

超伝導検出器を用いたミリ波領域におけるパラフォトン暗黒物質探索

荻野恭輔, 並木飛鳥, 難波俊雄^A, 成田佳奈香, 浅井祥仁,
坂井南美^B, 渡邊祥正^C, 山本智

東大理, 東大素セ^A, 理研^B, 芝浦工大^C

日本物理学会2023年春季大会

目次

- パラフォトンとは
- パラフォトン探索の現状
- 探索手法
- 実験のセットアップ
- 本測定
- スプリアスの除去
- 今後の課題
- まとめ

パラフォトン(Paraphoton)

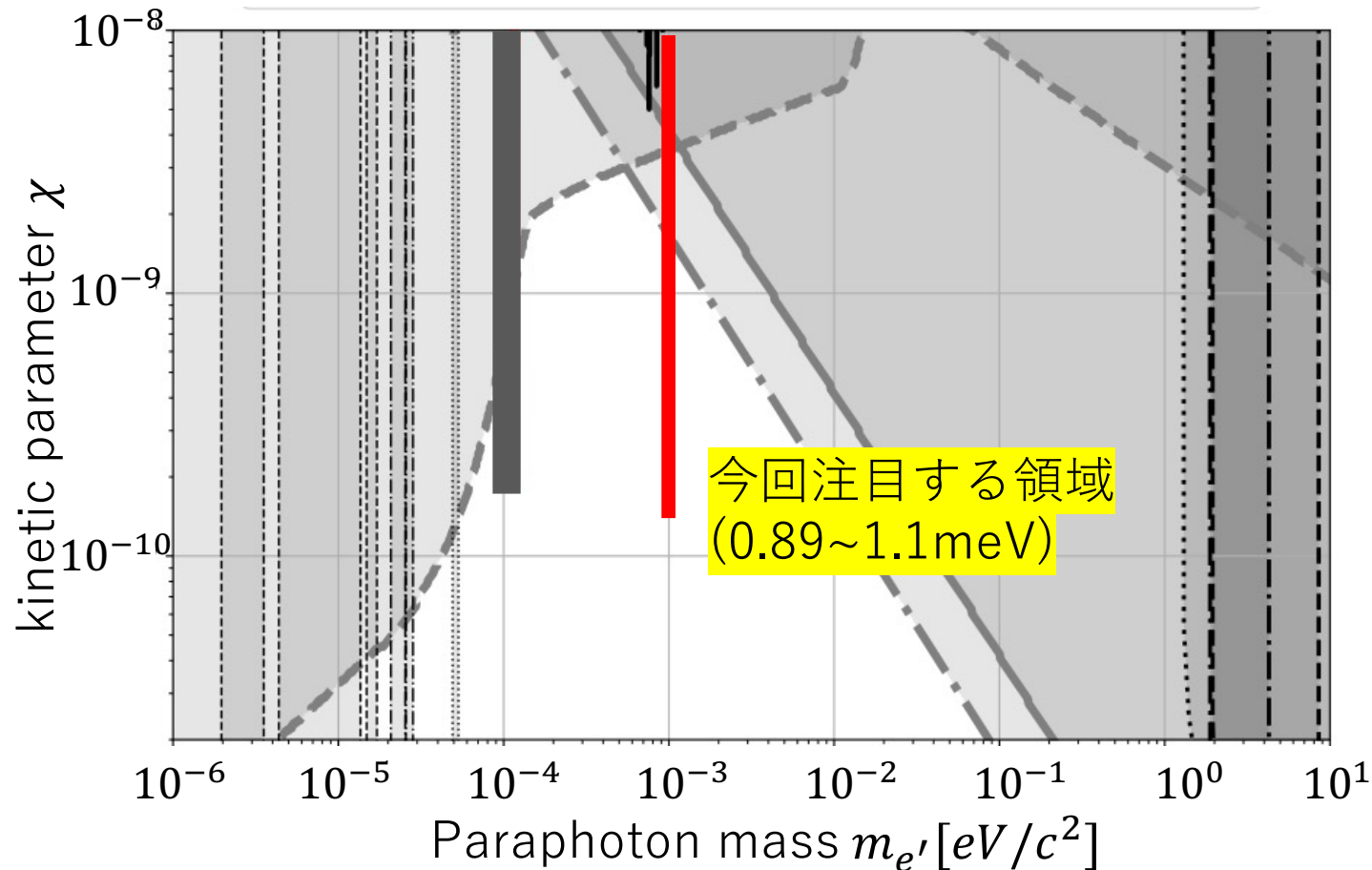
- WISP(Weak Interacting Slim Particles):WIMPとは異なり、軽く tabletop実験で探索できる暗黒物質
- 標準模型を超えた理論においてSM粒子からなる”visible sector”と非常に弱く結合する”hidden sector”
- “hidden sector”のうちU(1)対称性に対応するゲージボソン
→パラフォトン(Dark Photonとも呼ばれる)

$$\mathcal{L} = \underbrace{-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + J^\mu A_\mu}_{\text{標準理論}} \underbrace{-\frac{1}{4}X^{\mu\nu}X_{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{\gamma'} \begin{pmatrix} A_\mu \\ X_\mu \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \chi^2 & -\chi \\ -\chi & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_\mu \\ X_\mu \end{pmatrix}}_{\text{拡張項}}$$

χ :kinetic parameter $m_{\gamma'}$:パラフォトンの質量 X^μ : パラフォトン場
パラフォトンは通常の電磁波と混ざり合う

パラフォトン探索の現状

JCAP09(2020) 012

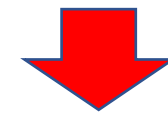


現状、meV領域はそれ以外の領域に
比べ探索が進んでいない

($m_{\gamma'} \sim 1 \text{ meV}$ では $\chi \sim 2 \times 10^{-8}$)

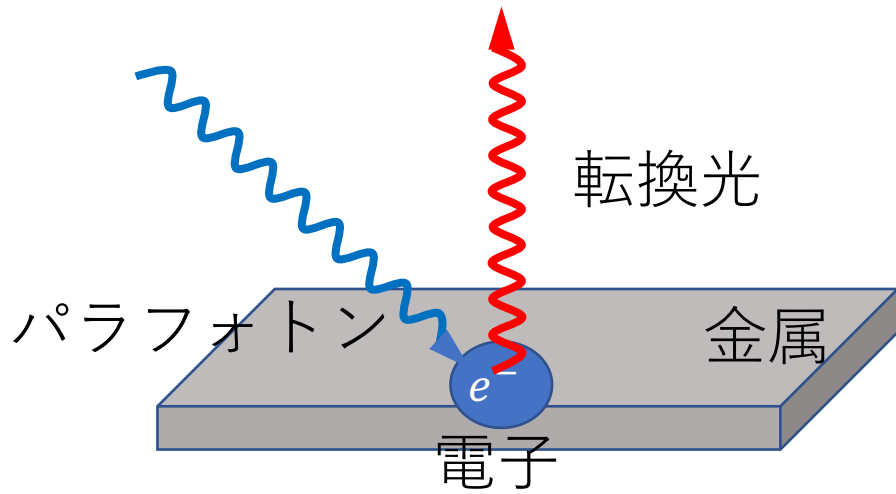
$$\chi = 4.5 \times 10^{-14} \times \left(\frac{P_{rec}}{10^{-23} W} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.3}{\rho_{DM}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 m^2}{A_{eff}} \right) \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right)$$

超伝導検出器SUMIREを用い
て探索を行う



$\chi \sim 10^{-10}$ と2桁近く高い感度
での探索が見込める

探索手法



- 銀河に存在する暗黒物質全てがパラフォトンであると仮定
- パラフォトンはkinetic mixing χ によって通常の電場を含むため、金属に入射すると内部の自由電子を振動させる
- 境界条件によって転換光は金属表面から垂直に放射される

→ 本実験においてはアルミ製ミラーによって転換光を発生させる

転換光

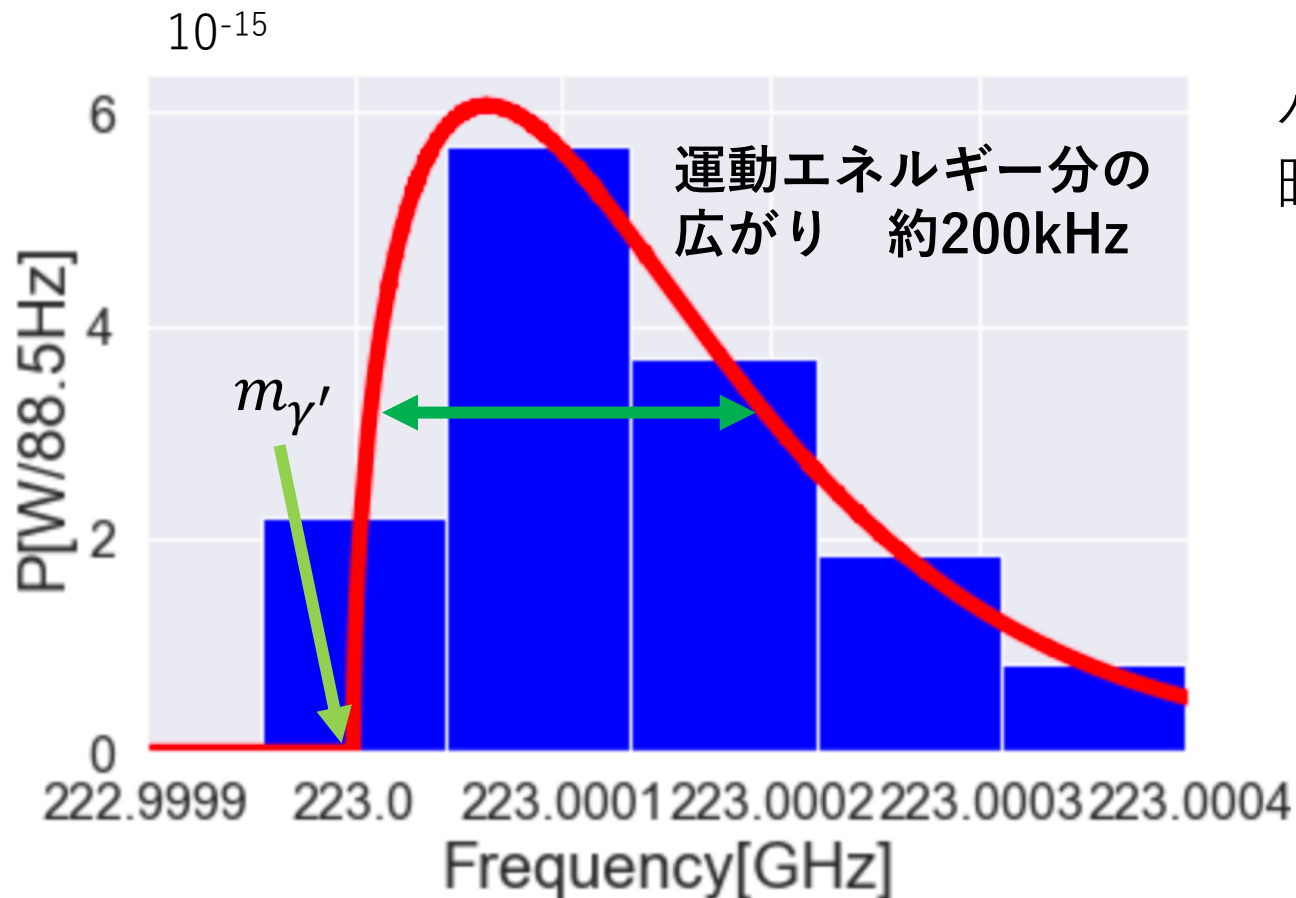
$$\begin{aligned} \text{パワー: } P_0 &= \frac{2}{3} \chi^2 A_{eff} \rho_{DM} \\ \text{周波数: } \omega &= \frac{m_{\gamma'}}{\sqrt{1-v^2}} \end{aligned}$$

ρ_{DM} : DM密度
 A_{eff} : 有効面積
 v : DM速度

感度向上のためミラーの形状を球面にし検出器に集光

予想されるシグナル

$\chi = 2 \times 10^{-9}$ 、 $m_{\gamma'} = 0.922 \text{ meV} (223 \text{ GHz})$ を仮定 $\rightarrow P = 1.5 \times 10^{-14} \text{ W}$



パラフォトンのシグナルエネルギー分布は
暗黒物質の速度分布を反映したものになる

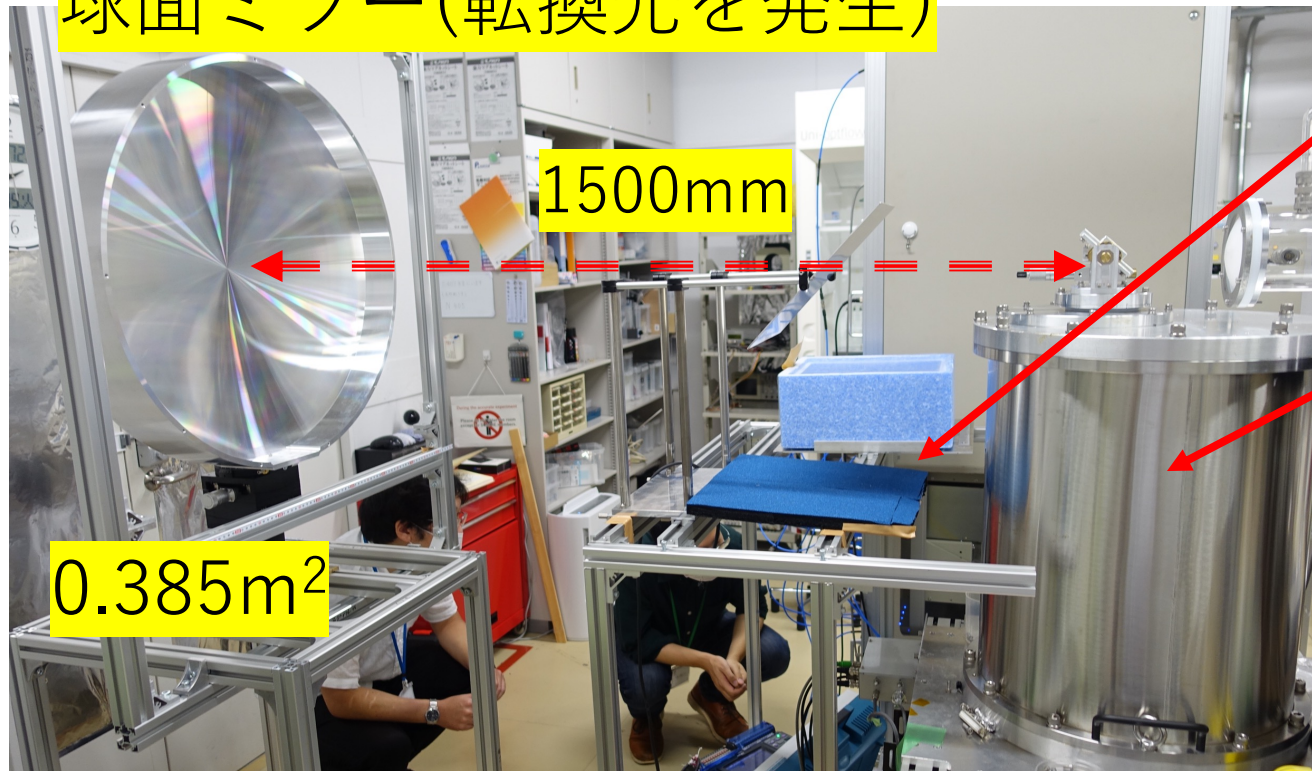
スペクトロメータの分解能は88.5kHz



転換光は鋭いピークとして観測される

実験のセットアップ

球面ミラー(転換光を発生)



キャリブレーション用の台
※液体窒素/室温黒体を使用

SUMIRE

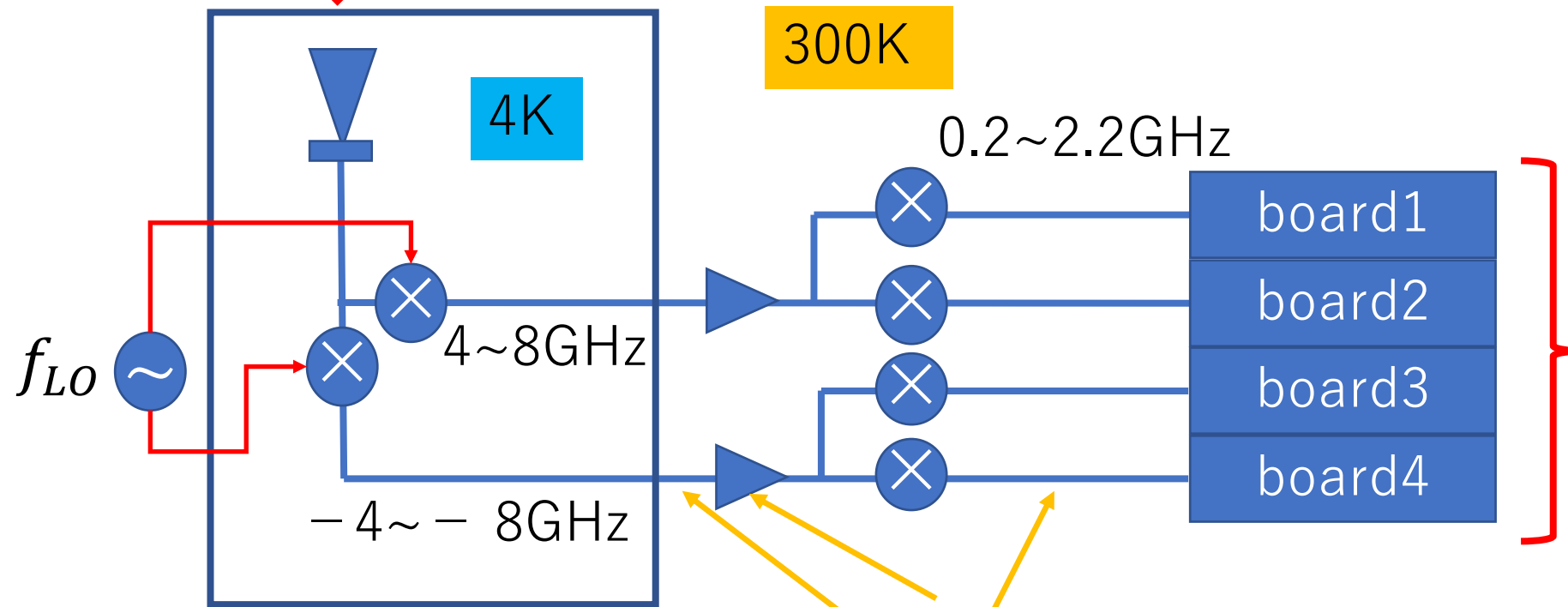
ALMA型のカートリッジ受信機
を使用した超伝導SIS検出器
周波数帯域:216~264GHz
分解能:88.5kHz
dead timeほぼなし

$\chi \propto (A_{eff})^{-\frac{1}{2}}$ より実験室の規模が許す範囲
でミラー径を最大化したセットアップ

SUMIREの信号処理

キャリブレーション測定/
本測定
入力帯域
216~264GHz

SISミキサによる低ノイズなダウンコンバートに
より200GHz帯域における高感度探索を実現



2×4GHzの8GHz分
のスキャン

f_{LO} は224,228,232,248,252,256GHzの6つ

ノイズ混入の可能性

キャリブレーション測定

- キャリブレーション測定のセットアップ(本測定時も同様)

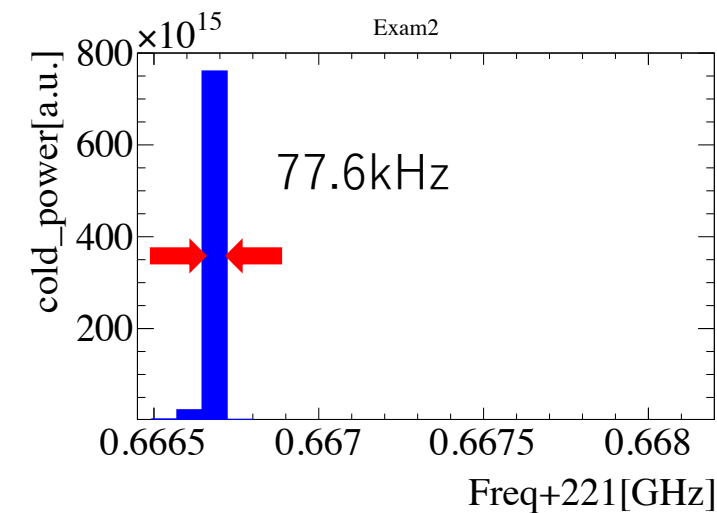
8GHz帯域 × 6つの f_{LO}  216~264GHzの広帯域をスキャン

- 各 f_{LO} にて0,40,80,120MHz(<< 測定帯域2.5GHz)ずつずらして4パターン測定
→ダウコンバート後に混入するシグナルライクなノイズを除去する
- 各測定ごとに5分間ずつ液体窒素温度/室温黒体を用いたキャリブレーション測定(+本測定)を実施
- 同一条件で2回ずつ繰り返して測定を実施→総測定時間4時間

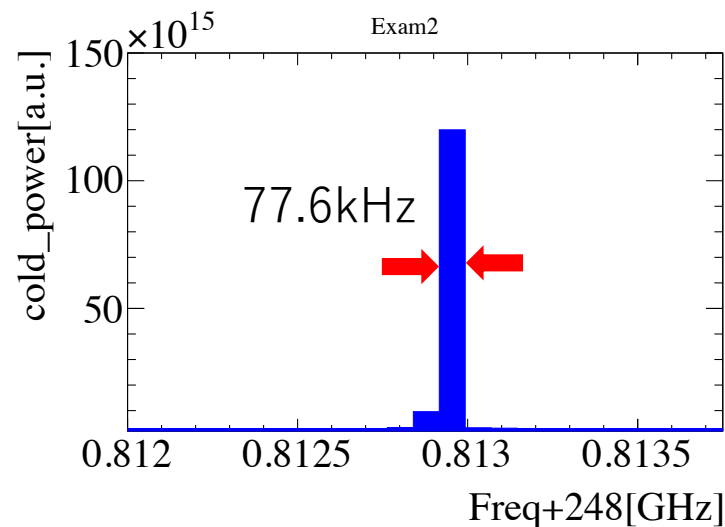
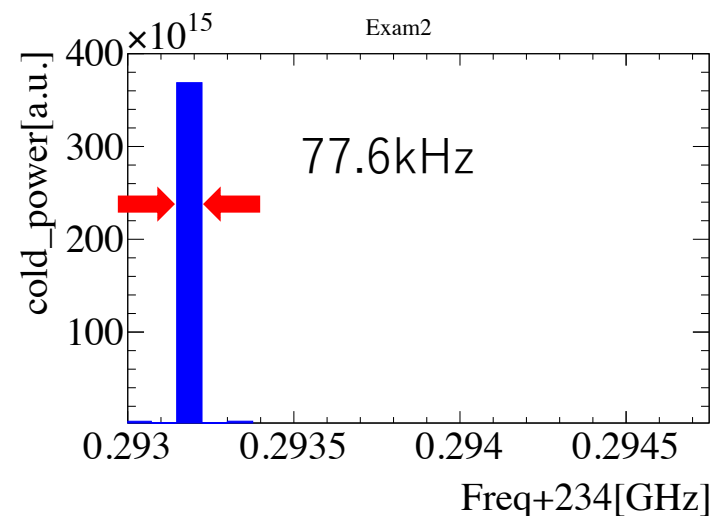
今回はキャリブレーションデータを用いてスプリアス
と呼ばれるノイズの除去を行った

スプリアス

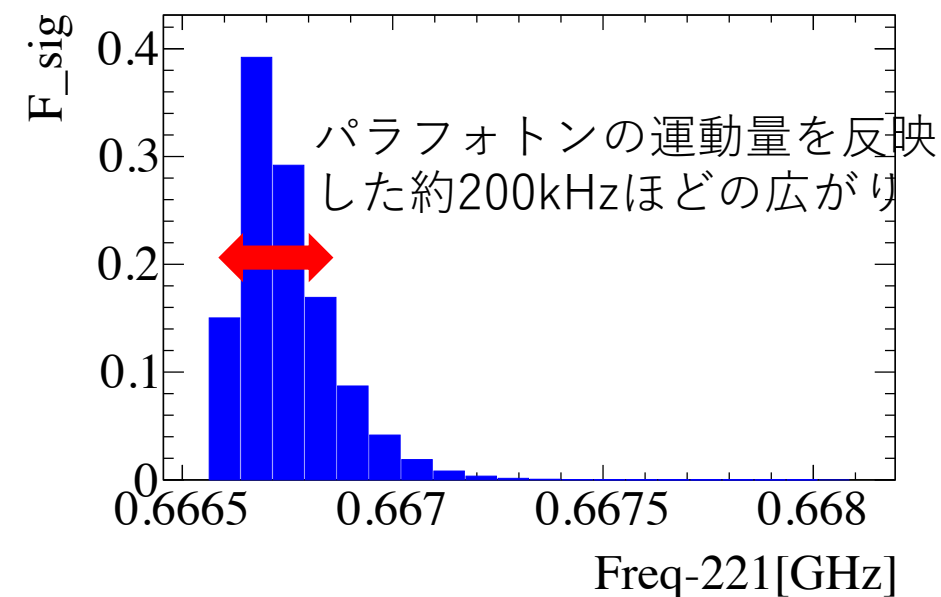
スプリアス：ノイズによる鋭いピーク



キャリブレーションデータ
に載ったスプリアスの例



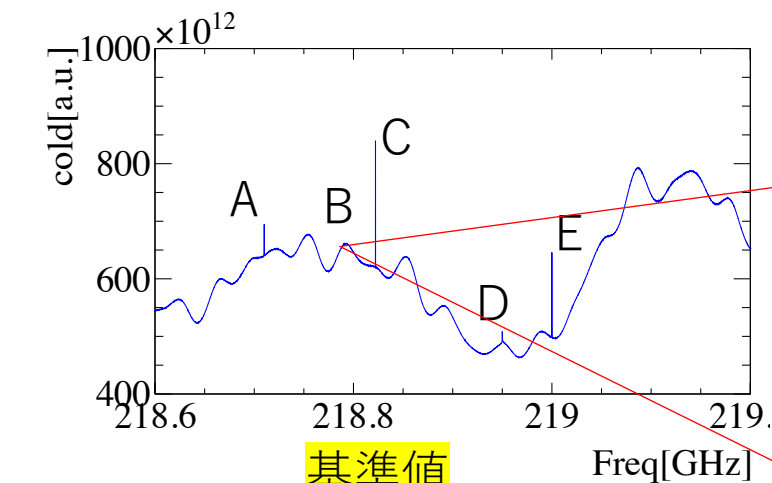
予想されるDMシグナルの形状



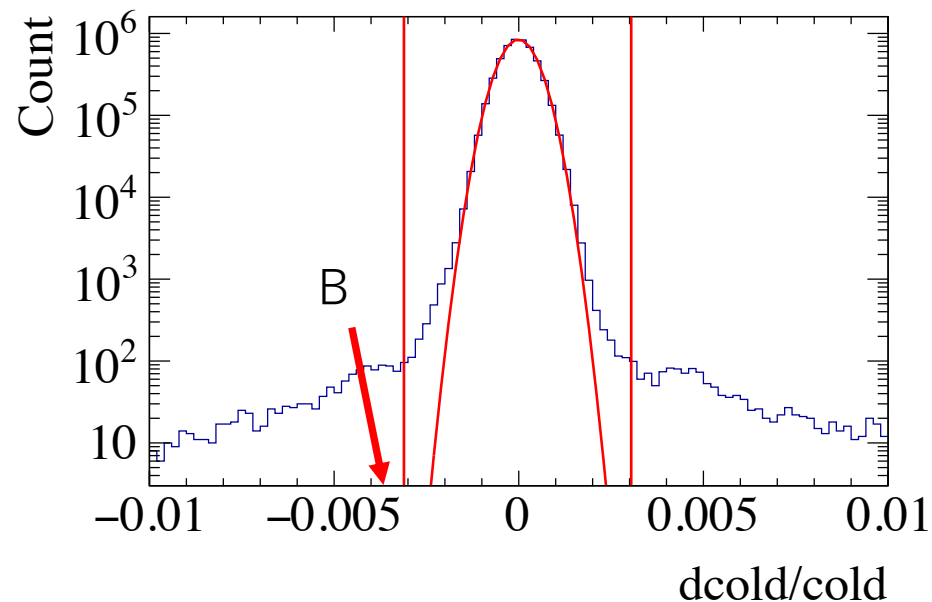
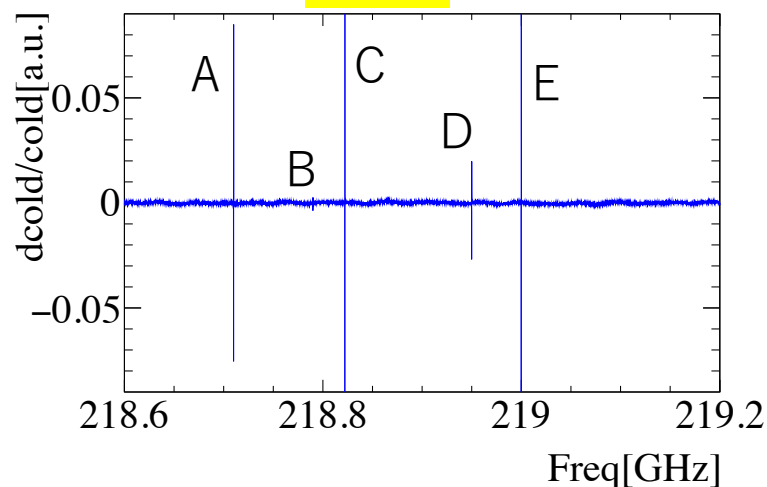
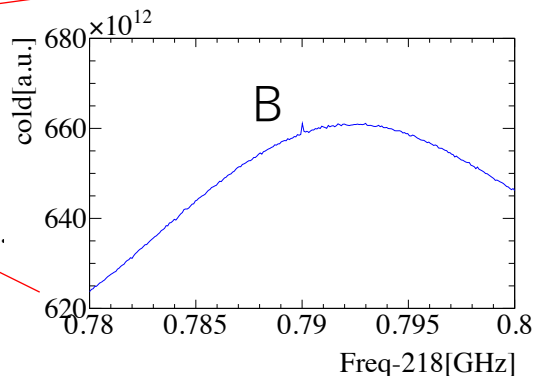
DMシグナルと混同しないよう排除すべき

スプリアスの除去

基準：キャリブレーションデータの差分を自身の値で規格化したもの



生データ



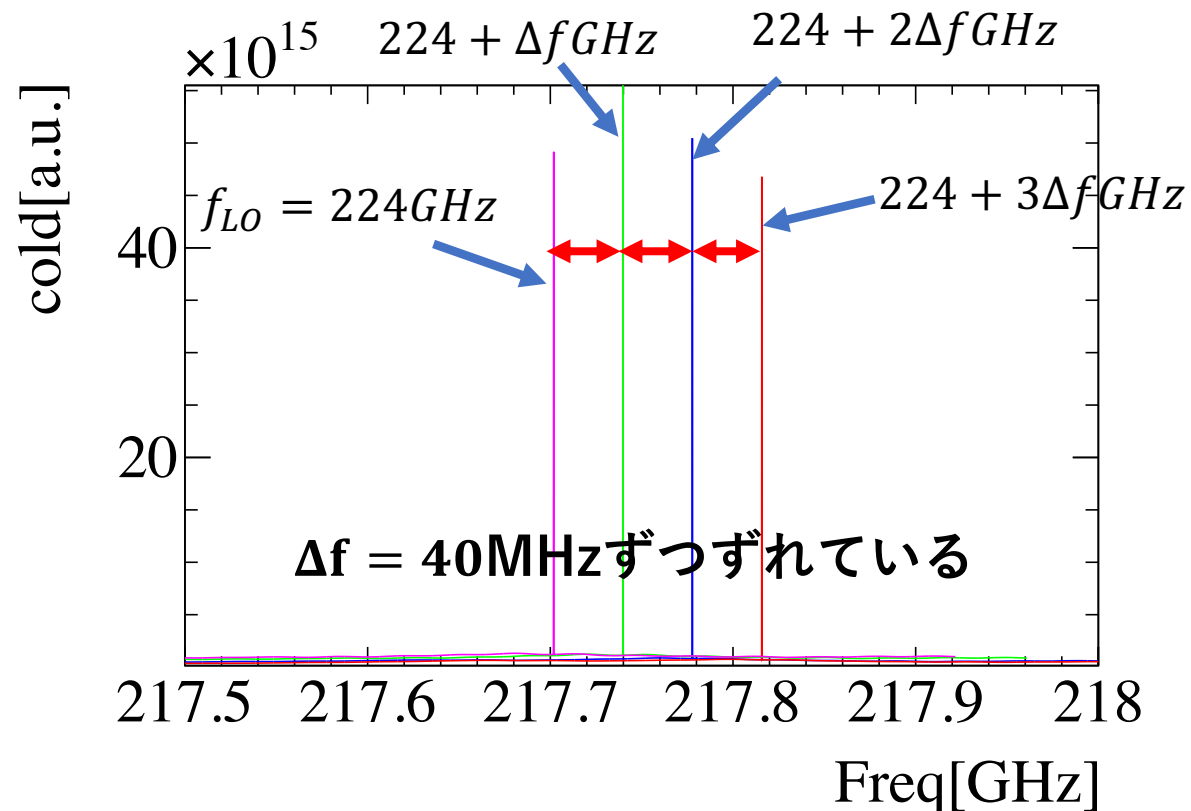
全データでこの
基準値を集計

液体窒素黒体では 6.3σ 、
室温黒体では 6.5σ を基準とした

スプリアスの割合と起源を調べた

スプリアス除去の結果

- ・ 今回除去されたスプリアスは全データの 9.0×10^{-4}
- ・ f_{LO} をずらした際に同じ周波数だけ移動したスプリアスのみであった



代表的なスプリアス起源

- ・ 携帯電波(1.8GHz帯域, 2GHz帯域)
- ・ FPU(1.2GHz帯域)
- ・ Wi-Fi(5GHz帯域) など

左の例は1960~1980MHzに割り当てられた携帯電波の周波数と推定

216~264GHz全周波数帯域において探索が可能

今後の課題

- 今回はピークサーチまで至らなかったため、キャリブレーション後のスペクトルからDMシグナルをフィッティングにより探索
- ミラーのアライメントを中心に系統誤差の見積り

→これらの結果を踏まえ、本測定での探索感度の推定

まとめ

- 暗黒物質WISPの一つであるパラフォトンの探索を行った
- SIS検出器を用い、0.89~1.09meVの領域において世界最高感度での探索が期待できる($\chi \sim 10^{-10}$ 程度の感度になると推定)
- ローカルを意図的にずらすことによる検出器由来のノイズであるスプリアスの除去

今後はピークサーチを行い216~264GHz帯域における世界最高感度でのパラフォトン探索を目指す

将来的には受信機のカートリッジを入れ替え300~500GHzの帯域でも同様の測定を行う予定