

# 超伝導ミリ波検出器を用いた パラフォトン暗黒物質探索

東大理, 東大素セ<sup>A</sup>, 高工研<sup>B</sup>, 理研<sup>C</sup>, 芝浦工大<sup>D</sup>, 総研大<sup>E</sup>

荻野 恭輔, 並木 飛鳥, ○難波 俊雄<sup>A</sup>, 成田 佳奈香, 浅井 祥仁<sup>B</sup>,  
坂井 南美<sup>C</sup>, 渡邊 祥正<sup>D</sup>, 山本 智<sup>E</sup>

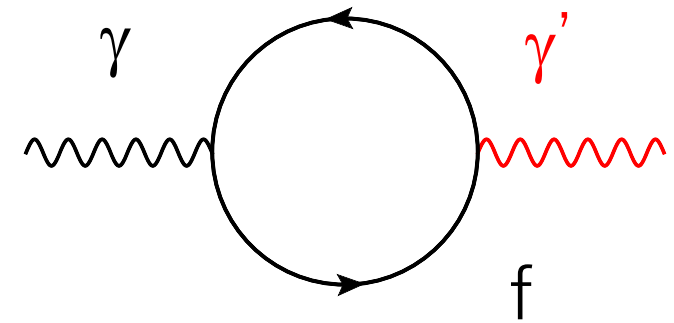
# パラフォトン (ヒドゥンフォトン、ダークフォトン)

- 標準理論の拡張

新たに U(1) 対称性を追加

→対応するゲージボソン: パラフォトン

- 電荷とパラ電荷を併せ持つ重い粒子などを仮定すれば、光子とパラフォトンの混合を自然に導入できる
- 暗黒物質の候補



標準理論電磁場項

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - J^\mu A_\mu$$

$$-\frac{1}{4} X_{\mu\nu} X^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2} X_\mu X^\mu - \frac{\chi}{2} F_{\mu\nu} X^{\mu\nu}$$

パラフォトン項

パラフォトン場

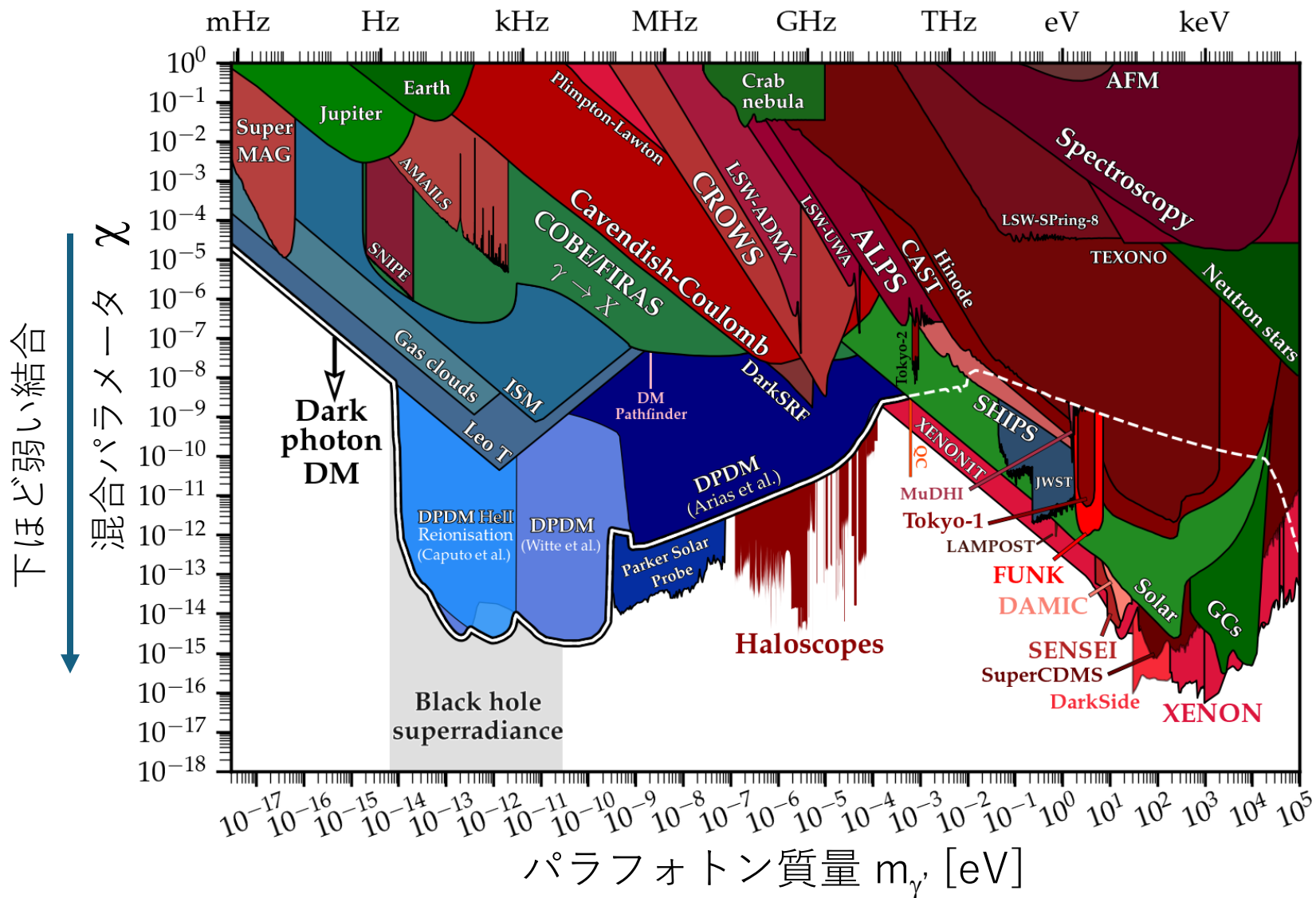
パラフォトン質量項

$m_{\gamma'}$ : パラフォトン質量

光子パラフォトン混合項

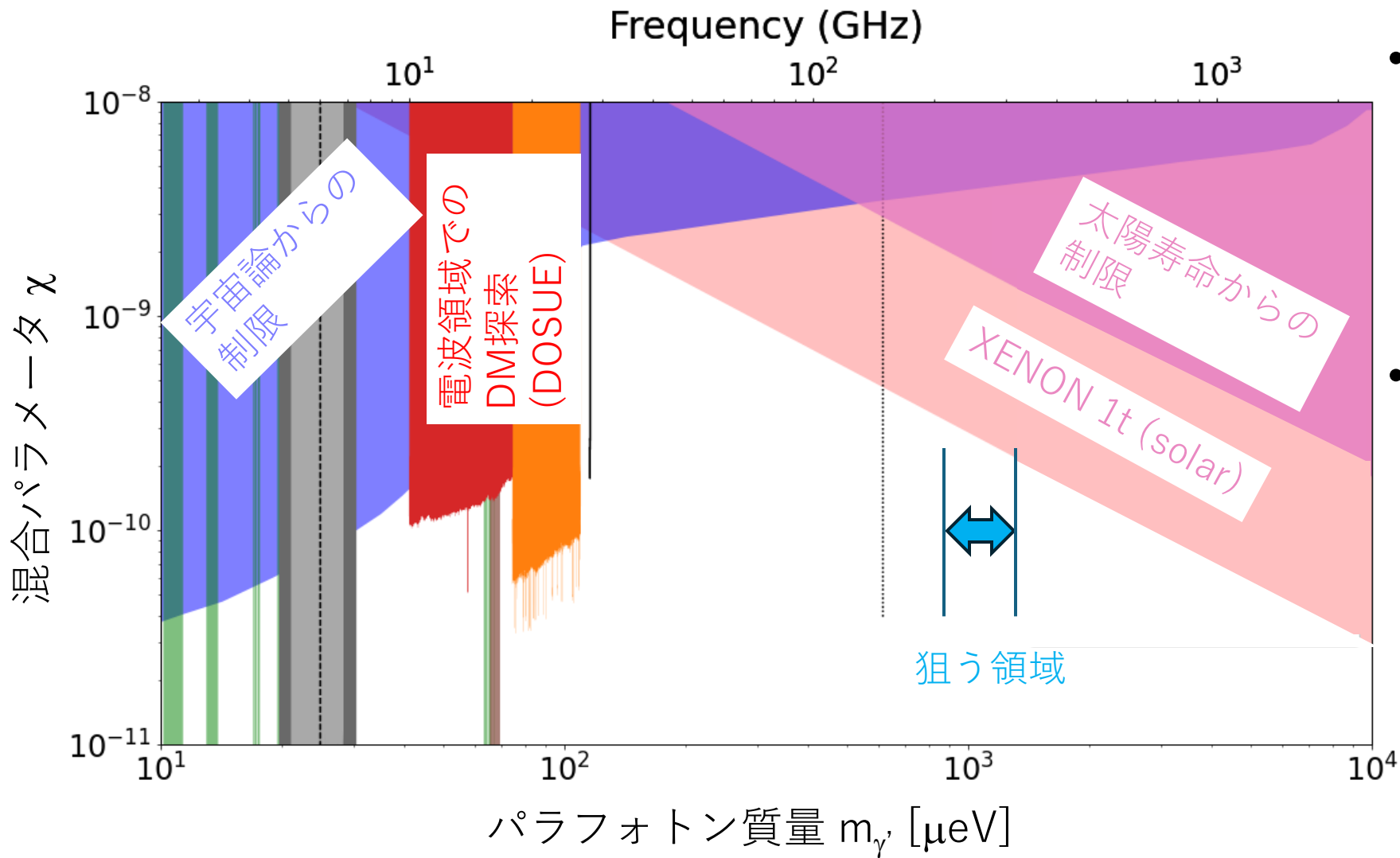
$\chi$ : 混合パラメータ

# パラフォトン探索の現状



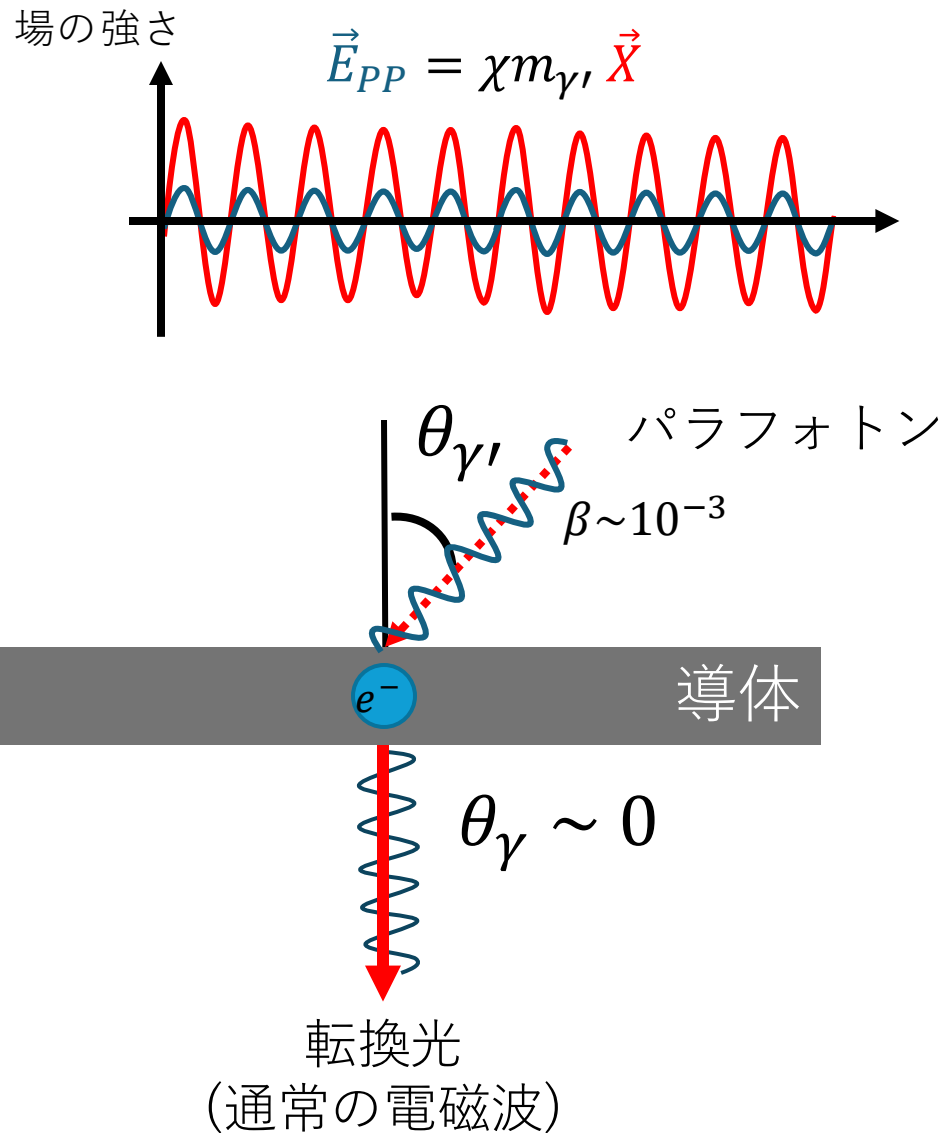
- $m_\gamma$ 、 $\chi$ に理論からの予言はない  
 ~広大な探索空間
- 多くの考察や探索によってパラフォトン  
 を制限
  - 宇宙論的考察
  - 天文測定
  - 実験的探索

# この実験で探す領域～ミリ波領域



- 比較的制限の少ない質量～ミリ電子ボルト領域のパラフォトンミリ波検出器で探す
- 全ての暗黒物質が冷たいパラフォトンから成っていると仮定し探索

# 探し方: 光子との混合 (kinematic mixing) を利用



- パラフォトンが光子と混合しているため、通常の電場も付随する

$$\vec{E}_{PP} = \chi m_{\gamma'} \vec{X}$$

- $\vec{E}_{PP}$  が導体中の電子を揺らし、転換光を放出
- 導体表面での境界条件から、ほぼ垂直方向に放出
- エネルギー保存則から、転換光のエネルギー  $\cong$  パラフォトン質量

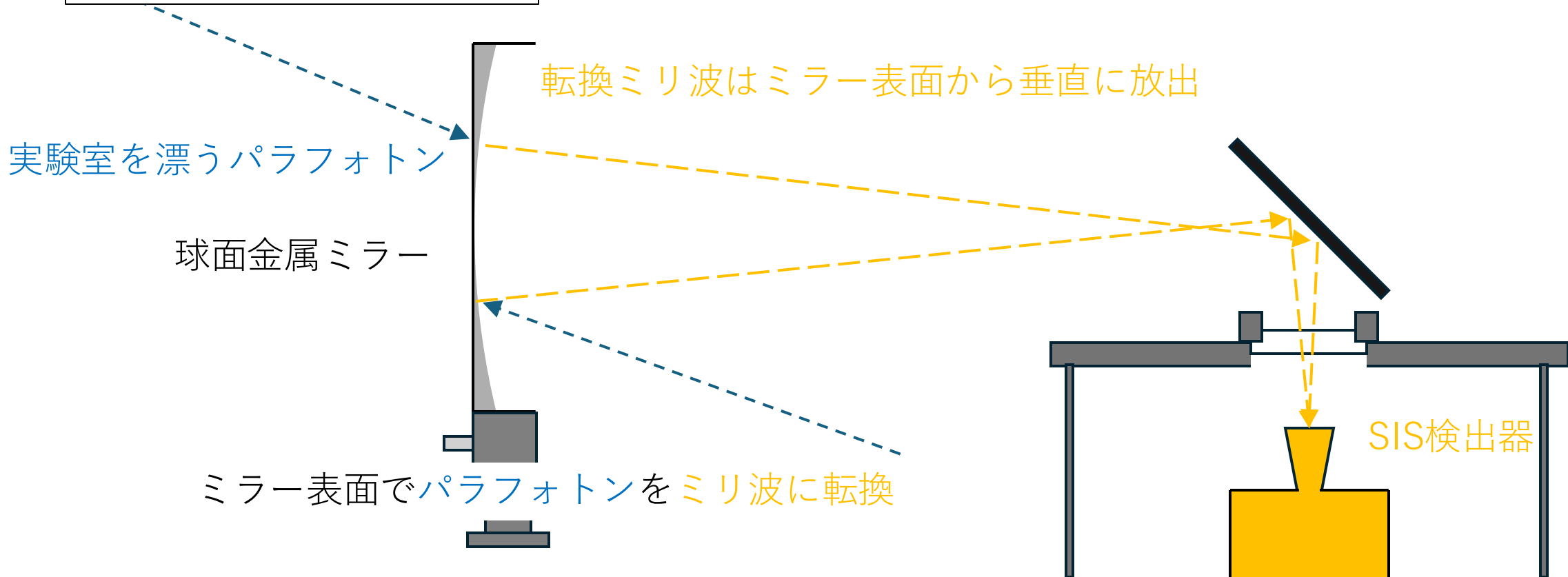


導体から垂直に放出されるミリ波を探せ

# 実験室での探索セットアップ

1. 金属板でパラフォトン暗黒物質をミリ波に変換
2. ミリ波をSISミリ波検出器まで導いて検出

セットアップの断面図



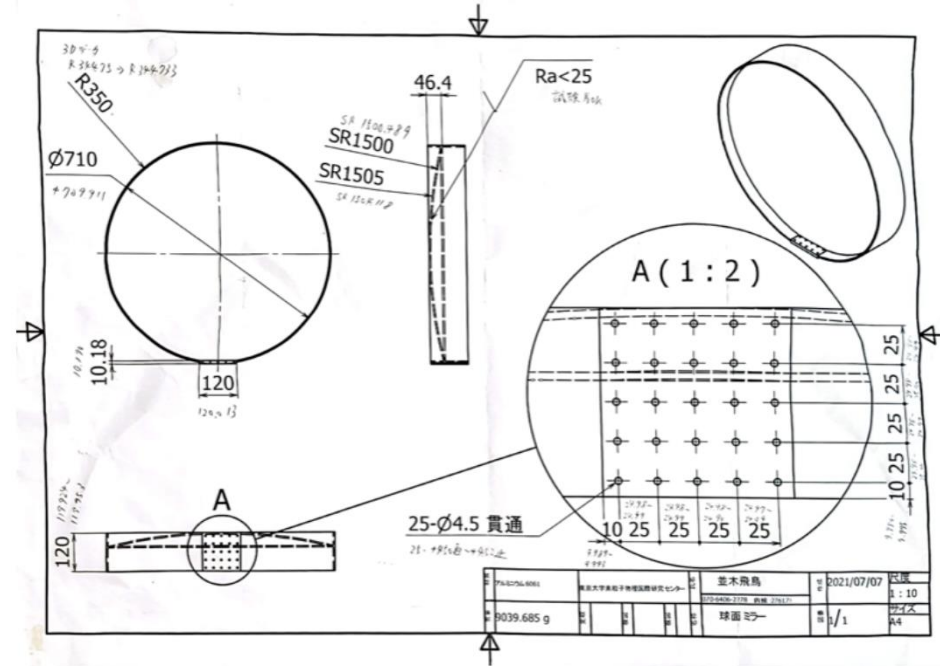
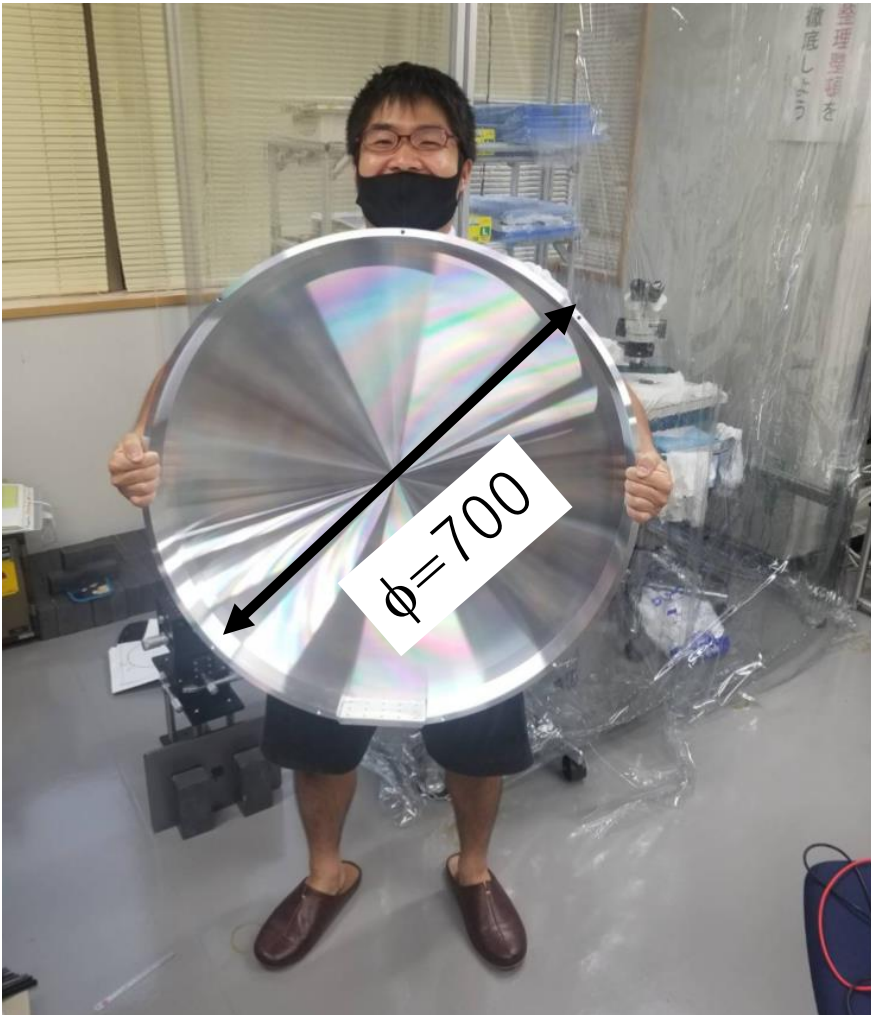
# 実際のセットアップ



アルミの球面鏡

SIS検出器  
(クライオスタット中)

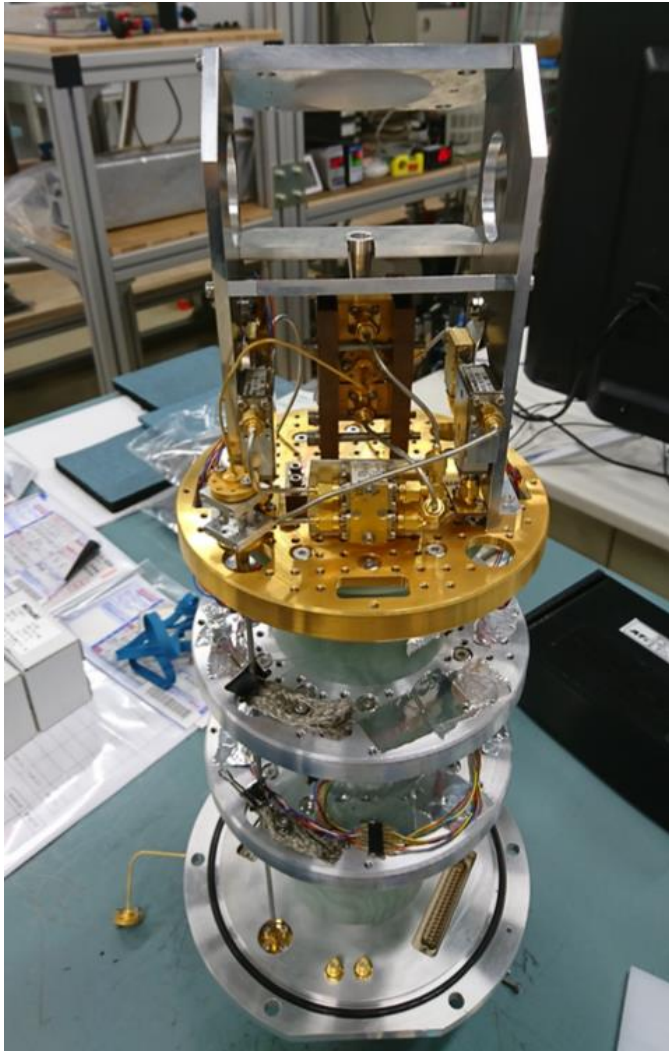
# 球面鏡



- アルミニウム製 (A5052)
- 直径 700mm  
(面積  $A_{\text{mirror}} = 0.385 \text{ m}^2$ )
- ミラーの曲率  $R = 1500 \text{ mm}$   
(検出器の入力に合うようにデザイン)



# ミリ波検出器 (SUMIRE)



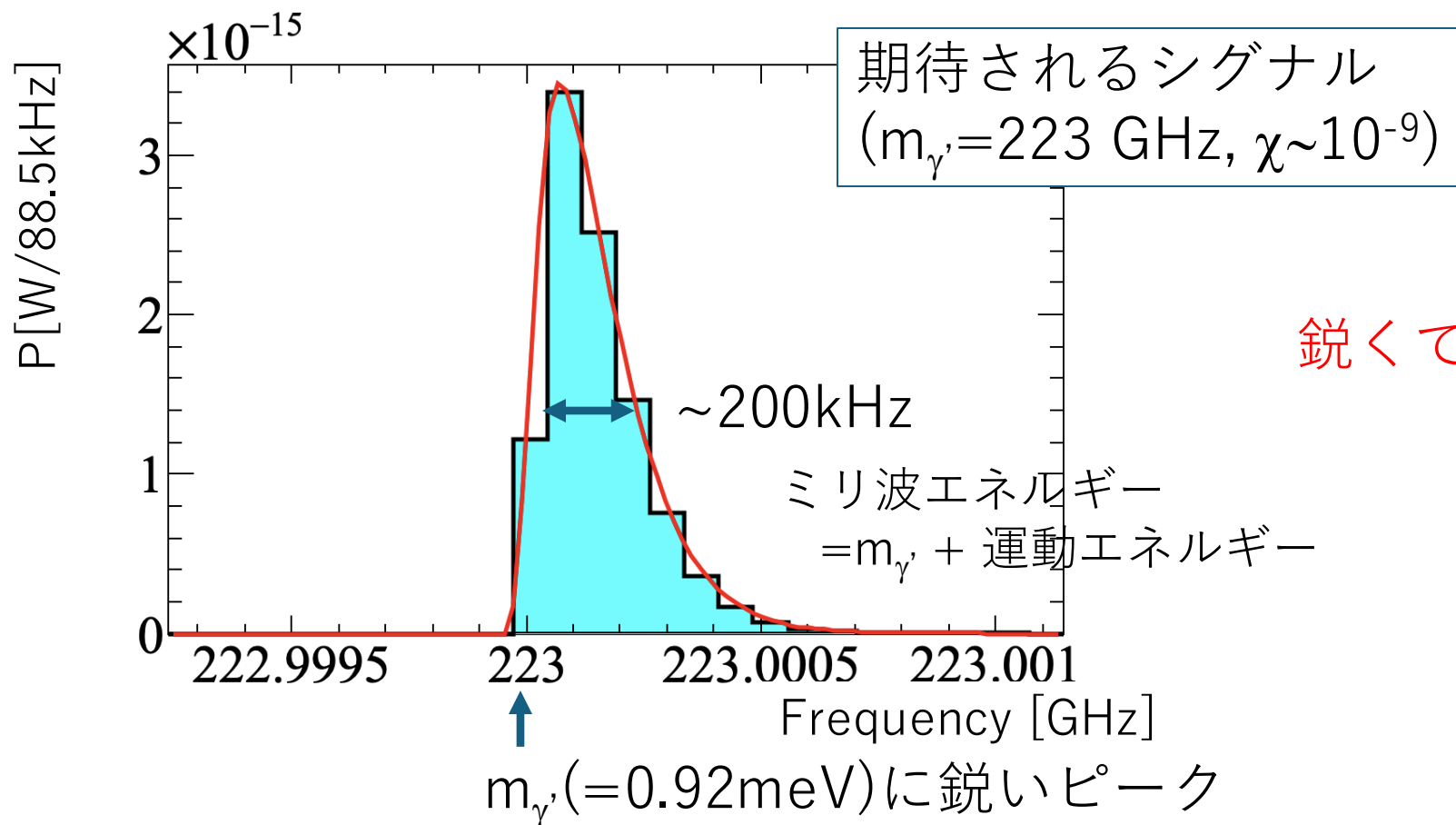
- Spectrometer Using superconductor Mixer REceiver (SUMIRE)
- 分子スペクトルのライン同定のために理研坂井研に設置 (ALMAで使用されているものと同型)
- 今回は Band6 カートリッジを使用  
216GHz~264GHz (=0.89meV~1.09meV)
- 一度の測定で 8GHz の帯域幅、局所発振周波数 (LO) の変更により、全帯域をカバー
- 分解能 88.5kHz
- ほぼデッドタイムフリー

# 予想されるシグナル

- 積分信号強度

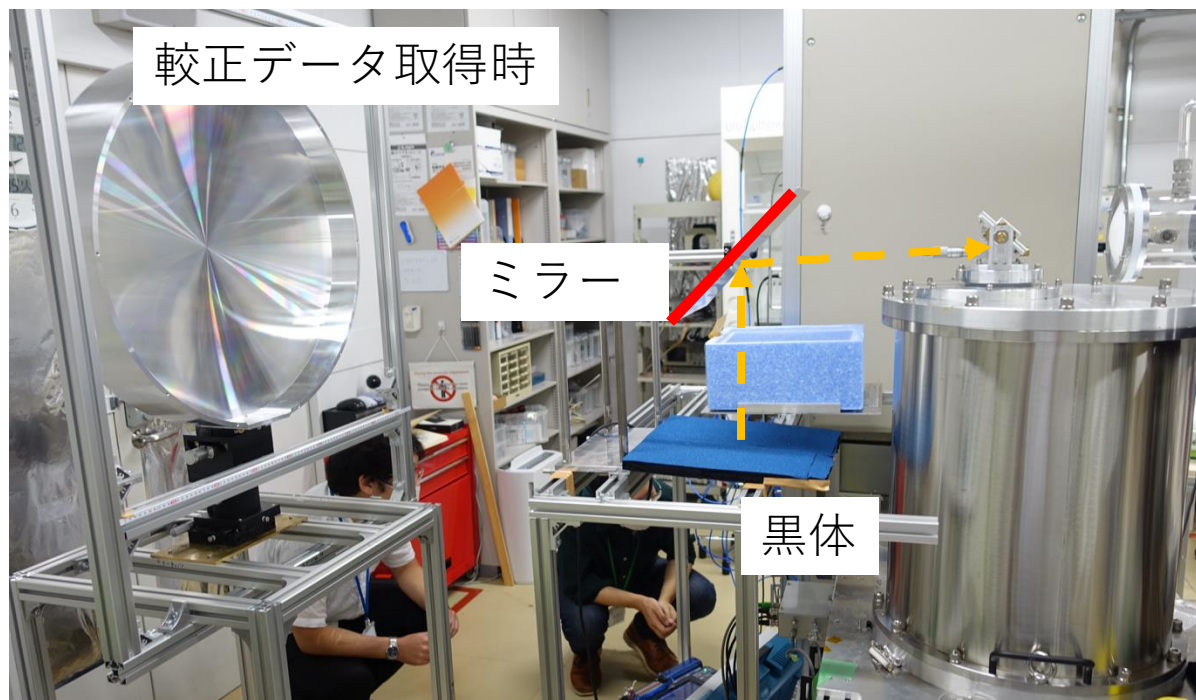
$$P [W] \cong 5 \times 10^{-17} \left( \frac{\chi}{10^{-10}} \right)^2 \left( \frac{\rho_{CDM}}{0.3 \text{ GeV/cm}^2} \right) \left( \frac{A_{mirror}}{1 \text{ m}^2} \right)$$

- パラフォトンから転換されたミリ波スペクトル



# パラフォトン探索実験

- 2022年7月に実施
- (8GHz 帯域) × (6 LO 周波数) で全 48GHz (216~264GHz) をスキャン
- ライブタイム 5分を 8回繰り返す、各周波数で 40分のライブタイム
- 繰り返し時、LO はわずかに ( $\pm 512, 1024$  channels) にシフト (検出器起源のノイズを除くため)



- 毎測定の前後に校正用のデータも取得 (77K & 300K 黒体)
- 校正データ取得時は、一時的にミラーを挿入して測定

# 較正 (Hot-Cold 法)

- シグナル出力:  $S$

$$S = (P_{receive} + P_{sys})G.$$

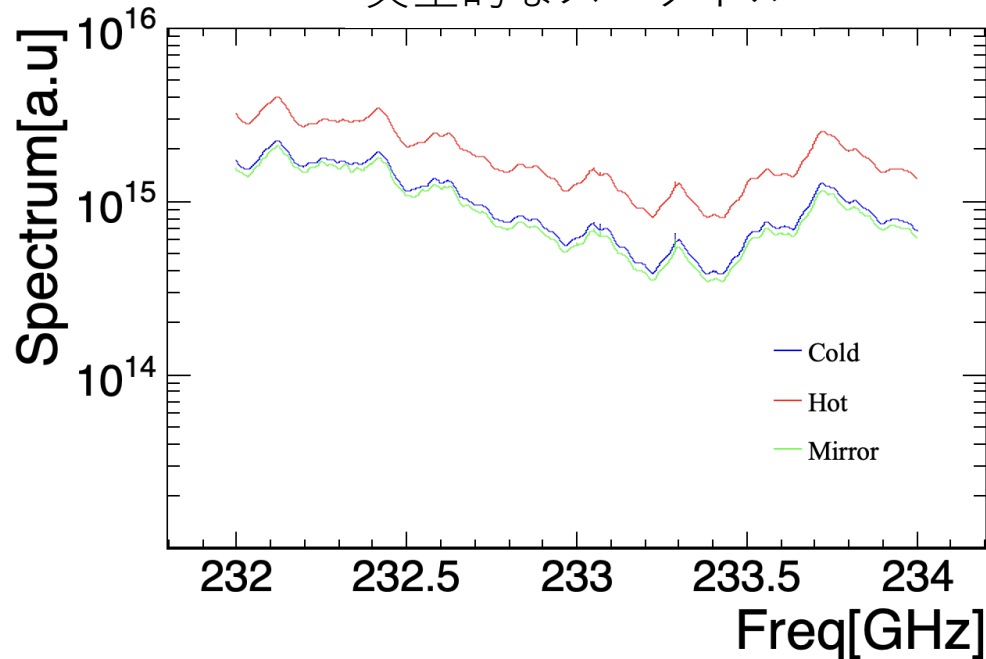
( $P_{receive}$ : 受信パワー,  $P_{sys}$ : システム雑音,  $G$ : ゲイン)

- 検出器が温度  $T$  の黒体を見た時、受信シグナル:  $P_{receive}^T$

$$P_{receive}^T = 2k_B T \Delta\nu.$$

- 以上から、2つの黒体の観測により、 $G$  と  $P_{sys}$  を得る

典型的なスペクトル



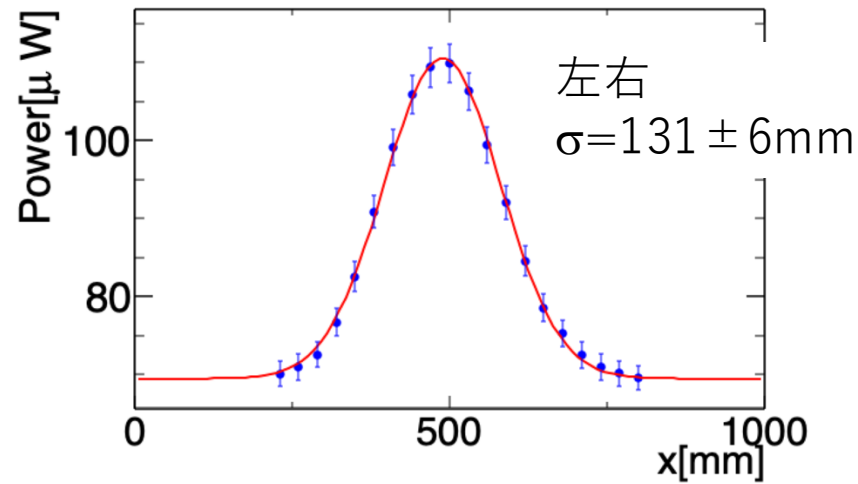
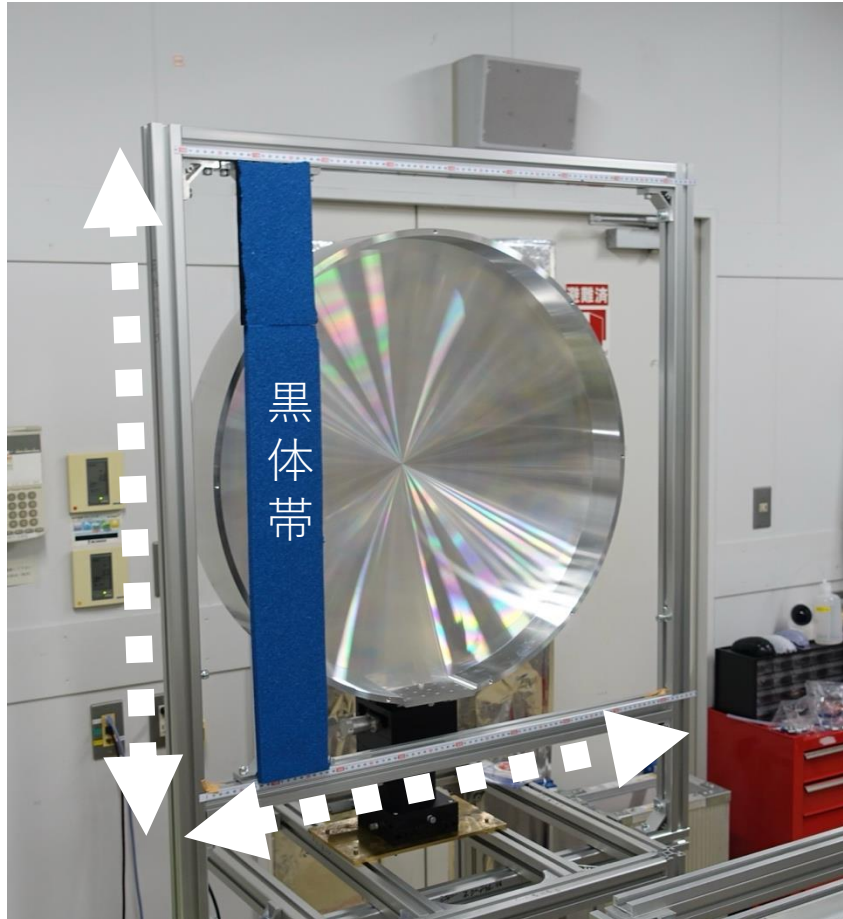
較正はチャンネルごとにおこなった

較正後の典型的な受信パワー

$\sim 10^{-16}$  [W/88.5kHz].

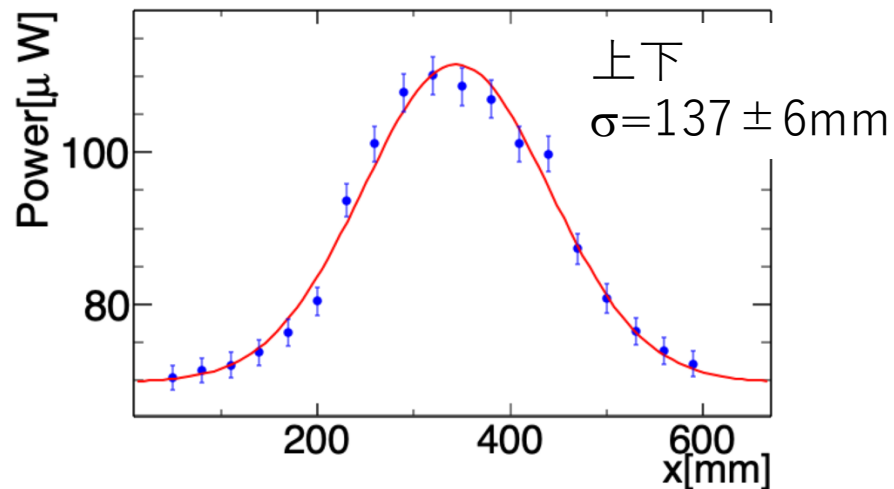
# 検出器の入力プロファイルの検証

- ミラー前面に黒体帯を設置し、移動させて測定 (左右、上下)



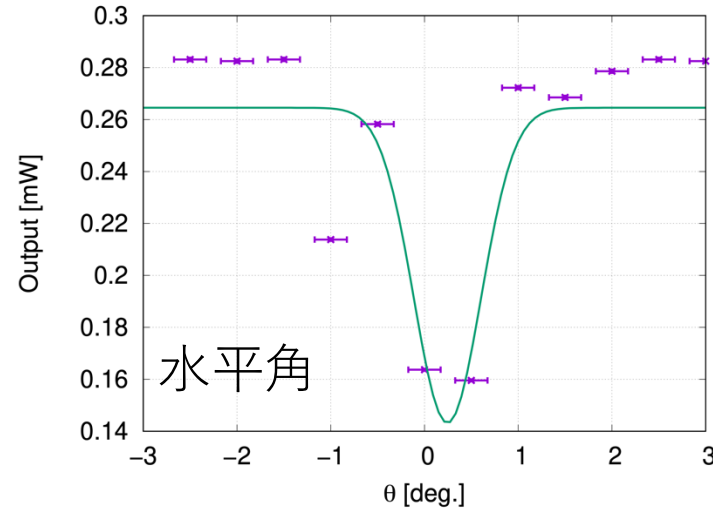
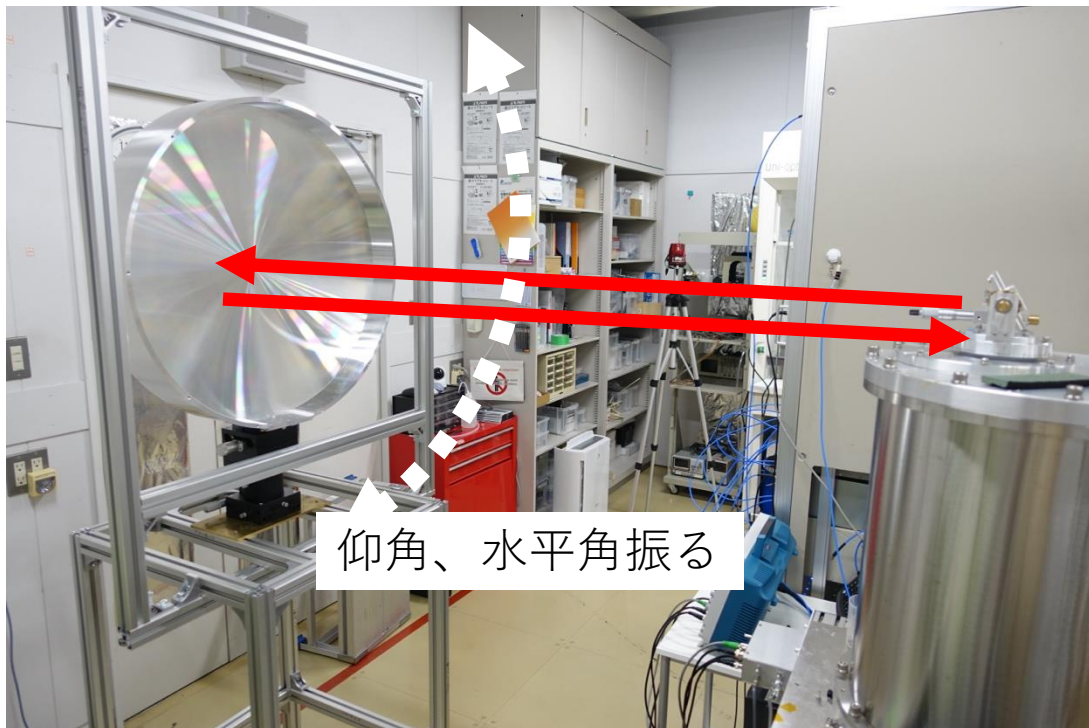
設計値: 138mm

どちらも一致



# 鏡面の垂直性の調整

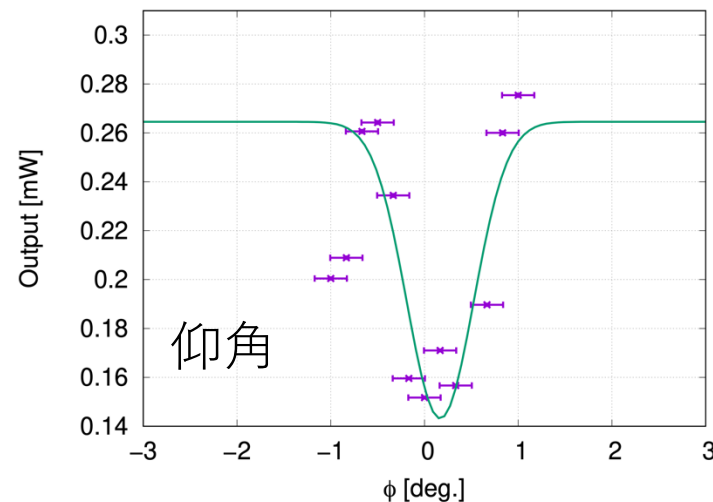
- ミラーが正しく設置されていれば、検出器は自分 (4K) が写って見える
- 鏡の角度を振って、出力を見ながら調整



どちらも検出器に向けた時に鋭く落ち込む  
(強引にフィットすると  
 $\sigma = 0.36^\circ = 6.3 \text{ mrad}$ )

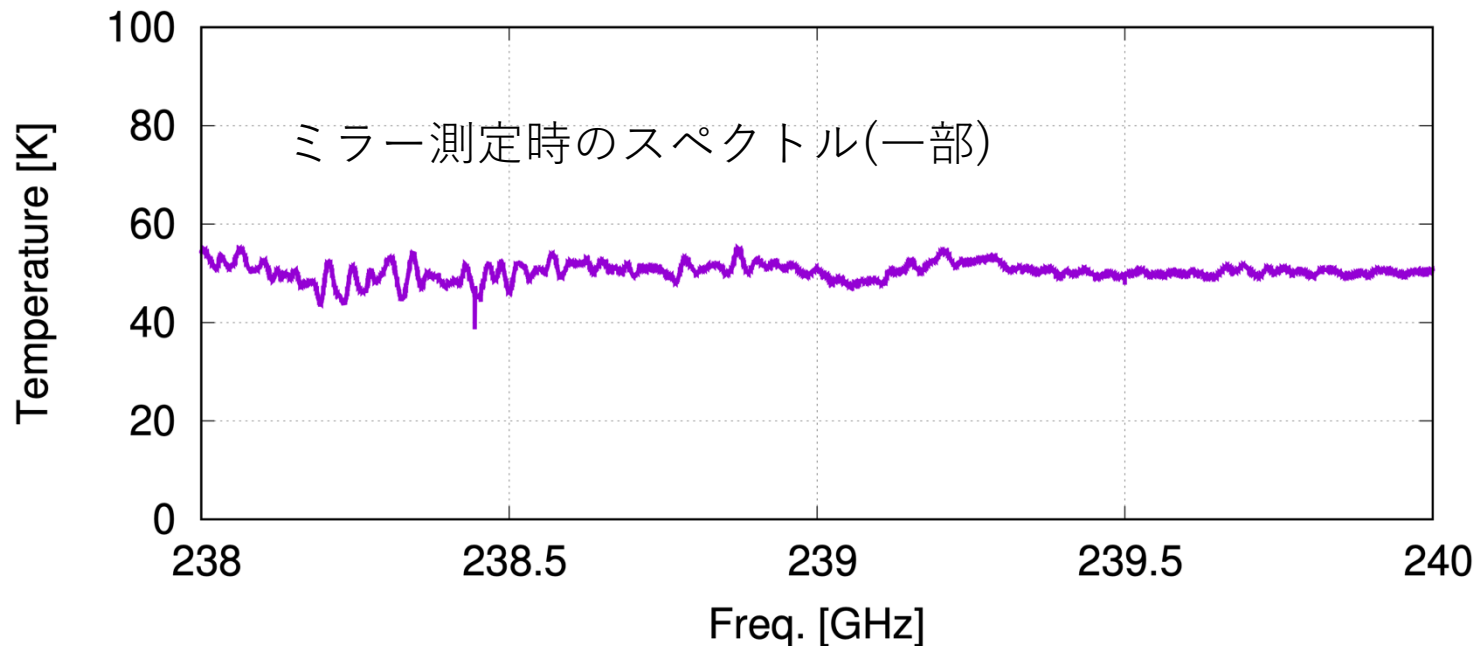


最小になるところにセット



# 鏡面の垂直性の評価

- Conservative に、  
(測定時のミラー温度)=(4Kの自分の鏡像)+(周囲の常温)と仮定
- 測定時の典型的な温度は、40K~60K くらいの温度  
→88%~81% くらいは正しくミラーが見えている
- 最悪値: 110K (おそらく内部で standing wave がのってるせい)  
これがアライメントの不備だと仮定すると、鏡面が見えているのは 64%



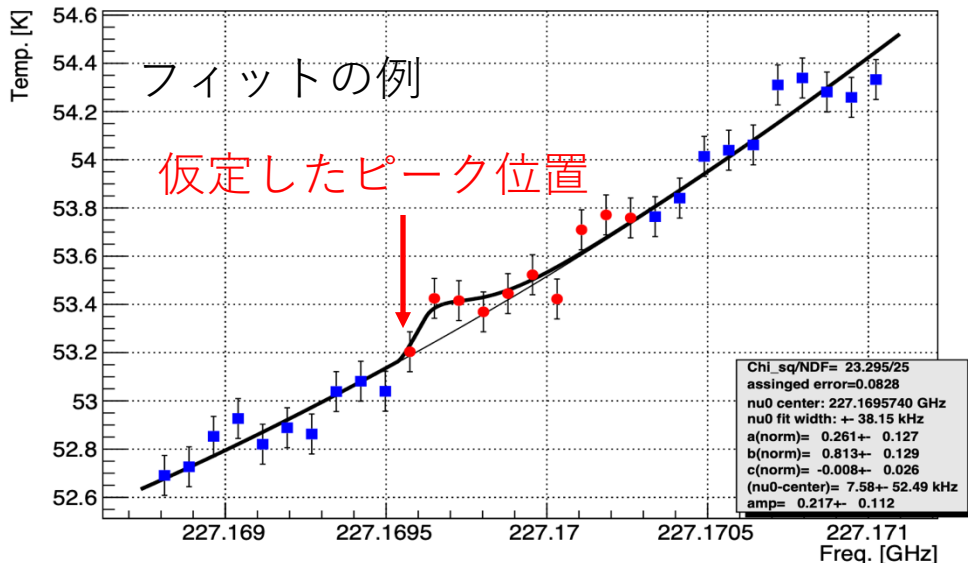
# 現在、解析中

- 偽のピーク (spurious) 除去

- 計測系起源のスパイクノイズ: シグナルと混同するため、除去が重要
- 校正データ (77K) の二回微分を利用して、~1.8% のノイズ部分を除去
- LO ずらした計測のおかげで、観測不能領域はなし

- データフィッティング

- 二次関数のフロアとシグナルを仮定し、位置を固定してフィット
- 全チャンネルでフィットを繰り返してシグナルを探索



ほぼ解析は完了し、細かいところをつめているところ  
結果は次回学会で



# まとめ

- 標準理論を超えた粒子、パラフォトンの探索実験
- 質量ミリ電子ボルトのパラフォトンが暗黒物質であると仮定し、ミリ波に変換して探索
- 黒体の位置を変えてスキャンすることで、検出器のガウス状の入力プロファイルを確認
- ミラーのアライメントは検出器の鏡像を見ることでおこない、最悪でもミラーの64%は正しく見えている
- パラフォトン測定は終了し、現在解析が進行中  
→ほぼ完了でもうすぐ結果