

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02879

研究課題名(和文) 高強度レーザー場と高輝度X線を用いた真空の巨視的構造の探索

研究課題名(英文) Search for Vacuum Polarization using High Power Laser and XFEL

研究代表者

山崎 高幸 (Yamazaki, Takayuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教

研究者番号：40632360

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：SACLAのXFELと同期する大強度レーザー(0.6TW)を約 $2\mu\text{m}$ まで集光することにより生成した $5\times 10^{18}\text{W/cm}^2$ の高強度電磁場(磁場にして15,000T相当)を用いて真空を励起し、マクロな屈折率変化をXFELをプローブとして探索した。これは従来数テスラ程度の磁石を用いて行われてきた実験とは全く異なる手法である。2019年のビームタイムにおいて、高強度レーザーを波面補償光学系を用いて回折限界近くまで集光し、Si製ビームシェイパーを用いて角度発散の増加を抑制しながらXFELを集光したプロトタイプ実験を行い、真空回折実験として量子電磁力学の予想にあと18桁まで迫る世界初の結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、LHC実験におけるヒッグス粒子の発見が単なる新粒子の発見ではなく真空の内部に潜むスカラー場を初めて実証したものであることに着目し、高強度電磁場によって真空を励起することにより真空内部を探るものである。同様の実験は従来、磁石を用いて行われてきたが、本研究では近年発達が目覚ましい大強度レーザーを用いることで磁石よりはるかに協力的な電磁場を発生させ、それと同期する高輝度X線自由電子レーザー(XFEL)という小さな構造を探るのに適したプローブを用いる全く新たな実験手法を確立した。これは今後SACLAの500TWレーザーや世界の大強度レーザー施設における同種の実験への先鞭をつける成果である。

研究成果の概要(英文)：The vacuum was excited by an intense electromagnetic field of  $5e18\text{W/cm}^2$  (equivalent to a magnetic field of 15,000 T) generated by focusing a high intensity laser (0.6 TW) synchronized with the SACLA XFEL to about  $2\mu\text{m}$ , and macroscopic refractive index changes were explored using the XFEL as a probe. During the 2019 beamtime, the intense laser was focused near the diffraction limit using wavefront-compensating optics, and the XFEL was focused using a Si beam shaper to suppress the increase in angular divergence. We performed a prototype experiment and obtained the world's first result of vacuum diffraction experiment that is 18 orders of magnitude closer to the prediction of quantum electrodynamics.

研究分野：ミュオン科学

キーワード：素粒子実験 X線 高性能レーザー

### 1. 研究開始当初の背景

2012年のヒッグス粒子の発見は、素粒子物理学の標準理論の完成と同時に真空が「空」ではなくヒッグス場というスカラー場で満たされた空間であることを明らかにした。標準理論を超える物理においては、アクシオン場・インフラトン場・ダークエネルギーなど様々な場が真空を満たしていることを予言しており、真空そのものの研究が重要さを増した。真空の構造は通常感知することができないが、LHC 実験などのように高エネルギーを与えることで真空を励起することで探索することが可能となる。もう一つの方法として、真空に電磁場を印加することによりマクロに真空を励起させ屈折率などの性質の変化を調べる手法が存在する。電磁場を印加した方向に応じて真空の屈折率に異方性が生じる (Opt. Commun. 267, 318 (2006)) ため、真空複屈折や真空回折などの現象がプローブ光の偏向状態や運動量変化として観測可能となる。

特に真空複屈折は磁石を用いて真空を励起し、プローブとしてレーザー光を用いた探索実験が 1990 年代から行われてきたが、いまだ観測には至っていない。しかし、この実験では図 1 に示すように Axion Like Particle (ALP) などの未知粒子が存在した場合に真空複屈折がエンハンスされると予想されており、これらの粒子に対し強い制限を与えている。磁石を用いた手法では、数テスラ程度の磁場によって真空を励起するため、 $10^{-23}$  レベルの極めて小さい真空複屈折を近赤外レーザーをプローブに用いて高精度に測定する必要があり、S/N 比が悪くノイズ対策が極めて困難である。

近年のレーザー技術の発展により大強度レーザーを集光することによって高強度電磁場を発生させ、従来の実験よりも 12 桁大きい真空の屈折率変化を引き起こすことが可能になった。さらに、SACLA などの高輝度 X 線自由電子レーザー (XFEL) が誕生したことにより、屈折媒質中における光路長  $L/\lambda$  ( $L$  は媒質の長さ、 $\lambda$  はプローブ光の波長) を従来に比べ 4 桁エンハンスすることが可能となった。本研究では、この全く新たなアプローチで真空のマクロな性質を探索する。

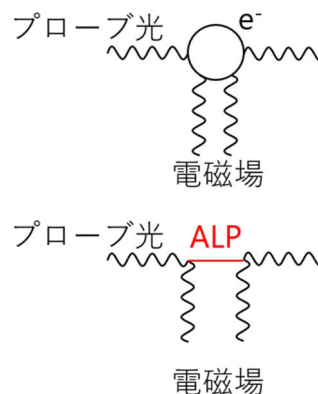


図 1: 電磁場による真空偏極

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、大強度レーザーを集光することによる高強度電磁場によって真空を励起し、そのマクロな構造の変化を探索することである。PW クラスの近赤外レーザーを回折限界である  $1\mu\text{m}$  まで集光すると  $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$  (磁場にして  $10^6\text{T}$ ) という極めて強い電磁場が得られる。この高強度場は真空中に潜む仮想粒子や未知粒子と相互作用することで真空を編曲させ、マクロなスケールにおいて真空の屈折率を変化させる。X 線自由電子レーザー (XFEL) をプローブ光として用いることで、真空の屈折率勾配を真空回折 (プローブ光の運動量変化) として世界で初めて観測し、真空複屈折 (プローブ光の偏光の変化) を世界最高感度で探索することを目指す。

### 3. 研究の方法

真空回折・複屈折探索実験のセットアップを図 2 に示す。近赤外レーザーを回折限界である  $\mu\text{m}$  レベルに集光することで得られた高強度電磁場で真空を偏極し屈折率変化を生じさせる。ここにプローブ光として XFEL を通すと、真空回折によって X 線の角度発散が増加し、真空複屈折によって直線偏光から楕円偏光への変化が発生する。角度発散の変化は回折した X 線のみをスリットで切り出すことで測定し、偏光の変化は偏光子を用いて測定する。

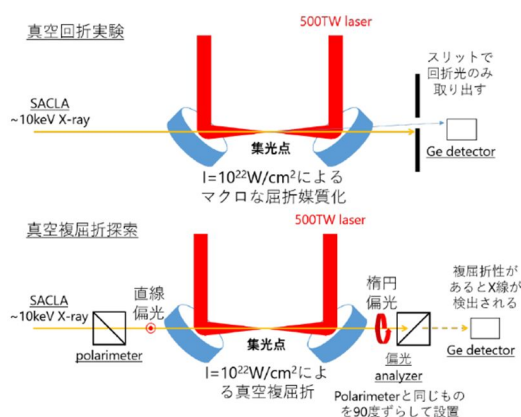


図 2: 真空回折・複屈折探索実験セットアップ

### 4. 研究成果

SACLA の XFEL と同期する 0.6TW レーザーを用いて世界で初めて真空回折実験を行い、真空偏極を探索する新たな手法を確立した。本研究では、TW クラスレーザーを波面補償光学系を用いることで約  $2\mu\text{m}$  まで集光し (図 3)、かつ新たに開発した X 線ビームシェイパー (図 4) によって XFEL を角度発散を  $11\mu\text{m}$  まで抑制しつつガウスビーム集光して実験を行った。これらのビームどうしの時間的・空間

的アライメント手法も確立し空間的には XFEL のサイズ (  $\sim 10 \mu\text{m}$  ) より十分小さな数  $\mu\text{m}$  の精度、時間的には GaAs 基板のレーザーに対する透過率が XFEL の照射により変化することを利用して  $\pm 160\text{fs}$  ( レーザーの集光範囲が  $\pm 300\text{fs}$  ) の精度を達成した。

2019 年に 96 時間のビームタイムを獲得し、SACLA の実験ハッチ 2 で真空回折の探索実験を行った。レーザーの ON/OFF、タイミングを変化させてバックグラウンドを除去して回折信号を探索したが、有意な信号は観測されなかった。しかし、量子電磁力学 ( QED ) の予想に対し  $2.3 \times 10^{18}$  ( 90% C.L. ) まで迫る制限を与えることができた。本研究で確立した実験手法を用いることで、将来的には SACLA で 2018 年から共用運転が開始されている 500TW レーザーと XFEL を用いて実験を行い、さらに現在開発中の X 線偏光子による BG 抑制を行うことで世界初の真空回折の観測が可能である。

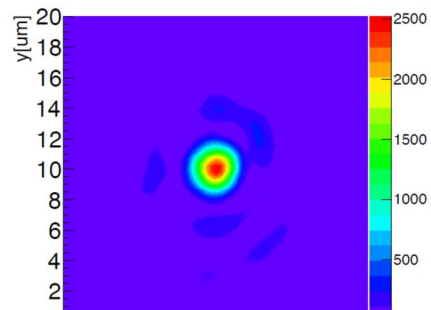


図 3 : 1.9  $\mu\text{m}$  まで集光された 0.6TW レーザー

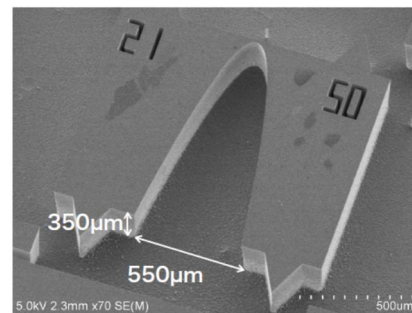


図 4 : Si 製 X 線ビームシェイパーの SEM 画像

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Y. Seino, T. Inada, T. Yamazaki, T. Namba, S. Asai	4. 巻 2020
2. 論文標題 New estimation of the curvature effect for the X-ray vacuum diffraction induced by an intense laser field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073C02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa084	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 T. Inada, T. Yamazaki, T. Yamaji, Y. Seino, X. Fan, S. Kamioka, T. Namba, S. Asai	4. 巻 7
2. 論文標題 Probing Physics in Vacuum Using an X-ray Free-Electron Laser, a High-Power Laser, and a High-Field Magnet	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 671 ~ 671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app7070671	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 山崎 高幸, 清野 結大, 稲田 聡明, 難波 俊雄, 浅井 祥仁	4. 巻 45
2. 論文標題 XFELの高輝度性を利用した真空の探索	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 488 ~ 492
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 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, 玉作賢治, 井上伊知郎, 大坂泰斗, 矢橋牧名, 石川哲也, 川合健太郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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, 玉作賢治, 井上伊知郎, 大坂泰斗, 矢橋牧名, 石川哲也, 川合健太郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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, 玉作賢治, 井上伊知郎, 大坂泰斗, 矢橋牧名, 石川哲也, 川合健太郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 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, 玉作賢治, 井上伊知郎, 大坂泰斗, 矢橋牧名, 石川哲也, 川合健太郎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Seino, T. Yamazaki, T. Inada, T. Namba, S. Asai, T. Yabuuchi, T. Togashi, Y. Inubushi, K. Tamasaku, M. Yabashi, T. Ishikawa
2. 発表標題 Search for Vacuum Diffraction Using high power laser and X-ray Free Electron Laser SACLA
3. 学会等名 Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (LNPC '17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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, 玉作賢治, 井上伊知朗, 大坂泰斗, 矢橋牧名, 石川哲也
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017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
連携研究者	玉作 賢治  (Tamasaku Kenji)  (30300883)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・チームリーダー   (82401)	
連携研究者	犬伏 雄一  (Inubushi Yuichi)  (40506250)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・研究員   (84502)	
連携研究者	藪内 俊毅  (Yabuuchi Toshinori)  (20397772)	国立研究開発法人理化学研究所・放射光科学総合研究センター・研究員   (82401)	
連携研究者	富樫 格  (Togashi Tadashi)  (60415239)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・XFEL利用研究推進室・研究員   (84502)	

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