

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13809

研究課題名（和文）電波望遠鏡を応用した新しい素粒子実験の開拓 暗黒光子の探索

研究課題名（英文）Search for hidden photon cold dark matter using radio telescopes

研究代表者

小栗 秀悟 (Oguri, Shugo)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：20751176

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、暗黒物質の候補である、“暗黒光子”の探索実験を目的としている。電波望遠鏡を流用することで、スピーディに最先端の探索実験を行うことを計画している。申請者は、高感度ミリ波分光観測器“KUMODES”を用いて暗黒光子探索を行った。探索した暗黒光子の質量は $1e-4eV$ 付近である。光子と暗黒光子の結合の強さを表す混合確率に対して、この領域では初となる、 $1e-10$ 台の上限値がつけられた。この成果は論文にまとめ、現在JCAPに投稿中である。並行して、GroundBIRDによる探索実験を進めている。期間内の探索には至らなかったが、試験運用を行い、実験の実現性を実証することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、まだ誰も探索していないミリ波帯を探索する点である。この帯域は、技術的な困難さから世界中の素粒子分野の研究者が攻めあぐねている未開拓領域である。宇宙・天文観測をおこなう電波望遠鏡技術を応用することによって、この質量領域を開拓する。

暗黒光子は素粒子の標準理論からは予言されない粒子で、それを捉えた暁には未知の物理の存在が示唆される。今後の素粒子物理学に新たな方向付けを与える。また、暗黒光子が暗黒物質の一端を担っていることも同時に証明する。宇宙創生期に暗黒物質がどのように生まれたのか、という謎に大きく迫ることができる。

研究成果の概要（英文）：We searched for hidden-photon cold dark matter (HP-CDM) using radio telescopes. Diversion of the telescopes has an advantage in addition to the shortening of development time. We used a millimeter-wave spectrometer for sensing of the atmospheric water vapor, KUMODES. We set upper limits for the parameter of mixing between the photon and HP-CDM in the mass range around 0.1 meV , $\sim 2e-10$, at a 95% confidence level. We are submitting the result to JCAP. In parallel, we proceed to search for HP-CDM using a telescope developed for observation of CMB polarization, GroundBIRD. We did not finish it, but we confirmed that the telescope system works correctly. The search experiment is ready.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：宇宙素粒子 暗黒物質 暗黒光子

1. 研究開始当初の背景

宇宙・天文観測精度の向上により、宇宙を構成する物質の大半は暗黒物質が占めることが明らかになった。暗黒物質は銀河の重力の大部分を担っているが、重力以外の性質は全くの不明である。暗黒物質は宇宙の進化の歴史にも影響を与えており、その正体を明らかにすることは宇宙・素粒子物理双方の最重要課題である。巨大な装置を使って、WIMP と呼ばれる質量の大きな (水素原子と比較して数倍~数百倍程度) 暗黒物質の精力的な探索が行われているが、確固たる発見には至っていない。

近年、新たな暗黒物質候補として、従来の実験手法では計測できないほど軽い質量の「暗黒光子」 (dark photon もしくは hidden photon) に注目が集まっている [1-3]。暗黒光子の最大の特徴は、物質境界面において非常に稀な確率 (数億~数百億分の一程度) で、光 (光子) に転換することである。転換光子のエネルギーは暗黒光子の質量に相当し、転換光子を集光・測定することで、暗黒光子の性質を明らかにすることができる。

2. 研究の目的

既存の電波望遠鏡を応用して、ミリ波帯に相当する質量の暗黒光子を探索する実験手法を確立し、探索実験を行う。ミリ波帯は、素粒子実験業界にはあまり馴染みがなく、未開拓な領域である。申請者の培った素粒子実験のノウハウと CMB 観測実験の電波測定技術を組み合わせて、世界最高感度の探索を確立する。

暗黒光子からの転換には、平面鏡を用いる。平面鏡は製作が容易で、また転換光が平面波となり望遠鏡の集光システムがそのまま使えるため、相性がいい。さらに、望遠鏡に付随する駆動システムを用いることで、暗黒光子の信号に変調をかけることが可能となる。これらのアイデアを組み合わせ、短期間、低コストで世界最高感度の探索実験を実現する (図 1)。

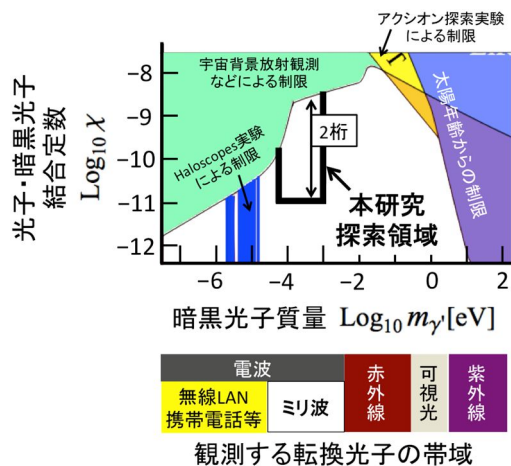


図 1. 暗黒光子に対する制限。横軸の質量は、転換光子の周波数帯域に対応している。

3. 研究の方法

研究方法は、二つの手法で行った。

(1) 気象観測装置 KUMODEs を用いた暗黒光子探索

ゲリラ豪雨の「予兆の予兆」を捉えることで約 1 時間前の予報が可能な革新的気象観測装置 KUMODEs のプロトタイプを検出器に用いた。本検出器は、空気中の水蒸気を高精度に捉えることで、積乱雲の発生を予報する。20GHz 帯の検出器を備えており、入射する放射エネルギーを周波数スペクトルとして捉えることができる。暗黒光子は、質量を決めると、観測されるスペクトル形状が決まる。質量を変えながら繰り返しフィットを行うことで、測定領域での探索が可能である。

観測の主なノイズ源は、検出器自身の熱雑音、および、周辺環境 (常温) 由来の熱雑音である。検出器を冷却し、また、屋外で検出器を空に向けて探索実験を行うことで、高感度測定を実現した。

(2) CMB 観測実験 GroundBIRD を用いた暗黒光子探索

超伝導検出器 MKID と高速回転スキャンを特徴とする観測装置 GroundBIRD を利用して、探索実験を行う。超伝導検出器は、KUMODEs より一桁低い温度まで冷却が可能で、高感度を実現できる。また、観測装置は 3 秒で一周する回転台の上に設置されており、それにより検出器に対する暗黒光子の到来方向を変調することが可能となる。スペクトル分解はできないものの、この高感度検出能力と信号変調により、KUMODEs を用いたものより、高感度な観測が期待できる。

4. 研究成果

- (1) KUMODeS による観測は、KEK にて行われた。晴れた夜に、約 12 時間をかけて、27.998~28.012GHz の範囲を繰り返し測定した。この周波数範囲は、暗黒光子の質量に換算すると、115.79~115.85 μeV に対応する。検出器の冷却や屋外測定により、バックグラウンドを放射温度換算で 130K にまで落とすことができた。
- (2) 暗黒光子探索実験では、発見以前は信号が検出されないため、暗黒光子由来の信号以外の方法での検出器の較正が必要不可欠である。大きなエラーの要因は、信号増幅器の増幅率の時間変動と、ホーンの電波特性である。増幅率の時間変動は、数時間おきに、常温と液体窒素温度の黒体放射源（黒体）を用いて較正を行い、較正と較正の間の変動を誤差として見積もった。後者のホーン特性の較正は、小さく切った黒体を離れた距離に設置し、その黒体からの強度の位置依存性からホーンの効率と角度分解能を算出した。
- (3) 測定スペクトルに、質量を変えた予想波形のフィットを繰り返し、それぞれの質量での暗黒光子由来の信号強度を算出した。図 2 に、算出された信号強度を載せる。上のグラフが信号強度で、0 を中心に推移していることが確認できる。真ん中のグラフがその統計誤差で、下のグラフが、信号強度が 0 から確率的に離れているかどうかを示す指標 (p 値) である。もっとも小さな p 値で 1.24×10^{-4} 程度であり、look elsewhere 効果を考慮した結果、有意な暗黒光子由来の信号は検出されなかった。
- (4) 今回算出された信号強度とそのエラーから、パラメータ上で許容される範囲の上限値を算出した(図 3)。この結果は、論文にまとめ、現在 JCAP に投稿中である[4]。
- (5) GroundBIRD は、2019 年末に国内開発を終え、観測地であるスペイン領・テネリフェ島に輸出された。その後、2020 年夏に、現地にて設置作業を行い、2020 年秋に試験運用を開始した(図 4)。
- (6) テスト用に設置した検出器にて、月からの信号を検出した。分速 20 回転という高速スキャン中でも、検出器を安定して運用し、望遠鏡の制御も含めて問題が無いことを確認した[5]。しかし、本観測用の検出器は、検出器自体のトラブルや読み出し用の増幅器の不具合などが重なり、測定には至らなかった。本研究は、今後も継続する予定である。

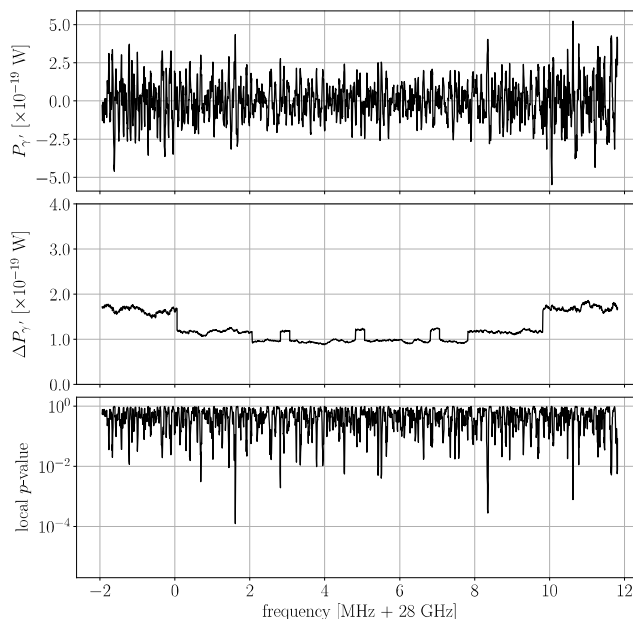


図 2. KUMODeS の測定結果から見積もられた暗黒光子の信号強度

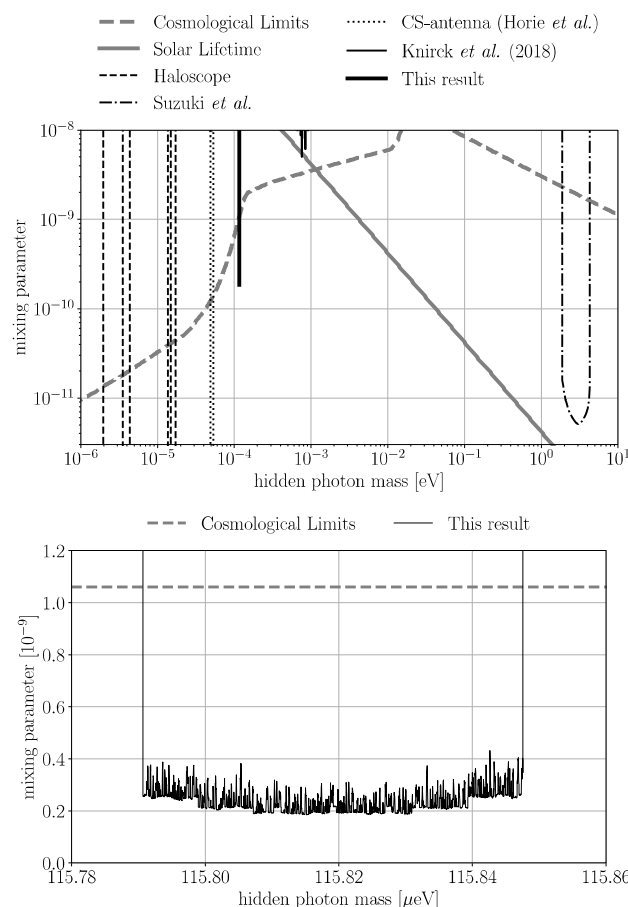


図 3. KUMODeS を用いた探索実験で得られた、光子・暗黒光子結合定数の上限値[4]

<引用文献>

[1] P. Arias, D. Cadamuro, M. Goodsell, J. Jaeckel, J. Redondo and A. Ringwald, WISPy cold dark matter, JCAP 06 (2012) 013, [arXiv:1201.5902].

[2] J. Jaeckel, A force beyond the Standard Model - Status of the quest for hidden photons, Frascati Phys. Ser. 56 (2012) 172-192, [arXiv:1303.1821].

[3] J. Jaeckel and A. Ringwald, A cavity experiment to search for hidden sector photons, Physics Letters B 659 (2008) 509 - 514, [arXiv:0707.2063].

[4] N. Tomita, S. Oguri, Y. Inoue, M. Minowa, T. Nagasaki, J. Suzuki, O. Tajima, Search for hidden-photon cold dark matter using a K-band cryogenic receiver, arXiv:2006.02828 (JCAP に投稿中)

[5] 小栗秀悟, 鈴木惇也, 本多俊介, CMB 偏光観測実験 GroundBIRD のファーストライト, 高エネルギーニュース, Vol.38 No.4 2020/01.02.03



図 4. テネリフェ島にて、GroundBIRD 望遠鏡設置の様子[5]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kutsuma Hiroki, Hattori Makoto, Kiuchi Kenji, Mima Satoru, Nagasaki Taketo, Oguri Shugo, Suzuki Junya, Tajima Osamu	4. 巻 193
2. 論文標題 Optimization of Geomagnetic Shielding for MKIDs Mounted on a Rotating Cryostat	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 203 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10909-018-2036-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagasaki T. et al.	4. 巻 193
2. 論文標題 GroundBIRD: Observation of CMB Polarization with a Rapid Scanning and MKIDs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1066 ~ 1074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-2077-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Choi J., Oguri S., 他	4. 巻 168
2. 論文標題 Status of the GroundBIRD Telescope	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01014 ~ 01014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201816801014	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. WATANABE, S. MIMA, S. OGURI, M. YOSHIDA et al.	4. 巻 E100-C
2. 論文標題 Development of an Optical Coupling with Ground-Side Absorption for Antenna- Coupled Kinetic Inductance Detectors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE TRANSACTIONS on Electronics	6. 最初と最後の頁 298-304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E100.C.298	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa	4. 巻 758
2. 論文標題 Observation of gamma ray bursts at ground level under the thunderclouds	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 286-291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2016.05.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shugo Oguri et al.	4. 巻 9906
2. 論文標題 GroundBIRD: observations of CMB polarization with fast scan modulation and MKIDs	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 9906, Ground-based and Airborne Telescopes VI	6. 最初と最後の頁 99063L
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2231672	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 超伝導検出器搭載の望遠鏡を用いた宇宙マイクロ波背景放射の精密観測
3. 学会等名 第6回RAPシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shugo Oguri
2. 発表標題 Search for hidden photon cold dark matter using radio telescopes
3. 学会等名 17th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 GroundBIRD望遠鏡の観測に向けた超伝導検出器MKIDのノイズ対策
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 電波観測装置を用いた暗黒光子探索
3. 学会等名 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ・第4回理研NICT合同テラヘルツワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 高速回転変調とMKIDによるCMB地上観測実験 "GroundBIRD"
3. 学会等名 第18回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ・第4回理研NICT合同テラヘルツワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shugo Oguri
2. 発表標題 GroundBIRD: observation of CMB polarization with fast scan modulation and MKIDs
3. 学会等名 SPIE - Ground-based and Airborne Telescopes VI (vol. 9906) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 GroundBIRD望遠鏡での焦点面構造体の開発
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 室温エレクトロニクス・安いKID読み出し装置
3. 学会等名 TIAかけはし・ブレインストーミング研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小栗秀悟
2. 発表標題 GroundBIRD望遠鏡での検出器読み出しの評価
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----