

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18621

研究課題名（和文）暗黒物質Axion探索を目指した、アクシオン類似粒子・暗黒光子の探索

研究課題名（英文）Searches for dark-matter axion-like particles and dark-photons, aiming to search for axion

研究代表者

岸本 康宏（Kishimoto, Yasuhiro）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授

研究者番号：30374911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超弦理論などで予言され、質量は非常に軽いと考えられている暗黒光子、アクシオン類似粒子を対象に研究を実施した。後者は強磁場の存在下でマイクロ波光子に転換し、前者は磁場を必要としない。予想されるマイクロ波信号は非常に微弱であるため、本研究は、1)室温下での暗黒光子探索、2)極低温下での高感度暗黒光子探索、3)極低温、強磁場環境下でのアクシオン類似粒子の探索と、3段階で研究を推進した。現在、これらデータの解析中であり、データ取得系が非常に安定で、長時間測定による感度上昇の有効性が確認されるなど、4)将来の暗黒物質アクシオン探索の基礎を構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は、宇宙の重力源の大部分を占める正体不明の素粒子であり、その解決は、現代物理学、宇宙物理学の最大の課題の1つである。数多くの暗黒物質候補の中で、アクシオンは最有力候補の1つであるが、その探索には、複数の技術的困難がある。この状況下、本研究は、1)室温下での暗黒光子探索、2)極低温下での高感度暗黒光子探索、3)極低温、強磁場環境下でのアクシオン類似粒子の探索と、実験を三段階で進めることにより、各段階で技術的課題を解決し、同時に意味ある物理の探索を実施しながら、アクシオン探索という最終目標に向け、実験的な基礎を構築する事に成功した。すなわち、アクシオン探索実行の基礎を構築出来た。

研究成果の概要（英文）：This research is to search for dark photons and axion-like particles, which are predicted by string theory and are thought to have extremely low mass. The latter are converted into microwave photons in a strong magnetic field, the former, on the other side, does not require any magnetic field. Since the expected microwave signal is very weak, this research proceeded on three steps: 1) searches for dark photon at room temperature, 2) high-sensitivity ones for dark photon at extremely low temperatures, 3) one for axion-like particles under extremely low temperature and strong magnetic field environment. Currently, these data are being analyzed, and it is confirmed that the data acquisition system is well stable, and sensitivity is increased through long-term integration. Thus, this studies established a foundation for future dark matter axion searches.

研究分野：宇宙素粒子物理学実験

キーワード：暗黒物質 アクシオン 暗黒光子 マイクロ波 極低温 強磁場

1. 研究開始当初の背景

この宇宙には、暗黒物質と呼ばれる正体不明の物質が存在する。その量は、我々の周囲にある「通常物質」の約5倍もの量である。この暗黒物質は、様々な研究成果から、未知の素粒子と考えられており、従って、天文学、宇宙物理学、素粒子物理学の最重要課題の1つである。

この暗黒物質の有力な候補は、弱く相互作用する重粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMPs)とアクシオンである。本研究は、WIMPsに比べ、その探索が遅れているアクシオンに対して、実験的に探索を開始するための研究である。

アクシオンは強磁場中で光子に転換する性質があり、また暗黒物質アクシオン質量は非常に軽く、マイクロ波のエネルギーに対応すると考えられている。しかし、そのマイクロ波信号の強度は極めて弱いため、1) 極めて強い磁場空間内に、2) 信号を増幅するためのマイクロ波共振空洞を用意し、3) それを極低温に冷却して、光子雑音を抑制した上で、4) 極低ノイズのアンプで検波する必要がある。このように、暗黒物質アクシオン探索では、主に4つの技術的ハードルが存在し、それらを1つ1つ解決して、実験を遂行する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、暗黒物質アクシオン探索を遂行するに当たって乗り越えるべき4つのハードル(上述)を1つ1つ解決すること、しかもその解決に当たっては、物理として意味のある対象を探索しつつ、技術的困難を解決に至らしめることが目標である。従って、本研究では、第一に、常温・無磁場という条件下で、暗黒物質暗黒光子の探索を遂行する。次に、マイクロ波空洞を極低温下に冷却し、雑音光子の削減と低ノイズアンプの利用によって、暗黒光子探索実験の探索感度を向上する。そして、最終段階では、強い磁場を印加し、アクシオン探索に必要な要素を全て盛り込んだ形で実験を行い、アクシオンには感度が及ばないものの、アクシオン類似粒子の探索を進める。この3ステップによって、将来の高感度なアクシオン探索の準備を整えることが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

前節に示した様に、本研究は3つの段階の実験を行う。第一段階は暗黒光子の探索である。暗黒光子は、超弦理論など、標準理論を内包する理論で広く予言される素粒子であると同時に、暗黒物質の候補でもある。暗黒光子とアクシオンを比較すると、暗黒光子では磁場を必要としない点が、実験装置上の大きな違いとなる。この探索は、常温・無磁場という環境下での実験であるため、マイクロ波関連技術、特にマイクロ波共振空洞への技術的アプローチのみに集中する。必要な要素は、周波数変調機能を有するマイクロ波空洞の技術開発と校正を含めたマイクロ波測定系の構築であり、構築後、暗黒光子探索を実施し、データを解析する。第二段階では、マイクロ波空洞、マイクロ波の前段アンプなどを極低温下に移設する。ここでは、クライオスタット内の低温環境という条件をクリアする点が重要であり、コンパクトで熱流入を抑制した実験系の構築が求められる。最終の第三段階では、磁場の印加である。マイクロ波関連部品には、フェライトやマイクロ波スイッチなど磁性を利用した機器があり、そういった要素の使用を避け、必要な場合には、消磁などの対策を行う必要がある。これらを達成した後、磁場を印加して実験を遂行する。磁場を印加した場合、アクシオン類似粒子と呼ばれる暗黒物質の探索が可能となる。アクシオン類似粒子は、暗黒光子同様、超弦理論などで予言されており、その性質は、その名の通り、アクシオンと非常に似通っている。暗黒光子もアクシオン類似粒子も、いずれも非常に広いパラメータスペースが未探索のまま残されており、思わぬ大発見もあり得る。

4. 研究成果

第一段階の暗黒物質暗黒光子の実験のため、共振周波数5 GHz付近の空洞を、有限要素法のシミュレーションを用いて設計した。空洞は矩形とし、中心部に銅またはテフロン製の球を用いて周波数を変調する設計であり、空洞と測定系との接続は、導波管同軸変換器の窓の大きさを変更する、インダクタンス結合のアンテナを採用した(図1)。マイクロ波測定系は、低雑音HEMTアンプで構成した。アンプの利得安定性が測定感度を決定づける要素であるため、GANダイオードによる熱雑音源と可変アッテネータを用いて、アン

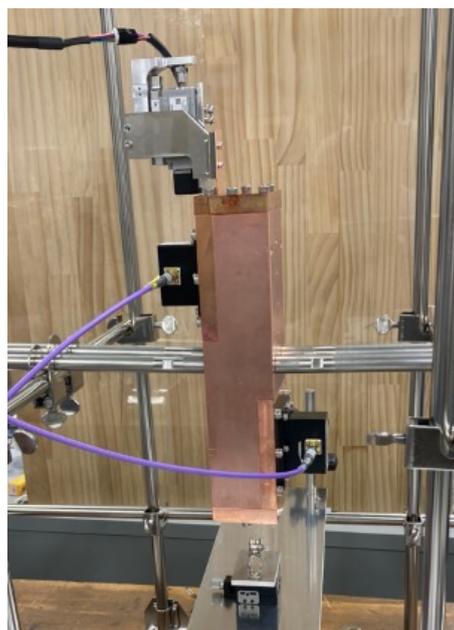


図1: 第一段階(常温)の、暗黒光子測定装置(空洞周辺部)

プの利得校正系を構築した。この校正されたパワーと、共振空洞のパワーを交互に頻りに測定する (Dicke Switch) ことによって、利得安定性を保障し、長時間の積分によって、雑音を抑制し、高感度化が可能となる。2022年11月に、この系を用いて、暗黒物質暗黒光子の探索を開始し、2023年1月までに、4.9 GHz 周辺 16MHz の探索を行った。(図2)。

この後、2023年秋まで、共振空洞の再設計を行い、測定系をクライオスタット中に移設する改造を施し、2023年12月に極低温下での試験測定を行った。この測定で、校正系が正常に動作すること、また、アンプの電気的特性 (利得など) が安定であること、冷却系が目標温度で安定であること等を確認された。これらの結果を受け、2024年1月に、マイクロ波共振器を導入した系(図3)に、磁場を装置の定格である9Tまで励磁して実験を行った。この時の測定系のダイアグラムを図4に示す。この測定によって、非常に狭い範囲であるが、アクシオン類似粒子の探索のデータを取得した。この時の測定では、マイクロ波スイッチの1つが、当初の想定よりも磁場の影響が大きいため稼働しないことが判明し、アンプの利得校正の精度に限界が生じている。このスイッチの原理は、コイルに電流を流し、磁気によってスイッチの状態を変更するものであるが、このスイッチを、外部からの機械的な動作でスイッチ状態を変更するタイプに変更した。この変更によって、コイルからの発熱も抑制することができ、観測の安定度が高まるものと期待している。現在、この改良した実験系による測定を準備している最中である。

このように、本研究では、常温・無磁場での暗黒物質暗黒光子の測定から、極低温・強磁場(9T)のアクシオン類似粒子の探索までを実行した。その上で、極低温・強磁場環境下での測定の経験を元に、より本格的な実験遂行の準備を整えることができた。すなわち、本研究の当初の目的を全てクリアする研究成果を上げることができた。

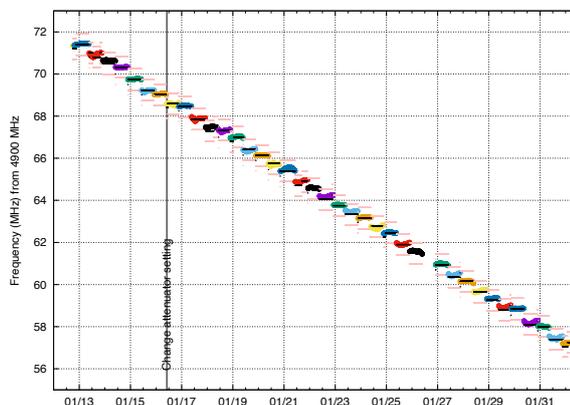


図 2 : 2022~23 年の暗黒光子探索 run での測定周波数の掃引の様子



図 3 : 冷凍機インサート部にマイクロ波共振空洞を導入した様子

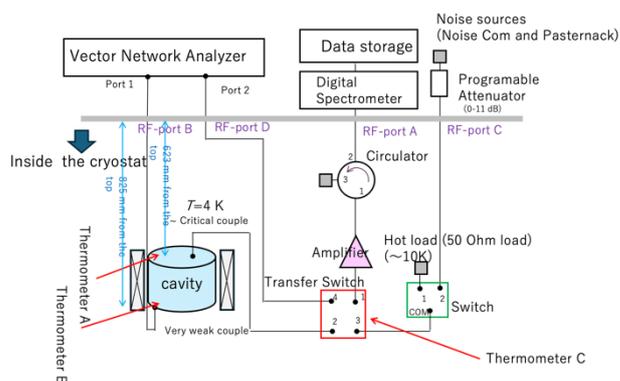


図 4 : 第三段階 (極低温・強磁場) での run (2024年1月) の測定系

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 Kishimoto Yasuhiro, Nakayama Kazunori	4. 巻 827
2. 論文標題 Electric current on surface of a metal/superconductor in axion/hidden-photon background	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136950 ~ 136950
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2022.136950	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9件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yasuhiro Kishimoto
2. 発表標題 Hidden Photon Search at Tohoku and Future
3. 学会等名 What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter - 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本 康宏
2. 発表標題 暗黒物質アクシオンを始めとする, Wave-like dark matter の実験的探索
3. 学会等名 ICEPPシンポジウム 2022（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本 康宏
2. 発表標題 素粒子物理学実験でのアクシオン探索
3. 学会等名 東北大学宇宙系談話会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本 康宏
2. 発表標題 共振空胴を用いた, 5GHz近傍における暗黒物質暗黒光子の探索実験(1)
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 渡辺昇希, 村松佳樹, 小川泉, 岸本康宏
2. 発表標題 アクシオン探索実験に向けての共振器較正システムの開発
3. 学会等名 2021年度 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村松佳樹, 小川泉, 岸本康宏, 渡辺昇希
2. 発表標題 Axion 探索実験に向けた低雑音マイクロ波増幅器の性能評価
3. 学会等名 2021年度 日本物理学会北陸支部 定例学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kishimoto
2. 発表標題 Wave-like Dark Matter
3. 学会等名 Unrevealing History of Universe and Matter Evolution with Underground Physics 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Kishimoto
2. 発表標題 Detection experiment of dark-matter-axion microwave emitted from superconductors
3. 学会等名 What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter - 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本康宏, 小川泉, 村松佳樹, 美馬寛, 黒澤俊介
2. 発表標題 暗黒物質アクシオン, 暗黒光子等の検出のための大型共振空洞の開発・研究 -高いIQ値の実現(その3)-
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	小川 泉 (Ogawa Izumi) (20294142)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	

	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
研究 協力者	マッジーマーサ ルイゼーアデル (Azzi Marthe Luise Adele)		
研究 協力者	服部 佳太 (Hattori Keita)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	村松 佳樹 (Yoshiki Muramatsu)		
研究協力者	中川 闘暉 (Nakagawa Toki)		
研究協力者	渡辺昇希 (Watanabe Shoki)		
研究協力者	時安 敦史 (Tokiyasu Atsushi)		
研究協力者	伊藤 慎太郎 (Shintaro Ito)		

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