

令和 4 年 4 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01921

研究課題名(和文) 気体の磁気特性に対する基礎研究とその応用

研究課題名(英文) Basic study of gaseous magnetism and its application

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・特任助教

研究者番号：20779269

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：光学系については、Nd:YAGレーザーからの1064nm光に対し超高反射ミラーを用いてフィネス50万のFabry-Perot共振器を構成した。また共振器長変動に対して厳しい共鳴条件(FWHM=3pm)を満たすようレーザー周波数をフィードバックする制御系を構築した。磁場系についてはピーク磁場10T、長さ20cmの横磁場を発生可能なレーストラック型パルス磁石を用い、ショットサイクル20sで自動データ取得可能な測定系を構築した。測定帯域としては、磁場のパルス幅約1msに対応する50-500Hz帯のノイズ低減が重要であり、共振器ミラーのSiO₂/Ta₂O₅多層膜で生じる固有複屈折ノイズを調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精密光学の光技術と強磁場技術を融合した新たな微小磁気計測手法の開発は、ガスが低温下で示す、磁気応答の増加に対する機構解明、またこれを応用した新しい磁気光学デバイスの開発基盤として極めて重要である。さらにマクロスケールでの非線形QED過程の検証により真空の磁気光学効果として観測されれば、いわば「真空の磁化」の発見となる。

研究成果の概要(英文)：We made an optical system composed of a high-finesse Fabry-Perot cavity (F~500,000) for 1064 nm Nd:YAG laser and feedback electronics developed to stabilize the cavity resonance frequency against the relatively tight cavity length condition (FWHM=3pm). The racetrack magnet system was newly designed to accommodate the lateral peak field of 10T over the length of 20cm and incorporated to fully automated data-acquisition/magnet-control system with a shot cycle of 20s. Since noise reduction in the 50-500Hz band, which corresponds to the inverse of magnetic-field pulse width of 1ms, is critical, birefringence that intrinsically resides in a SiO₂/Ta₂O₅ dielectric multi-layers in the cavity mirror surface was studied throughout.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：磁気光学効果 パルス強磁場 真空非線形QED

1. 研究開始当初の背景

物質に磁場を印加して光を入射すると磁気光学効果が生じる。光の進行方向に対して垂直な磁場(横磁場)を印加する場合、縦横の屈折率に微小な差が生じる(磁氣的「複屈折」)。また光の進行方向と平行な磁場(縦磁場)により生じる磁気応答は「ファラデー効果」として知られている。複屈折が入射した直線偏光を楕円偏光に変換するのに対し、ファラデー効果は左右の円偏光に位相差を発生させ、直線偏光を保ったまま偏光面を回転させる。

現在、基本的な光学素子として重要な光アイソレータ等の磁気光学素子にはガーネットが用いられている。これらは損傷閾値により入射パワーを制限するため、非線形光学や重力波干渉計等のいわゆる「高出力レーザーのフロンティア」において問題となる。また実社会においても、レーザー加工機の普及や光通信における情報量の増大に伴い、レーザー光源の高出力化が今後ますます進んでいく。

これに対し、ガスを用いた磁気光学素子には事実上損傷閾値が存在しない。また結晶と比べはるかに波長帯域も広いことから、新たな偏光制御素子となる可能性を秘めている。さらに圧力を 10^5Pa から 10^6Pa ($\sim 1\text{atm}$) と変えることで得られるダイナミックレンジは実に 10 桁におよび、磁場の可動域(地磁気 $\sim 100\mu\text{T}$ から永久磁石 $\sim 1\text{T}$ の約 4 桁)をはるかにしのぐ。

しかしガスは常圧において一般の結晶よりも磁気光学効果が 3~4 桁程小さく、その測定には高感度な計測システムが必要となる。これまで主に常圧・常温付近においてその波長依存性のみが調べられてきたが、低温ほど分子の熱運動が抑えられるため磁気応答が相対的に増加する。

また超精密実験では、低温・高真空状態でのチェンバー内残留ガスによる磁気応答が測定の background となる。さらにガスの磁気応答が消える超高真空状態においてもなお、真空の非線形 QED 過程により磁気光学効果が生じると期待されている。既にこのボックスダイアグラムによる複屈折の大きさは 10^{-24}T^2 と計算されており、人類が考えうる最も小さな磁気応答であるが未だ観測されていない。

2. 研究の目的

精密光学における光技術と我々が開発した強磁場技術を組み合わせて、微小磁気応答を高感度に測定するのに最適な測定系を構築する。これを駆使して上記の課題を達成するための基礎研究および応用展開を行う。

- (1) 精密光学の光技術と強磁場技術を融合した新たな微小磁気計測手法の誕生。
- (2) ガスが低温下で示す、磁気応答の増加に対する機構解明。またこれを応用した新しい磁気光学デバイスの開発。
- (3) マクロスケールでの非線形 QED 過程の初めての検証。これが真空の磁気光学効果として観測されれば、いわば「真空の磁化」の発見となる。

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、 $2.4\text{m}\times 1.2\text{m}$ 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) 構築する超高感度計測システムは、自らの光学系に存在する微小な固有複屈折(非磁場の状態で存在するため観測上は static なノイズとなる)すらも容易に検出してしまうため、印加する磁場の強度を時間的に変化させる(変調する)ことで、これら DC 成分とシグナルを切り分ける必要がある。そのため、どのように磁場変調を実現するかが重要なポイントとなる。先行研究(Della Valle et al. Chem. Phys. Lett. 2014)では 2.5T の永久磁石ダイポールを約 10Hz で回転させることで横磁場を変調している。しかしこの手法では回転で生じる機械的な振動が精密な光学系の擾乱となり感度が伸びない。そこで我々は永久磁石を回転させるのではなく、電磁石を用いてそのカレントを時間的に変化させることで磁場変調を生み出す。さらにカレントは交流ではなく、約 1ms のパルス時間の間だけ大電流を流すことで電磁石内部でのジュール発熱を抑えると同時に 10T もの磁場発生が可能である。複屈折およびファラデー回転はそれぞれ印加磁場の 2 乗および 1 乗に比例するため、この強磁場により飛躍的に感度が向上する。
- (3) さらに、信号の統計量を稼ぐためにパルス磁場を高い繰り返し速度で発生させる技術も開発済みである。独自開発した冷却効率の良い電磁石と高速充電可能なバンクを用いて 10T、0.8m の横磁場を 0.2Hz の繰り返しレートで発生可能である。
- (4) 検出感度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、キャリアブ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シグナルに対する感度が向上する。そのため真空下にあるビームパイプ以外の不要な磁場発生ボリュームを削減することで高効率に強磁場を発生可能な新デザインのパルス電磁石を開発した。またその性能評価を行い、液体窒素冷却時(77K)において、14T のピーク磁場を 0.1Hz 程度で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及び複屈折はそれぞれ印可磁場の 1 乗及び 2 乗に比例するため、正負逆向きの磁場を印可することにより、磁場依存性の異なる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た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 上岡修星
2. 発表標題 パルス強磁場を用いた真空複屈折実験
3. 学会等名 1000 テスラ超強磁場科学の開拓（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshiaki Inada
2. 発表標題 Science with X-rays in the 2050s: Quantum Vacuum
3. 学会等名 SACLA Users's Meeting 2022 Special Session（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yudai Seino
2. 発表標題 Experimental search for Vacuum Diffraction using high-power laser and XFEL
3. 学会等名 Extremely High Intensity Laser Physics Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
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 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Tabletop Experiments https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/ Tabletop Experiments https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/
--

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
---------	---------