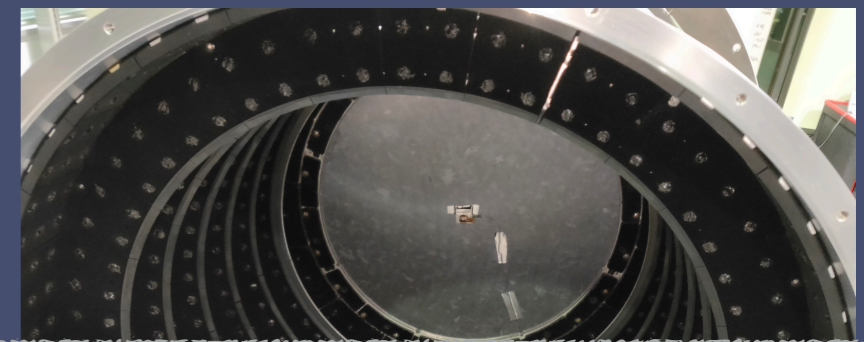
低温槽を拡張し

- ・ アンテナも冷却
- ・ 金属板以外は低温槽を見る

このままでは
内壁で反射した**迷光**が入ってくる
⇒ 結局、外の300K を見ることに...

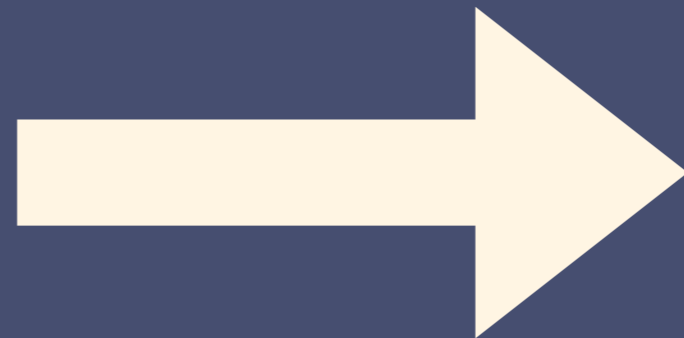
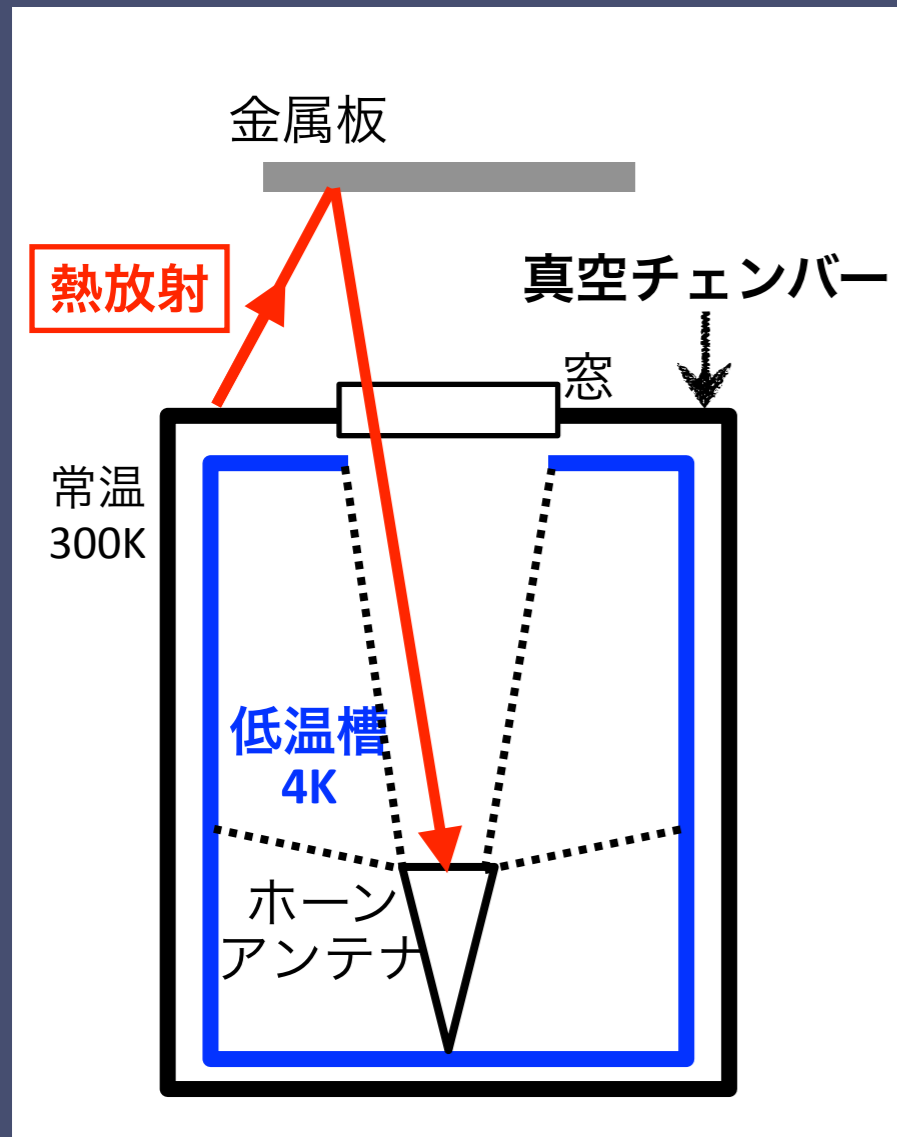
CMB ではこれを防ぐために 電波吸収材で内壁を覆う

SO 望遠鏡内壁
(バッフルリングがある)

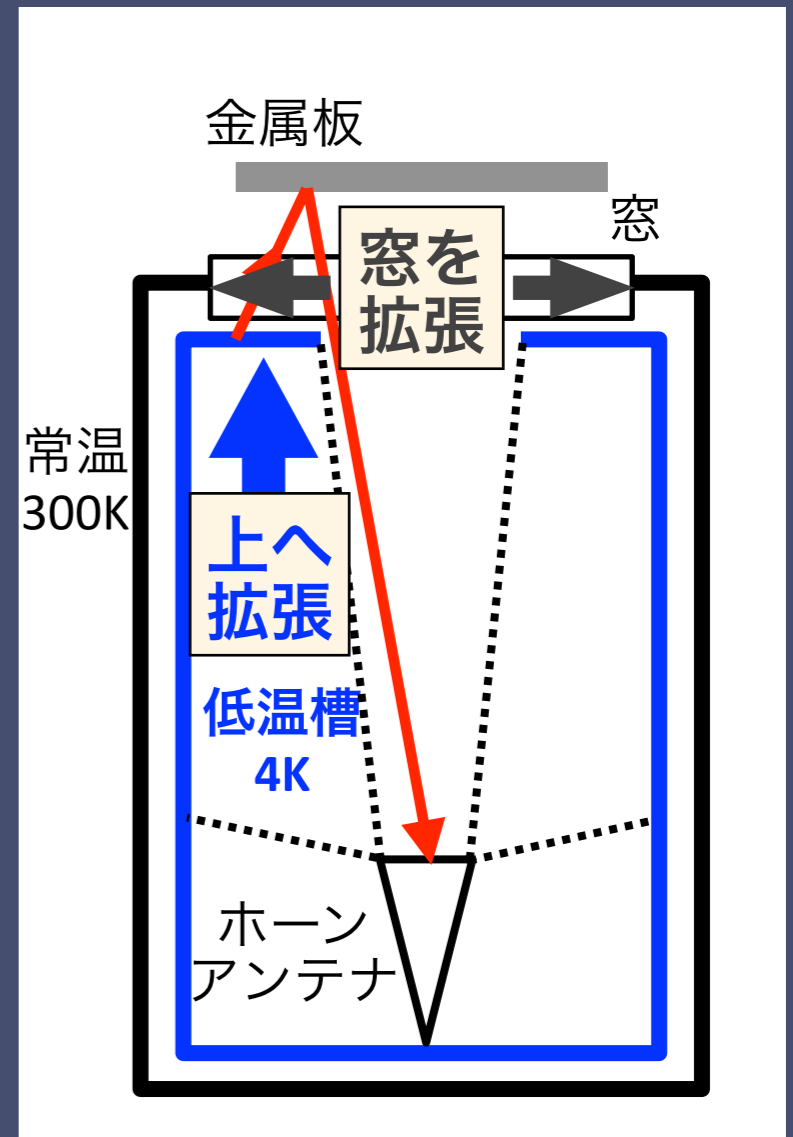


最近開発した吸収材では
99% の電波を吸収!! (3Kの効果)

受信機的设计と熱放射ノイズ源



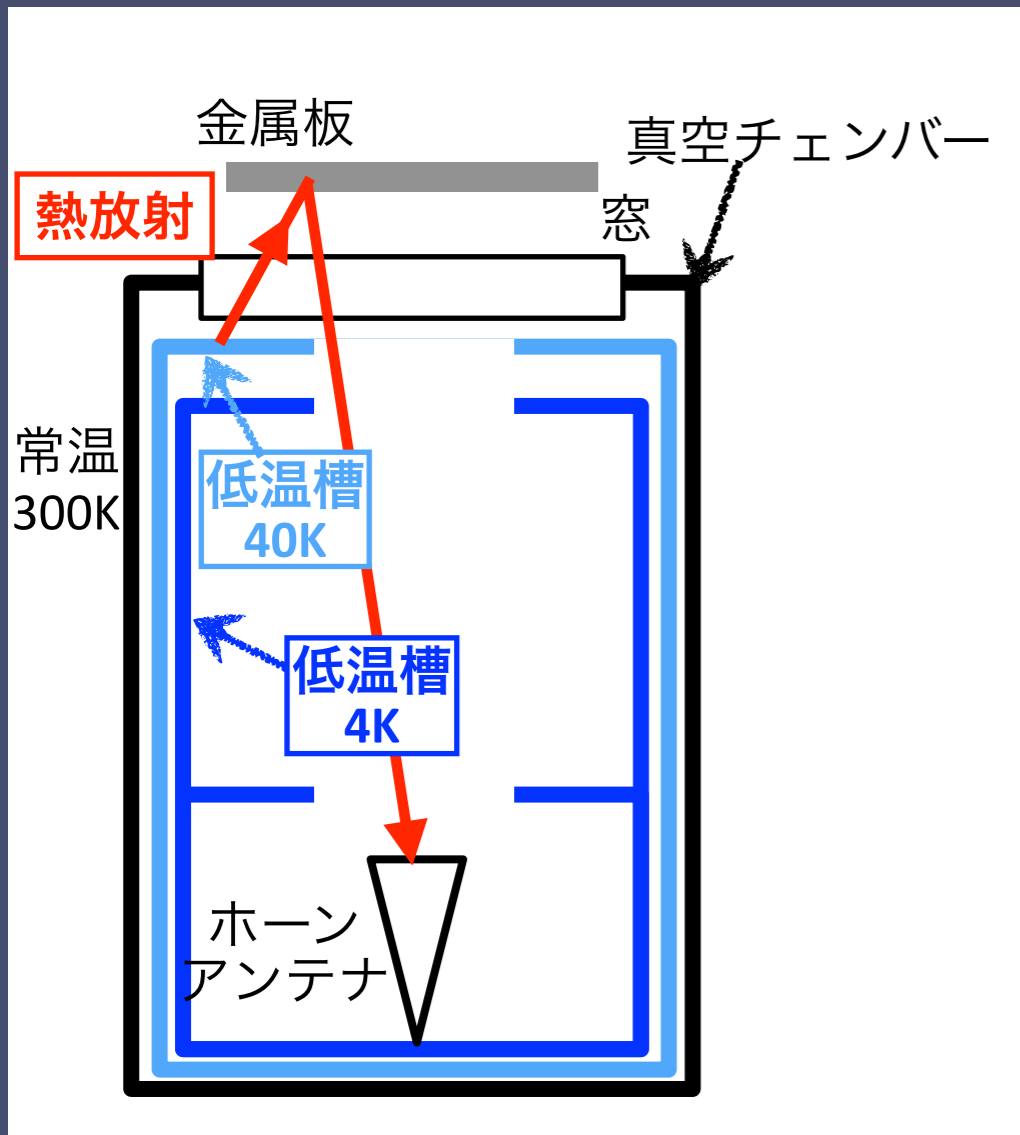
- ・ 低温槽を金属板まで拡張する
- ・ 窓を低温槽の穴より大きくする



金属板方向からも
金属板表面の反射で
常温からの放射を受け得る

金属板表面の反射が
低温槽に入る
⇒ すべて低温槽を見る

受信機的设计と熱放射ノイズ源



実際のクライオスタットは
4K槽だけでなく、**40K槽**も存在

(多層構造にしないと4Kまで冷えない)

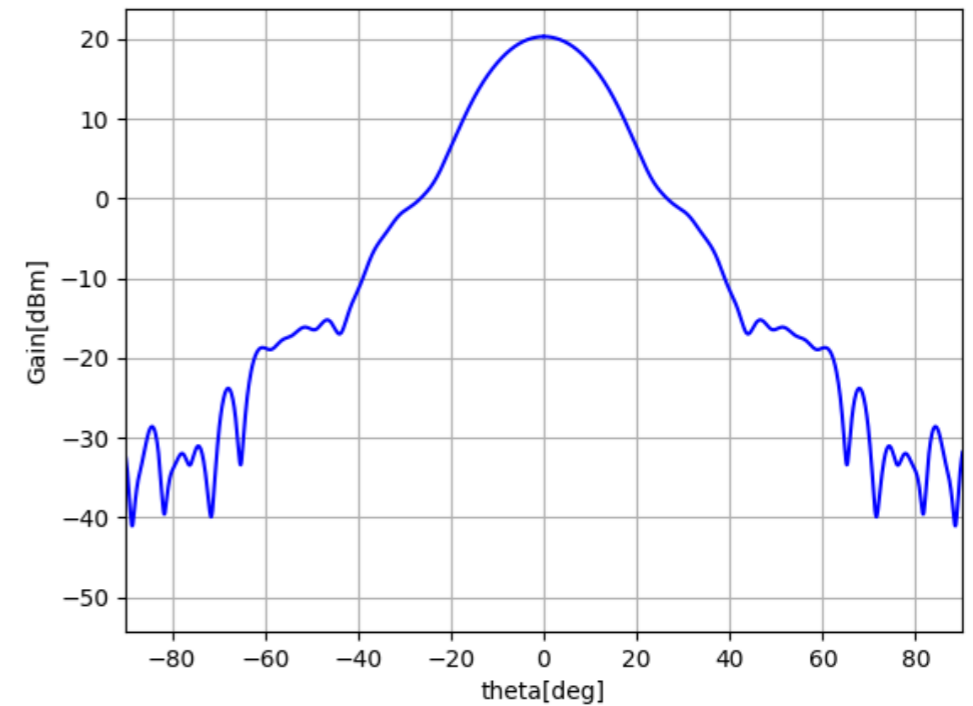
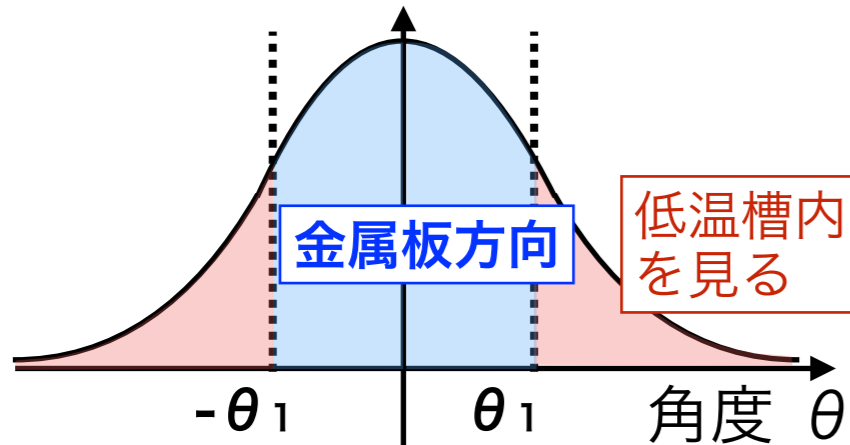
金属板を反射して入ってくる熱放射は
40K を見ることになる

熱放射ノイズの推定

アンテナの方向感度

のシミュレーション

アンテナの方向感度



熱放射ノイズ

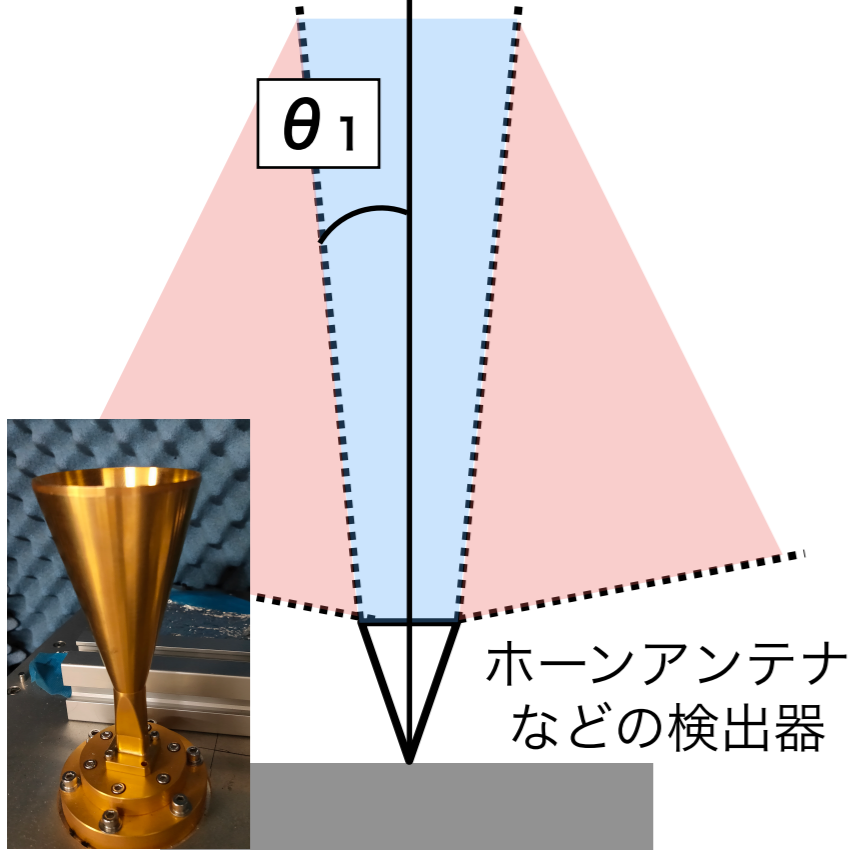
||

[各方向 θ からくる電波の強度(温度)]

×

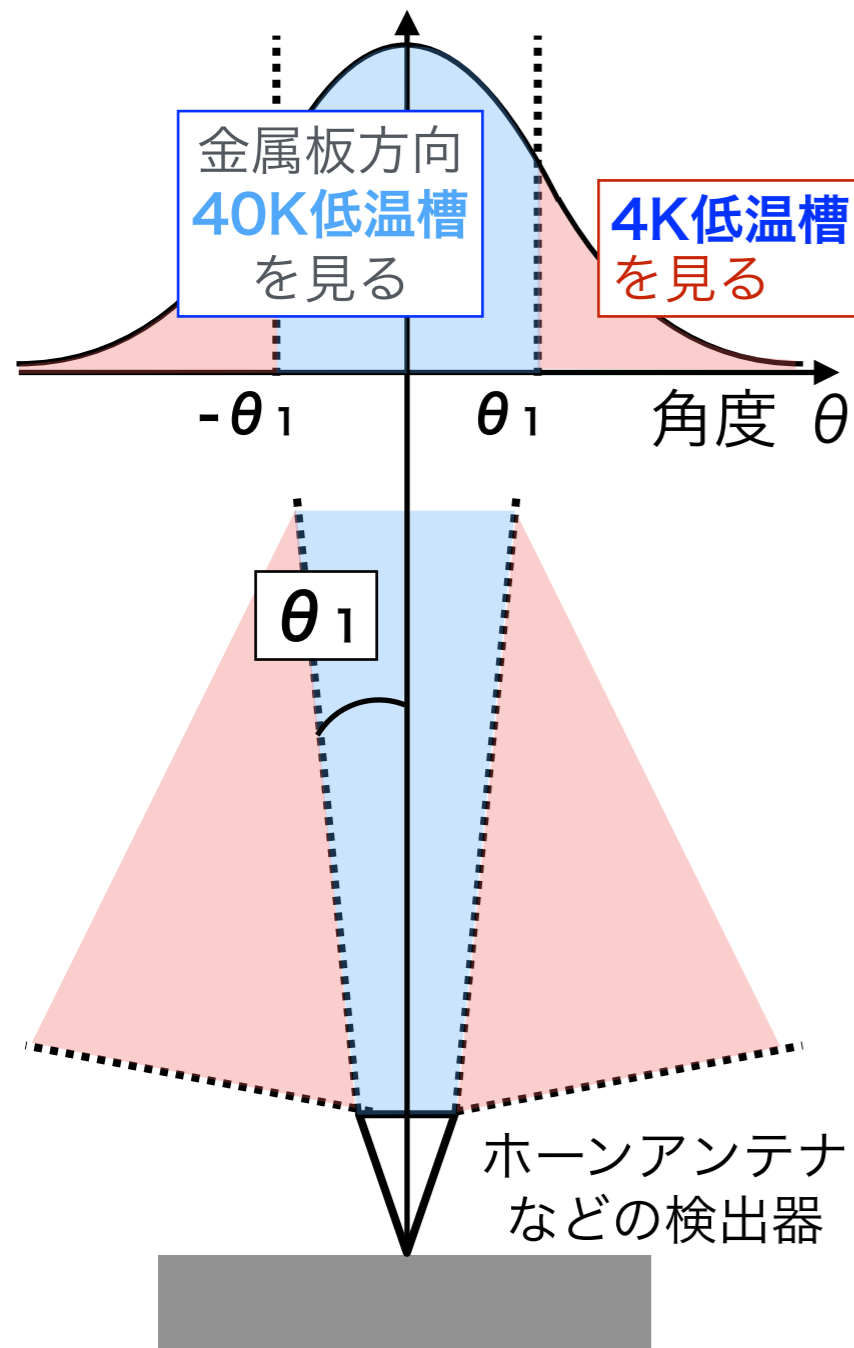
[アンテナの指向性(方向感度)]

の積分

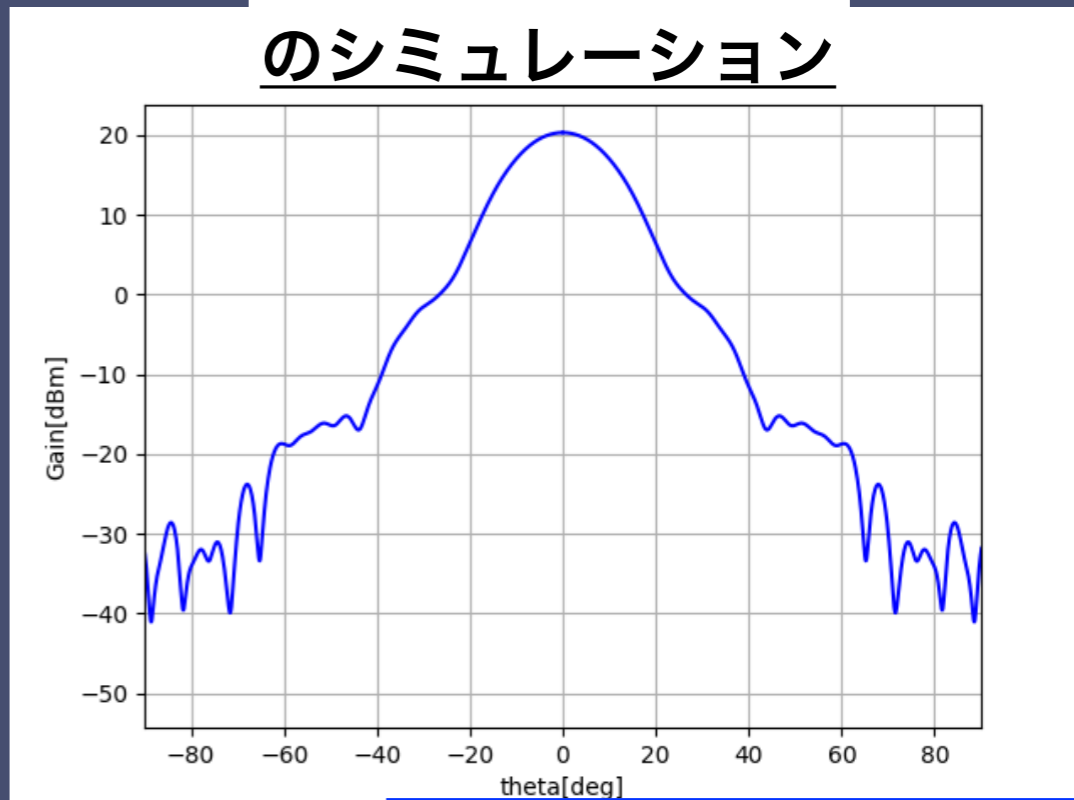


熱放射ノイズの推定

アンテナの方向感度



アンテナの方向感度のシミュレーション



熱放射ノイズ (T_{load})

= 10.7 K

||

[各方向からくる電波の強度(温度)]

×

低温槽: 4K or 40K

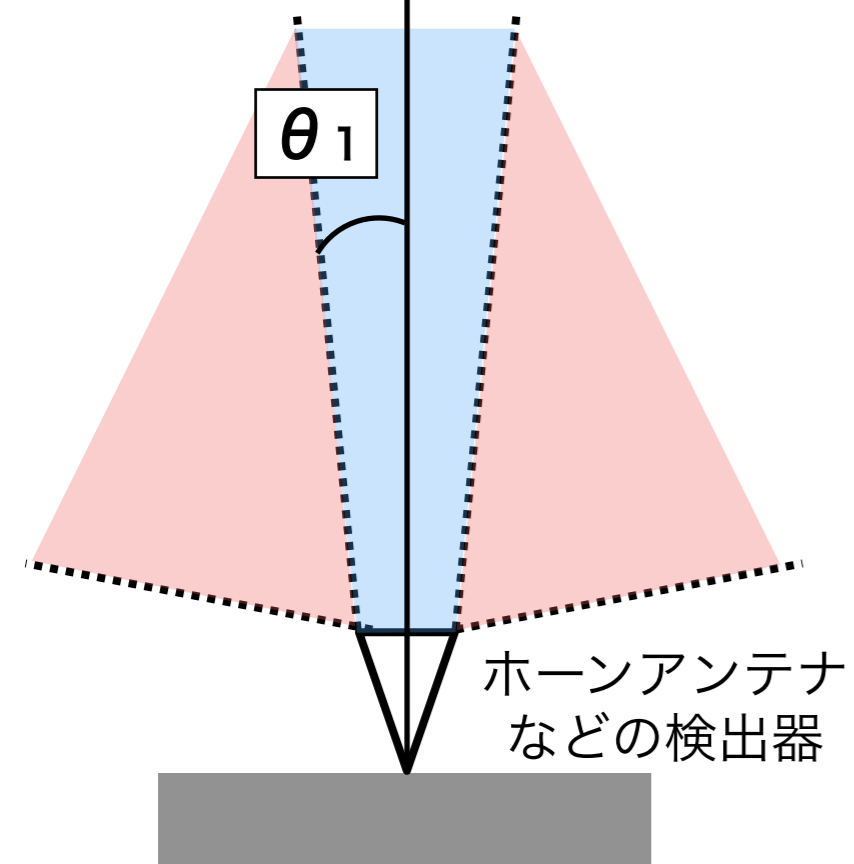
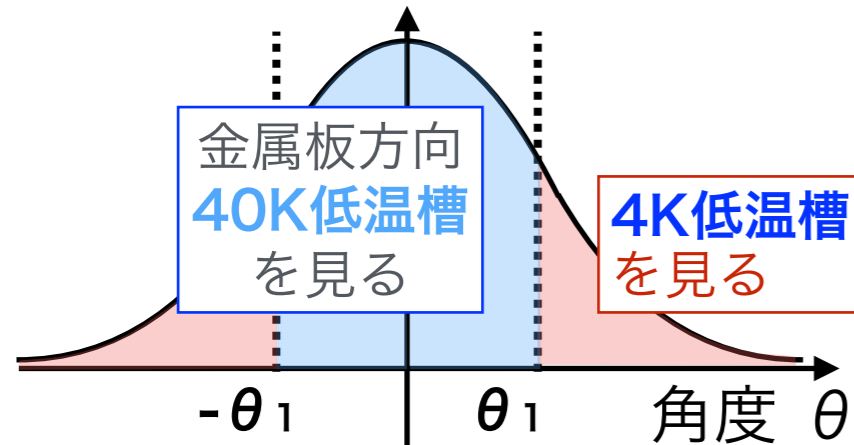
[アンテナの指向性(方向感度)]

上のシミュレーションより

の積分

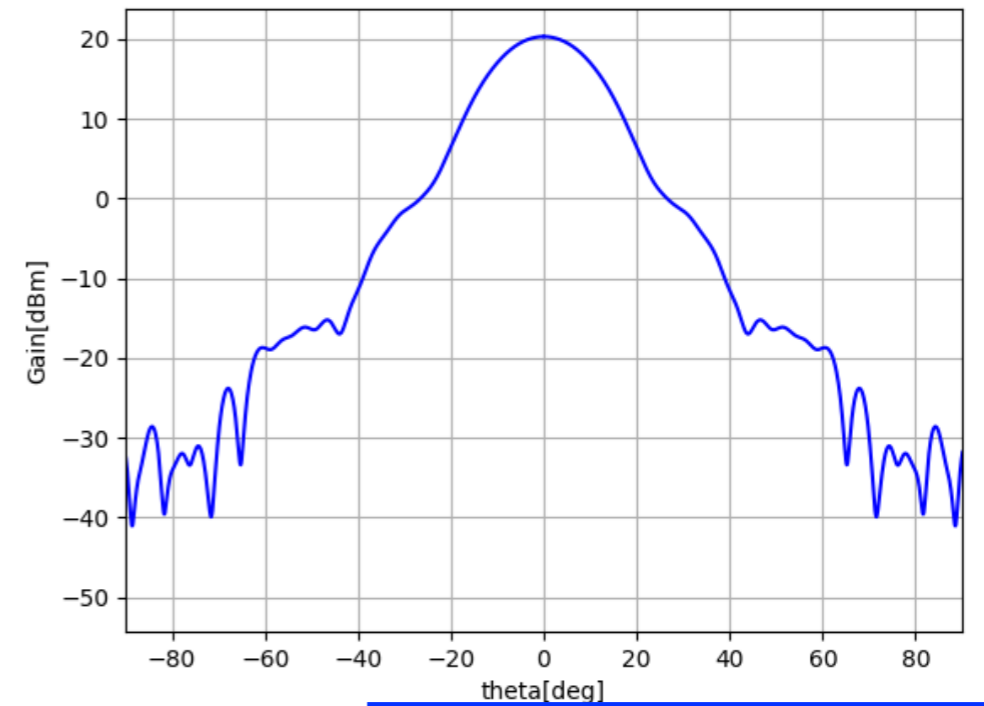
熱放射ノイズの推定

アンテナの方向感度



アンテナの方向感度

のシミュレーション



熱放射ノイズ (T_{load})

= 10.7 K

先行実験の $T_{load} = 140 K$

比べて **13 分の1** に!!

の積分

結合定数 χ の感度の改善

先行実験からの改善

- ・ 全ノイズの抑制：180 K \Rightarrow ~20 K (9分の1倍)
- ・ 測定時間：10 hours \Rightarrow 100 hours = 4 days (10倍)

- ・ $\chi \propto \sqrt{\text{(測定する信号強度)}}$

$$\begin{cases} \Delta\chi \propto \sqrt{T} \\ \Delta\chi \propto 1/t^{1/4} \end{cases}$$

結合定数 χ の感度の改善

先行実験からの改善

- ・ 全ノイズの抑制：180 K \Rightarrow ~20 K (9分の1倍)
- ・ 測定時間：10 hours \Rightarrow 100 hours = 4 days (10倍)

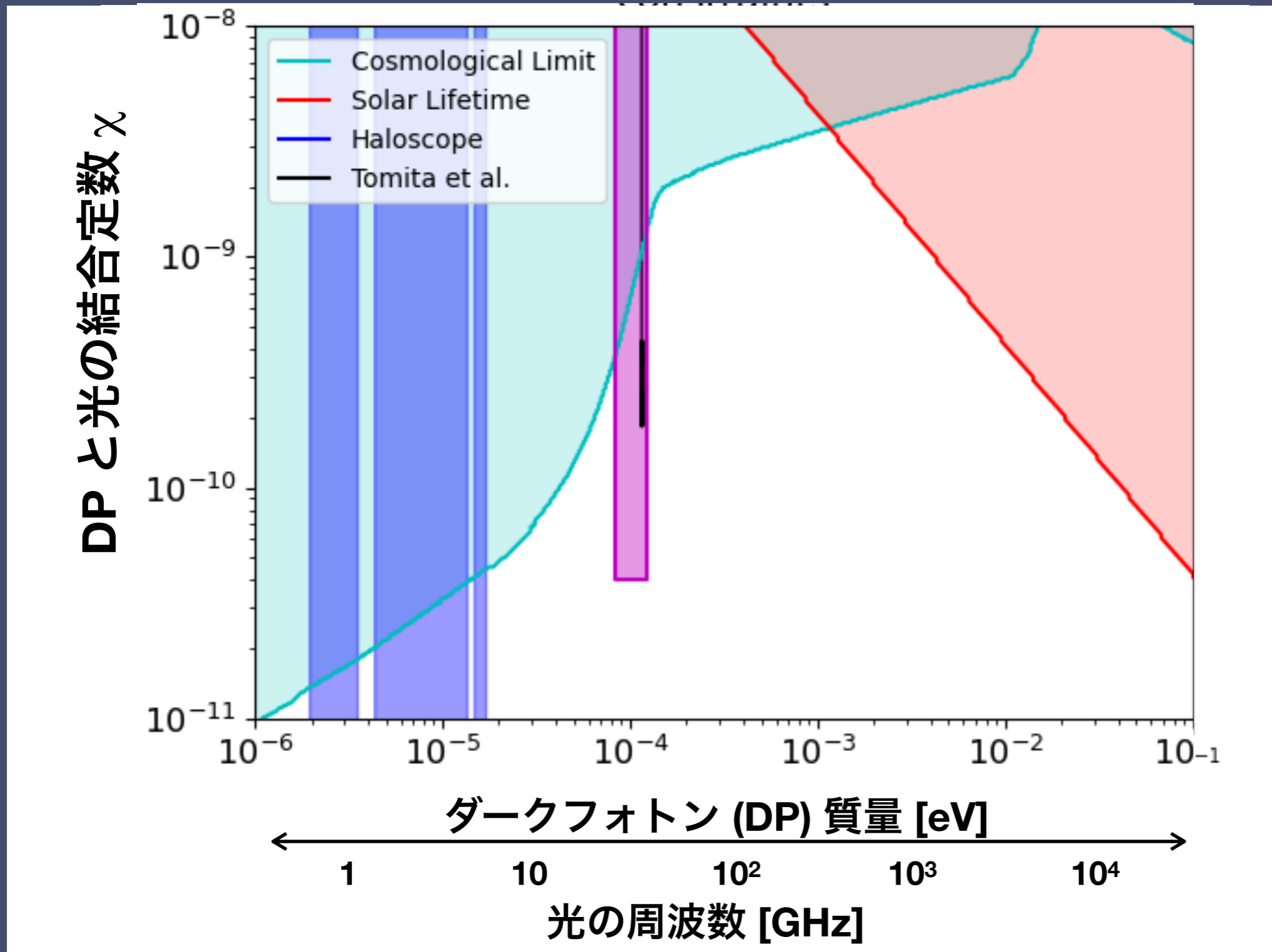
- ・ $\chi \propto \sqrt{\text{(測定する信号強度)}}$

$$\begin{cases} \Delta\chi \propto \sqrt{T} \\ \Delta\chi \propto 1/t^{1/4} \end{cases}$$

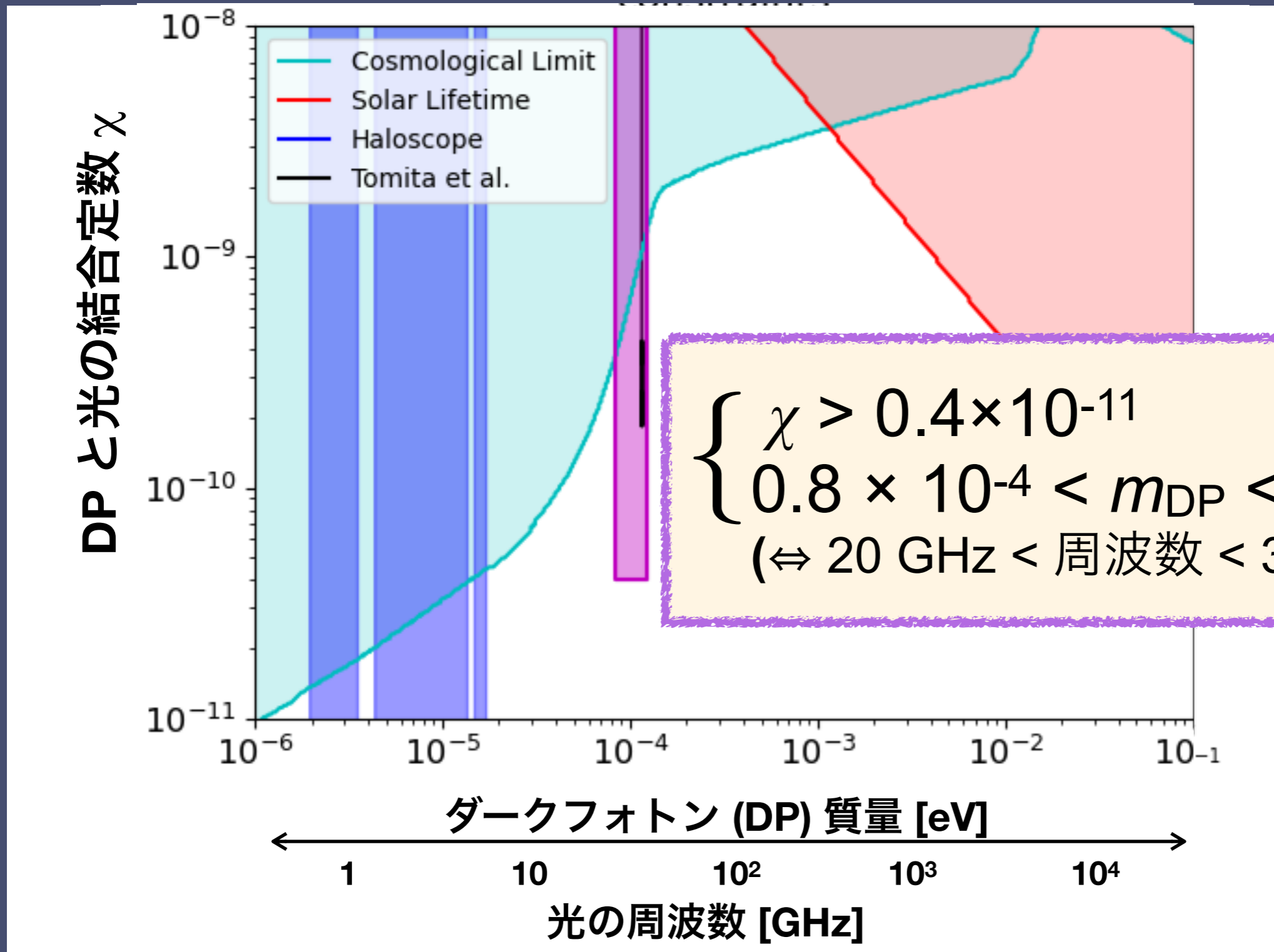


χ への感度で 5倍

予想感度

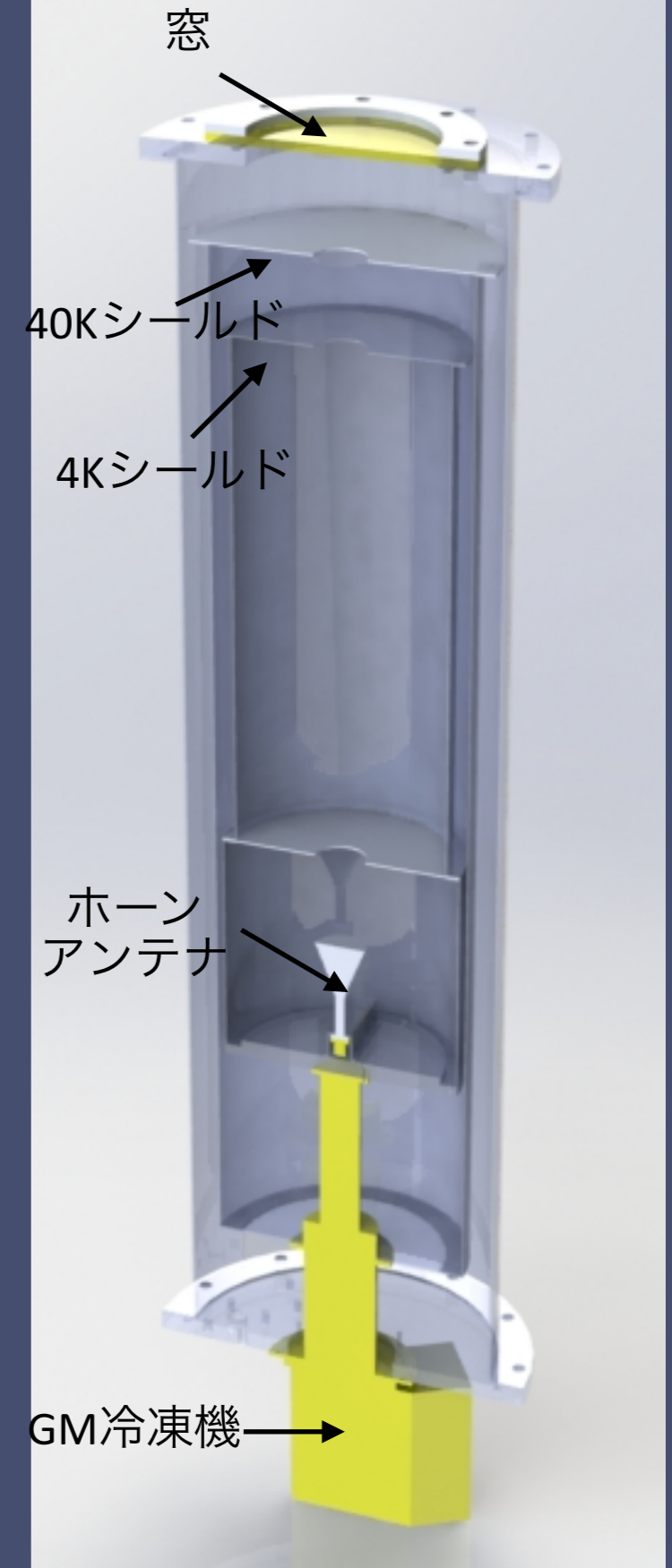


予想感度



現状 & 予定

- 熱放射ノイズを防ぐのに最適なクライオスタットの設計がおおよそ完了!
- 実際に製作 & 先行研究と同じ @ 20GHz での測定を年度中に計画!



まとめ

- CMB望遠鏡の熱放射ノイズ抑制技術を生かして
先行研究から**より高い感度**での Dark Photon の探索を目指す
- 4日間の測定で**感度 5 倍**で探索!!
 - 冷却系の拡張&最適化/黒体の実装 によって、
 - T_{load} を**1/13** に抑制
- 現在設計がおおかた完了!!
- 本年度中にまず ~20GHz での測定を実施!!

その先は...

- 読み出し回路の自作で dead time を抑制 (現在の duty 比 1/300)
- 既存の部品からの帯域の交換でより広帯域での探索(20~200GHz) にも!!