

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654069

研究課題名(和文)暗黒エネルギー源の予備的地上探索

研究課題名(英文)A pilot search for a source of Dark Energy in laboratory

## 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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：暗黒エネルギー源となり得る低質量かつ光と弱く結合する未知スカラー場の探索手法「真空内四光波混合」を開拓した。この手法によるパイロット探索の結果に基づき、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パイロット探索ながら、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。

研究成果の概要(英文)：We have developed the new method, four-wave mixing in the vacuum, to search for a low-mass scalar field weakly coupling to photons which can be a reasonable candidate for Dark Energy. Based on the pilot search by utilizing this method, we evaluated the upper limit on the mass-coupling relation on unknown scalar fields. Although the laser field strength is still weak, we have succeeded to publish the result of the pilot search for the first time.

研究分野：素粒子・原子核・レーザー実験

キーワード：暗黒エネルギー源 スカラー場 レーザー 真空内四光波混合

## 1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙観測により暗黒エネルギー (DE) が宇宙の約 7 割のエネルギーを有しているという見解が一般化されつつある。DE は宇宙項に相当する。その観測値はプランク単位換算で  $10^{-120}$  と極めて小さく、統一理論で期待される  $\sim 1$  との乖離が最大級の問題となっている。DE の自然な説明として、物質とは重力的にしか結合しない極めて軽いスカラー場による有力な解釈がある。本研究の動機となっているスカラー場は、有限到達距離の重力源とも捉えられる。これは、スケール変換に対して不変であった時空が、重力定数という次元を持った状態、すなわちスケール変換不変性を自発的に破る際に生じる粒子であり、その自己相互作用により微少な質量を持った場である。もし、 $\mu\text{eV}$ - $\text{neV}$  程度のスカラー場が量子過程のみを通じて重力程度の強さで物質と相互作用できると、宇宙年齢 ( $10^{60}$  プランク単位) の 2 乗に反比例して減衰する宇宙項 ( $10^{-120}$  プランク単位) が自然に導出でき、観測値を無理なく説明できる。したがって、スカラー場の存在を突き止められれば、DE の一つの有力な説明となり得る。

研究代表者は、このような軽い場を、高強度レーザー場によって探る方法として、光・光散乱においてスカラー場交換による共鳴散乱を利用することを提案していた。光子・光子衝突の重心系 (CMS) エネルギーが、スカラー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  $u$  ( $0 < u < 1$ ) 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  $(2-u) + u$  というパラメトリック高調波が縮退したレーザー場中で生成し得る。共鳴散乱の積分効果による確率の増大に着眼し、この  $(2-u)$  光子の検知を目指すことにした。

2009 年に高強度レーザー施設 (Extreme Light Infrastructure) が欧州連合から大型予算措置を受け、パルス当たり  $\text{kJ}$  のレーザー光を  $10^{-14}$  秒前後の時間スケールで集光できるレーザーシステムが段階的に構築される。研究代表者は、ELI 原子核部門にて本探索手法による探索を提案していた。

## 2. 研究の目的

暗黒エネルギー源の候補となる軽いスカラー場の地上探索へ向け、真空中で 2 色のレーザー光を集光し、真空起因のパラメトリック高調波生成の観測を、予備実験として試みることを目的とした。

## 3. 研究の方法

レーザー光に代表されるコヒーレント光は、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、スカラー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、生成されたスカラー場が 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  $0 < u < 1$  として  $u$  の背景レ

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 (2-u) + 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(2-u) を生成することが可能になる。この場合、生成場と崩壊誘導場の強度を同程度とすると、スカラー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。したがって、近未来のレーザーの高強度化は、感度の飛躍的向上につながる。

具体的には、同じ光学軸上で上記2色のレーザーパルス光を混合し、その軸上に放出される(2-u) の信号光を、生成・誘導に使われたレーザー光の中から偏光状態を指定しつつ分光すればよい。

#### 4. 研究成果

パイロット探索として、学内に約10kHzで信号の時間構造を反映する波形データを取得する読み出しシステムを構築し、真空容器内で弱い2色レーザー場を混合して、探索を実施した。1週間ほどのデータ取得期間に貯められた統計量をもとに、信号光の有無を調べた。その結果、統計的に有意な信号光は発見されなかった。この結果に基づき、非常に弱いレーザー場ではあるが、本探索手法による世界初の探索結果を論文として公表した〔雑誌論文[1]〕。

並行して、京都大学化学研究所にて、より高強度のレーザー場を用いる探索実験の準備実験を推進した。その結果、探索の背景事象となる原子起因の四光波混合光の検知に成功し、その定量化と抑制方法についての研究を推進した。

上記の研究成果は、以下のリストに掲げられているように様々な国際会議、国内会議、査読付き論文、レビュー論文、解説記事を通じて世界中に発信された。

#### 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 8 件)

[1] Kensuke Homma, Takashi Hasebe, Kazuki Kume, “The first search for sub-eV scalar fields via four-wave mixing at a quasi-parallel laser collider”, *Progress of Theoretical Experimental Physics* (2014) 083C01. 査読あり

[2] K. Homma, “Perspective to search for sub-eV neutral boson resonances with stimulated laser colliders”, *The European Physical Journal Special Topics* Volume 223, Issue 6, pp 1131-1137, 2014. 査読あり

[3] 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

[4] Yasunori Fujii and Kensuke Homma, “Probing dark energy with high-intensity laser field”, *Prog.Theor.Phys.Suppl.* 193 (2012) 230-235. 査読あり

[5] K. Homma, D. Habs, G. Mourou, H. Ruhl, T. Tajima, “Opportunities of fundamental physics with high-intensity laser fields”, *Prog.Theor.Phys.Suppl.* **193** (2012) 224-229. 査読あり

[6] K.Homma, “Probing the Vacuum Structure by Combinations of High-intensity Laser Technologies”, *AIP Conf. Proc.* 1462, 17-24 (2012). 査読あり

[7] T.Tajima and K.Homma, “Fundamental Physics Explored with High Intensity Laser”, *International Journal of Modern Physics A27* (2012) 1230027. 査読あり

[8] Kensuke Homma, “Sensitivity to Dark

Energy Candidates by searching for four-wave mixing of high-intensity lasers in the vacuum.”, *Progress of Theoretical Experimental Physics* (2012) 04D004. 査読あり

〔学会発表〕(計 22 件)

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

[2] 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, 「四光波混合を用いた低質量・弱結合場の探索結果」日本物理学会第 70 回年次大会、早稲田大学、東京 (2015.03.21)

[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] 長谷部孝, 本間謙輔, 久米一輝, 大谷一人, 宮坂泰弘, 井上俊介, 橋田昌樹, 阪部周二 「真空内四光波混合による低質量・弱結合粒子の探索」日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年春季) 東海大学 (2014.03.29)

[9] T.Hasebe, K.Homma, K.Kume, K.Otani, Y.Miyasaka, S.Inoue, M.Hashida, 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)

[10] 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)

[11] 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)

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

[13] 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)

[14] 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)

[15] 本間謙輔、「高強度レーザー場による準巨視的真空構造の探求」レーザー研シンポジウム 2013、大阪大学医学部銀杏会館 (2013.0508)

[16] 久米一輝、本間謙輔、長谷部孝、大谷一人、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二「真空内四光波混合測定」日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年春季) 広島大学 (2013.03.28)

[17] 長谷部孝、本間謙輔、久米一輝、大谷一人、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二「真空内四光波混合測定手法」日本物理学会第 68 回年次大会(2013 年春季)広島大学 (2013.03.28)

[18] 本間謙輔、長谷部孝、久米一輝、大谷一人、時田茂樹、橋田昌樹、阪部周二「真空量子光学 -暗黒エネルギー源候補の地上探索へ向けて-」日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年春季) 広島大学 (2013.03.28)

[19] 本間謙輔、「真空量子光学 -暗黒エネルギー源候補の地上探索へ向けて-」レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会 姫路商工会議所 (2013.01.28-30)

[20] K.Homma, “Probing the quantum vacuum by high-intensity lasers toward search for dark fields”, The 12th Zimanyi Winter School on Heavy Ion Physics, Budapest in Hungary (2012.12.03-07)

[21] K.Homma, “Search for low-mass Dark Matter / Dark Energy Candidates by High-Intensity Lasers”, International endeavor to establish Laser-Based High Energy Physics and

Applications Conference, Strathclyde University in UK (2012.11.13-15)

[22] K.Homma, “Search for Dark Matter / Dark Energy Candidates by High-Intensity Laser Fields”, 21st INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP, Calgary in Canada (2012.07.23-27)

〔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：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.eli-np.ro>

<http://www.izest.polytechnique.edu/jsp/accueil.jsp?LANGUE=1>

## 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

( )  
研究者番号：

### (3) 連携研究者

豊川 弘之 (Toyokawa Hiroyuki)  
独立行政法人産業技術総合研究所  
計測フロンティア研究部門  
グループリーダー  
研究者番号：80357582

黒田 隆之介 (Kuroda Ryunosuke)  
独立行政法人産業技術総合研究所  
計測フロンティア研究部門研究員  
研究者番号：70350428