

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^A, 高工研^B, 理研^C, 芝浦工大^D, 総研大^E

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

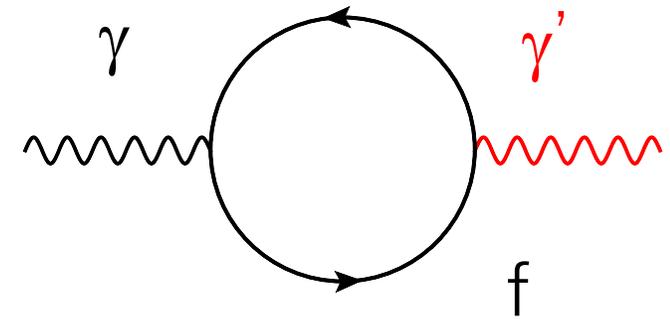
パラフォトン (ヒドゥンフォトン、ダークフォトン)

- 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

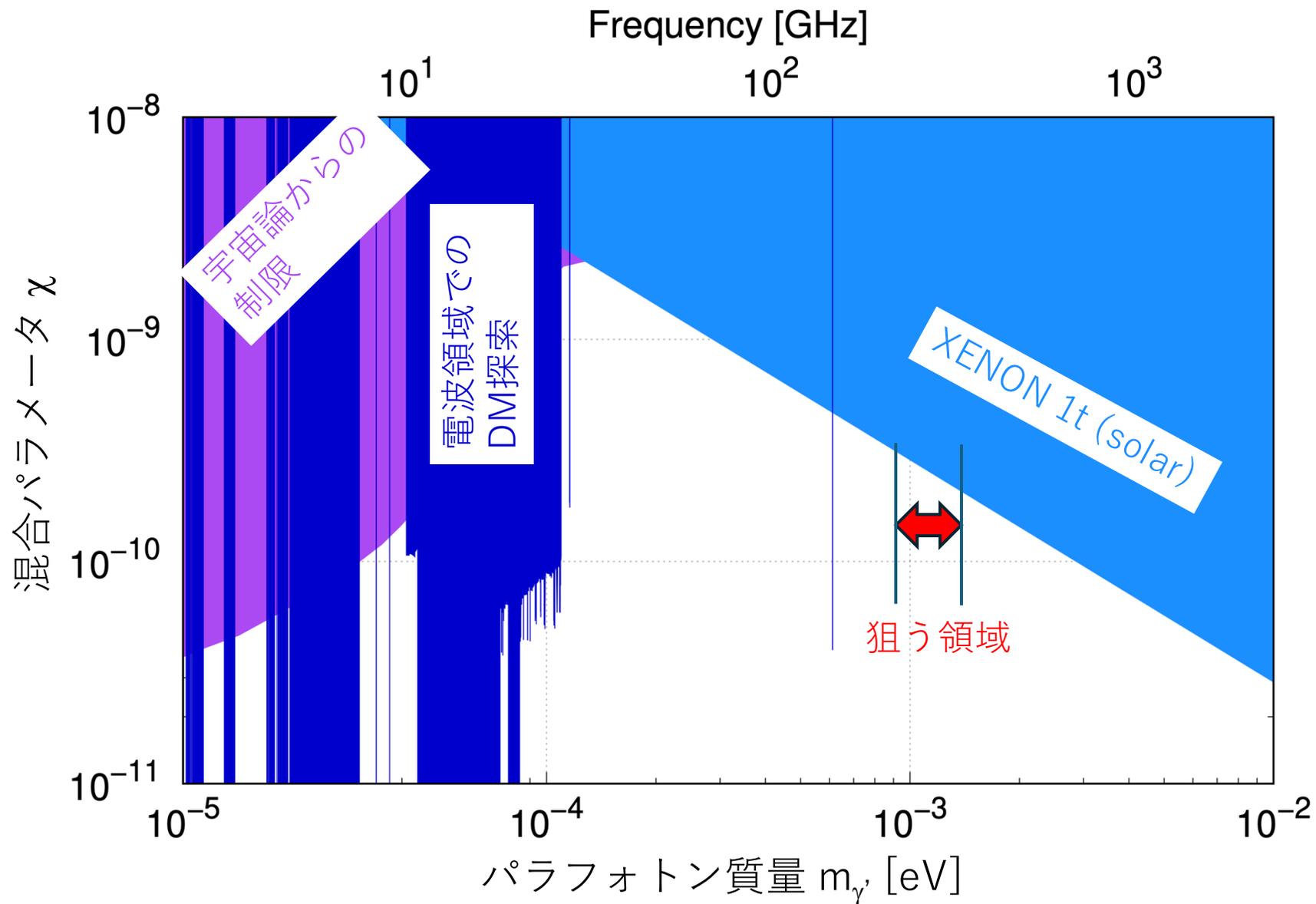
パラフォトン質量項

$m_{\gamma'}$: パラフォトン質量

光子パラフォトン混合項

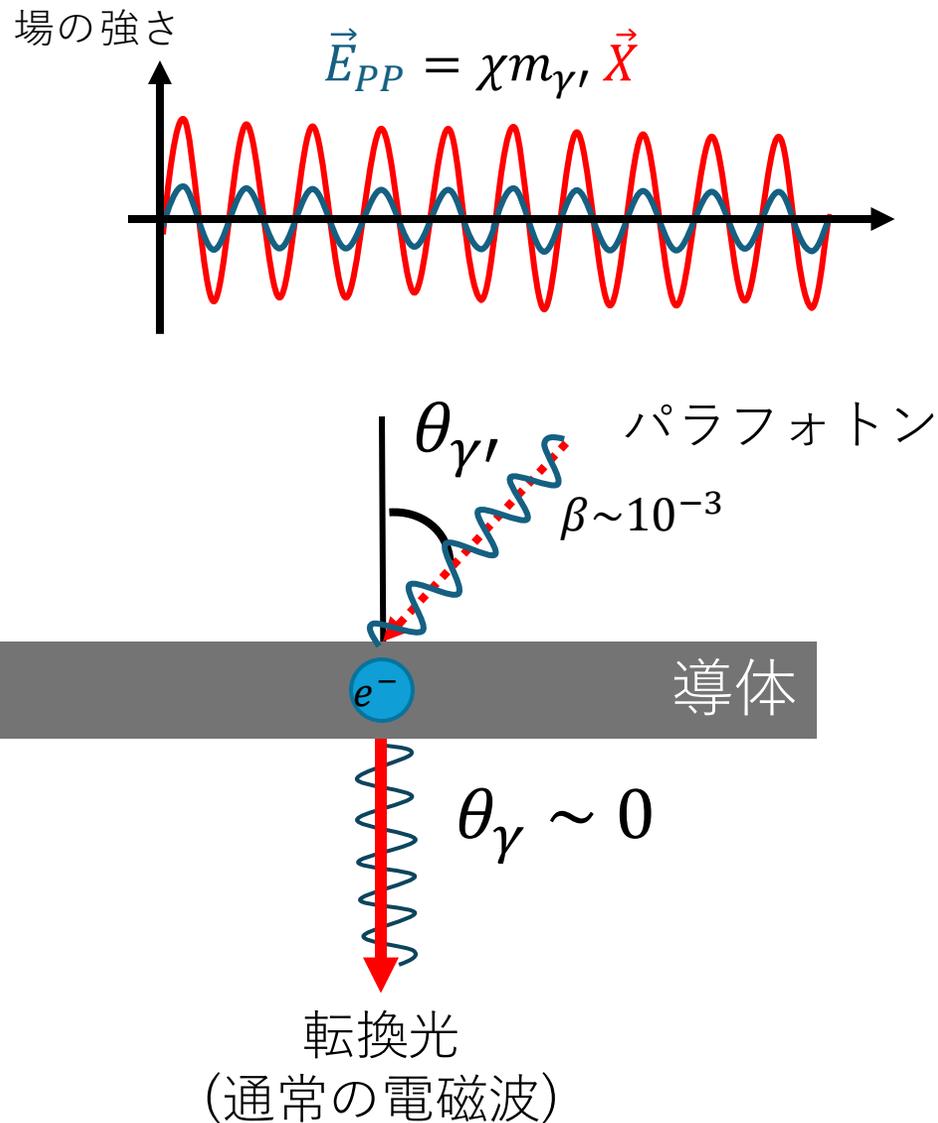
χ : 混合パラメータ

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、轉換光を放出
- 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、轉換光のエネルギー \cong パラフォトン質量

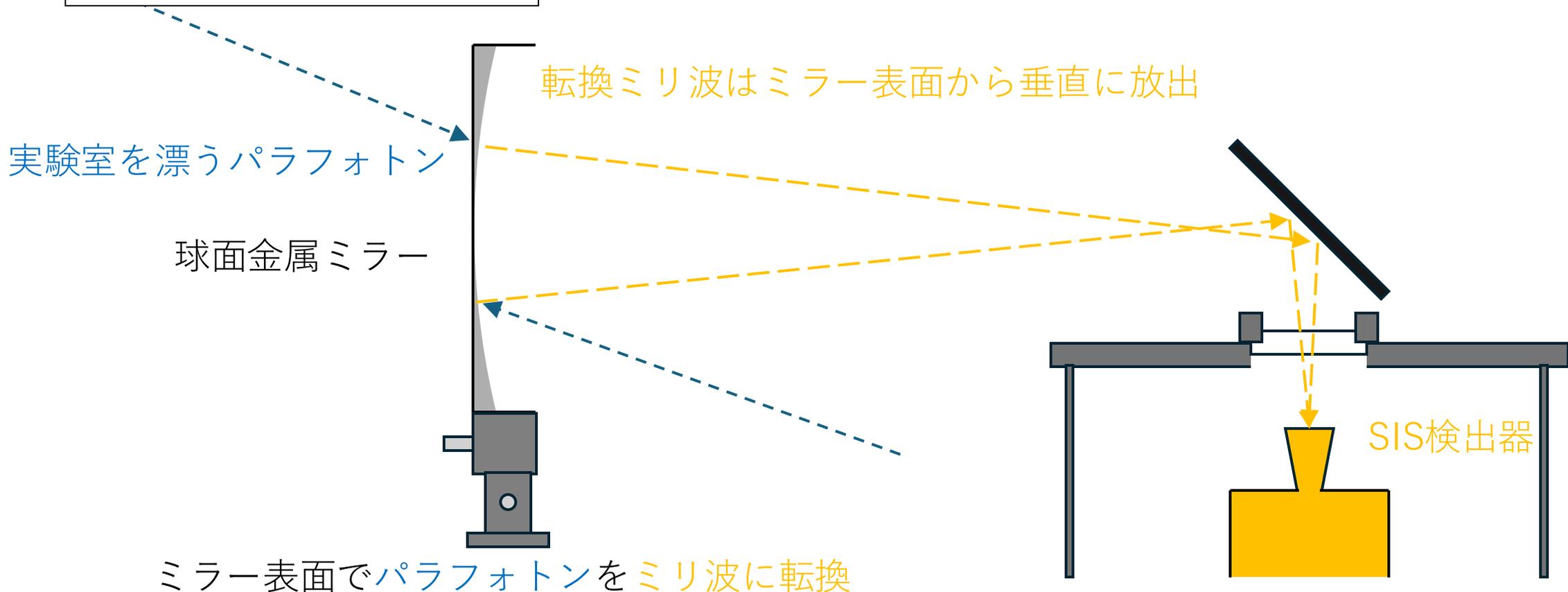


導体から垂直に放出されるミリ波を探せ

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



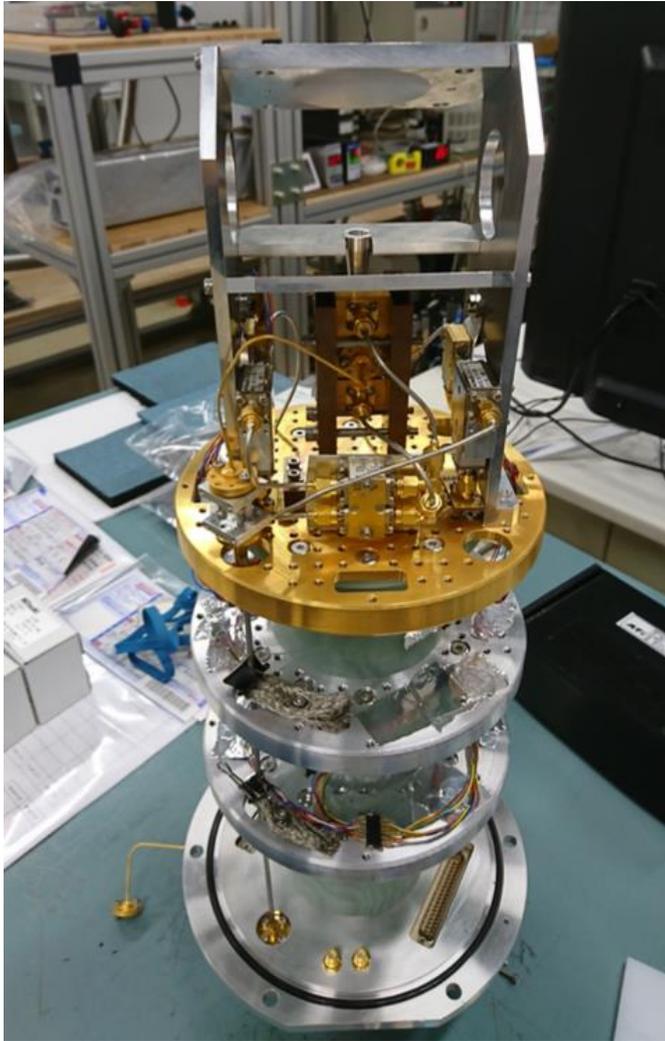
実際のセットアップ



アルミの球面鏡
直径 700mm
曲率 1500mm

SIS検出器
(クライオスタット中)

ミリ波検出器 (SUMIRE)



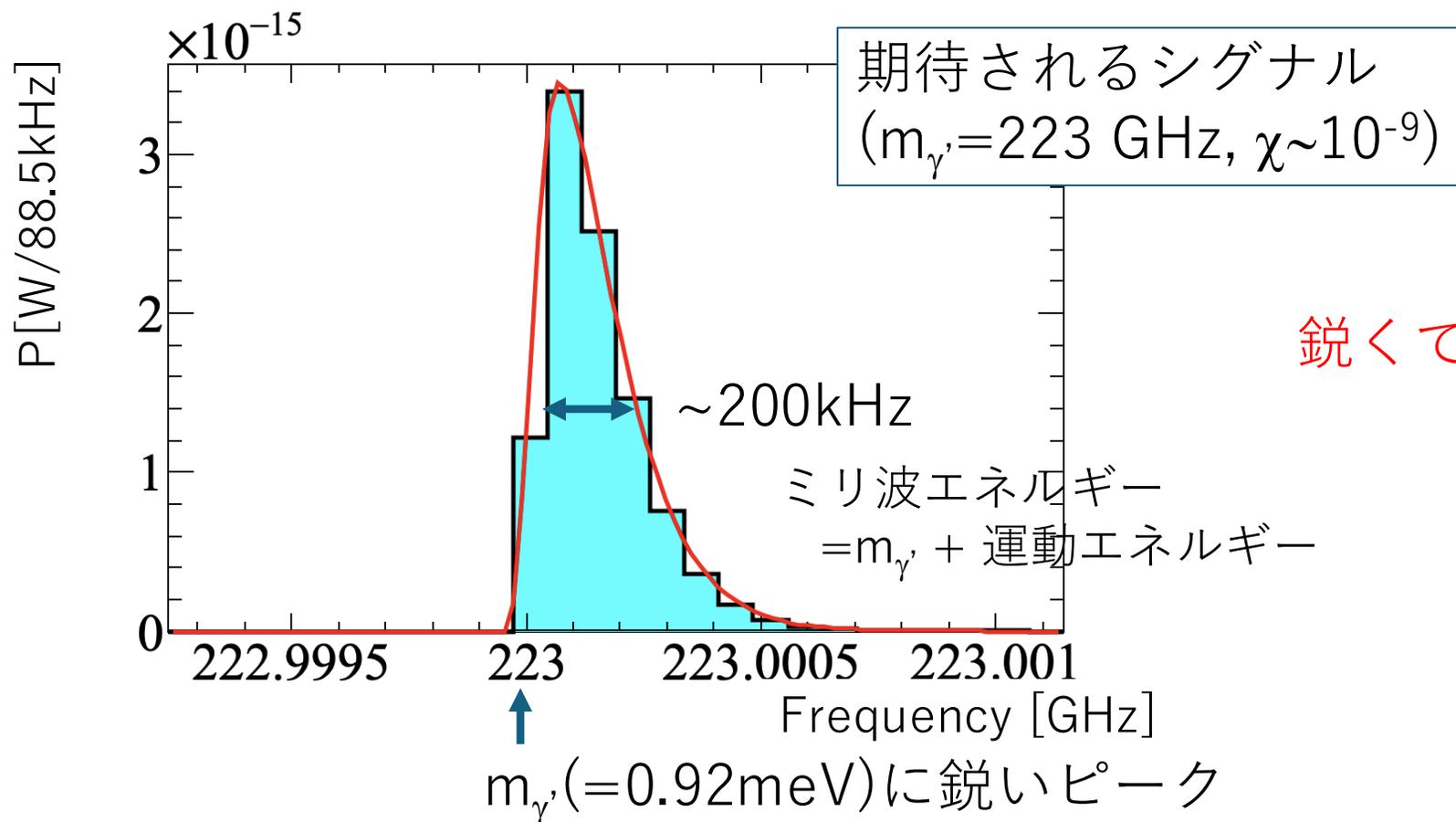
- Spectrometer Using superconductor Mixer REceiver (SUMIRE)
- 分子スペクトルのライン同定のために理研坂井研に設置
- ALMAで使用されているものと同型のヘテロダイン受信機
- 今回は Band6 カートリッジを使用
216GHz~264GHz (=0.89meV~1.09meV)
- 一度の測定で 8GHz の帯域幅、局所発振周波数 (LO) の変更により、全帯域をカバー
- 分解能 88.5kHz
- ほぼデッドタイムフリー

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

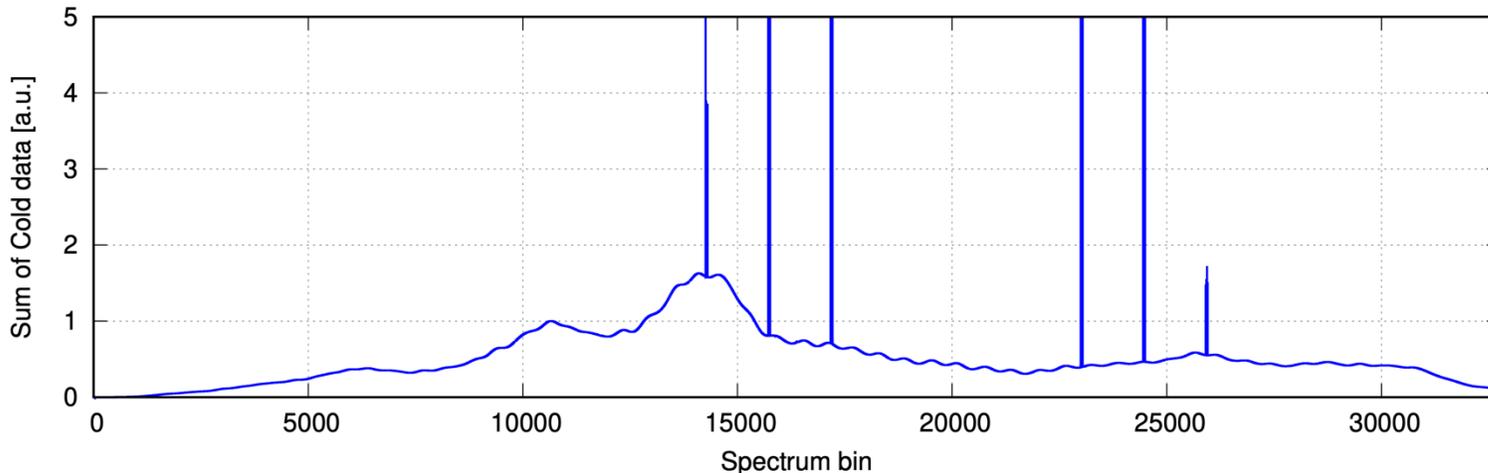
- 2022年7月に実施
- (8GHz 帯域) × (6 LO 周波数) で全 48GHz (216~264GHz) をスキャン
- ライブタイム 5分を 8回繰り返す、各周波数で 40分のライブタイム
- 繰り返し時、LO はわずかに ($\pm 512, 1024$ channels) にシフト (検出器起源のノイズを除くため)



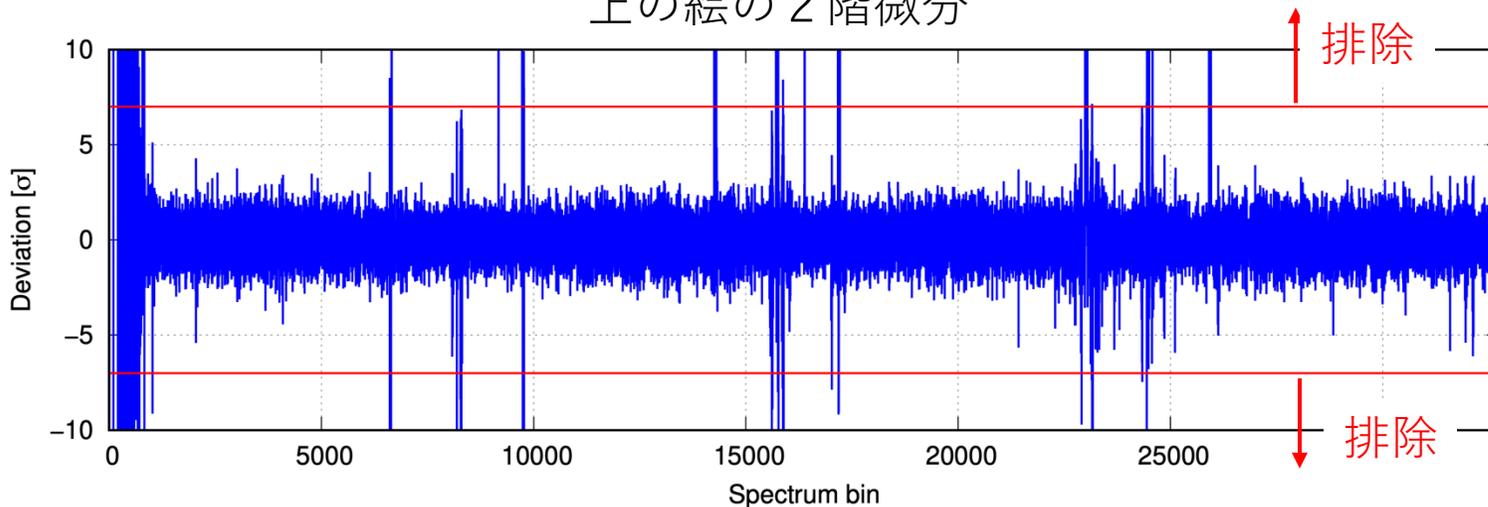
- ミラーのアラインメントは、検出器 (4K) の反射を利用
- 毎測定の前後に77K & 300K黒体のデータも取得して校正 (Hot-Cold法)

スパイクノイズ (spurious) の除去

低温校正の生データの和



上の絵の2階微分

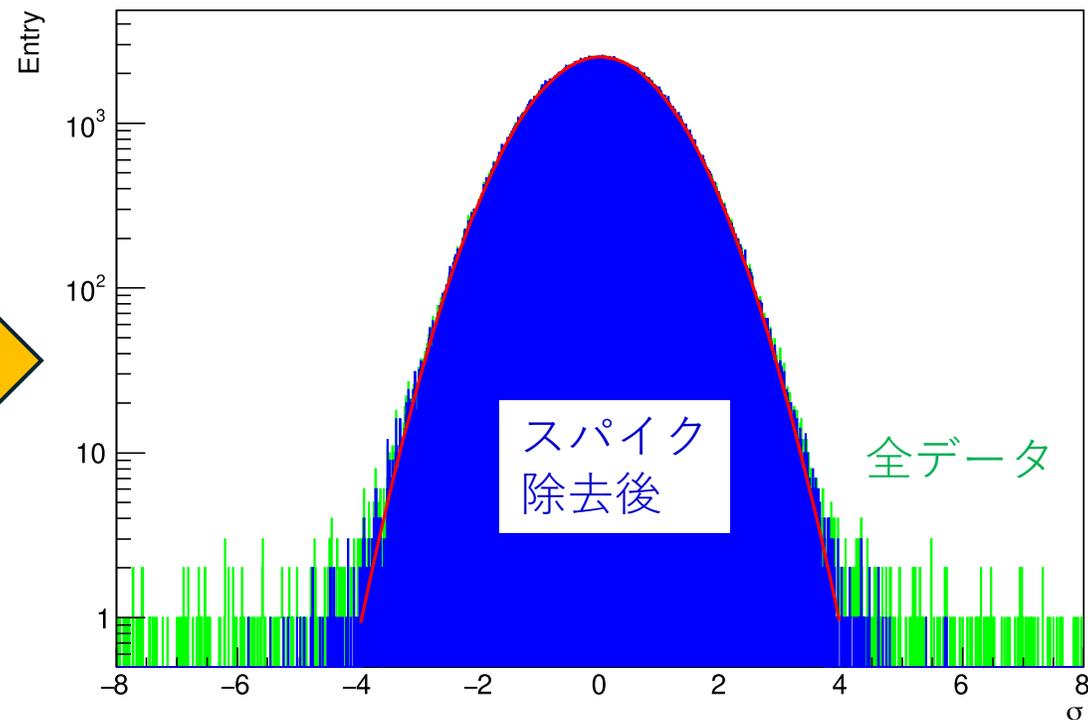
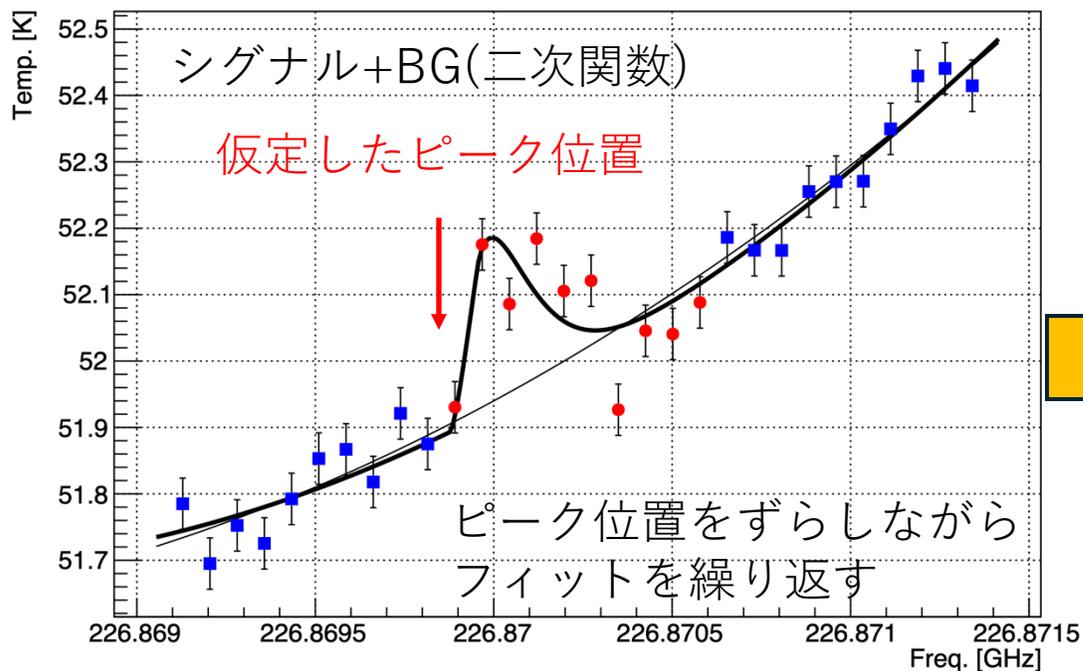


- 環境中の電波や計測系のノイズが、偽のピーク (spurious peak) を作る
- 常に乗っているノイズもあれば、突発的に生じるノイズもある
- 低温の校正データ (バンド毎の総和) の2階微分を利用して、やばいチャンネルをマスク
- LOを微妙にずらして繰り返し測定をおこなっているので、盲点はない

シグナルをフィットで探索

run: 20220719095633 lsbi, bin #15323

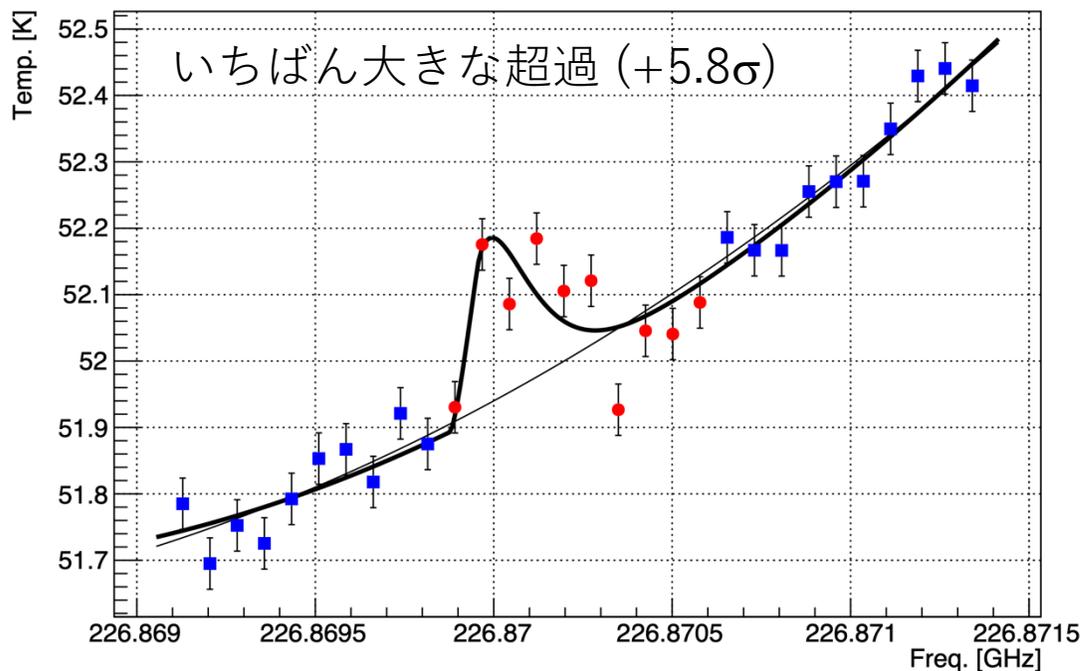
シグナルの大きさの有意性分布



- ピークの位置を固定し、シグナル+BG (二次関数) でフィット
- ピーク位置をずらしながらひたすらフィットの繰り返し
- 得られたシグナルの大きさの有意性をプロット

シグナルをフィットで探索

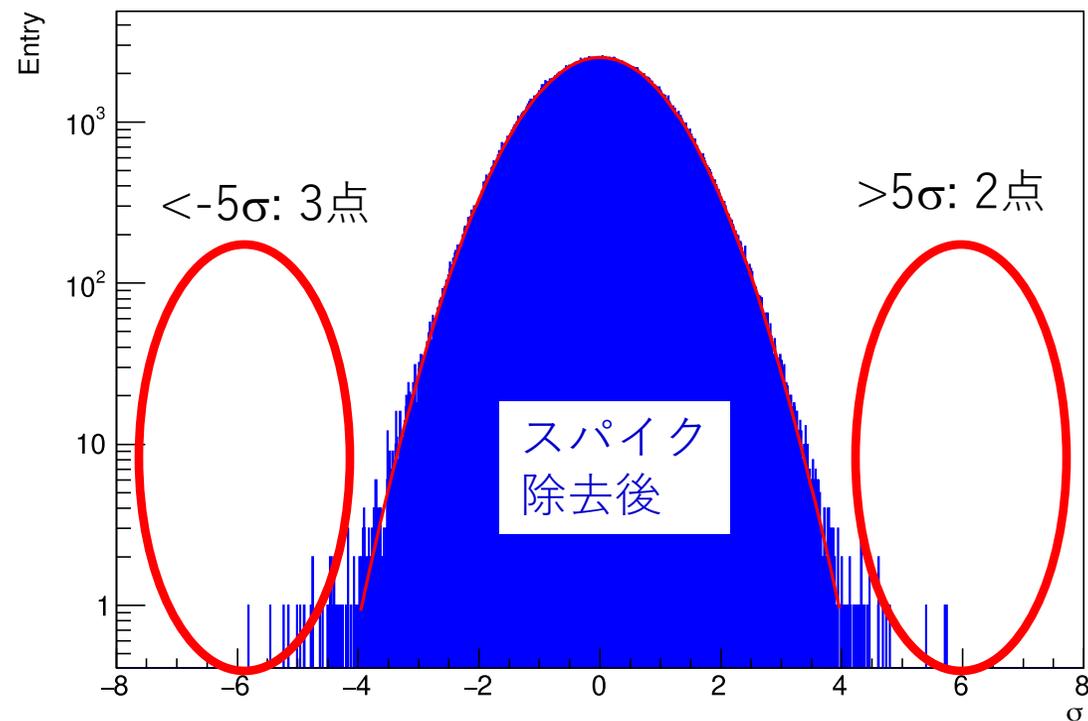
run: 20220719095633 lsbi, bin #15323



- 両端にガウス分布からの超過
 - 正側だけでなく負側にもある
 - 8回の繰り返し測定のうち、1~2回だけ極端に大きい



シグナルの大きさの有意性分布

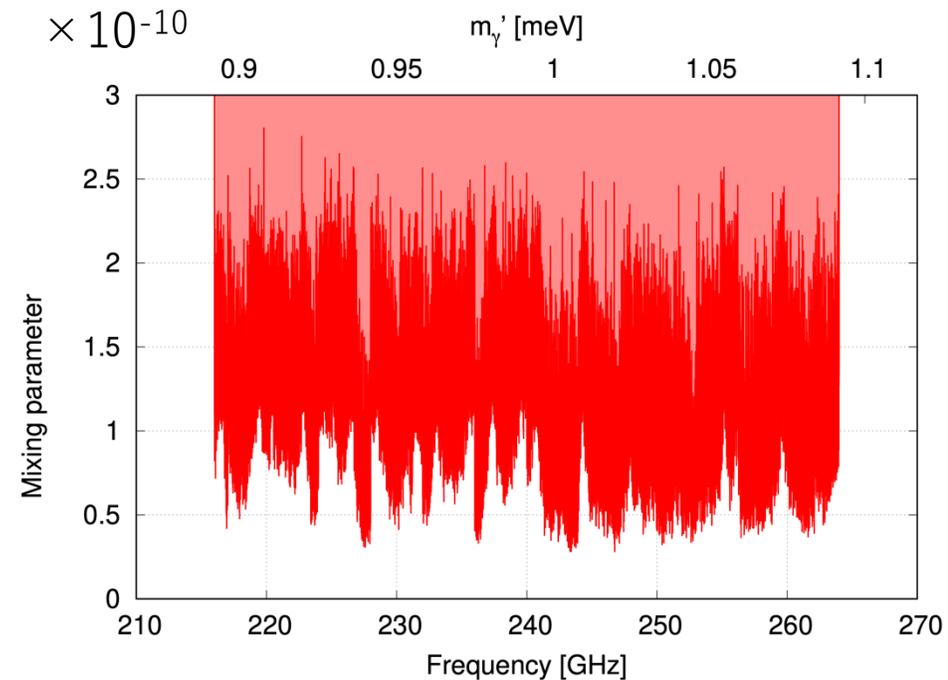
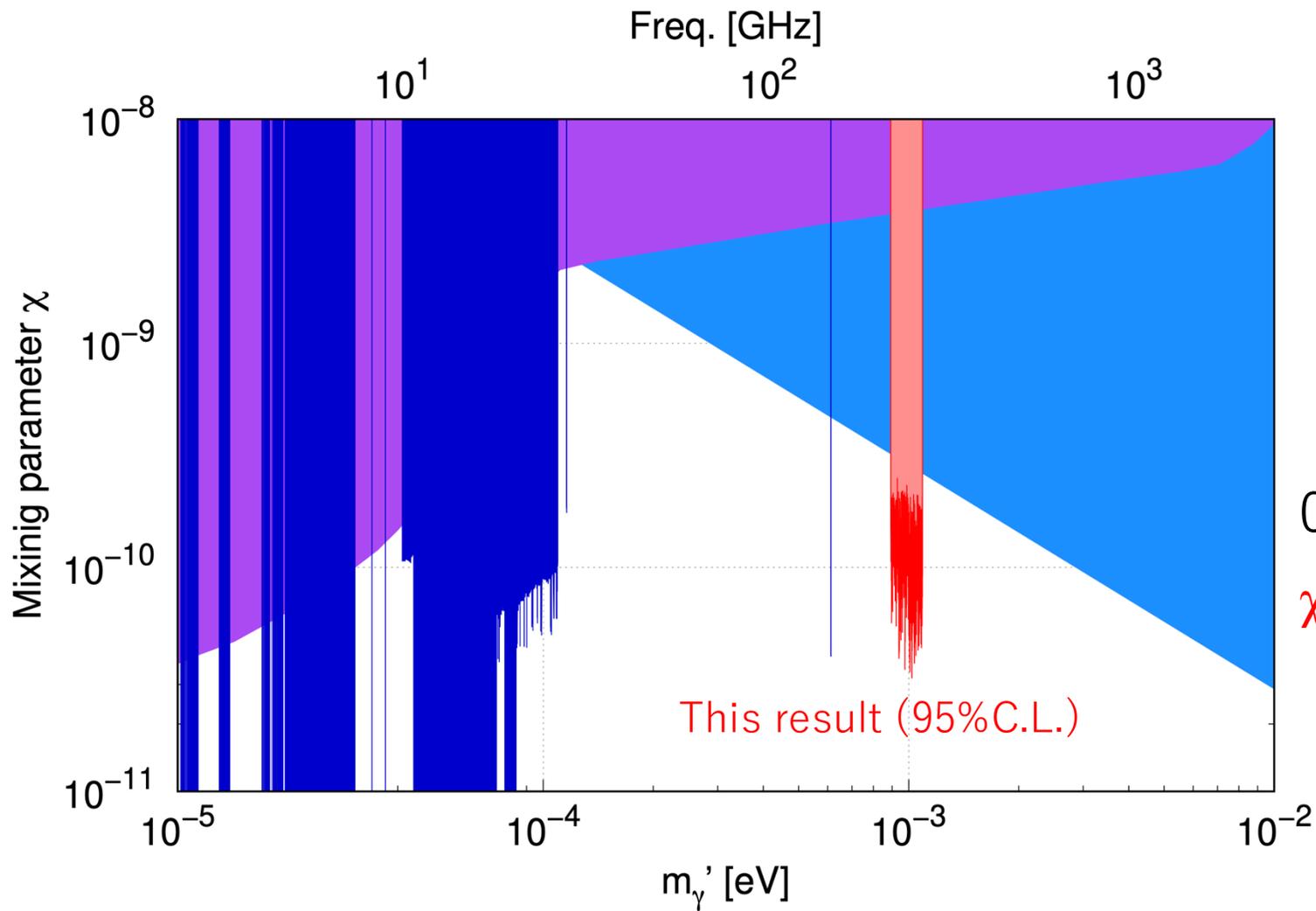


おそらくは、突発的なノイズ事象だと考えられるが、シグナルとみなして上限をつける。

シグナルパワー換算時の重要項目

- 有効な光子→パラフォトン変換面積
アラインメントは低温検出器(4K)自身の反射を利用
探索時の測定温度(<110K)から、視野の64%以上をカバー
→ガウシアンの入力を仮定して、 $A_{\text{eff}} > 0.045 \text{m}^2$
- シグナルの位相
シグナルは同位相で鏡面から放出されるが、
設置精度はそこまで良くない
→完全にランダムに足されると仮定し、検出シグナル強度 $1/2$
- 検出器のパワー較正精度
測定前後のゲイン較正の差から $< 5\%$
- 偏光依存性
検出器は片偏光のみ検波するので、検出シグナル強度 $1/2$

得られた結果



$0.89 < m_{\gamma'} < 1.09 \text{ meV}$ の領域で、
 $\chi > (0.27 \sim 2.81) \times 10^{-10}$ (95% C.L.)
 の領域を排除した

まとめと今後

- 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
- 216~264GHz の範囲を超伝導ミリ波検出器で測定し、 $0.89 < m_{\gamma} < 1.09$ meV の領域で、 $\chi < (0.27 \sim 2.81) \times 10^{-10}$ (95% C.L.)
という世界で最も厳しい制限を得た
- 今後
 - ノイズと疑わしいシグナル近辺の再測定→感度向上 (or discovery)
 - 検出器ユニットの交換→より重い領域(>300GHz帯)の探索