

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17629

研究課題名(和文) X線自由電子レーザーを用いた光子・光子散乱の測定

研究課題名(英文) Photon-photon scattering experiment using XFEL

研究代表者

山崎 高幸 (Yamazaki, Takayuki)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：40632360

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：SACLAのX線自由電子レーザーをLaue型ビームスプリッターを用いて分岐・交差させることで光子・光子散乱実験を行った。光子・光子散乱は観測できなかったが、X線領域における光子・光子散乱断面積に対し世界で最も厳しい制限を与えた。この結果はPhys. Lett. B 763 (2016) 454-457に掲載された。

光子・光子散乱を観測するため、X線自由電子レーザーと高強度近赤外レーザーを用いることでシグナル量を大幅に増加させる実験手法を考案した。本測定に向け、10 μ m程度に集光したレーザーどうしを空間的・時間的に衝突させる光学系を開発した。

研究成果の概要(英文)：I have searched for photon-photon elastic scattering at SACLA using a Laue-case beam splitter. No evidence of x-ray photon-photon scattering was observed, but the most stringent limit on the scattering cross section in the x-ray region was obtained. This result is published in Phys. Lett. B 763 (2016) 454-457.

Collision of an x-ray free electron laser and a high power near-infrared laser expects a much larger cross section of photon-photon scattering and is a new promising method to observe photon-photon scattering. I have developed a optical system to focus both lasers to 10 μ m focal spot and collide them spacially and temporally.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 X線

1. 研究開始当初の背景

光子は電荷を持たず、Maxwell 方程式が線形であることから、光子・光子散乱は古典的には起こらない。しかし、量子電磁力学 (QED) によれば、仮想電子のループを介して光子どうしが相互作用し、散乱を起こす (真空の非線形性)。特に実光子どうしの光子・光子散乱を直接測定しようという試みが 1930 年代から現在に至るまで断続的に行われてきた (図 1) が、QED で予言される散乱断面積は $\approx 7.3 \times 10^{-66} (h [eV])^6 [cm^2]$ (h は実験で用いる光子の重心系エネルギー) と極めて小さく、未だ観測されていない。

従来は可視光および近赤外レーザーを用いて光子・光子散乱の探索が行われていた。しかし光子の重心系エネルギーが $O(1) eV$ と低いため、QED で予言される散乱断面積が $\sim 7.3 \times 10^{-66} [cm^2]$ と極めて小さかった。この問題を解決すべく、可視光に比べ 4 桁高い光子エネルギーを持つ X 線自由電子レーザー (XFEL) を用いることで散乱断面積を 24 桁向上させた実験が 2014 年に初めて行われ、QED 理論値まであと 19 桁に迫る感度で探索がなされた。

XFEL は 2010 年代に供用が始まった新たなデバイスであり、その性能は日進月歩で向上している。また、XFEL 施設において XFEL と高強度近赤外レーザーとの同時利用などの設備の充実が進んできている。本研究は XFEL という新たな目を最大限に活用し、世界最高感度での光子・光子散乱の探索、さらには初観測を目指す。

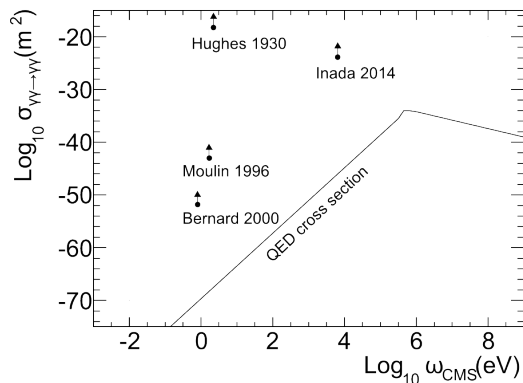


図 1: 過去に行われた光子・光子散乱実験で得られた散乱断面積の上限値 (矢印付きの点) および QED 理論値 (曲線)

2. 研究の目的

本研究は、X 線自由電子レーザーを用いて散乱断面積の大きな領域で光子・光子散乱実験を行うことで、実光子どうしの散乱を世界で初めて観測することを目的としている。さらに、散乱実験における光子の重心系エネルギー近傍の質量を持ち光子と結合するアクシオンなどの未知粒子の探索も行う。

3. 研究の方法

X 線自由電子レーザー施設 SACLA において実験を行う。SACLA からの 5×10^{11} photons/pulse の X 線ビーム (10keV) をビームスプリッターで分岐・交差させる (図 2)。X 線どうしの光子・光子散乱の結果として生じる光子はブースト軸上に入射 X 線より高いエネルギーを持って放出される。この光子を半導体検出器で測定することで、入射光子由来のバックグラウンドを除去することが可能である。

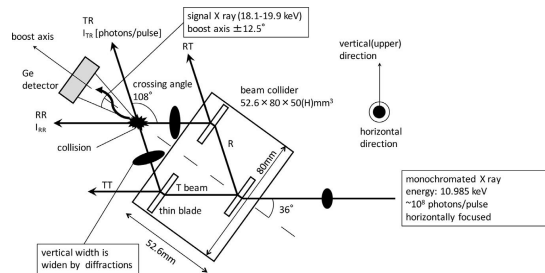


図 2: Si 単結晶製の一体型 X 線ビームスプリッターを用いた光子・光子散乱実験セットアップ

また、さらなる感度向上を目指し、新たな実験手法の開発を進める。Bragg 型ビームスプリッターやモザイク結晶などの X 線光学素子、SACLA の最新の実験設備 (SPRING-8/SACLA 相互利用施設や、XFEL と高強度レーザーの同時利用施設 (図 3)) の利用を比較検討しつつ世界初の光子・光子散乱の観測を目指す。

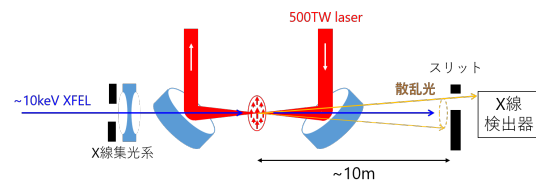


図 3: XFEL と高強度レーザーの同時利用施設を用いた光子・光子散乱実験の概念図

4. 研究成果

X 線を用いた光子・光子散乱実験は 2014 年に初めて行われたが、この際に X 線自由電子レーザーを分岐・交差させるために利用された Laue 型ビームスプリッターは回折効率が低いという問題があった。これを改善するため 0.2mm 厚という薄さの Laue 型ビームスプリッターを新たに開発し、さらに SACLA の性能 (パルスエネルギー、バンド幅、繰り返しレート) の向上により 2014 年の実験に比べ 3 桁高いルミノシティで光子・光子散乱を探索した。ルミノシティの向上に伴いバックグラウンド事象も増加するが、シグナルのみを取り出すビームコリメーターを最適化することでバックグラウンドフリーな測定を行った。光子・光子散乱に起因するシグナルは観測できなかった (図 4) が、X 線領域にお

る光子・光子散乱断面積に対し過去の実験に比べ3桁厳しい上限値 ($<1.9 \times 10^{-27} \text{ m}^2$) を与えた。この結果は Phys. Lett. B 763 (2016) 454-457 に掲載された。

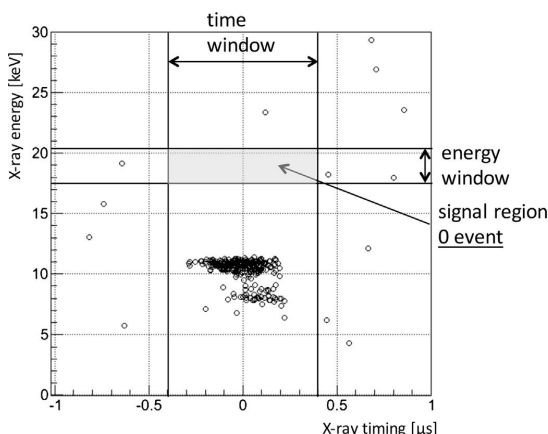


図4: 高効率 Laue 型ビームスプリッターを用いた光子・光子散乱実験において X 線検出器で測定された光子の光子エネルギーおよびタイミング分布。光子・光子散乱が起きた場合にシグナルが検出される領域 (signal region) 内の事象は観測されなかった。

さらなる感度向上を目指し当初予定していた Bragg 型ビームスプリッターおよび四光波混合だけではなく、SACLA の二色発振やモザイク結晶の利用、さらには XFEL と高強度レーザーを同時利用する実験など様々なセットアップの比較検討を行った。その結果、XFEL と SACLA にインストール中の PW 級レーザーとの光子・光子散乱実験 (図 3) が最も優れているという結論を得た。

このセットアップでは XFEL は衝突後に約 $30 \mu\text{rad}$ 程度方向を変えるため、スリットを用いてバックグラウンドと分離する。XFEL と高強度レーザーとの空間的・時間的な交差が完璧であれば、2.5 日間のビームタイムでシグナル数は $O(10^4)$ に達する。しかし、Laue 型ビームスプリッターを用いたこれまでの手法と異なりビーム同士の空間的・時間的な交差は保証されない。そのため新たに XFEL と高強度レーザーとの衝突光学系を開発し、 $10 \mu\text{m}$ 程度の集光サイズでの衝突手法を確立した。

空間的には衝突点に亜鉛薄膜を設置し、高強度レーザーによって形成されたクレーターと XFEL によって形成された穴との位置をレーザー顕微鏡を用いて詳細に解析することで交差を保証している。図5に実際に SACLA で衝突実験を行った際に得られたレーザー顕微鏡像を示す。

また、SACLA で標準的に使われている手法によって 1ps 程度の精度で XFEL とレーザーとのタイミング調整が可能であることを確認した。GaAs 薄膜に XFEL とレーザーが同時に入射すると、XFEL によるプラズマ形成によりタイミングが一致している場合のみレ

ザーの透過率が減少することを利用している。

今後は 2017 年度中に SACLA において供用開始が予定されている XFEL と PW クラスレーザーとの同時利用施設において光子・光子散乱実験を行う。まずはすでに達成した $10 \mu\text{m}$ 集光における X 線とレーザーとの衝突手法を用いて世界最高感度で光子・光子散乱を探索する。さらに $1 \mu\text{m}$ 集光での衝突技術を開発することで世界初の光子・光子散乱の観測が可能になる。

XFEL と高強度レーザーを用いた真空の非線形効果の探索実験は European XFEL の HIBEF プロジェクトなどでも提案され準備研究が進められているが、本研究は鍵となる XFEL と高強度レーザーとの衝突技術においてすでに $10 \mu\text{m}$ レベルで衝突させる手法を確立しており、これは European XFEL の稼働とともに競争の激化が予想される中での大きなアドバンテージである。

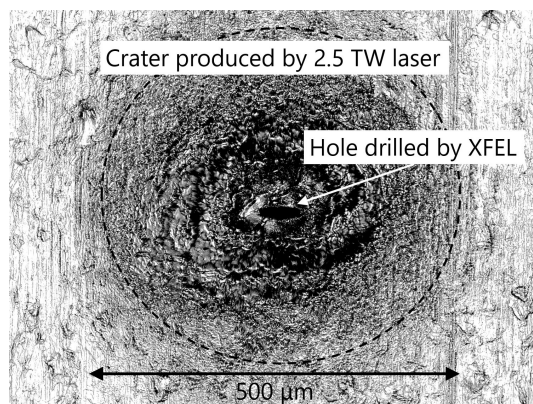


図5: XFEL と高強度レーザーの位置アライメントに用いた厚さ $20 \mu\text{m}$ の亜鉛薄膜のレーザー顕微鏡写真

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2件)

T. Yamaji, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai, T. Kobayashi, K. Tamasaku, Y. Tanaka, Y. Inubushi, K. Sawada, M. Yabashi, and T. Ishikawa, "An experiment of X-ray photon-photon elastic scattering with a Laue-case beam collider", Physics Letters B, 査読有, Vol. 763, 2016, 454-457
DOI:10.1016/j.physletb.2016.11.003

山崎高幸, 山道智博, 稲田聡明, "X 線自由電子レーザーを用いて真空を探る", 高エネルギーニュース, 査読無, Vol. 34, 2015, 97

<http://www.jahep.org/hepnews/2015/15-2-3-XFELphoton.pdf>

〔学会発表〕(計 8 件)

清野結大、山崎高幸、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、藪内俊毅、富樫格、犬伏雄一、大和田成起、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、「X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 03 月 18 日、大阪大学(大阪府豊中市)

山崎高幸、清野結大、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、藪内俊毅、富樫格、犬伏雄一、大和田成起、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、「X 線自由電子レーザー施設 SACLA における高強度レーザーを用いた真空回折の探索」、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年 03 月 18 日、大阪大学(大阪府豊中市)

Y. Seino, T. Yamazaki, T. Inada, T. Namba, S. Asai, T. Yabuuchi, T. Togashi, Y. Inubushi, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa, "Search for Vacuum Diffraction Using X-ray Free Electron Laser SACLA", 9th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms, 2017 年 01 月 10 日, 京都大学(京都府京都市)

山崎高幸、清野結大、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、藪内俊毅、富樫格、犬伏雄一、大和田成起、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、「X 線自由電子レーザー施設 SACLA における真空複屈折の探索」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 09 月 22 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

清野結大、山崎高幸、稲田聡明、難波俊雄、浅井祥仁、藪内俊毅、富樫格、犬伏雄一、大和田成起、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、「X 線自由電子レーザー施設 SACLA での真空回折の探索」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 09 月 22 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

稲田聡明、清野結大、山崎高幸、難波俊雄、浅井祥仁、藪内俊毅、富樫格、犬伏雄一、大和田成起、玉作賢治、矢橋牧名、石川哲也、「X 線自由電子レーザー施設 SACLA での真空回折の探索」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 09 月 22 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

山道智博、稲田聡明、山崎高幸、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、玉作賢治、田中義人、犬伏雄一、澤田桂、矢橋牧名、石川哲也、高橋忠幸、渡辺伸、佐藤悟朗、「SPring-8/SACLA における光子光子散乱の探索」、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 09 月 22 日、宮崎大学(宮崎県宮崎市)

山道智博、稲田聡明、山崎高幸、難波俊雄、浅井祥仁、小林富雄、玉作賢治、田中義人、犬伏雄一、澤田桂、矢橋牧名、石川哲也、高橋忠幸、渡辺伸、佐藤悟朗、「SPring-8/SACLA における光子光子散乱

の探索」、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 03 月 22 日、東北学院大学(宮城県仙台市)

〔その他〕

ホームページ等

http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/tabletop_experiments/Home.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 高幸 (YAMAZAKI, Takayuki)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：40632360