

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14486

研究課題名（和文）ミリ波分光器を用いた暗黒光子探索 前人未踏の質量領域を切り拓く

研究課題名（英文）Search for dark photon using a millimeter-wave spectrometer in the unexplored mass range

研究代表者

安達 俊介（Adachi, Shunsuke）

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：80835273

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：ダークマターは宇宙の大部分を構成しているが、その質量の大きさもわかっていない。本研究ではダークマターの正体解明のために、ミリ波分光器を用いた手法で「暗黒光子」と呼ばれる超軽量なダークマターを探索した。暗黒光子は微弱なミリ波に転換すると予言され、その周波数はダークマター1個の質量に1対1対応する。よって、広い周波数での探索が必要となる。本研究では、まず周波数が18-26.5GHzのミリ波を測定可能な分光器を開発して暗黒光子の探索をおこなった。暗黒光子の検出には至らなかったが、従来の宇宙観測による制限を超える感度で探索ができた。最終年度には10-18GHzにも探索範囲を広げることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒光子をミリ波帯域で広く探索した実験は今までになく、ミリ波分光器を用いた暗黒光子探索の手法の確立が本研究によっておこなえたといえる。また、暗黒光子の発見には至らなかったが、今回探索した10-26.5 GHzに対応する質量領域(0.04-0.11ミリ電子ボルト)では暗黒光子が存在している可能性が低いという知見が得られた。今後、本研究で確立した手法をもとに、より広い周波数帯域、すなわち質量領域での暗黒光子ダークマターを探索していきたい。

研究成果の概要（英文）：Dark matter occupies a quarter of the total energy in the universe. However, we don't know the mass. This research aims to detect dark matter using a millimeter-wave spectrometer to reveal its characteristics. In particular, our target is a "dark photon" which is predicted to convert to a millimeter-wave and the frequency corresponds to a mass of dark matter. Since the dark matter mass is unknown, the broadband search of the millimeter-wave signal is required.

We have developed a millimeter-wave spectrometer for the frequency range of 18--26.5 GHz and conducted a search for the signal from the dark photon. We have not found any sign of the dark photon, but we achieved exploring the dark photon with much higher sensitivity than the conventional constraints from the cosmic observations. In the final year, we also searched for the dark photon in the frequency range of 10-18 GHz with another developed spectrometer.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒光子 ダークマター ミリ波

1. 研究開始当初の背景

銀河ハローの回転速度や宇宙背景放射 (CMB)、重力レンズ効果などの宇宙観測によって、ダークマターの存在は揺るぎないものとなっている。一方で、重力と相互作用する以外のことは全くわかっていない。弱く相互作用をする比較的重いダークマター、「WIMP」を仮定して、核子との散乱を探索する直接探索や粒子加速器による直接生成が精力的におこなわれてきたが、未だ発見できていない。そこで、WIMP 以外のダークマター候補、「暗黒光子」が注目を集めている。暗黒光子は「軽く」かつ「重力場以外には電場としか反応しない」粒子である[1]。この粒子は High-scale Inflation model といった理論モデルによって予言されているが[2]、未探索な領域が 10^{-4} - 10^{-3} eV の質量領域に広大に存在していた。

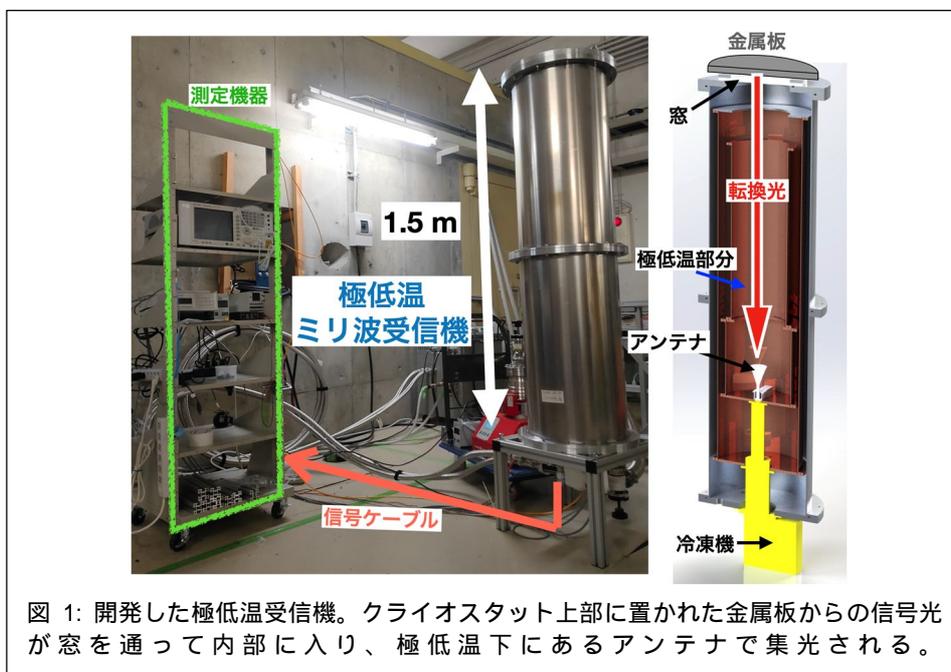
暗黒光子は、金属板の中で自由電子の作る電磁場と非常に弱く反応して、金属板とほぼ垂直に実光子 (転換光) を放出する[3]。その転換光は暗黒光子の質量に対応した周波数を持ち (質量 $\approx h\nu$, ν :周波数)、前人未踏の質量領域 (10^{-4} ~ 10^{-3} eV) はミリ波 (≈ 10 ~ 100 GHz) の波長帯に対応する。その暗黒光子を探索する手段として、金属板で変換されたミリ波を分光検出する方法が考案され実施された[4]。この実験では暗黒光子と実光子の結合定数 χ に $\chi < 1.54 \sim 3.9 \times 10^{-9}$ という世界一の制限を得られたが、極端に狭い質量領域 ($1.1579 \sim 1.1585$) $\times 10^{-4}$ eV [27.998 ~ 28.012 GHz] でしか探索できていなかった。そこで、暗黒光子の質量領域をより広くかつ深く探索できる実験手法の確立が求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ミリ波を分光検出する手法に基づいてダークマター候補となる暗黒光子を広い周波数帯域 (=広い質量領域) で探索し、暗黒光子の発見、しいてはダークマターの正体解明を目指すことである。

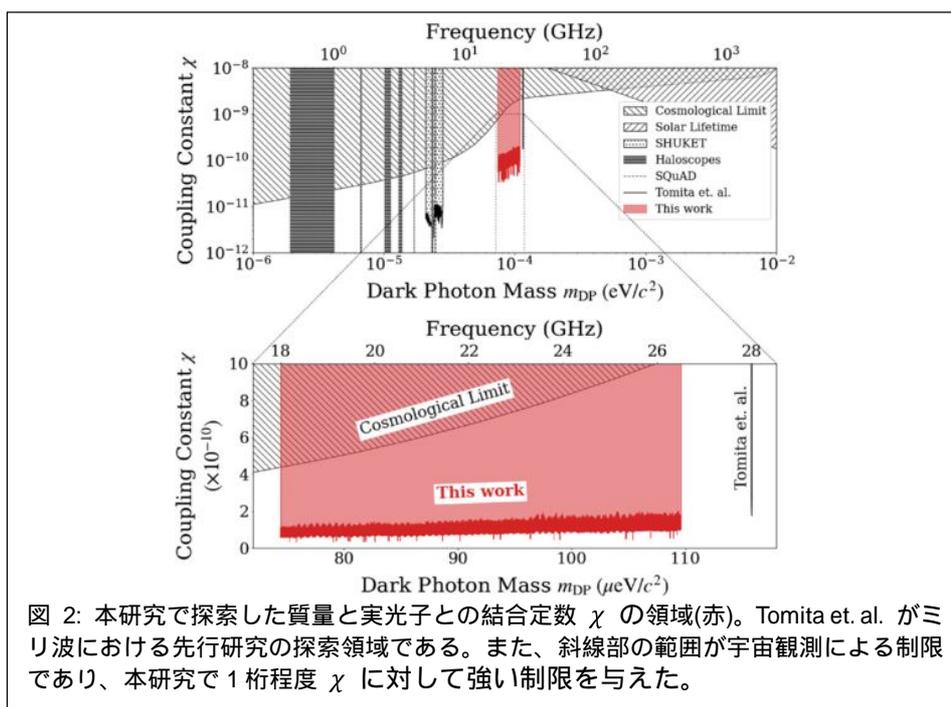
3. 研究の方法

金属板で転換された微弱なミリ波をホーンアンテナで集め、低ノイズアンプで増幅し、スペクトルアナライザで高速フーリエ変換(FFT)によって分光測定した。暗黒光子から生じる転換光は周波数が暗黒光子の質量に対応し、かつ細い周波数幅 ($\Delta\nu / \nu \approx 10^{-6}$) を持つことが予言されている。よって、FFT によって高い周波数分解能で測定された周波数スペクトルの中から細いピークを探すことで、暗黒光子探索をおこなうことができる。一方で、予想される信号ピークは非常に小さく、ノイズに埋もれてしまいやすい。先行研究[4]では、ホーンアンテナに入ってくる室温(300 K)の熱放射ノイズが主なノイズとなっており、それによって微弱な信号を捉えるのを難しくしていた。本研究では、ホーンアンテナまで含むセットアップを 3 K に冷える極低温クライオスタット内に設置して、金属板以外の方向から入ってくる熱放射ノイズを可能な限り抑制する受信機を開発した (図 1)。この受信機を用いて 18 ~ 26.5 GHz の広い周波数帯域を約 10 日間かけて測定した。



4. 研究成果

開発した受信機では従来よりも熱放射ノイズが半分以下に抑制できた。このおかげで、先行実験と同じ感度を維持しつつより短時間で測定することが可能になり、より広い周波数帯域をスキャンすることができた（周波数帯域は先行実験の約 600 倍!）。得られた周波数スペクトルを詳細に解析し、暗黒光子由来の信号ピークがないかを探した。残念ながら統計的に有意なピークを発見することはできず、暗黒光子の発見には至らなかった。一方で、10~26.5 GHz の広い範囲で $\chi < 0.3 \sim 2.0 \times 10^{-10}$ という世界一の制限を与えることができた（図 2）。これは既存の宇宙観測による制限よりも一桁程度強い制限である。また、この探索を通して信号ピークが有意に存在するかどうかを評価する統計的手法も確立することができた。



上記の最初の受信機の開発と探索によって、ミリ波分光器を用いた手法での広い周波数帯を

探索する手法が確立したといえる。これをさらに広げるべく、10~18 GHz も探索できる受信機を開発し、探索をおこなった。こちらは測定を終えたところであり、現在鋭意解析中である。到達予定感度としては、初探索と同じく $\chi \sim 10^{-10}$ までを探索できる予定である。

本研究で確立した暗黒光子探索手法によって、100 GHz までの広大な周波数帯域を探索する見通しがたつた。具体的手法としては、図1の受信機内部の各パーツの対応周波数を適宜変えていくことで段階的に測定帯域を変更して周波数をスキャンしていけば良い。一方で、100 GHz 以上では本受信機の原理のままでは探索が難しい。現在利用しているタイプの低ノイズアンプ (HEMT アンプ) は 100 GHz までしか低ノイズなアンプが存在せず、それ以上での周波数では著しくノイズが大きくなるからである。そこで、「SIS ミクサ」と呼ばれる超伝導デバイスを応用することを考えた。SIS ミクサは低ノイズを維持したまま 100 GHz を超える高周波信号を 10 GHz 程度の低周波信号に変換することができる素子である。これの後段に HEMT アンプを用いることで、低雑音を維持した測定が可能になる。本研究では、将来、SIS ミクサを暗黒光子探索に導入することを見据え、SIS ミクサを搭載したプロトタイプ受信機の開発にも取り組んだ。開発を終え、一通り SIS ミクサの動作確認はできており、今後詳細な受信機の性能評価、実際の暗黒光子探索測定の実施が期待される。

参考文献

- [1] P. Arias, D. Cadamuro, *et. al.*, JCAP 1206, 013 (2012)
- [2] P. W. Graham, J. Mardon, S. Rajendran, Phys. Rev. D 93, 103520 (2016)
- [3] D. Horns, J. Jaeckel, *et. al.*, JCAP 04, 016 (2013)
- [4] N. Tomita, S. Oguri, *et al.*, JCAP 09, 012 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Kotaka S., Adachi S., Fujinaka R., Honda S., Nakata H., Seino Y., Sueno Y., Sumida T., Suzuki J., Tajima O., Takeichi S., DOSUE-RR Collaboration | 4. 巻 130 |
| 2. 論文標題 Search for Dark Photon Dark Matter in the Mass Range 74--110 ueV with a Cryogenic Millimeter-Wave Receiver | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 71805 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.071805 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 安達俊介 |
| 2. 発表標題 ダークフォトン-CDM 探索実験 DOSUE-RR 200GHz 帯での測定に向けた受信機の開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022 年秋季大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shunsuke Adachi |
| 2. 発表標題 Dark matter hunting with cutting-edge millimeter-wave technologies |
| 3. 学会等名 QUP workshop: toward Project Q (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shunsuke Adachi |
| 2. 発表標題 DOSUE-RR - Dark-photon dark-matter search at Kyoto |
| 3. 学会等名 Kashiwa Dark Matter Symposium 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shunsuke Adachi |
| 2. 発表標題 First results of DOSUE-RR experiment - the most stringent constraint for dark photon CDM at the mass range of 74 - 110 μeV |
| 3. 学会等名 International Conference on High Energy Physics (ICHEP) 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安達俊介 |
| 2. 発表標題 広帯域なダークフォトン探索実験、DOSUE-RR の現状と予定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 安達俊介 |
| 2. 発表標題 超軽量ダークマター探索実験 DOSUE-RR/K-band における初測定 |
| 3. 学会等名 第 22 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shumpei Kotaka |
| 2. 発表標題 Dark-photon Observation System for Unexplored Radio Range - DOSUE-RR |
| 3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Toshi Sumida |
| 2. 発表標題 DOSUE-RR - experiment to explore ultra-light CDM in the millimeter-wave range |
| 3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 安達俊介 |
| 2. 発表標題 ダークフォトン CDM 探索実験 DOSUE-RR/K-band 75--110 $\mu\text{eV}/c^2$ における初期探索 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第 77 回年次大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小高駿平 |
| 2. 発表標題 ミリ波領域におけるダークフォトン探索実験 DOSUE-RR - 熱放射ノイズの評価 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第 76 回秋季大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小高駿平 |
| 2. 発表標題 ミリ波領域におけるダークフォトン探索 DOSUE-RR実験 熱放射ノイズの抑制研究 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第75回秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小高駿平 |
| 2. 発表標題 ミリ波領域におけるダークフォトン探索 DOSUE-RR実験 -実験装置の冷却試験と探索感度の評価- |
| 3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小高駿平 |
| 2. 発表標題 Search for Dark Photons in millimeter-wave range Simulation study to minimize thermal radiation noise |
| 3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小高駿平 |
| 2. 発表標題 Search for Dark Photons in millimeter-wave range Simulation study to minimize thermal radiation noise |
| 3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 安達俊介 |
| 2. 発表標題 ミリ波帯域でのダークフォトン探索 DOSUE-RR 実験 |
| 3. 学会等名 ダークマターの懇談会2020 |
| 4. 発表年 2020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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|