

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287060

研究課題名(和文) 真空内四光波混合によるアクシオン探索

研究課題名(英文) Search for axion-like particles with four-wave-mixing in the vacuum

## 研究代表者

本間 謙輔 (Homma, Kensuke)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40304399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の暗黒物質源となり得るアクシオンのような未知の素粒子を2色レーザーを同軸上で混合することにより探索した。この探索は、一色目のレーザー光により未知粒子を生成し、同時に2色目のレーザー光により誘導崩壊させる手法「真空内四光波混合」に基づいている。探索の結果、統計的に有意な信号が得られなかった。この探索結果は、2つの論文として出版した。最初の探索結果は、この独創的な手法に基づく史上初の試みに相当する。

研究成果の概要(英文)：We have searched for axion-like particles (ALP), which can be a reasonable candidate for dark matter in the Universe, by combining two-color laser fields in the same optical axis. This search is based on "four-wave mixing in the vacuum", where one laser is used to create ALP and the other one is used to stimulate decays of those produced particles. As a result of the search, we have not observed the signature beyond statistical fluctuations. This result has been published as two papers. The first result corresponds to historically the first search based on this unique method.

研究分野：素粒子・原子核・レーザー実験

キーワード：アクシオン 擬スカラー場 暗黒物質 レーザー 真空内四光波混合

1. 研究開始当初の背景

暗黒エネルギー (DE)、暗黒物質 (DM) は、現代物理学の最重要課題である。申請者は、検証可能な DE 模型として、スカラー・テンソル理論の予言によるスカラー場 (neV 以上の質量域にあるディラトン) の検証可能性について協力研究者と共に考察し、地上で検証実験を実現するための実験手法を海外協力研究者らと提案した。さらに、具体的な実験条件下での検出感度について定量化を終えた。これによれば、軽い DM および DE 源が、同じ手法で探索可能となる。

提案の骨子は、レーザー場同士の散乱において軽い未知場の交換による共鳴散乱を利用するものである。光子・光子衝突の重心系 (cms) エネルギーが、未知場の質量に一致したとき共鳴条件が満たされる。質量が軽い (cms エネルギーが小さい) 場合、正面衝突系では光の波長を伸ばす以外方法はないが、準平行衝突系 (qps) では、光学波長域を保ったまま、入射角度を小さくすることにより、入射波長で決まるエネルギーよりも桁違いに小さい cms エネルギー (共鳴条件) を達成できる。qps は、cms の衝突軸を真横にローレンツブーストした系に相当し、cms での弾性的な散乱が、qps のブースト前方では、ほぼ 2 倍波、後方では、ほぼゼロ周波数の散乱として波長シフトが観測されることになる。本提案での qps は、コヒーレンスを有する 2 色のレーザービーム  $1$  と  $u$  ( $u$  は  $0 < u < 1$  となる非整数値) を同時に集光することで実現される。後述するように、軽い場の介在により、 $1 + 1$  共鳴  $u + (2-u)$  という波長シフト (真空内四光波混合) が起り得る。共鳴散乱の積分的効果による確率の増大を利用し、この  $(2-u)$  光子が探索すべき信号となる。四光波混合の生成量は各周波数光子数の 3 乗に比例するため、近未来のレーザーの高強度化により感度が飛躍的に向上する。

実験の立場からすれば、交換される未知場の質量と光子との実効的な結合定数さえ与えられれば、未知場の理論的背景に依らず、散乱実験による一般的な探索が可能となる。本手法により探索対象とする未知場は、強固な理論的背景を持つ、軽い DM の代表格としてのアクシオン (擬スカラー場) およびディラトン (スカラー場) である。ディラトンが DE の候補となるためには、その物質場との結合は、重力程度に弱い必要があり、究極的に本手法の感度が重力結合へ至るのならば、それよりも強い結合領域に予言される軽い DM の候補は、必然的に観測網にかかる。一回の衝突で重力結合への感度に至るには、レーザー核融合に使用されるような、パルス当たり 10 kJ クラスの超高強度レーザーが必要となるが、このような超高強度レーザーを基礎物理実験に利用する展望はすでに開けている。しかし、超高強度場を用いて探索する予備的段階として、QCD アクシオン場の探索は、比較的低強度のレーザーでも可能とな

る見通しが得られた。

QCD ラグランジアン CP 対称性は、QCD の非摂導真空構造 (真空) を色濃く反映している。真空の位相値は、元来、任意でよい (CP 非保存) にも関わらず、実世界では、極めて良い精度でゼロ (CP 保存) となっている。このため自発的に位相値をゼロに収斂させる機構が必要となる。アクシオン場は、このために導入された Peccei-Quinn 対称性の破れに伴う「質量ゼロの南部・ゴールドストーンボゾン (NGB)」である。中間子は、元来、NGB として考えられたが、カイラル対称性の破れに伴い、実世界では擬 NGB として有限の質量を有する。アクシオンが実質量を得るためにも、NGB から擬 NGB 化への転化が必要となる。カイラル相転移が起る 170 MeV 付近のエネルギースケールでは、QCD 非摂導真空は多様な相構造を有する。申請者は、QCD の相転移を探究してきた。その常套手段は、高エネルギー重イオン衝突により超高温状態を生成し、カイラル対称性の部分的回復の兆しとして、中間子の質量変化を測定するものである。一方、アクシオン場の擬 NGB 化過程を理解することは、QCD 真空の理解に加え、宇宙論的にも重要課題となる。この転移によって得られる質量に依っては、DM の有力な候補になり得るからである。

これまでレーザーと静磁場を用いてアクシオンの生成と崩壊を観測する手法や太陽内でインコヒーレントに生成されるアクシオンを地上の磁場を用いて崩壊させる方法を常套手段として探索が行われてきた。本提案手法は、レーザー場強度が増すにつれて、これら既存手法の感度を桁違いに向上できる。レーザーのコヒーレント光は、同一運動量に縮退した状態の異なった個数状態の線形結合として理解される。単一波長のレーザー光を集光すると、軽い未知場の生成かつ自発崩壊の確率は入射レーザー光強度の 2 乗に比例する。これは、コヒーレント状態から 2 光子を消滅させる際の自由度に起因する。一方、生成された未知場が 2 光子へ崩壊する際、別の運動量状態にあるコヒーレント光が背景に存在すると、その運動量状態へ崩壊が誘導される。この場合、崩壊確率がその誘導場の強度に比例することになる。そこで、生成用に  $1$  のレーザー光を用意し、崩壊用に  $u$  の背景レーザー場を用意しておく、エネルギー・運動量の保存則から  $1 + 1$  共鳴  $u + (2-u)$  という反応を介して、崩壊時に一方の光子は  $(2-u)$  というエネルギーを満たすことになる。つまり、あらかじめ 2 波長のレーザーを混在させておくことにより、真空下でパラメトリックに新たな光波を生成すること (真空内四光波混合) が可能になる。この場合、生成場と崩壊誘導場の強度を同程度とすると、未知場の生成かつ崩壊の確率は、それらレーザー強度の 3 乗に比例することになる。

24年度に挑戦的萌芽研究予算で、低強度レーザーによる四光波混合を実装し、信号光を検知する予備的セットアップを構築し、上記手法が実施可能であることを検証した。そこで、本格的な測定に移行するための研究費が必須となった。

## 2. 研究の目的

真空中で2色のレーザー光を集光し、真空起因の四光波混合過程の観測により、軽い暗黒物質源となり得るアクシオン(擬スカラー場)の地上探索を実施することを目的とした。

## 3. 研究の方法

擬スカラー場の生成用レーザー場(エネルギー)と崩壊用誘導レーザー場(エネルギー $u$ )を混合して真空中で集光し、未知場の共鳴を介して起り得る、 $(1) + (2) u$   $(2) + (2-u)$   $(1)$ の反応を通じて $(2-u)$ の四光波混合過程の有無を測定する。括弧内はレーザー光の直線偏光状態を表している。共鳴が擬スカラー場起因の場合を想定し、初期状態と終状態間の偏光関係を要求しつつ $(2-u)$ の光子を計数する測定系を、研究分担者が運用する京大化研内に構築し、擬スカラー場の探索を、レーザー強度を2段階で上げつつ実施することを計画した。そのため、具体的には以下の研究課題を実施した。

- 光子検出システムの改良
- 校正用光源の開発と検出効率の見積手法の確立
- 相互作用部を真空容器内に移設
- 生成光波 800nm(1mJ/pulse)と誘導光波 1064nm(1J/pulse)の混合によるパイロット探索
- 生成光波 800nm(0.6mJ/pulse)と誘導光波 1064nm(1J/pulse)の混合による探索
- 近未来の超高強度レーザー応用に向けたバックグラウンド光の生成機構理解と抑制手法の確立

## 4. 研究成果

京都大学化学研究所内で分担研究者が運用するレーザーシステムにおける探索装置の構築と並行して、広島大学学内で実施した弱レーザー光源による探索結果に基づき、未知スカラー場と光子の質量-結合関係において本探索手法により棄却できる領域を算出した。弱いレーザー場による探索ながら、世界初の探索結果を査読付き論文として出版することに成功した。加えて、特に欧州で勃興している近未来のレーザーの高強度化計画を踏まえて、この手法に基づく未知のsub-eV弱結合共鳴場探索の展望を論文化した。

京都大学化学研究所内で構築した真空容器内のレーザー集光系において、生成用光波(800nm)と崩壊誘導用光波(1064nm)のレーザーを同軸上で混合し、真空内四光波混合光の探索を実施した。その際、研究分担者が運用

するレーザーシステムで得られる生成用レーザー光強度を2段階に用いて探索を試みた。比較的弱い初段階のレーザー強度による探索では、真空内四光波混合光が統計的に有意に見出されなかった結果を得た。この結果から、アクシオン場と光子との結合に対する上限値を、アクシオン場の質量の関数として見積り、論文として出版することに成功した。

初段階の探索システムにより、残余原子起因の背景光の圧力依存性の定量化にも成功した。その結果、2段階目の最高強度レーザーによる探索には、真空系の根本的なアップグレードが必須であることが判明した。これらの経験を通じて、背景光の抑制方法の確立とその実践のために必要とされる次期研究課題を具体化することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

[1] T. Hasebe, K. Homma, Y. Nakamiya, K. Matsuura, K. Otani, M. Hashida, S. Inoue, S. Sakabe, "Search for sub-eV scalar and pseudoscalar resonances via four-wave mixing with a laser collider", *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015, 073C01. 査読あり。

[2] K. Homma, "Perspective to search for sub-eV neutral boson resonances with stimulated laser colliders", *Eur. Phys. J. ST* 223, 1131-1137, 2014. 査読あり。

[3] K. Homma, T. Hasebe, K. Kume, "The first search for sub-eV scalar fields via four-wave mixing at a quasi-parallel laser collider", *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 083C01, 2014. 査読あり。

[4] 本間謙輔、長谷部孝、久米一輝、阪部周二、橋田昌樹、「真空内四光波混合によるsub-eV中性ボゾンの共鳴探索」高エネルギーニュース Vol.32, No.3, 171-177 (2013年10/11/12月) 査読なし。

[学会発表](計22件)

(1) 国際会議

[1] K. Homma, 「Search for sub-eV dark fields at stimulated laser colliders」Outlook on Wake Field Acceleration: the Next Frontier - CERN - Geneva - Switzerland (2015.10.15)

[2] K. Homma, 「Quantum Optics in the Vacuum toward Laboratory Search for Dark Fields in the Universe」CLE2015, OPTICS & PHOTONICS International Congress 2015, Yokohama, Japan (2015.04.23)

[3] K. Homma, 「HPLS TDR3」ELI-NP Science

Program and Instruments: Technical Design Reports, Bucharest-Magurele, Romania (2015.02.18)

[4] K. Homma, 「A strategy of searching for dark fields via resonances coupling to two photons with high-intensity laser facilities」 IZEST ELI-NP Conference "Extreme Light's New Horizons", Embassy of Romania, Paris, France(2014.09.18)

[5] K. Homma, 「Quantum Optics in the Vacuum」3rd International Conference on New Frontiers in Physics, Crete, Greece (2014.08.05)

[6] K. Homma, 「Toward laboratory search for sub-eV neutral bosons via resonances by stimulated photon-photon collider」23rd ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP, Sofia, Bulgaria (2014.07.16)

[7] K. Homma, 「TDR3: Combined Laser-Gamma experiments」ELI-NP TDRs at Midway-High Power Laser System, Bucharest-Magurele, Romania (2014.04.02)

[8] T. Hasebe, K. Homma, K. Kume, K. Otani, Y. Miyasaka, S. Inoue, M. Hashida and S. Sakabe, 「Search for sub-eV scalar particles via four-wave mixing in the vacuum」, Institute for Chemical Research International Symposium 2014 - The Science and Technology of Smart Materials -, Kyoto, Japan (2014.03.10)

[9] K. Homma, 「Low energy stimulated photon-photon collider toward laboratory search for dark fields」From Fundamental Physics to Societal Applications at the Embassy of France, Tokyo, Japan (2013.11.19)

[10] K. Homma, 「Prospect to search for sub-eV dark fields with high-intensity and high-energy lasers」3<sup>rd</sup> IZEST meeting, Livermore, USA (2013.07.17)

[11] K. Homma, 「Vacuum Quantum Optics - toward Search for sub-eV Dark Matter / Dark Energy Candidates -」22nd International Laser Physics Workshop, Prague, Czech Republic (2013.07.15)

[12] K. Homma, 「Dark field search via photon-photon coupling at ELI-NP」Towards Technical Design Reports (TDR) of experiments with intense laser beams at ELI-NP, Bucharest-Magurele, Romania (2013.06.28)

[13] K. Homma, 「Required Laser System toward Laboratory Search for Low-mass Dark Matter and Dark Energy Candidates」ICAN Conference, CERN, Geneva, Switzerland (2013.06.27)

## (2) 国内会議

[1] 「ELI-NP での真空内四光波混合探索へ向けた現状と課題」長谷部孝、本間謙輔、中宮

義英、松浦佳代、橋田昌樹、井上俊介、阪部周二、日本物理学会第 71 回年次大会、東北学院大学泉キャンパス(2016.3.22)

[2] 「高強度レーザー場を用いた素粒子物理学の新展開」本間謙輔、第 36 回レーザー学会シンポジウム、名城大学天白キャンパス(2016.1.11)

[3] 「四光波混合を用いた暗黒物質候補粒子の探索結果」長谷部孝、本間謙輔、中宮義英、松浦佳代、橋田昌樹、井上俊介、阪部周二、第 36 回レーザー学会年次大会、名城大学天白キャンパス(2016.1.10)

[4] 「真空内四光波混合による暗黒場探索の現状と展望」本間謙輔、新学術領域研究会テラスケール 2015、東京工業大学岡山キャンパス(2015.12.22)

[5] 「四光波混合を用いた低質量・弱結合場の探索結果」長谷部孝、本間謙輔、松浦佳代、大谷一人、中宮義英、橋田昌樹、井上峻介、阪部周二、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、東京 (2015.03.21)

[6] 「Extreme Light Infrastructure (ELI-NP) の物理」本間謙輔、日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、東京 (2015.03.24)

[7] 「超高強度レーザー場を用いた真空構造探求へのアプローチ」本間謙輔、レーザー研シンポジウム 2015 -平成 25 年度共同研究成果報告会-、大阪大学、大阪 (2014.04.16)

[8] 「真空内四光波混合による低質量・弱結合粒子の探索」長谷部孝、本間謙輔、久米一輝、大谷一人、宮坂泰弘、井上峻介、橋田昌樹、阪部周二、日本物理学会第 69 回年次大会、東海大学 (2014.03.29)

[9] 「高強度レーザー場による準巨視的真空構造の探求」本間謙輔、レーザー研シンポジウム 2013、大阪大学医学部銀杏会館 (2013.05.08)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

連携した国際共同研究：

ELI-NP(Extreme-Light-Infrastructure 原子核部門, IFIN-H 研究所, ルーマニア, 欧州連合)

<http://www.eli-np.ro>

IZEST(International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology, エコールポリテクニク, フランス)

<https://portail.polytechnique.edu/izest/en>

研究会, 講演会, セミナー等の講師：

[1] ELI-NP Summer School

(<http://www.eli-np.ro>)

「Laser driven particle physics」,  
Bucharest, Romania (2015.09.22)

[2] 本間謙輔, 「高強度レーザーで唯一可能となる素粒子・宇宙論的研究」

第6回レーザー学会超高強度レーザーの学術応用 (2014年9月30日, 京都大学宇治キャンパス)

[3] 本間謙輔, 「真空量子光学」ICEPP セミナー2013 東京大学素粒子物理国際研究センター(2013.4.17)

[4] K.Homma, “Vacuum Quantum Optics - toward Search for Light Dark matter / Dark Energy Candidates”, INRS-EMT, Montreal, Canada (2013.04.02)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

本間 謙輔 (Homma Kensuke)

広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：40304399

### (2) 研究分担者

阪部 周二 (Sakabe Shuji)

京都大学・化学研究所・教授

研究者番号：50153903