

超伝導SIS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2022年秋季大会

目次

概要

- パラフォトンとは
- 探索の現状

実験内容

- 探索手法
- 実験のセットアップ
- キャリブレーション
- 本測定

まとめ

パラフォトン(Dark Photon)

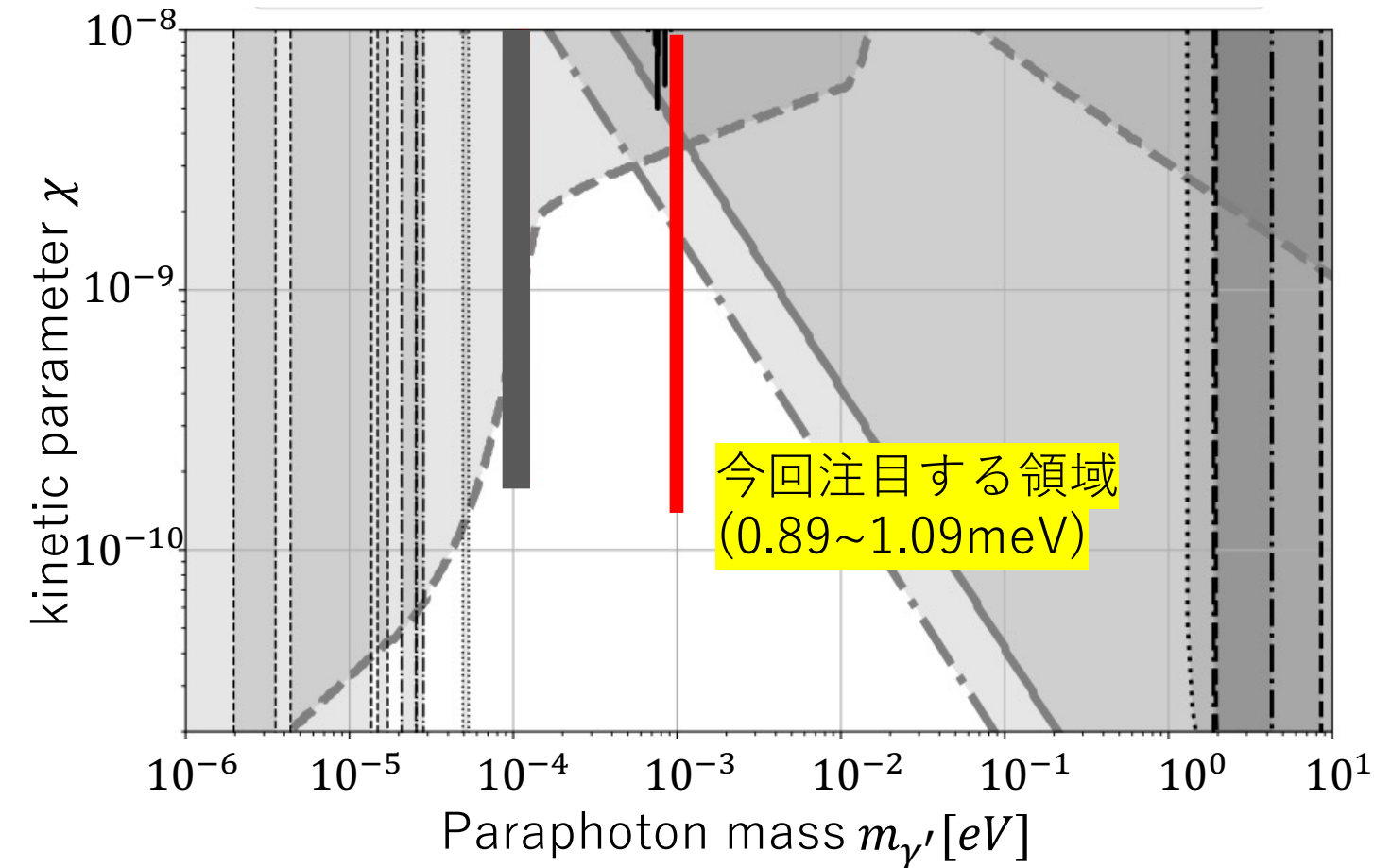
- WISP(Weak Interacting Slim Particles):WIMPとは異なり、軽く tabletop実験で探索できる暗黒物質
- 標準模型を超えた理論においてSM粒子からなる”visible sector”と非常に弱く結合する”hidden sector”
- “hidden sector”のうちU(1)対称性に対応するゲージボソン
→パラフォトン

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

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

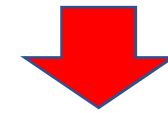


現状、meV領域はそれ以外の領域に
比べ探索が進んでいない

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

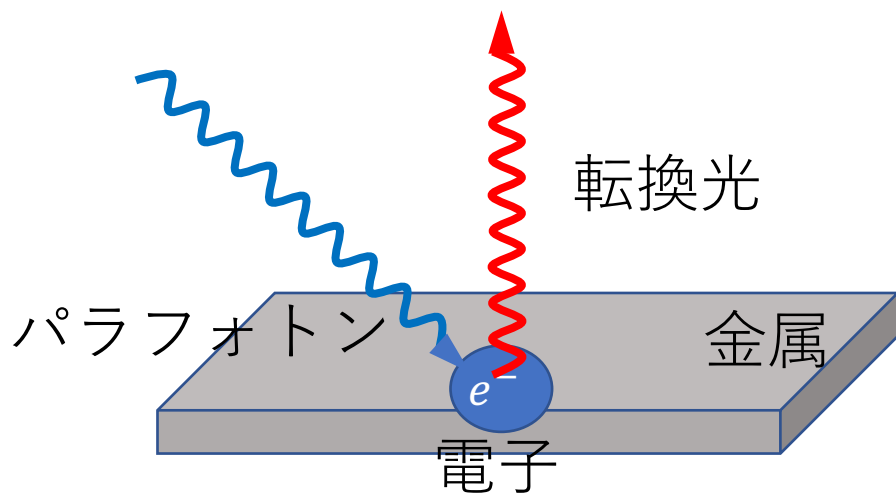
$$\chi = 4.5 \times 10^{-14} \times \left(\frac{P_{rec}}{10^{-23} \text{ W}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.3}{\rho_{DM}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 \text{ m}^2}{A_{eff}} \right) \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right)$$

超伝導SIS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
- パラフォトンが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

→球面ミラーを用いてこの転換光を検出器に集光する

転換光

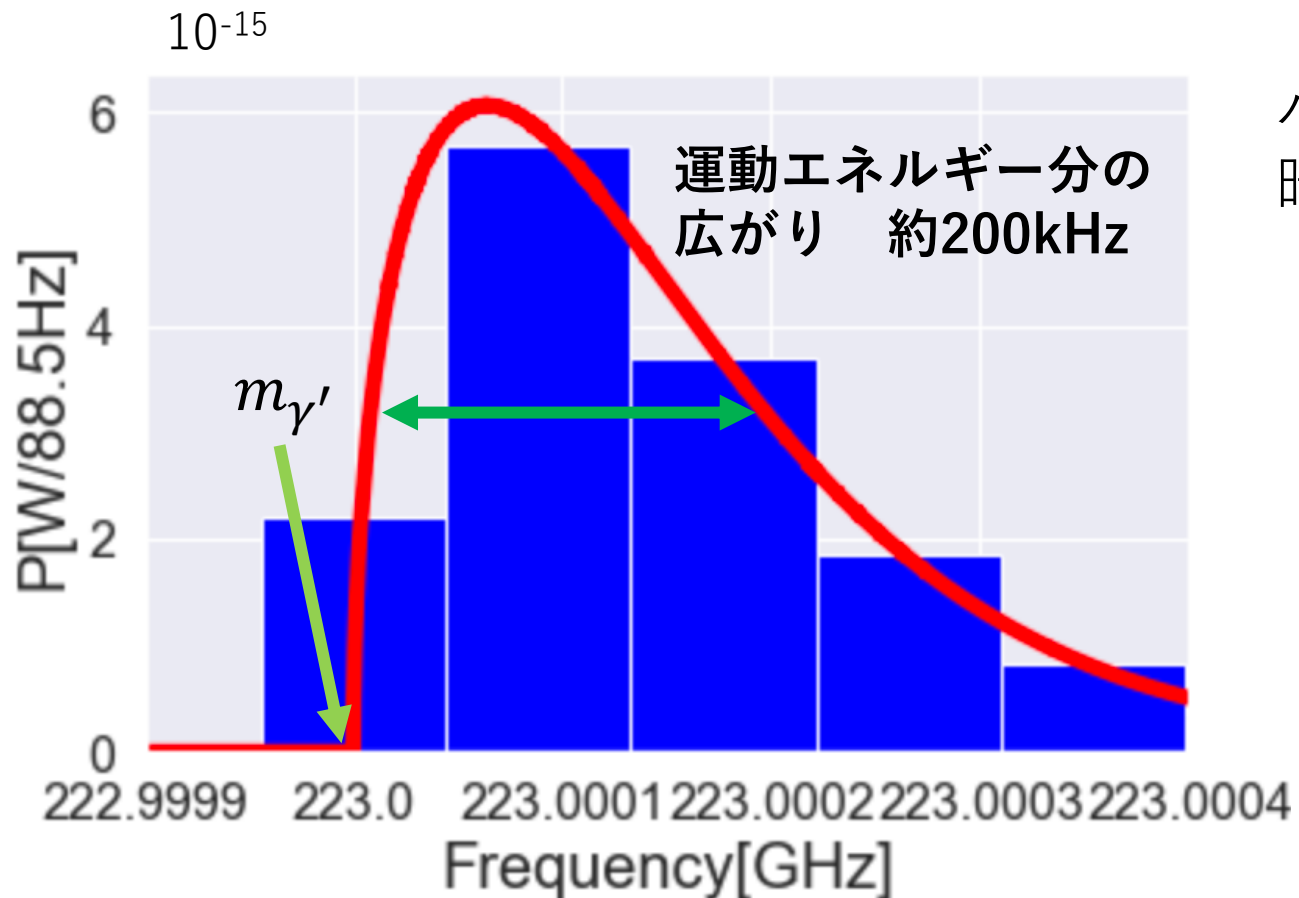
$$\begin{aligned} \text{パワー: } P_0 &= \frac{2}{3} \chi^2 A_{eff} \rho_{DM} \\ \text{周波数: } \omega &= \frac{m_{\gamma'}}{\sqrt{1-v^2}} \end{aligned}$$

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

感度向上のためには有効面積 A_{eff} の最大化が重要

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

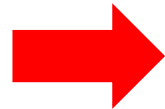
球面ミラー

キャリブレーション用の台

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

ミラーの面積:0.385m²
(ガウスビーム径の約 $\sqrt{2}$ 倍)



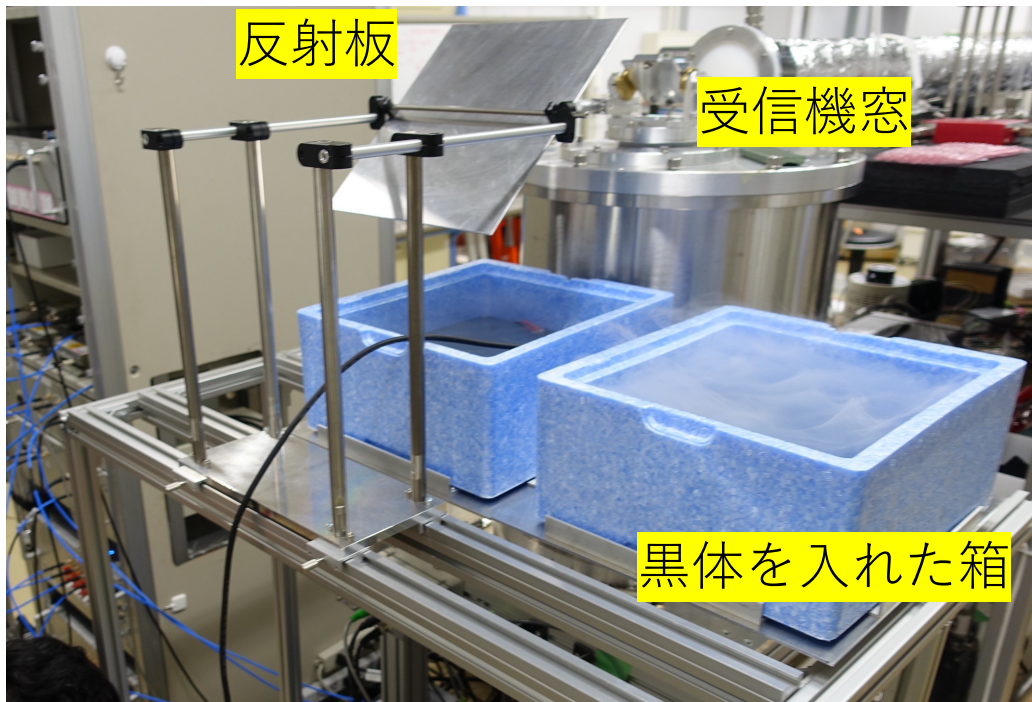
$\chi \propto (A_{eff})^{-\frac{1}{2}}$ より実験室の規模が許す範囲
でミラー径を最大化したセットアップ

キャリブレーション

出力 S と受信パワー P_T は

$$S = (P_T + P_{sys})G \quad (G: \text{ゲイン}, P_{sys}: \text{システム雑音})$$

$$P_T = 2k_b T \Delta\nu \quad (k_b: \text{ボルツマン定数}, T: \text{温度}, \Delta\nu: \text{周波数分解能})$$



1. 温度の分かっている二つの黒体輻射の出力を測定(室温:297K, N₂:77K)
2. 得られた G, P_{sys} からミラーを測定したときの受信パワーを求める

ゲイン G の値が $P_{rec} \propto \chi^2$ に効いてくる
→ ゲインを最大化、安定化させることが重要

ゲインのリニアリティの確認

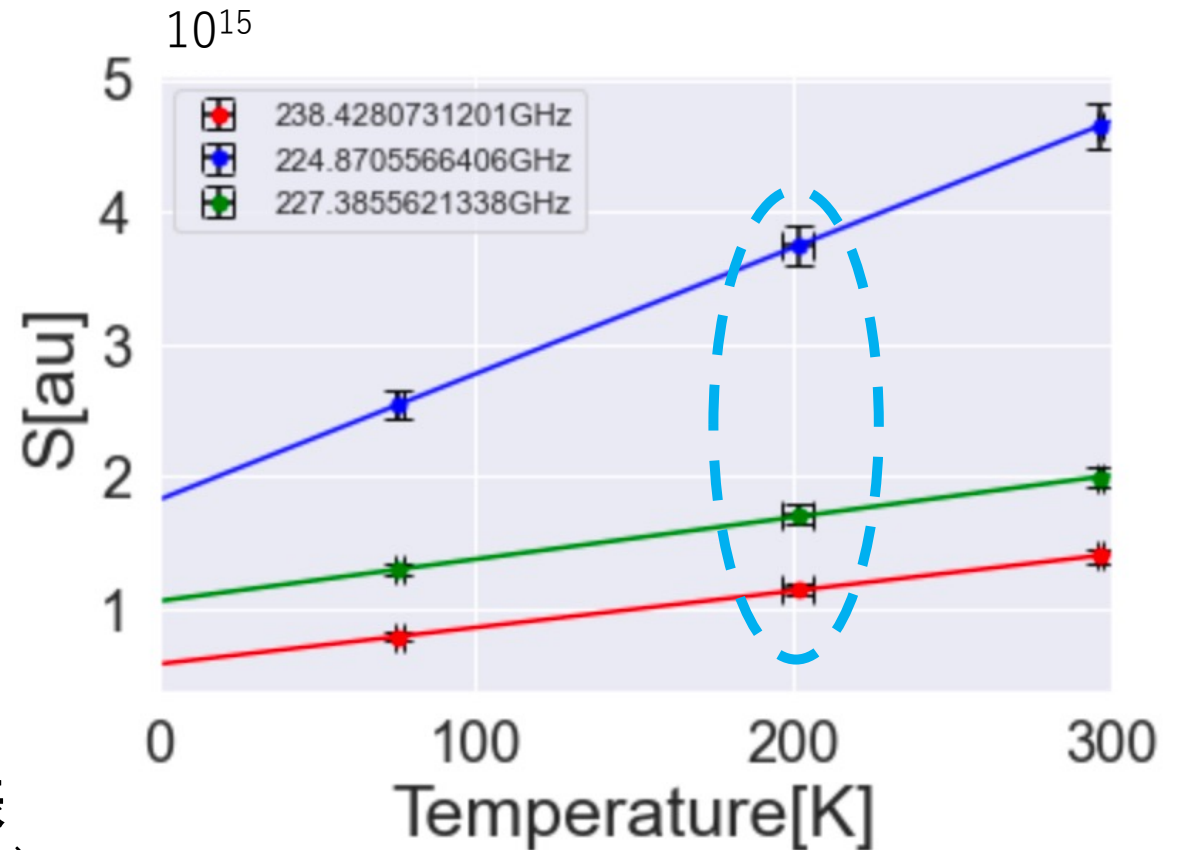
液体窒素、室温の2点でとった直線に対し、ドライアイス+エタノール(202K)での黒体温度を測定した点を内挿してリニアリティを確認

周波数[GHz]	$\Delta S/S[\%]$
238.4	4.14
224.9	3.90
227.4	5.06

測定した8GHz全体では $\Delta S/S=0.042 \pm 0.005$

内挿した202Kの点では4.2%の精度でリニアリティが確認できた

→ 測定する温度である4K近くも同様の精度であると考えられる(確認中)



本測定

- 総測定時間は4時間で各周波数ごとに40分の積分時間で測定
- 一度の測定で8GHzの帯域のスペクトルが得られ、これを f_{LO} を6回変えながら測定することで216~264GHzの間をスキャン
- 系統誤差を減らすためにスキャンは4回繰り返した
- 繰り返しの際はヘテロダイン後の帯域のノイズを区別するために512ビン分 f_{LO} をずらして測定を行った
- 各測定の際はhot/coldで較正測定を実施

現在は測定データの解析中

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)
- 3温度での測定による出力の線形性を確認した

今後は解析を進め、meV領域におけるパラフォトンの最高感度での探索を目指す

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