

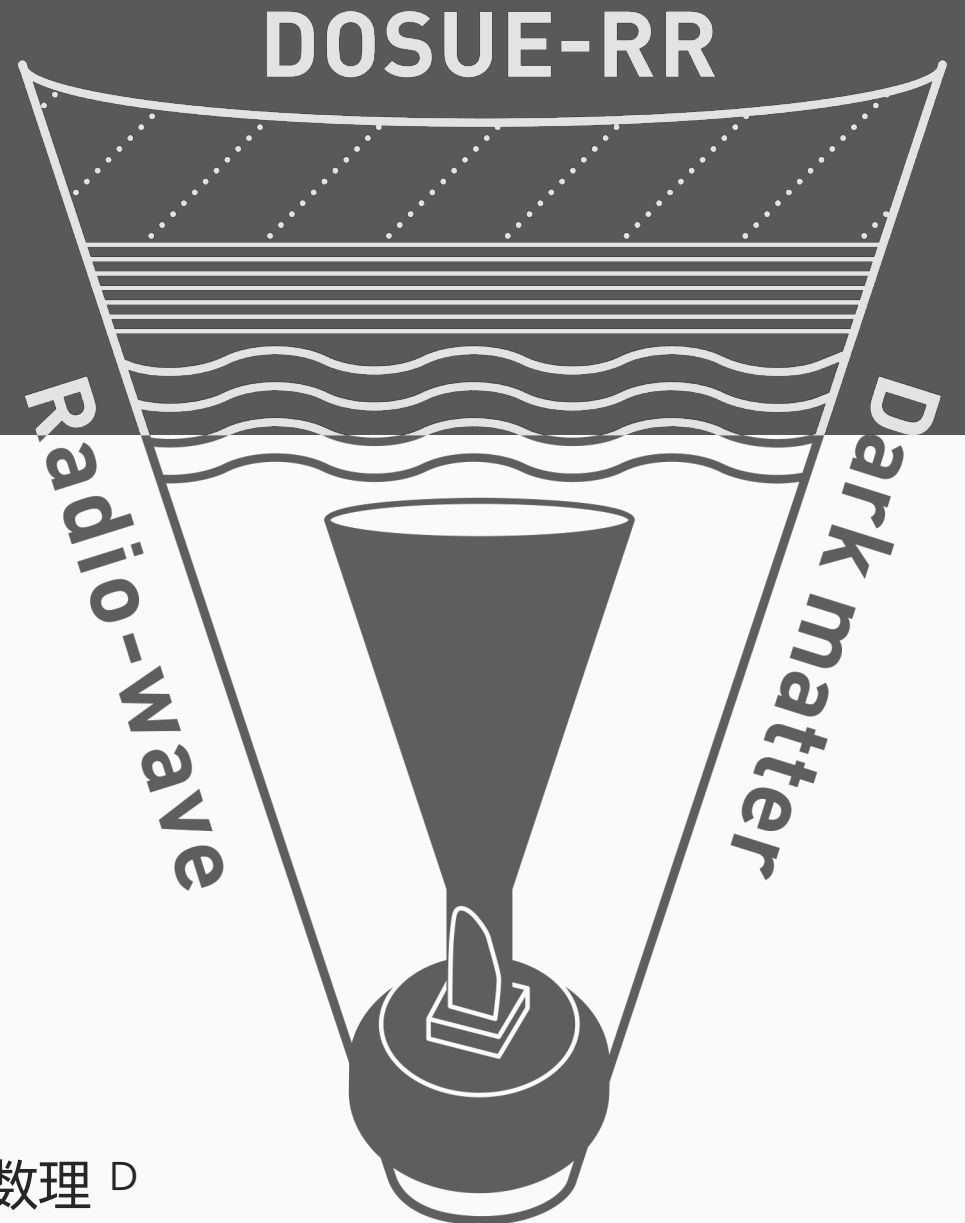
# ミリ波受信機を用いた ダークフォトン探索実験 DOSUE-RR

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

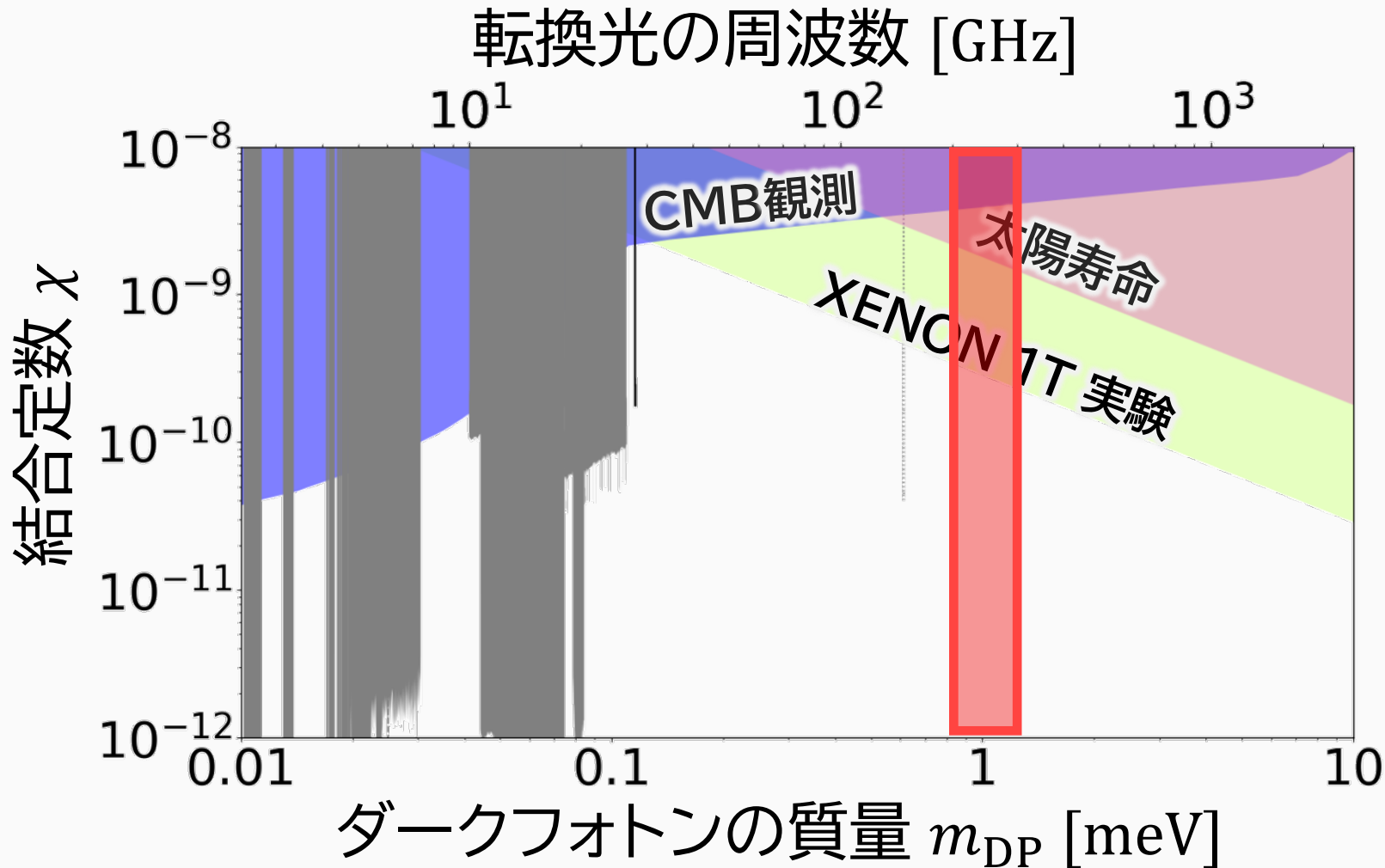
第 31 回 ICEPP Symposium (2025/02/17)

埴村圭吾, 安達俊介, 小川英夫 <sup>A</sup>, 鈴木惇也, 竹内広樹,  
田島治, 中島拓 <sup>B</sup>, 長谷川豊 <sup>C</sup>, 本多俊介 <sup>D</sup>

京大理, 大阪公立大理 <sup>A</sup>, 名古屋大 ISEE <sup>B</sup>, NICT <sup>C</sup>, 筑波大数理 <sup>D</sup>



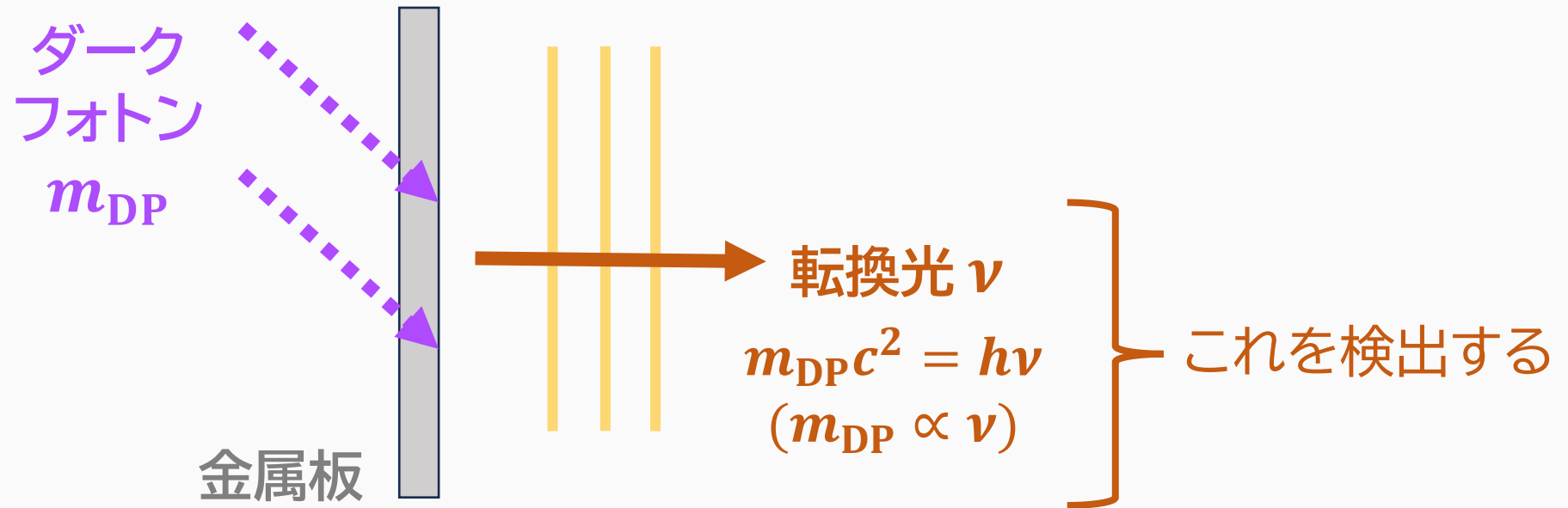
# DOSUE-RR の現在のターゲット



- $\sim 240$  GHz ( $\sim 1$  meV) の高周波帯を探索する
- 高周波に対応した受信機を開発

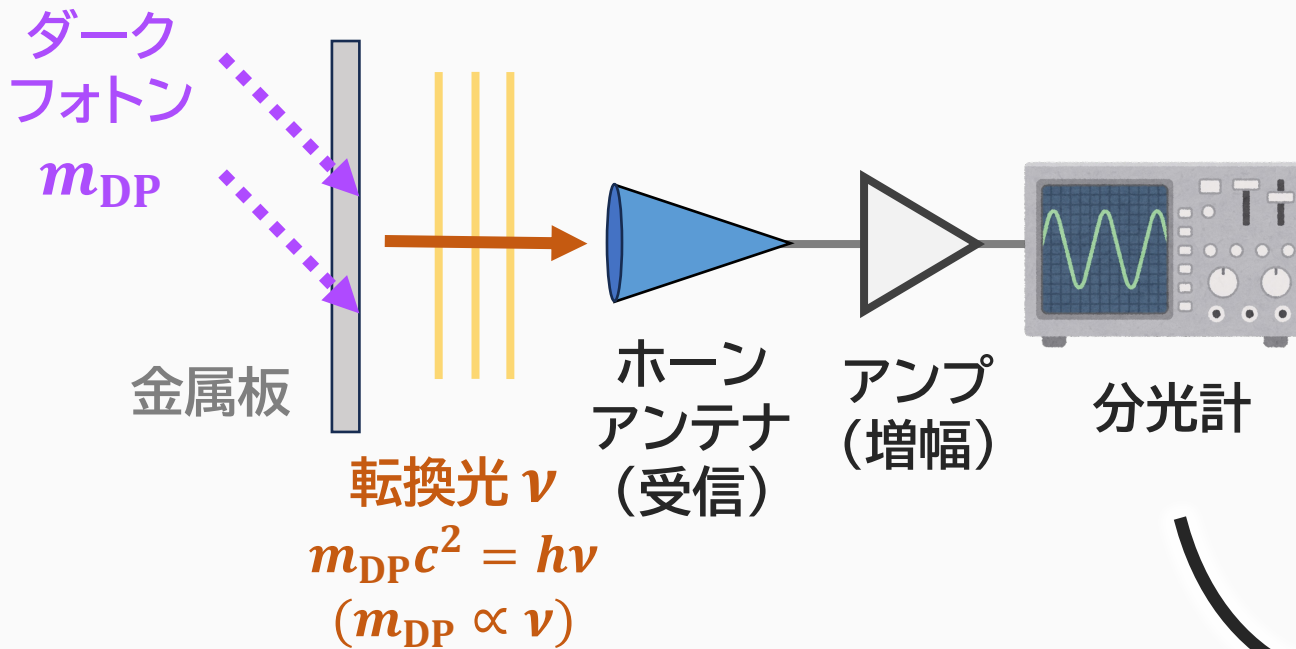
# ダークフォトンの検出原理

- 金属板の表面から極めて微弱な転換光が**垂直**に生じる



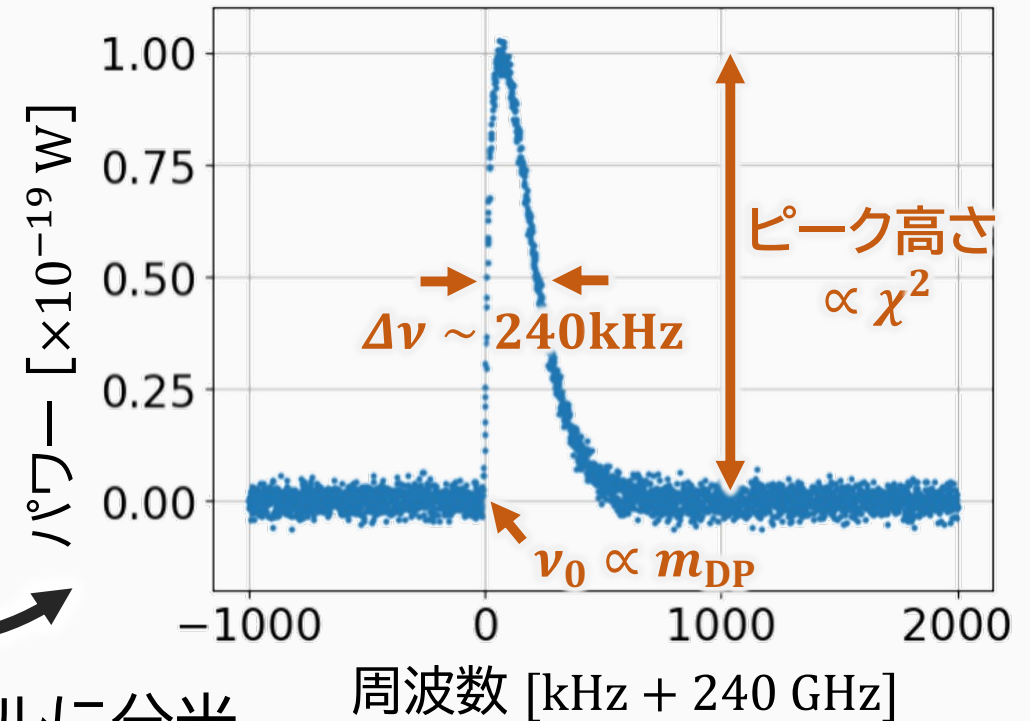
# ダークフォトンの検出原理

- 金属板の表面から極めて微弱な転換光が**垂直**に生じる



シミュレーション: 鋭いピークが見られる

$$m_{DP} = 1 \text{ meV} \leftrightarrow \nu = 240 \text{ GHz}$$

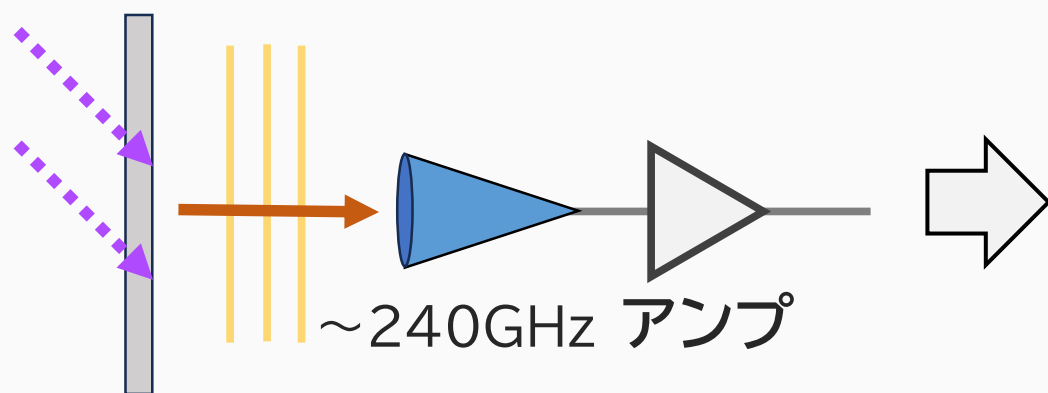


周波数スペクトルに分光

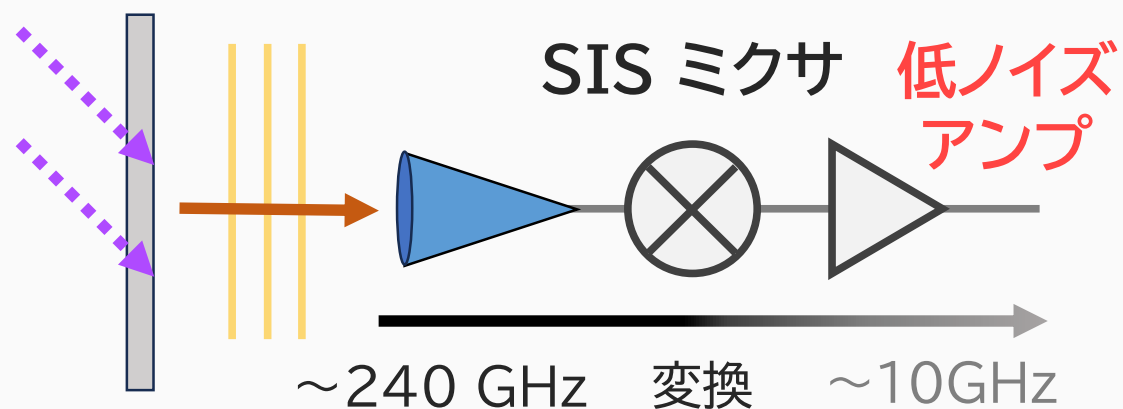


# 高周波を高感度に探索するために

- 転換光は極めて微弱 → 低ノイズで増幅し、より小さな結合定数を探索
  - しかし、高周波帯域では低ノイズアンプは存在しない（最低でも ~500K）
- **SIS ミクサ**を導入し、高周波を低ノイズアンプの存在する低周波まで周波数を落とす



ノイズレベル ~500 K



ノイズレベル ~100 K

※ 結合定数  $\chi$  への感度  $\propto \sqrt{\text{ノイズレベル[K]}}$

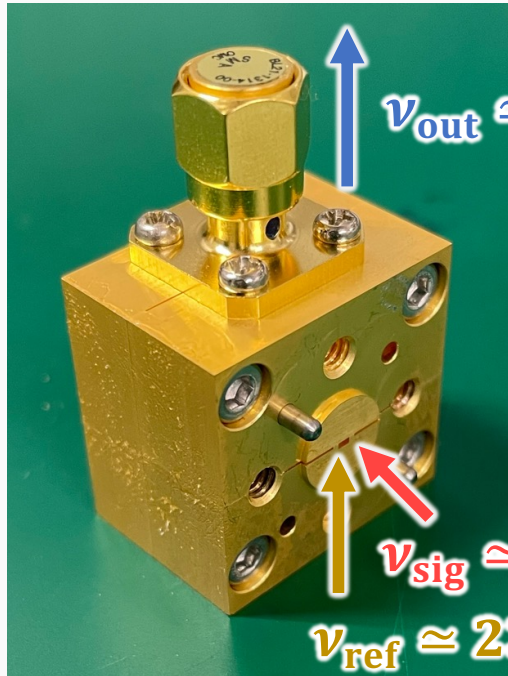
# SIS ミクサ (Superconductor – Insulator – Superconductor mixer)



SIS ミクサ

- 周波数を変換する超伝導デバイス
- 低ノイズ ( $\sim 100 \text{ K}$ )
- 2 周波数  $\nu_{\text{sig}}$ 、 $\nu_{\text{ref}}$  をミキシングし、  
差周波  $\nu_{\text{out}} = |\nu_{\text{sig}} - \nu_{\text{ref}}|$  を出力する

# ミキシングの原理

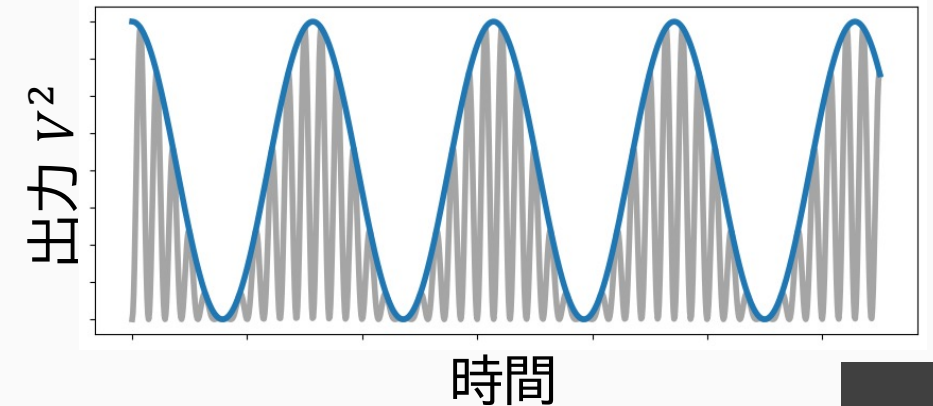
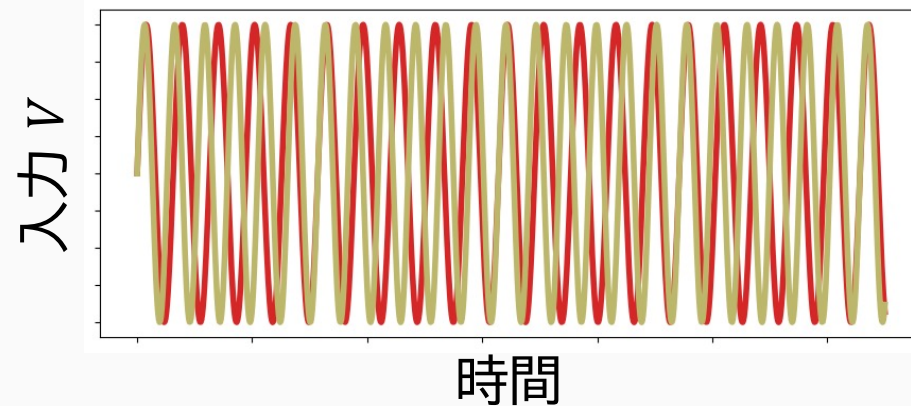


SIS ミクサ

- I-V 特性の非線形性から、 $v^2$ の項が現れる

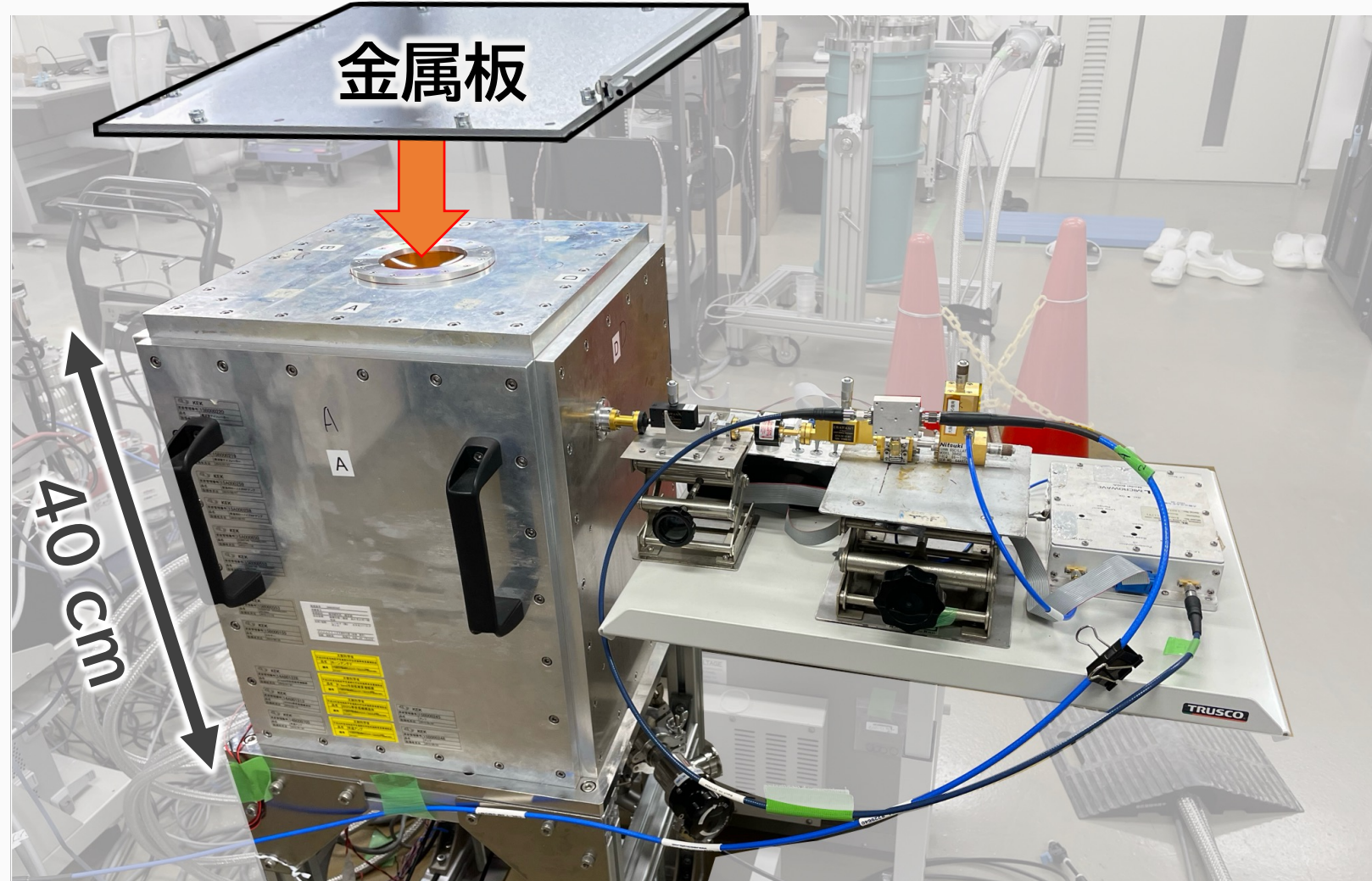
$$\begin{aligned} I &\propto (V_{\text{sig}} + V_{\text{ref}})^2 \\ &= |\sin(2\pi\nu_{\text{sig}}t) + \sin(2\pi\nu_{\text{ref}}t)|^2 \\ &= \sin[2\pi(\nu_{\text{sig}} - \nu_{\text{ref}})t] + \text{other terms.} \end{aligned}$$

sig, ref を入力すると → ミキシングして、低周波信号を取り出す

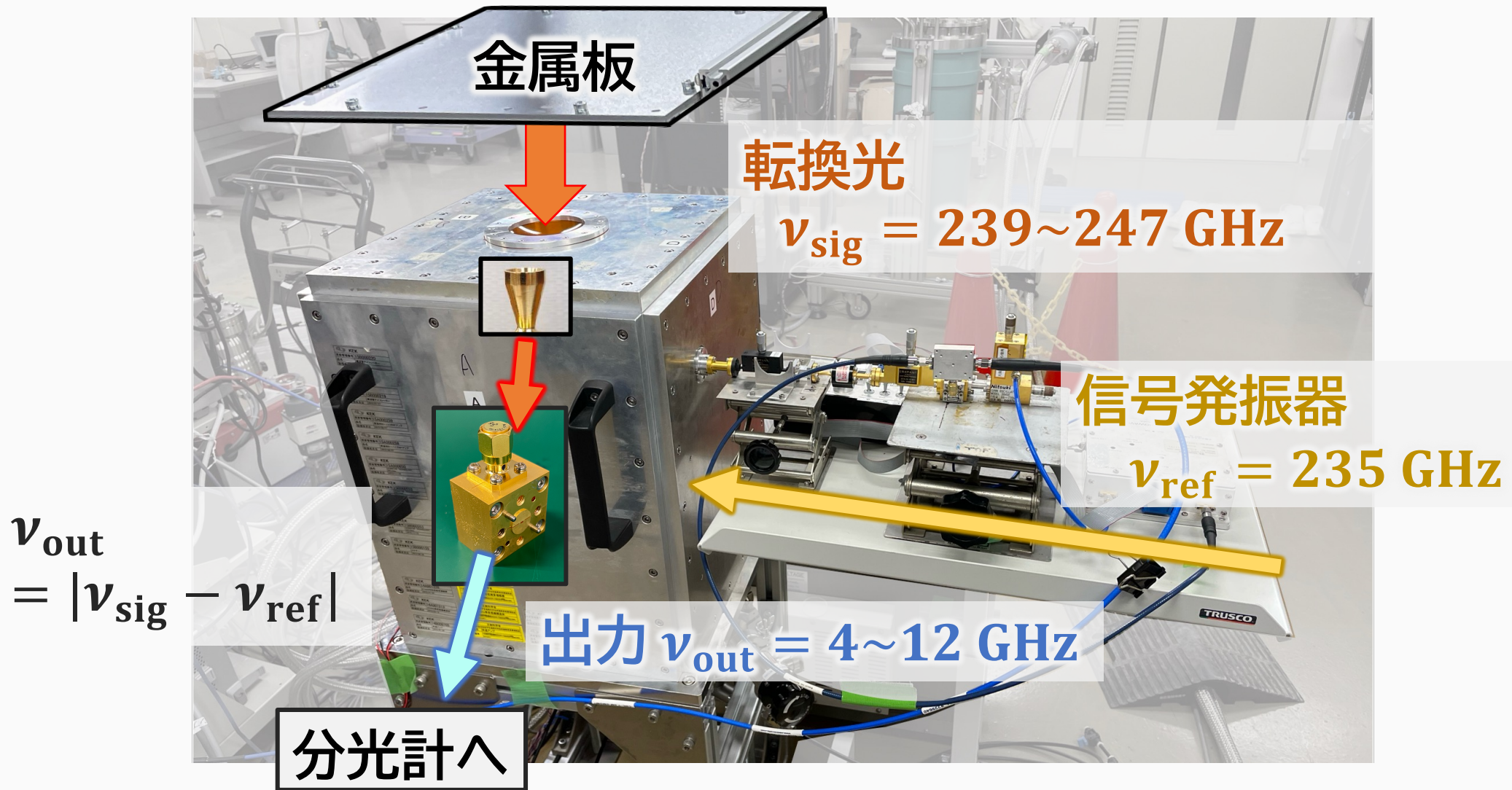




# 開発した 240 GHz 受信機

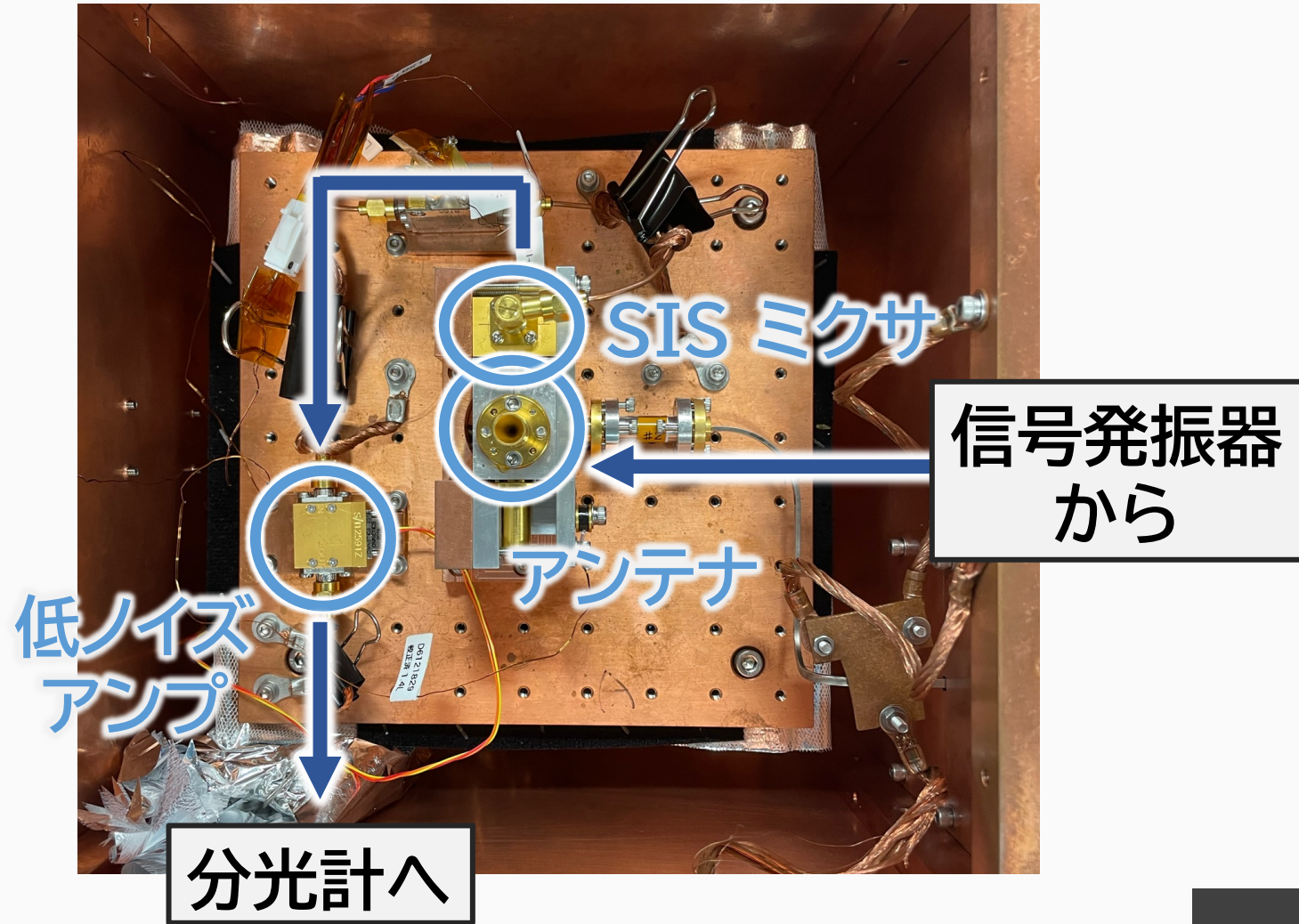
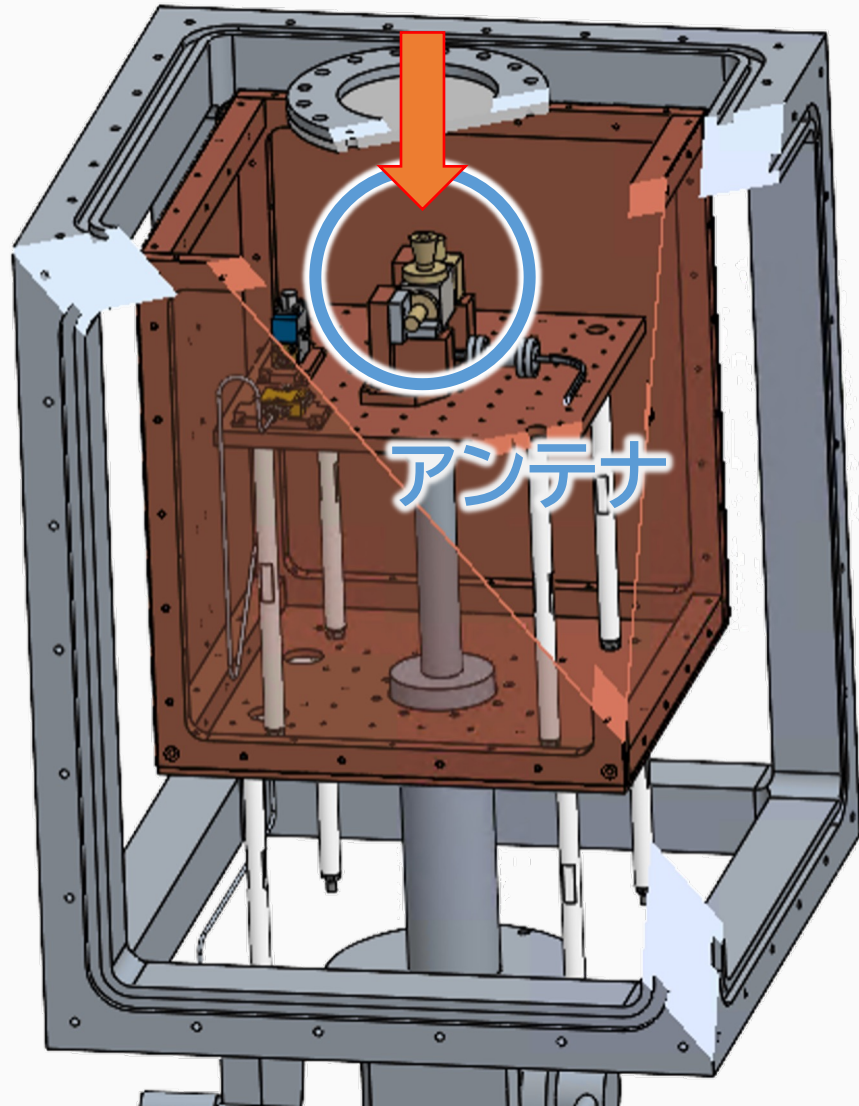


# 開発した 240 GHz 受信機



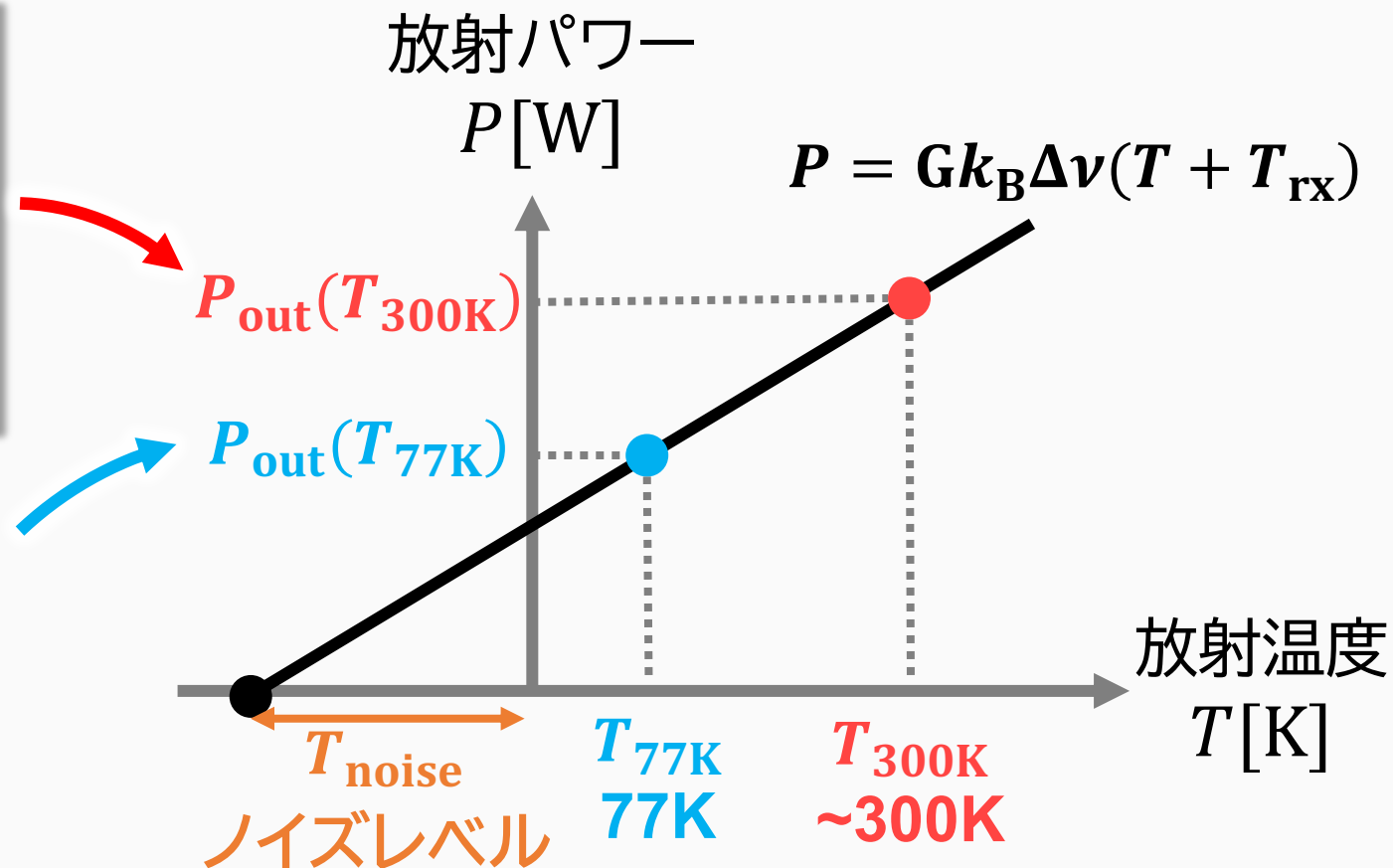
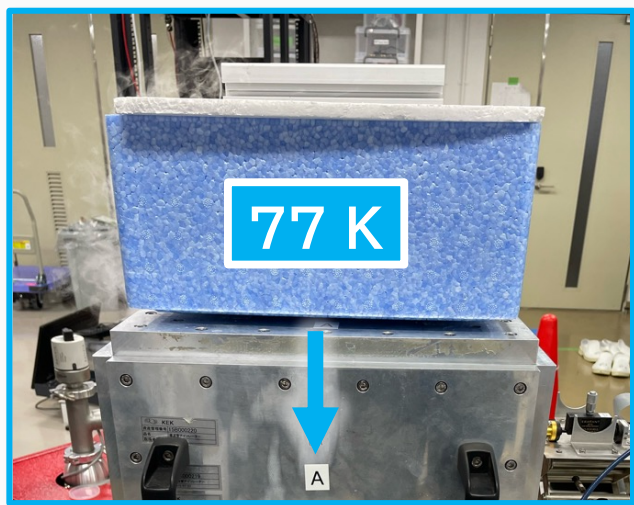
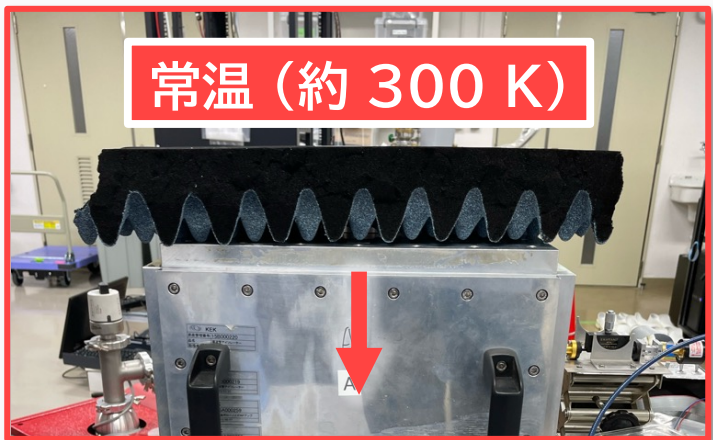


# 開発した受信機



# 受信機のノイズ評価

2つの黒体放射を用いてノイズ評価を行った







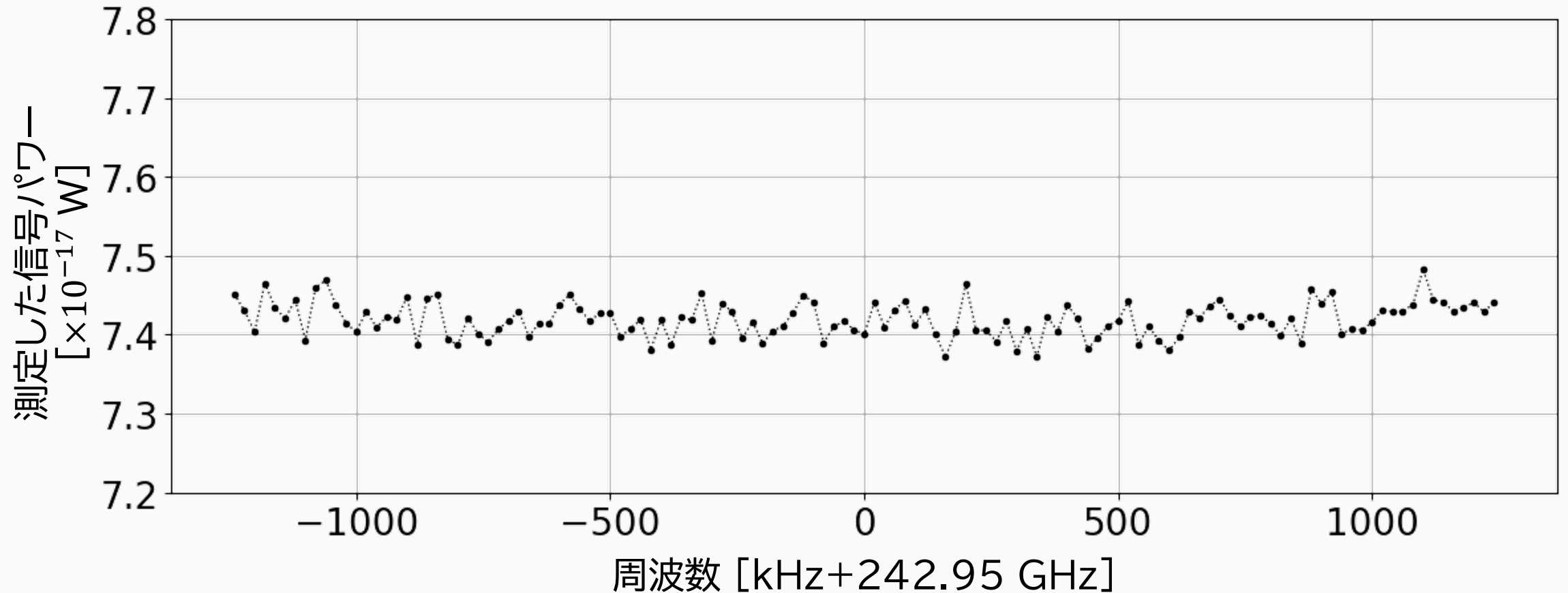
# 探索実験の流れ

- SIS ミクサを用いた探索をはじめて実証するため、  
2.5 MHz の帯域に限定して探索測定を行った

## 探索測定での設定

測定帯域	242.94875 – 242.95125 GHz (2.5 MHz 幅)
周波数の分解能	300 Hz
測定時間の合計	1 時間

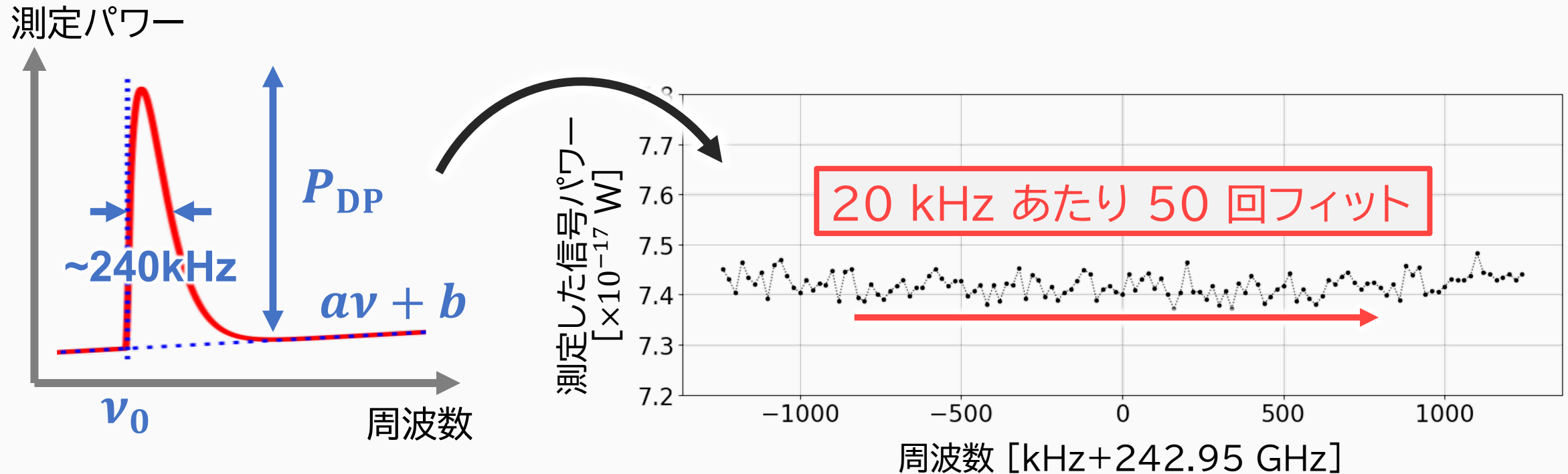
# 測定した周波数スペクトル



- ここからダークフォトンの信号を探索する

# ダークフォトンの探索

- 転換光の周波数  $\nu_0$  を 20 kHz ずつ移動させながらフィットを行い、それぞれの周波数  $\nu_0$  に対して転換光のパワーを推定する

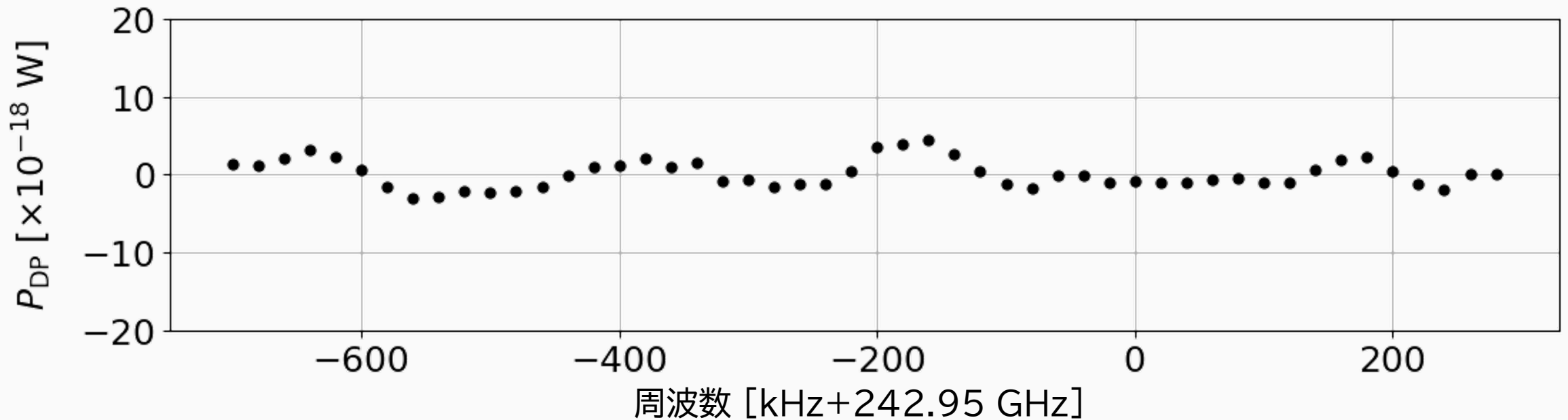


$$P_{\text{DP}} F(\nu, \nu_0) + a\nu + b$$

フリーパラメータ:  $P_{\text{DP}}, a, b$

# ダークフォトン探索の結果

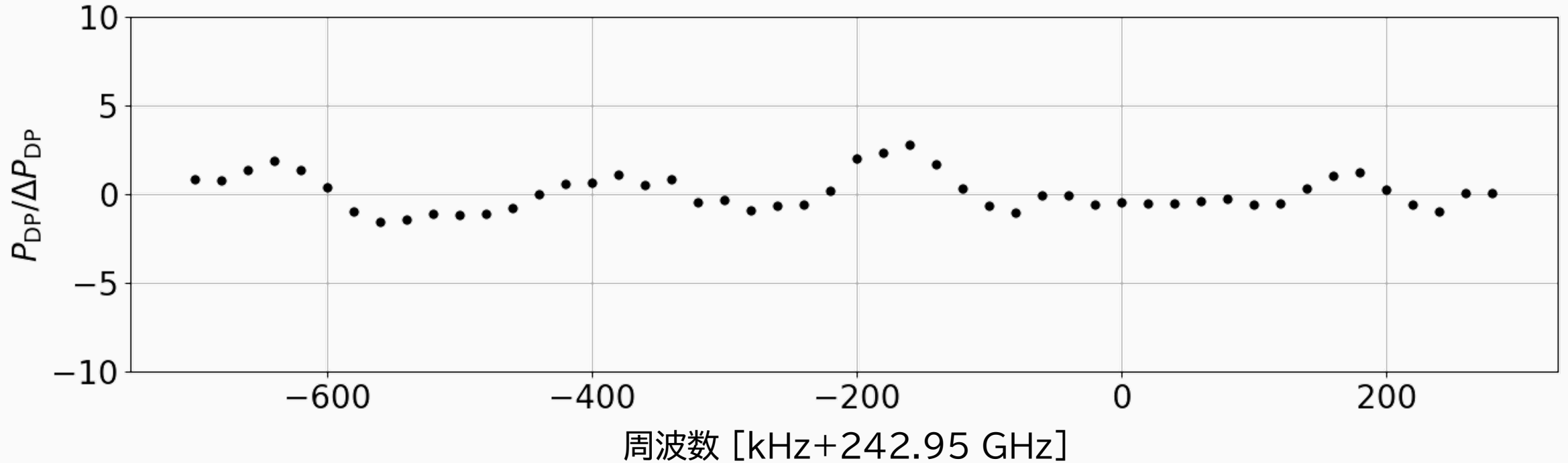
- 推定される転換光のパワー



- この中に有意な（転換光らしい）信号はあるか？

# 有意推定

- 推定された転換光  $P_{DP}$  とその誤差  $\Delta P_{DP}$  の比を示す  
(1より大きいほど転換光らしい信号)



- ノイズの揺らぎのみによってこの結果を説明できる確率: 0.198
- 統計的に有意な信号は存在しない

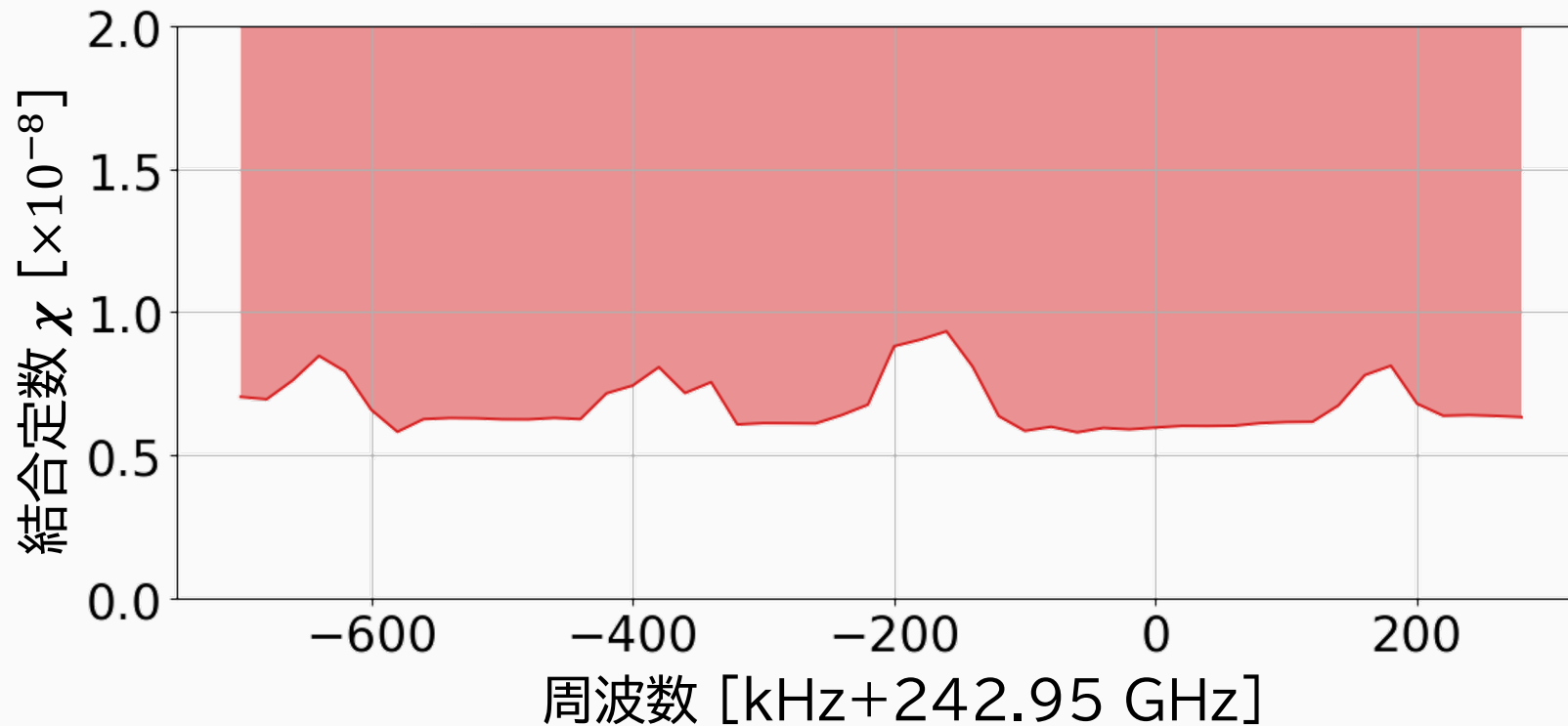
# 結合定数の計算

$$\chi = 3.4 \times 10^{-9} \left( \frac{P_{\text{DP}}}{10^{-18} \text{ W}} \right)^{1/2} \left( \frac{0.39 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{\text{CDM, halo}}} \right)^{1/2} \left( \frac{30 \text{ mm}^2}{A_{\text{eff}}} \right)^{1/2}$$

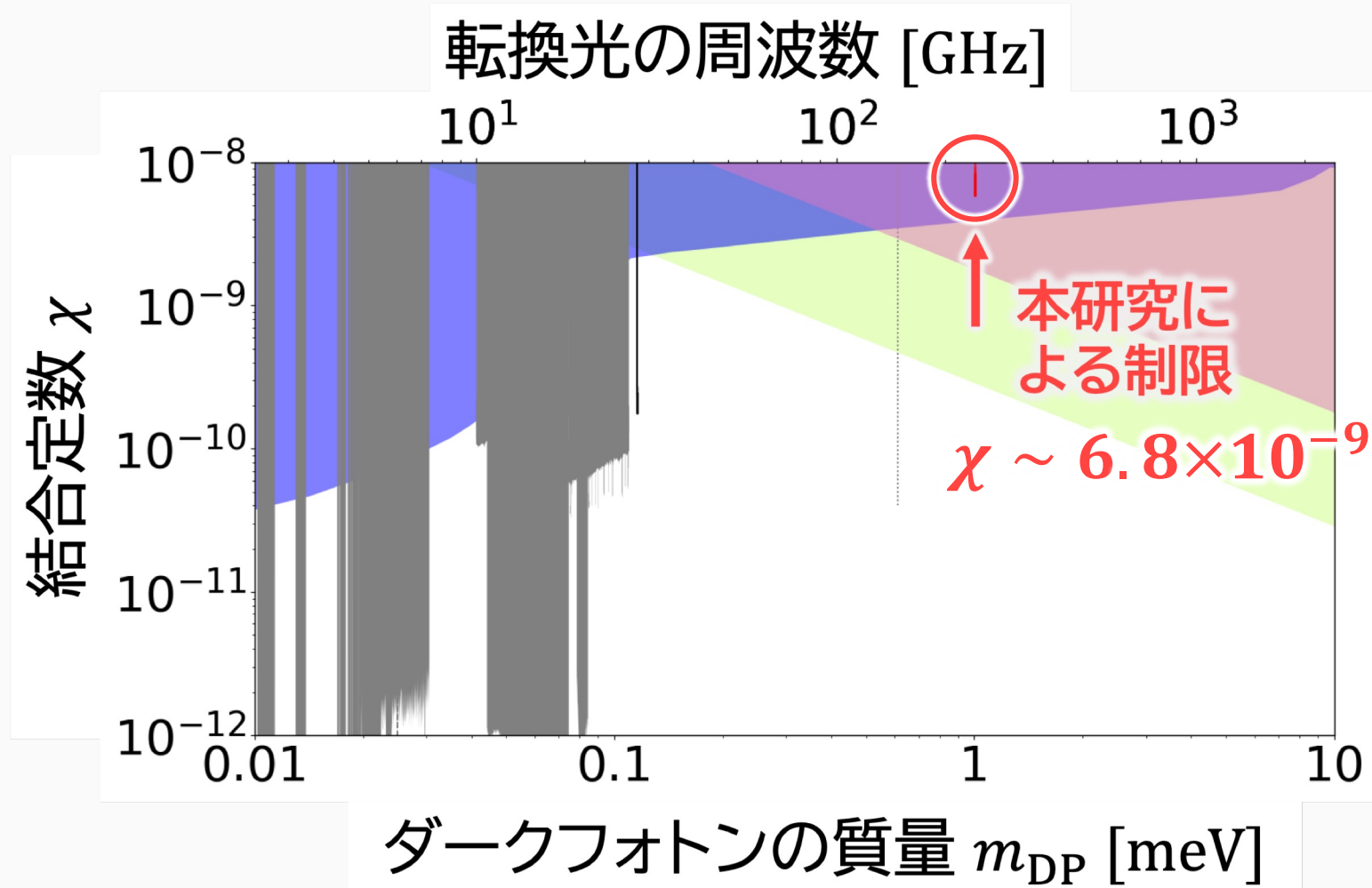
- 転換光のパワー  $P_{\text{DP}}$
- ダークマターのエネルギー密度  
 $\rho_{\text{CDM, halo}} \simeq 0.39 \text{ GeV/cm}^3$
- アンテナ有効開口面積  
 $A_{\text{eff}} \simeq 26 \text{ mm}^2$

# 結果: 結合定数 $\chi$ の 95 % 上限を設定

$$\chi = 3.4 \times 10^{-9} \left( \frac{P_{\text{DP}}}{10^{-18} \text{ W}} \right)^{1/2} \left( \frac{0.39 \text{ GeV/cm}^3}{\rho_{\text{CDM, halo}}} \right)^{1/2} \left( \frac{30 \text{ mm}^2}{A_{\text{eff}}} \right)^{1/2}$$

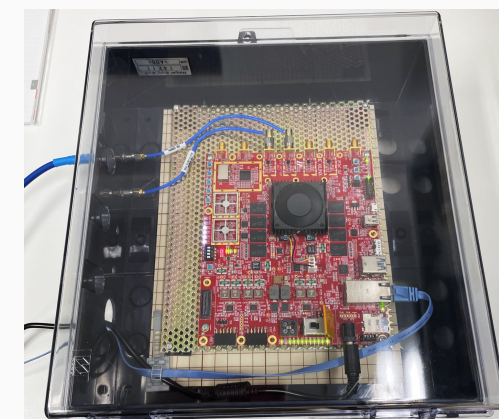
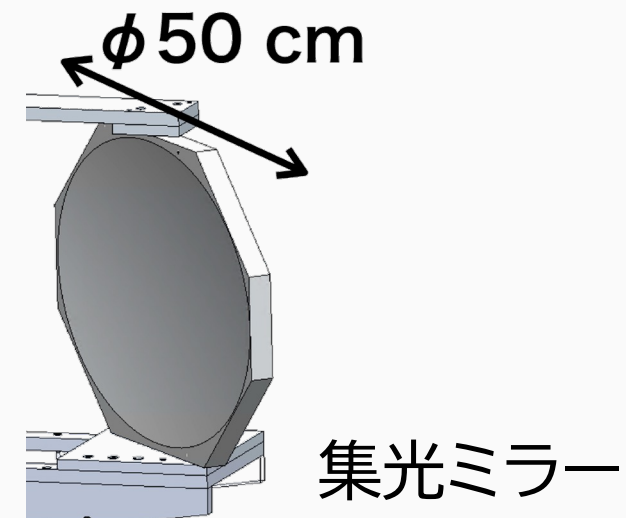
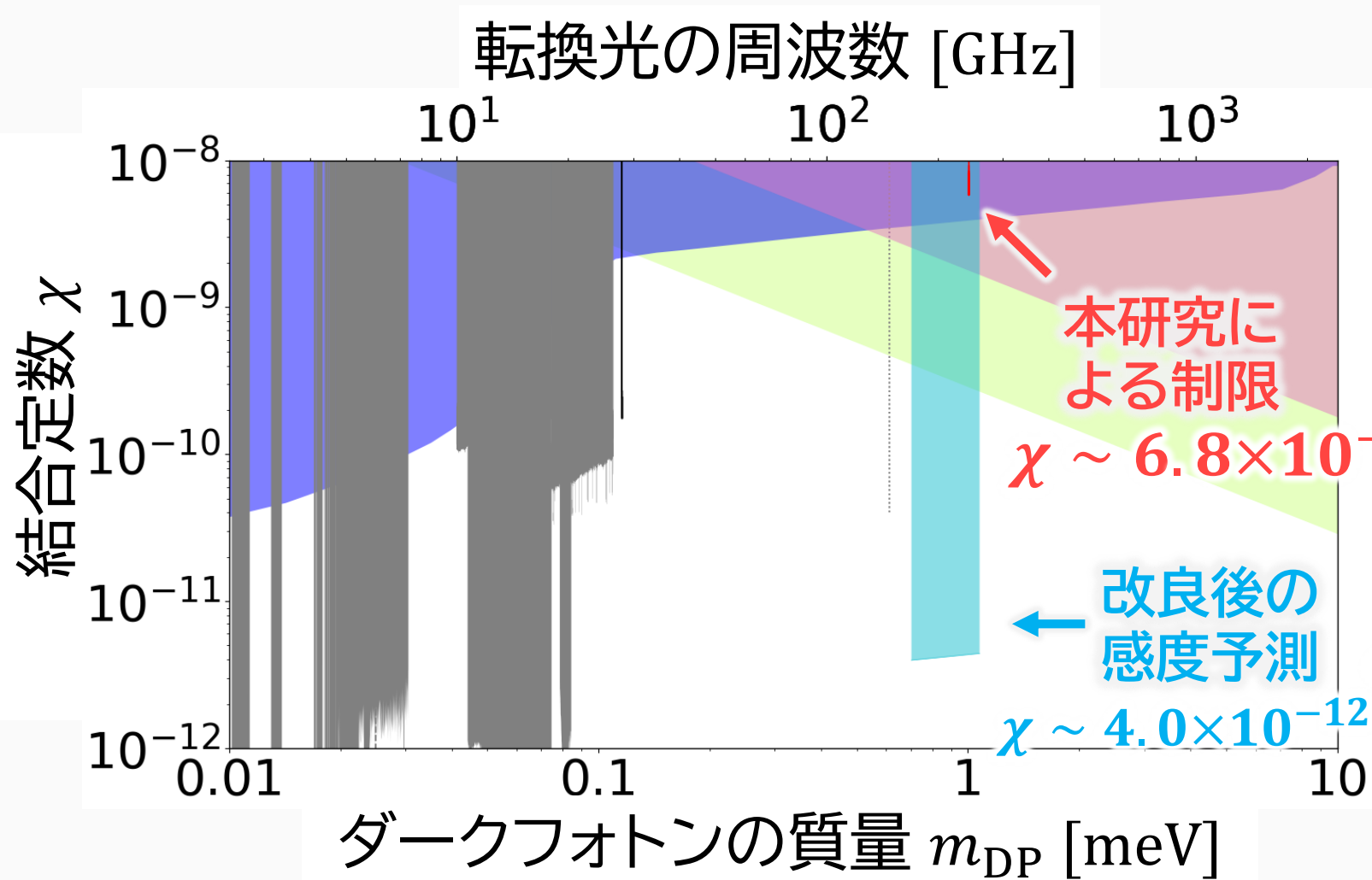


# 結果: 結合定数 $\chi$ の 95 % 上限を設定





# 将来展望



# まとめ

- 239–247 GHz を探索できる、SIS ミクサ搭載の低ノイズな受信機を開発
- 実際に質量  $\sim 1$  meV、転換光の周波数にして  $\sim 240$  GHz のダークフォトンを探査し、結合定数の上限  $\chi \sim 6.8 \times 10^{-9}$  を設定
- SIS ミクサによる高感度(低ノイズ)な探査法を確立
- 今後は集光ミラーを増設するなどの工夫を施すことで、  
 $170\text{--}260$  GHz の帯域を  $\chi \sim 4.0 \times 10^{-12}$  まで探索できるようになる