

令和元年5月29日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03970

研究課題名(和文)高精度レーザーと強磁場を用いた真空構造の探索

研究課題名(英文) Search for structures of vacuum with a high precision laser and a strong magnetic field

研究代表者

難波 俊雄 (Namba, Toshio)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：40376702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：現代の物理学が予言する真空の構造を探索する実験である。真空に強磁場をパルス的に印加し、偏極を引き起こして真空を歪める。その歪みを高精度のレーザーで検出する。感度を高めるために高反射ミラー2枚で光共振器を作成し、共振器中の光に対してパルス磁場を印加する。プロトタイプ実験の結果をもとに、感度を決める鍵であるレーザーのノイズを削減し装置の長期安定性を向上させた。また、共振器の真空度の改善やパルス磁石の高磁場化などの改善もおこなった。これにより、真空構造の測定に向けた装置がほぼ完成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは実験の対象とされてこなかった「真空」について着目することで、新たな分野として真空の物理学が注目されるようになった。今回は真空の構造の探索には至らなかったが、量子電磁気学の予言する真空偏極まであと3.5桁の感度で探索をおこない、そこまでは真空の構造が無いことが確認できた。また、技術的側面では、基礎技術である防振技術やレーザーの安定化、共振器の制御技術の開発、製作において大きな進展が得られ、他の分野での応用も期待される。

研究成果の概要(英文)：Some theories of modern physics predict structures of vacuum. The vacuum polarization can be created by strong pulsed magnetic fields, and the polarization can be detected by a high precision laser. An optical cavity made by two high reflection mirrors is used for the enhancement of its sensitivity. Based on the results of a prototype experiment, the laser system has been improved and been stabilized. The vacuum chamber and the pulsed magnets have been also improved. The development of the experimental apparatus has almost been completed.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子物理実験 真空 レーザー パルス磁石

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現代の素粒子物理学は場の量子論によって記述される。場の量子論は、真空を単なる何も無い空間ではなく、いろいろな場が遍在しており、粒子が常に生成と消滅を繰り返している複雑な状態と記述している。この記述の正しさがドラマチックに示されたのが2012年のヒッグス粒子の発見である。真空中で仮想的なヒッグス場が絡みつくことによりすべての粒子に質量を与えているという描像は、われわれの世界観を変えうるものである。そして、真空に潜んでいるのはヒッグス場だけではない。宇宙初期のインフレーションを起こ

した場合は、今でも正体不明である。また、宇宙は現在も加速膨張していると考えられているが、この原因のダークエネルギーの場も全く見当がつかない。素粒子物理の標準理論を超えたアクシオン模型で予言されているアクシオン場も暗黒物質の有力な候補である。

一方、確実にあると分かっている真空の構造としては、量子電磁気学の予言する、電子・陽電子ループを介した真空偏極がある。この真空偏極はイタリアのPVLASグループやフランスのBMVグループなど世界中で探索がおこなわれているが、未だに発見に至っていない。

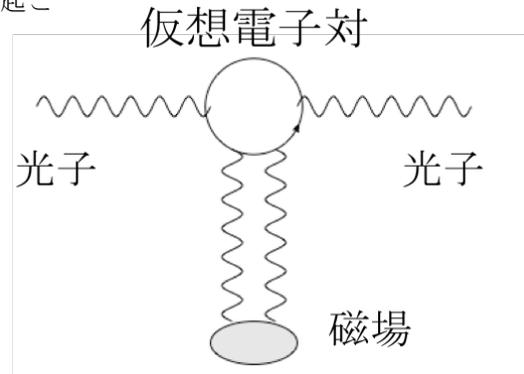


図1 量子電磁気学の予言する真空偏極

2. 研究の目的

高精度レーザーと大強度パルス磁石を用いて真空の複雑な構造を明らかにする。ダークエネルギーやインフレーション場などの未知の場を、電磁場との結合を介して探索する。また、既に確立された理論である量子電磁気学の予言する真空の複屈折の観測をおこなう。これにより、これまでは単なる何も無い状態だと考えられていた真空に対する新たな知見を得る。

3. 研究の方法

真空中に強磁場を印加すると、真空中の場が反応し、真空の屈折率に異方性(複屈折性)が生じる。例えば、量子電磁気学の予言する真空偏極では、定数 $k(=4.0 \times 10^{-24} [T^{-2}])$ を用いて $n_{\parallel} - n_{\perp} = kB^2$ と計算されている。この微小な複屈折性を観測するために、偏光プリズムを用いて直線偏光させたレーザーを用いる。レーザー光の偏光に対して斜めに、パルス磁石で9Tの磁場を印加する。真空が偏極した場合は、磁場の垂直方向と平行方向で屈折率が異なるため、レーザーの偏光が変化し、その変化を後段の偏光プリズムによって検出する。パルス磁石の長さは20cmであるが、高フィネス(～400,000)のファブリペロー共振器と組み合わせて実効的な磁場長を伸ばすことにより、探索感度を上げる。静的な磁場では無く、パルス長～1msのパルス磁石を用いるため、印加磁場との相関をとることで磁場に起因した複屈折変化だけを抽出することができる。微小なシグナルが予想されるため、レーザーの安定性や共振器の真空度を向上することで探索感度を上げる。実験の模式図を図2に示す。

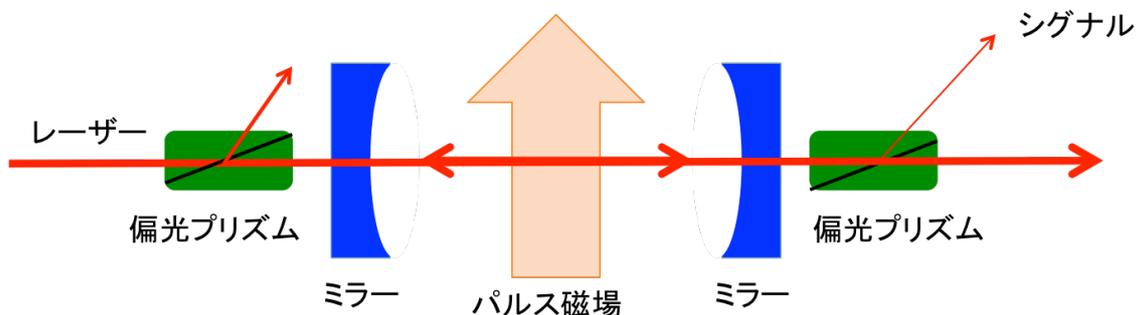


図2 実験の模式図

4. 研究成果

まずは、真空の複屈折を観測するためのプロトタイプ装置で測定(パルス磁場を約100回印加)をおこない、感度向上のためのスタディーをおこなった。また、実験装置の感度を確認するために、窒素ガスを装置に封入し、窒素ガス複屈折の測定による感度評価もおこなった。その結果をもとに、以下のような装置の改良をおこなった。

- (1) パルス磁石の駆動装置のスイッチングにともなう電磁ノイズを抑えるため、装置の充電系を改良し、スイッチの両端に過大な電位差が生じないようにスイッチングをおこなうことで、

- ノイズ削減に成功した。
- (2) パルス磁石や周囲の電気回路に磁気シールドを設置し、レーザー制御回路への漏れ磁場に起因するノイズを削減した。また、パルス磁石と周囲の装置の接続、設置方法を改良し、免震構造を追加して、パルス磁石励起時の振動が光学素子を揺らさないようにした。
 - (3) レーザーには Pound Drever Hall (PDH) 法でフィードバックをかけることで安定化を図っている。このフィードバック回路の最適化、電源のノイズ削減などをおこなうことで、レーザーの安定性を向上させた。また、入射レーザー強度を 300 倍強く 3mW にすることで、微小信号に対する感度を向上させた。
 - (4) 入射レーザーの強度ゆらぎを抑えるため、音響光学変調器(AOM)を導入した。これにより、20Hz 以上の周波数帯で雑音が大幅に減少した。また、各制御素子の電源の安定化を強化し、共振器の安定性を強化した。(図 3、図 4)

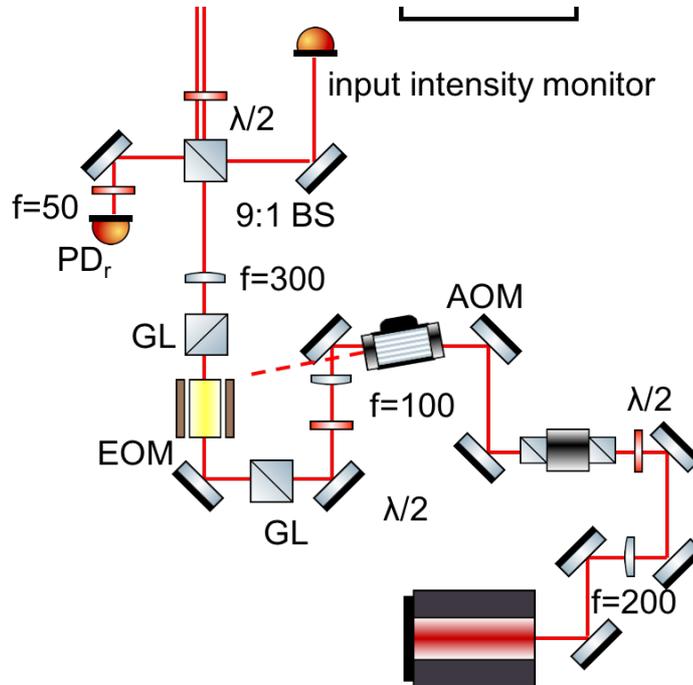


図 3 改良した入射レーザーシステム (上が共振器への入射)

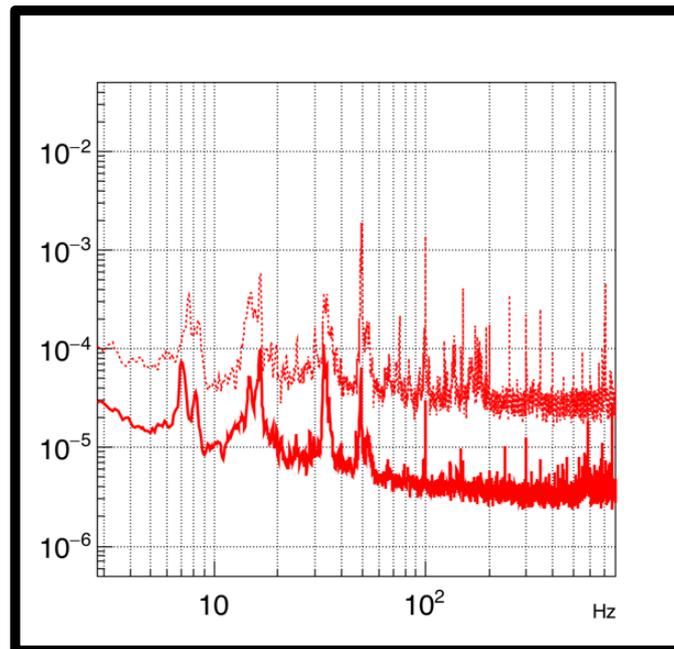


図 4 レーザー強度ノイズの変化。(横軸 Hz、縦軸 $1/\sqrt{\text{Hz}}$) 破線が実線に改善された。

- (5) 最終的な測定は数ヶ月に及ぶ。長期にわたって PDH 法でのレーザー制御を有効にするため

- に、検出器の温度ドリフトをキャンセルさせる制御を組み込んだ。これにより、無人の状態
で1週間以上放置してもレーザー強度変動が±5%以下であることが確認できた。
- (6) 長期測定中には、ノイズ等によってどうしてもファブリペロー共振器のロックが外れてしま
う。この時、自動的に共振器がロックされ、最適値に調整する機構を製作し、組み込んだ。
こちらも、1週間以上無人で放置して共振器を運転し、問題なく最適な位置にロックされ、
機能することが確認できた。
 - (7) 現在の磁石はパルス磁場 9T の磁場で運転しているが、15T 程度まで強度を上げて感度を上
げることが望ましい。この際、磁石両端部での磁気応力が問題であり、自ら発生した磁場
により破壊されてしまう。このため、端部に銅板を取り付け、エディン電流を利用して磁場を
キャンセルする設計とした。テスト用コイルを新たに製作して試験中であるが、概ね順調な
試験結果となっている。
 - (8) ファブリペロー共振器は真空中に設置してあるが、微量の残留ガスによって偽の複屈折信号
が観測されてしまう。このため、超高真空用の真空容器を製作した。必要である 10^{-6} Pa 台の
真空度が達成できることも確認された。
- これらの改良により、世界最高レベルの感度を達成し、量子電磁気学の予言する真空複屈折を観
測できる見込みが立った。現在、長期測定の準備をしているところであり、数ヶ月の測定により
真空の構造を観測する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 樊星、上岡修星、難波俊雄、OVAL 実験 -真空を探る-、高エネルギーニュース 36(2017)p. p. 9-
14、査読無、<http://www.jahep.org/hepnews/2017/17-1-2-OVAL.pdf>
- ② T. Inada, T. Yamazaki, T. Yamaji, Y. Seino, X. Fan, S. Kamioka, T. Namba, and S.
Asai, Probing Physics in Vacuum Using an X-ray Free-Electron Laser, a High-Power
Laser, and a High-Field Magnet, Applied Sciences 7(2017)671, 12p. p., 査読有,
<https://doi.org/10.3390/app7070671>
- 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, and H. Nojiri, The OVAL
experiment: a new experiment to measure vacuum magnetic birefringence using high
repetition pulsed magnets, European Physics Journal D71(2017)308, 10p. p., 査読有,
<https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80290-7>

[学会発表] (計 7 件)

- ① 上岡修星、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
- ② 成田佳奈香、OVAL 実験の感度を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 上岡修星、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 2018 年秋季大会、2018 年
- ④ 上岡修星、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 73 回年次大会、2018 年
- ⑤ 上岡修星、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
- ⑥ T. Inada, LSW experiments with pulsed magnets + Vacuum Magnetic Birefringence (VMB),
Workshop on High Magnetic Fields for FUNDamental Physics (HIMAFUN), 2017
- ⑦ S. Kamioka, Search for Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed Magnets, Light
driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017(LNPC' 17), 2017

[その他]

ホームページ等

<https://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者
なし
- (2) 研究協力者
なし

※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

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。