



令和3年12月28日

国際共同実験 SAPPHIRES、レーザーを用いた暗黒物質探索を始動

- 暗黒物質候補の地上での直接生成・崩壊観測へ向けて -

論文掲載

【本研究成果のポイント】

- ・暗黒物質候補となり得るアクシオン等の軽い未知素粒子の国際共同探索を始動。
- ・2色の強力なレーザーを真空中で混合集光して軽い未知素粒子を直接探索する手法の実現可能性とその拡張性を、実験室の探索系で示した。

【概要】 SAPPHIRES 国際共同実験^[1]（本論文では、広島大学大学院先進理工系科学研究科の本間謙輔准教授と桐田勇利大学院生が共同筆頭著者）は、現代宇宙物理学における最大級の謎である暗黒物質の源となり得るアクシオン^[2]等の未知素粒子を、2波長の光波から成る強力なレーザーを真空中で混ぜ合わせ、未知素粒子を介した散乱を誘導することにより、直接的にそれらを生成・崩壊させる探索実験を始動し、その探索結果を公表しました。今回の探索では、未知粒子の介在は確認されませんでした。この結果に基づき、未知粒子の質量と結合に対して棄却領域を求めました。本探索は潜在的な背景事象を理解、定量化するための予備的探索に相当し、今後のレーザーパルスの高強度化により感度が飛躍的に向上することが期待されます。

【論文情報】 本研究の成果は、欧州の科学雑誌「Journal of High Energy Physics」に2021年12月16日に掲載されました。

論文タイトル：Search for sub-eV axion-like resonance states via stimulated quasi-parallel laser collisions with the parameterization including fully asymmetric collisional geometry

著者名：

Kensuke Homma^{*1}, Yuri Kirita^{*1}, Masaki Hashida^{2,3}, Yusuke Hirahara¹, Shunsuke Inoue^{2,3}, Fumiya Ishibashi¹, Yoshihide Nakamiya⁴, Liviu Neagu^{4,5}, Akihito Nobuhiro¹, Takaya Ozaki¹, Madalin-Mihai Rosu⁴, Shuji Sakabe^{2,3}, Ovidiu Tesileanu⁴

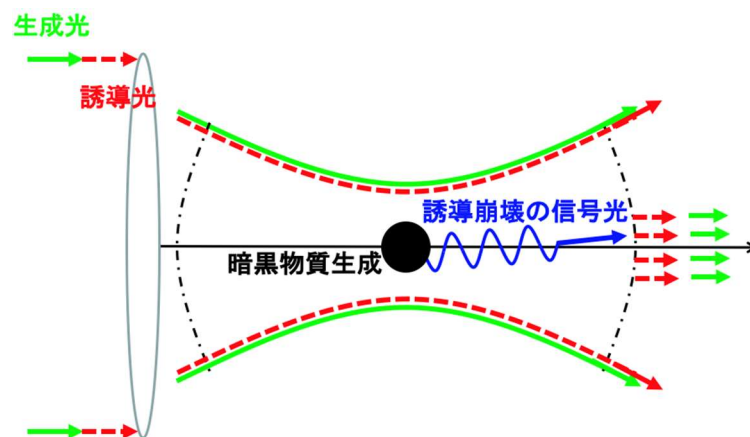
所属：

1. Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8526, Japan
2. Institute for Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

3. Graduate School of Science, Kyoto University, Sakyouku, Kyoto, 606-8502, Japan
 4. Extreme Light Infrastructure-Nuclear Physics (ELI-NP) and Horia Hulubei National Institute for R&D in Physics and Nuclear Engineering (IFIN-HH), 30 Reactorului St., P.O. Box MG-6, RO-077125, Bucharest-Magurele, Judetul Ilfov, Romania
 5. National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, 409 Atomistilor, P.O. Box MG-36, 077125, Magurele, Judetul Ilfov, Romania
- DOI: 10.1007/JHEP12(2021)108

【背景】

電子、原子核等、私たちの身の回りの物質や高エネルギー宇宙線や加速器の中で生成される粒子群だけでは、説明できない物質形態が宇宙には存在していることが知られています。これらの未知物質を一般に暗黒物質と呼びます。宇宙観測から重力の窓を通じてこれらの存在は間接的に示されていますが、直接的にその正体を暴くことは難しいとされています。そこで、光子と光子を真空中で衝突させ、これら暗黒物質の有効な候補となるアクシオンの粒子を、実験室で直接的に生成し、同時に2つの光子への崩壊を誘導して観測する手法を提案しました^[3,4]。



【研究成果の内容】

上図を用いて本探索原理を説明します。一例として、真空中で緑のレーザービームを集光することを考えます。すると、そのビーム内で起こる準平行光子-光子衝突において暗黒物質となり得る未知粒子(黒玉)の生成と崩壊を介した散乱が起こり得ます。この時、赤のレーザービームも同じ時空間中であらかじめ混合しておくこと、長寿命の暗黒物質の光への崩壊を誘導できます。赤いレーザー光で誘導する場合、エネルギー・運動量保存の関係から青い光を信号として利用できます。本探索では、真空容器内に残余する原子が最大の背景事象を作るため、真空容器内圧力を徐々に下げながら、信号光の有無を検証しました。その結果、大気圧の10万分の1以下で残余原子からの寄与が消え失せ、それよりも更に低い圧力では、信号光が見えない観測結果を得ました。この観測結果から、未知粒子の2光子への結合定数と未知粒子質量に対する棄却領域を提示することが可能となりました。

【今後の展開】

本研究は、世界最高強度級のレーザーを有する欧州連合内ルーマニアに建設された Extreme-Light-Infrastructure 原子核部門 (ELI-NP)^[5] を拠点とする研究者らとの国際共同研究であり、本論文にある京都大学化学研究所 (ICR) 内のレーザー^[6] を用いた予備的探索の経験を基に、設計・製作された ELI-NP における探索系への拡張可能性を、共同探索第一弾として示したものです。イタリアの地下施設でアクシオンの粒子が太陽から飛来している可能性を示す兆候が公表されました^[7]。この兆候から推定されるアクシオン質量が 0.1 電子ボルトから数十電子ボルト付近であるため、同程度の光子エネルギーを有するレーザービームで探索するのが理にかなっています。本研究のように実験室で直接アクシオンを光から作り出して壊す以上に明瞭に正体を暴ける方法は他にはありません。本手法は、レーザー光を高強度化することにより、今後飛躍的に感度が向上すると期待され^[8]、宇宙全体のエネルギー密度収支の 22% を占める暗黒物質が部分的に解明される日は、それほど遠くないかもしれません。

【参考資料】

[1] Search for Axion-like Particles via optical Parametric effects with High-Intensity lasers in Empty Space の略称。チタン-サファイア結晶は、広く高強度レーザーの増幅媒体であるため実験の心臓部となります。本実験は、複数の高強度レーザー施設を渡り歩く国際共同探索であるが故に、SAPPHIRES の名を冠しています。

[2] 南部・ゴールドストーンらは自発的対称性の破れに伴う零質量のボゾン (NGB) の存在を予見しました。NGB は様々な要因により、実世界では厳密に零質量とはならず有限質量の擬 NGB になります。強い相互作用 (QCD) の荷電共役・パリティ (CP) 変換の保存性を満たすために要請されるアクシオン粒子は、Peccei-Quinn (PQ) 対称性の自発的破れに伴う擬 NGB です。アクシオンは、QCD 特有の真空相転移における擬 NGB 化に伴い実質量を得ます。しかし、その質量が実際どこに来るのかは、実測するまでは分かりません。アクシオンは、上記、素粒子標準模型内の QCD の根本性質を説明する上で、素粒子論的に強く望まれる粒子ですが、結果的に、暗黒物質をも自然に説明できる強固な理論的背景をもつ未発見粒子です。

[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, JHEP 09 (2020) 095

[5] <http://www.eli-np.ro>

[6] <http://laser.kuicr.kyoto-u.ac.jp/index.html>

[7] 日本経済新聞 2020年8月23日「宇宙の謎解明 粒子を発見？」サイエンス 26面の記事。原著 E. Aprile et al., **Observation of excess electronic recoil events in XENON1T**, Phys. Rev. D 102, 072004

[8] Kensuke Homma, Yuri Kirita and Fumiya Ishibashi, **Perspective of Direct Search for Dark Components in the Universe with Multi-Wavelengths Stimulated Resonant Photon-Photon Colliders**, Universe 2021, 7(12), 479

【謝辞】 本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業基盤研究(A)「レーザー誘導共鳴散乱による XENON1T 超過事象のアクシオンの解釈の検証(課題番号: 21H04474、研究代表者:本間謙輔)」、同基盤研究(B)「真空内四光波混合による sub-eV 暗黒場の高感度探索(課題番号:17H02897、研究代表者:本間謙輔)」、および、京都大学化学研究所共同利用・共同研究課題提案型研究(課題番号: 2021-88、2020-85、2019-72 研究代表者:本間謙輔)などの支援を受けて行いました。

【お問い合わせ先】

<p>【研究に関すること】 広島大学大学院先進理工系科学研究科物理学プログラム 准教授 本間 謙輔 TEL:082-424-7375(不在の場合、下4桁7370) E-mail: khomma@hiroshima-u.ac.jp</p> <p>【報道に関すること】 広島大学財務・総務室広報部 広報グループ TEL: 082-424-3749 FAX: 082-424-6040 E-mail: koho@office.hiroshima-u.ac.jp</p>

発信枚数：A4版 4枚(本票含む)