

令和元年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14269

研究課題名(和文)磁気モーメントを持つWarm Dark Matterの探索

研究課題名(英文) Probing warm dark matter with a magnetic moment

研究代表者

稲田 聡明 (Inada, Toshiaki)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：20779269

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)：本実験の主な要素はファラデー回転を検出するための光学系と磁場発生系である。光学系については、測定が数ヶ月にわたるため共振器の長期安定性が重要であり、本研究期間にその擾乱耐性が大幅に向上した。電磁石については磁場強度が大きいほどより微小な磁気モーメント並びにより大きな質量に対し感度が向上する。そのため磁場領域は小さいものの瞬間的に20T程度の強磁場を発生可能なソレノイド型パルス電磁石を開発し、その性能評価を行った。さらに窒素ガスを用いた感度の較正を行い、期待通りの性能を確認した。これらにより、パイロット測定を開始するのに十分な環境を整えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は全宇宙のエネルギー密度の27%を占め、銀河の回転速度、宇宙の大規模構造、宇宙背景輻射スペクトル、重力レンズ効果等の観測からその存在は揺るぎないものとなっている。しかし暗黒物質の質量や種々の量子数といった基本的な性質に加え、重力相互作用以外の、標準理論で記述される粒子との具体的な結合については明らかでない。精密光学系を駆使することで電磁場との結合を持つ軽質量の暗黒物質を探索可能であり、宇宙の進化や時空の構造に対する新たな知見となる。

研究成果の概要(英文)：The main components of this experiments are the optics used to detect the small Faraday rotation signal from dark matter and a magnetic-field generation system. The long-term stability of the optical cavity is very important and the resistance to external disturbance has significantly been improved during this research period. Since the sensitivity to magnetic moments and dark matter mass is enhanced by using a strong magnetic field, a prototype magnet producing a peak field of about 20 T was developed. The calibration run using nitrogen gas showed the expected sensitivity and a pilot search has been made ready.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子実験 暗黒物質

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 暗黒物質は全宇宙のエネルギー密度の 27% を占め、銀河の回転速度、宇宙の大規模構造、宇宙背景放射スペクトル、重力レンズ効果等の観測からその存在は揺るぎないものとなっている。
- (2) しかし暗黒物質の質量や種々の量子数といった基本的な性質に加え、暗黒物質が複数の素粒子からなる複合粒子である可能性や複数の暗黒物質が存在する可能性については未だ解明されていない。
- (3) また暗黒物質の存在は天体物理学における重力相互作用の観測によって説明される一方で、標準理論で記述される粒子との具体的な結合については明らかでない。
- (4) 現在、非加速器的に探索されている暗黒物質の候補は主に 2 種類ある。まず質量 100 GeV 程度の WIMP (weakly interacting massive particles) により原子核が反跳される事象を検出する実験では、最も軽い超対称性粒子であるニュートラリーノがその候補として有力視されている。
- (5) また宇宙初期に非熱的に生成されたと考えられているアクシオンは、質量が 10 eV -10 eV と軽い粒子であり、磁場中にマイクロ波を印加することでアクシオンが二つの光子と結合する事象(プリマコフ効果)が探索されている。これらの粒子は非相対論的な速度で運動する CDM (cold dark matter) の候補である。
- (6) CDM モデルは波数 10 h/Mpc 以下の宇宙の大規模構造をよく説明できる一方で、より小さなスケールでは矮小銀河を作り過ぎてしまうという問題(小スケール問題)があり、これを解決するために CDM より軽い質量を持つ WDM (warm dark matter) が提唱されている。
- (7) 暗黒物質の候補として最も有力視されている WIMP を検出する地下実験において、未だ有意な信号が観測されておらず、また LHC 実験でも超対称性粒子の兆候が得られていない。そのため暗黒物質の質量や結合に対し様々なシナリオを想定した探索が重要となっている。

### 2. 研究の目的

本研究ではそのようなシナリオの一例として、磁気モーメントを介して電磁相互作用を行う WDM を探索する。中性子をはじめとして、複合粒子に対しては一般に粒子自体は電氣的に中性であっても磁気モーメントはゼロでない。磁気モーメントを持つ暗黒物質の探索は、質量 100 GeV 程度の CDM に対してはスピン依存性のある原子核反跳を検出する実験により  $\mu < 1.4 \times 10^{-4} \mu_N$  ( $\mu_N$ : 核磁子) という制限が得られている(DAMA 実験、PLB 2000)。しかし質量の軽い WDM に対しては原子核への運動量移行が小さくなるため同様の手法では検出できない。磁気モーメントを持つ WDM の探索は NMR を利用した実験と、光学的なファラデー回転を検出する実験の二つが考えられている。後者は S. Gardner, PRD 79, 055007 (2009) において提案されており、本研究はこれに基づく。

- (1) 提案以降この手法による実験は未だ実現されていないため、実験的な立場からの本手法の原理確認を一つ目の目的とした。
- (2) また実際に実験を遂行する際にその基礎となる、オプティクスや磁場発生装置等の要素技術の開発および確立を二つ目の目的とした。

### 3. 研究の方法

- (1) 実験要素は磁場を発生する電磁石、電磁石に電流を供給する電源、真空容器、ならびにファラデー回転を検出するための光学系からなり、2.4m x 1.2m の光学定盤 1 台の上で行うテーブルトップサイズの実験である。
- (2) 太陽系に存在する暗黒物質の磁気モーメントは等方的な空間分布であると考えられるが、真空中で磁場 B を印加することにより磁場と反平行な磁気モーメント成分はポテンシャルエネルギーが  $\mu B$  だけ上がる。これにより地球に対する暗黒物質の運動エネルギーが  $\mu B$  より小さい場合、磁場と反平行な成分は磁場を印加した領域へ侵入することができない。結果として磁場領域に磁場方向のマクロな磁気モーメントが出現する。この原理は超冷中性子を偏極させる Stern-Gerlach 型スピンフィルタとして実用化されている。
- (3) 偏光した光が磁化を持つ媒質を透過する際、偏光面の回転(ファラデー回転)が生じる。本研究は暗黒物質を偏極させ、微弱なファラデー回転を検出する実験である。光学系自体は物性測定で通常行われるファラデー実験と同様であり、偏光子と光共振器で構成される。偏光の回転は直交配置した二つの偏光子で検出され、微弱な偏光回転を蓄積するためにファブリペロー共振器を構成してレーザー光を往復させる。
- (4) 磁場を印加しない場合と比較して、磁場印加時に後段の偏光子の透過光強度が有意に増加すればファラデー回転の検出となる。また検出された回転量から暗黒物質の磁気モーメントの大きさを推定することが可能である。
- (5) 検出感度や探索される暗黒物質の質量は磁場の強さや磁場領域の長さ、光学系の性能に依存する。本研究期間ではまず原理検証のために小型電磁石と高フィネス光共振器を用いた測定システムを構築し、キャリアレーションガスとして窒素を充填して感度の較正を行った。

#### 4. 研究成果

- (1) 本研究では磁場発生システムと精密光共振器を長期間にわたり安定して運転する必要がある。その際、高フィネス共振を維持する技術が本質的に重要である。当初の計画通りこの光学系の安定性に関わる調査が大幅に進展した。
- (2) 電磁石については磁場強度が大きいほどより微小な磁気モーメント並びにより大きな質量に対し感度が向上する。そのため原理検証の段階では磁場領域は小さいものの瞬間的に強磁場を発生可能なソレノイド型パルス電磁石を開発した。またその性能評価を行い、室温で20T、液体窒素冷却時(77K)では23Tのピーク磁場を繰り返し発生可能であることを確認した。
- (3) ANSYS を用いた有限要素シミュレーションを行い、原理検証用並びに本測定用の電磁石の発生磁場・許容応力・発熱を定量的に評価可能な設計環境を構築した。
- (4) 観測されるファラデー回転は印可磁場に比例するため、正負逆向きの磁場を印可することにより、磁場に比例しない擬信号成分を抑制可能である。さらにパルス磁場により信号に強度変調を与えることで、光学系で生じる微小なファラデー回転をDC成分として除去可能である。これら独創的な測定手法の考案並びに実証を行なった。
- (5) 正負逆向きの繰り返し磁場を高速で発生すべく、これまでのバンク充電動作を改良し、さらにトリガー部FPGA及びバンク制御用PLCの動作シーケンスを改良した。これにより任意の磁場比率で正負磁場が発生可能となった。
- (6) これまで充電開始時において、高電圧リレーの動作タイミングで生じるサージが精密共振器の擾乱となっていたが、昇圧トランス後の高電圧リレーで充電制御を行う方式を改め、ゼロクロス機能を持つ高速SSRを用いて低電圧側で制御する方式へと改良し、サージを除去することが可能となった。
- (7) 磁場システムと精密光学系を組み合わせることで構築された原理検証用測定環境において、窒素ガスを用いた感度の較正を行い、期待通りの性能を確認した。
- (8) 上記によりパイロット測定を開始するのに十分な環境を整えた。
- (9) またこれと並行して本測定用の電磁石並びに共振器の設計を行い、更なる感度の向上が期待できることがわかった。
- (10) これら開発の現状を国内外の学会で発表し、また将来計画を論文にまとめて出版した。さらに光を用いた我々の実験の現状をまとめ、review論文として出版した。
- (11) 暗黒物質に対する幅広い可能性を実験的に調査するため、同種の性質(電氣的に中性で質量が軽く、テーブルトップ実験で探索可能)を持つ暗黒物質HPDM(hidden photon dark matter)に対しても同様の探索を行なった。

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計5件)

- (1) R. Battesti, J. Beard, S. Boser, N. Bruyant, D. Budker, S. A. Crooker, E. J. Daw, V. V. Flambaum, T. Inada, I. G. Irastorza, F. Karbstein, D. L. Kim, M. G. Kozlov, Z. Melhem, A. Phipps, P. Pugno, G. Rikken, C. Rizzo, M. Schott, Y. K. Semertzidis, H. H. J. ten Kate, G. Zavattini: High magnetic fields for fundamental physics, *Physics Reports* 765-766, 1 (2018), 査読有, DOI: 10.1016/j.physrep.2018.07.005
- (2) S. Knirck, T. Yamazaki, Y. Okesaku, S. Asai, T. Idehara, T. Inada: First results from a hidden photon dark matter search in the meV sector using a plane-parabolic mirror system, *JCAP* 11, 031 (2018), 査読有, DOI: 10.1088/1475-7516/2018/11/031
- (3) X. Fan, S. Kamioka, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, A. Matsuo, K. Kawaguchi, K. Kindo, H. Nojiri: The OVAL experiment: A new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high repetition pulsed magnets, *Eur. Phys. J. D71*, 308 (2017), 査読有, DOI: 10.1140/epjd/e2017-80290-7
- (4) T. Inada, T. Yamazaki, T. Yamaji, Y. Seino, X. Fan, S. Kamioka, T. Namba, S. Asai: Probing Physics in Vacuum using an X-ray Free-Electron Laser, a High-Power Laser, and a High Field Magnet, *Applied Science* 7, 671 (2017), 査読有, DOI: 10.3390/app7070671
- (5) T. Inada, T. Yamazaki, K. Kindo: Test of Vacuum Anisotropy under High Magnetic Fields: Vacuum Magnetic Birefringence Experiment, *ISSP Activity Report 2017*, Joint Research Highlights (2017), 査読無, <http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/docs/ar2017.pdf>

##### [学会発表](計9件)

- (1) 上岡修星, 成田佳奈香, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之, OVAL 実験: パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探

- 索、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14 日、九州大学
- (2) 成田佳奈香, 上岡修星, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之、OVAL 実験の感度の向上を目指した新型パルス磁石の考察、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14 日、九州大学
  - (3) S. Knirck, T. Inada, T. Yamazaki, Far-Infrared Technologies in Axion and Hidden Photon Astroparticle Physics, Fukui university 2019/03/05, International Workshop on Far-Infrared Technologies 2019
  - (4) 上岡修星, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之、パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 17 日、信州大学
  - (5) T. Inada: Light-by-light scattering at SACLA/SPring-8, Probing strong-field QED in electron-photon interactions, DESY, Germany (2018/08/23)
  - (6) 上岡修星, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之、パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 25 日、東京理科大学
  - (7) 上岡修星, 稲田聡明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 吉岡孝高, 五神真, 松尾晶, 金道浩一, 野尻浩之、パルス磁石と高フィネス共振器を用いた真空複屈折の探索、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 15 日、宇都宮大学
  - (8) T. Inada: LSW experiments with pulsed magnets + Vacuum Magnetic Birefringence (VMB), Workshop on High Magnetic Fields for Fundamental Physics (HIMAFUN), University of Toulouse III, France (2017/5/30)
  - (9) S. Kamioka, X. Fan, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, J. Omachi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, A. Matsuo, K. Kindo, H. Nojiri, Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnets, Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (LNPC '17), 2017/4/21, Pacifico Yokohama

〔その他〕

PDG 掲載 2 件

- (1) Invisible Axion Limits from Photon Coupling, Axions and Other Very Light Bosons, Particle Data Group 2018, p. 23 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001
- (2) Hidden Photons, Kinetic Mixing Parameter Limits, Axions and Other Very Light Bosons, Particle Data Group 2018, p. 35 (2018), DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001

研究に関するホームページ

- (1) [https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop\\_experiments/](https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/Tabletop_experiments/)

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。