

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21880

研究課題名（和文）暗黒エネルギー源探索へ向けたGHz帯誘導共鳴光子衝突実験実現性の検証

研究課題名（英文）Verification of the realizability of of a GHz-band stimulated resonant photon scattering experiment toward search for a dark energy source

研究代表者

本間 謙輔（Homma, Kensuke）

広島大学・先進理工系科学研究科（理）・助教

研究者番号：40304399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：GHz帯域の光子ビーム衝突を用いた誘導共鳴散乱実験による暗黒エネルギー源の地上探索へ向けて、以下の2つの要素課題を実施した。1) 2色のGHz帯光子群を混合後、自由空間に取り出して集光する準平行光子-光子衝突系の実装を試み、2) 誘導共鳴散乱の信号光となるGHz帯の単一光子に感度をもち、かつ、その個数を計数する手法の検討。これらの要素課題を通して、概念設計の実現可能性を検証し、その提案の出版に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の加速膨張を説明するには、斥力を生み出すエネルギー源が必要となる。そのエネルギー源の実態は未解明なため暗黒エネルギー（DE）と称される。DEが宇宙に占める割合は7割と大きく、その正体解明は究極の基礎物理学的課題である。DE源の1つの候補として、未知のスカラー型素粒子の介在が考えられる。その質量は極めて軽く、かつ、光子を含む物質場とは重力的に結合する粒子である。もし本研究構想が実現するならば、特定の理論模型に基づくDE候補の探索に留まらず、人類未踏の「超弱結合-超軽質量」域に存在し得る素粒子群の地平を、一般的に切り拓く展望を与えられる。

研究成果の概要（英文）：Toward a ground-based search for a dark energy source by a stimulated resonant scattering experiment using GHz-band photon beams, the following two elemental tasks were carried out: 1) After mixing two-color beams of GHz-band photons, we tried to construct a prototype quasi-parallel photon-photon collision system by focusing the two beams in free space, 2) finding a method of counting the number of signal photons in the GHz-band produced via the scattering process. Through these elemental issues, we verified the realizability of the GHz-band stimulated resonant photon scattering experiment and succeeded in publishing the proposal.

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 ティラトン GHz帯域 誘導共鳴散乱

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙の加速膨張を説明するには、斥力を生み出すエネルギー源が必要となる。そのエネルギー源の実態は未解明なため暗黒エネルギー(DE)と称される。DEが宇宙に占める割合は7割と大きく、その正体解明は究極の基礎物理学的課題である。DE源の1つの候補として、未知のスカラー型素粒子 dilaton の介在が考えられる[1]。dilaton は時空計量の伸縮(dilatation)、つまり、スケール変換に対する対称性の自発的破れに伴う南部-ゴールドストーンボゾンであり、その質量は  $10^{-7}$  eV と極めて軽く[2]、かつ、光子を含む物質場とは重力的に結合する粒子である[1]。本研究の究極の目標は GHz 帯光子を用いた誘導共鳴散乱実験による dilaton の地上探索である。

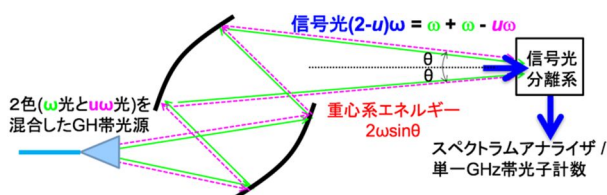


図1 準平行誘導共鳴光子衝突系の概念図。

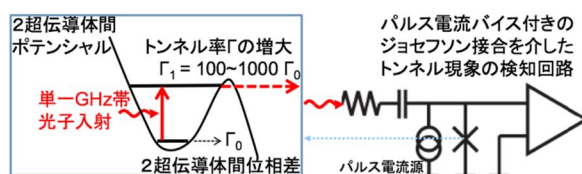


図2 単一 GHz 帯光子の検出原理。

dilaton を共鳴的に生成するには、図1のように、エネルギー の光子対重心系エネルギー  $2 \sin$  を dilaton 質量に一致させる必要がある。重心系エネルギーを  $10^{-7}$  eV にまで下げるには  $\sim 10^{-5}$  eV (GHz 帯域) の光子を  $\sim 10^{-2}$  rad で準平行に衝突させる。この際、特定の終状態へと散乱を誘導するための誘導光として、別のコヒーレント光  $u$  を混合しておく、信号光  $(2-u)$  が高周波で誘導される。この誘導共鳴散乱確率は、光子数の3乗に比例するため光子数が増大した際には、重力的結合に感度が達する[3,4]。例えば粒子加速器に用いられる  $1 \mu$ s 幅のパルス当たり 100MW 出力の 3GHz 帯高周波源(東芝クライストロン E3712)では、 $\sim 10^{25}$  個/パルスのコヒーレントな GHz 光子群を 50Hz で供給できる。加速器内の最大荷電粒子数  $\sim 10^{11}$  個/パルスと比較すると、 $10^{25}$  個の3乗に比例する頻度効果は絶大である。GHz 帯光子群をレーダー的に取り出し真空下で集光衝突させ、かつ、信号光の単一 GHz 光子感度の計数が可能ならば、近未来に dilaton を検証できる着想を得た。

## 2. 研究の目的

本申請内の目的は、この探索へ向けた2つの要素課題：1) 2色の GHz 帯光子群を混合後、自由空間に取り出して集光する、準平行衝突系実装の試み(図1)、2) 誘導共鳴

散乱の信号光となる GHz 帯の単一光子に感度をもち、かつ、その個数を計数する手法の検討(図 2)、を通じて研究構想の実現性を検証することであった。

### 3. 研究の方法

そこで、以下 2 つの要素課題に各々挑戦することにした。

**要素 1)** 図 1 は 2 色の GHz 光源を導波路中で混合後、自由空間に引き出し、パラボラミラーで集光し、信号光分離系を介して信号光子数を計数する測定系を示す。2 波長の試験用マイクロ波を同一導波路内で混合し、大気中でパラボラミラーにより集光するプロトタイプの探索系を試作する。その上で、スペクトラムアナライザーを用いて、信号波の探索を大気中で試みる。この試験的探索を通じて、将来、GHz 帯のより高強度の電波で探索する際の問題点：偏光制御、焦点形状モニター、信号光分離、黒体輻射からの背景光除去等を洗い出す。

**要素 2)** 図 2 は量子コンピューターの qubit 読み出しにも用いられる単一 GHz 帯光子検出の概念図を示す。絶縁体を挟んでジョセフソン接合された 2 つの超伝導体 (STJ) 間をトンネルするクーパー対の基底-励起状態間の遷移を利用する。単一 GHz 光子のエネルギーがクーパー対解離のエネルギー  $\sim 100\text{GHz}$  未満であっても、基底クーパー対を励起し、その励起クーパー対が絶縁体を介して隣の超伝導体へとトンネルするレート  $\Gamma$  が激増するため、その効果を電圧増大として検知できる。しかし、この検出手法では入射光子数に対する応答が直に定量化されていない。この検出原理を皮切りに、本探索に特化したその他の検出原理も探り、その適用可能性を検討する。

### 4. 研究成果

主に以下に示す 3 つの研究成果が得られた。

1) 本研究の概念設計による探索感度を定量化した論文を出版した[4]。さらに、重力的弱結合領域に踏み込める本手法が革新的であることを確信し、[4]に関する記者会見を実施した[5]。

2) 要素 1 について、2 周波の GHz 光合成  $\rightarrow$  ホーンから出射  $\rightarrow$  パラボラ対で集光する系を実機で構築してみた。その際、電磁波伝搬の詳細シミュレーションの必要性を強く認識した。特に、2 周波の右巻きと左巻きの円偏波ビームを合成する方法について、電波天文学の専門家に相談した結果、HFSS 電磁界シミュレータの有用性が分かり、ライセンスを購入し活用できるようになった。しかし、CPU コア数とメモリー量の不足が顕著となり、より高性能の計算機の必要性が判明した。

3) 要素 2 について、アンテナ結合伝送線路型 STJ の開拓者、および、超伝導ミリ波検出器による宇宙背景輻射偏光成分検出の専門家らとの議論の末、超伝導ジョセフソン接合によるフラックス型量子ビットを用いた単一 GHz 光子検出手法に辿り着いた。この手法の特徴は、短時間ゲート内に単一 GHz 光子の計数を可能とする点にある。仮に、ナノ秒時間幅のパルスビーム集光と同期して、ナノ秒の時間ゲートをかけて計数できれば、黒体輻射からの背景電磁波を圧倒的に抑制できる。この手法に基づくセンサーの開発者と実際に議論を重ね、本探索へ応用する場合に要請されるセンサーパラメータの改造目標値が定まった。

## 参考資料：

- [1] Y. Fujii and K. Maeda, *The Scalar–Tensor Theory of Gravitation* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003)
- [2] Y. Fujii, *A new estimate of the mass of the gravitational scalar field for Dark Energy*, *Fundam.Theor.Phys.* 183 (2016) 59-75.
- [3] Y. Fujii and K. Homma\*, *An approach toward the laboratory search for the scalar field as a candidate of Dark Energy*, *Prog. Theor. Phys.*, 126 (2011) 531.
- [4] K. Homma\* and Y. Kirita, *Stimulated radar collider for probing gravitationally weak coupling pseudo Nambu-Goldstone bosons*, *Journal of High Energy Physics* 2020, Article number: 95 (2020).
- [5] 本間謙輔、高強度レーダー混合による宇宙暗黒成分の革新的観測手法の発案～未知素粒子群発見への突破口を開けるか～  
<https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/60216>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nobuhiro Akihide, Hirahara Yusuke, Homma Kensuke, Kirita Yuri, Ozaki Takaya, Nakamiya Yoshihide, Hashida Masaki, Inoue Shunsuke, Sakabe Shuji	4. 巻 2020
2. 論文標題 Extended search for sub-eV axion-like resonances via four-wave mixing with a quasi-parallel laser collider in a high-quality vacuum system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Homma Kensuke, Kirita Yuri	4. 巻 2020
2. 論文標題 Stimulated radar collider for probing gravitationally weak coupling pseudo Nambu-Goldstone bosons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP09(2020)095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 5件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 桐田勇利、本間謙輔、井上峻介、橋田昌樹、阪部周二、中宮義英、 Liviu Neagu, Ovidiu Tesileanu, 他SAPPHIRES collaboration
2. 発表標題 真空内四光波混合実験によるアクシオンの粒子の高感度探索に向けた 光学素子起因背景光の評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本間謙輔、桐田勇利、井上峻介、橋田昌樹、阪部周二、中宮義英、 Liviu Neagu, Ovidiu Tesileanu, 他SAPPHIRES collaboration
2. 発表標題 2色の直線-円偏光パルスレーザーを組み合わせた誘導共鳴散乱によるsub-eV質量領域のアクシオンの粒子の探索
3. 学会等名 日本物理学会 2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐田勇利、本間謙輔、井上峻介、橋田昌樹、阪部周二、中宮義英、 Liviu Neagu, Ovidiu Tesileanu, 他SAPPHIRES collaboration
2. 発表標題 真空内四光波混合実験における光学素子起因背景光の定量的評価と sub-eV質量領域アクシオンの粒子の高感度探索
3. 学会等名 日本物理学会 2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間謙輔
2. 発表標題 多波長電磁波衝突を用いた真空構造への多角的アプローチ - 地上散乱実験は重力結合へ到達し得るか? -
3. 学会等名 東北大学電子光物理学研究センター-ELPH seminar (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田早由里, 本間謙輔, 桐田勇利
2. 発表標題 ディラトン探索に向けたGHz帯誘導光子コライダー集光系開発の現状
3. 学会等名 日本物理学会 2021年年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kensuke Homma
2. 発表標題 Perspective to search for dark components in the Universe with coherent photon collisions
3. 学会等名 3rd Johns Hopkins Workshop, Kavli IPMU, Kashiwa, Tokyo, Japan (2019.6.5) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Homma
2. 発表標題 Stimulated Radar Collider Toward a Laboratory Search for a Dark Energy Candidate
3. 学会等名 28th ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP, Gyeongju, Korea (2019.7.11) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Homma
2. 発表標題 Probing Quantum Vacuum at E4: Search for dark components in the sub-eV - 10 eV mass range
3. 学会等名 1st ELI-NP User Workshop, Magurele-Bucharest, Romania (2019.10.08) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kensuke Homma
2. 発表標題 Perspective of searching for axion-like particles in the mass range $10^{-7}$ - $10^3$ eV with stimulated photon-photon collider
3. 学会等名 Zimanyi School 2019, Wigner Research Center for Physics, Budapest, Hungary (2019.12.02) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柴田早由里, 本間謙輔
2. 発表標題 極低質量の宇宙暗黒成分探索へ向けたジョセフソン接合素子によるGHz帯光子計数法の考察
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会(素核宇)、山形大学小白川キャンパス (2019.9.17)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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