

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01907

研究課題名(和文) 高強度レーザーの組み合わせによる真空の構造の解明

研究課題名(英文) Study of structures of vacuum by using combinations of high intensity lasers

研究代表者

難波 俊雄 (Namba, Toshio)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：40376702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：真空に潜む場の研究を2種類の手法でおこなった。一つは高強度場の手法であり、大強度レーザーを集光することで場を介して真空の屈折率を変化させ、X線の回折事象を探索する。もう一つは硬X線と軟X線を正面衝突させる手法である。前者の手法は、0.6 TWのポンプレーザーを用いて実験をおこない、残念ながら回折事象は見つからなかったが、真空回折に対して世界初の上限值を得ることができた。後者の手法は、軟X線の取り回しについて検討し、ミラーを組み合わせることで硬X線の実験ハッチまで導く経路を策定した。また、予想されるシグナル分布を計算し、それに基づいて検出器の設計と製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に真空は何も無い空間と考えられ、今まで学問の対象としてあまり見られてこなかった。一方で場の量子論は真空中にいろいろな場が満ちていることを予言する。この研究はそのような真空の見方を変え、空間のパラダイムを変えようとする研究である。残念ながら本研究では新たな場の発見までは至らなかったが、将来の大強度実験による場の発見への道筋を示した。また、本研究で得た技術、特にX線やレーザーの位置やタイミングを調整する手法は、他の光学実験にも幅広く応用することができる。

研究成果の概要(英文)：Various fields underlying in vacuum are searched by this research with two methods.

One method is a search for vacuum diffraction caused by a high intensity laser field. This search has been performed with a 0.6TW fs laser at SACLA XFEL beamline. Unfortunately, no vacuum diffraction signals are observed, but we have obtained the first upper limit for the vacuum diffraction.

Another method is a photon-photon collider. A beamline to collide XFEL + SXFEL at SACLA has been designed with mirrors. The event distributions of collided photons have been also calculated. Based on this calculation, a detector for the collider has been designed and constructed.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子実験 真空 レーザー X線自由電子レーザー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代の素粒子物理学は場の量子論によって記述される。場の量子論は、真空を、単なる何も無い空間ではなく、いろいろな場が遍在しており、仮想的な粒子が常に生成と消滅を繰り返している複雑な状態として記述している。この描像をドラマチックに示したのが、2012年のヒッグス粒子の発見である。真空中において、仮想的なヒッグス場が絡みつくことによりすべての粒子に質量を与えているという描像は、われわれの世界観を変えうるものである。そして、真空に潜んでいるのはヒッグス場だけではない。宇宙初期のインフレーションを起こした場は、今でも正体不明である。また、宇宙は現在も加速膨張していると考えられているが、この原因のダークエネルギーの正体も全く見当がつかない。素粒子物理の標準理論を超えたアクシオン模型では、アクシオン場の存在を予言し、暗黒物質の有力な候補となっている。これら未知の場の他に、量子電磁気学の場も存在する。量子電磁気学は、真空中には仮想電子対が遍在することを予言する。強電磁場下において仮想電子対は偏極し、実光子に対して影響を与えられ考えられるが、このような極限現象はまだ観測されていない。このように複雑に入り組んだ「真空」の構造を研究する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、真空に潜む場を探索し、その構造を明らかにすることである。いままでの素粒子物理学が粒子とその相互作用を研究してきたのに対し、粒子の容れ物である真空を対象にして実験をおこなう。量子電磁気学の予言する真空での光子の非線形相互作用を検証するとともに、真空に潜む未知の場を探索する。このような実験は、強磁場と赤外レーザーを用いた実験が数件おこなわれているが、世界的にもあまり多くは無い。本研究は、X線自由電子レーザーを用いて、2種類の方法(高強度場の物理的手法とコライダー実験の手法)を検討しており、世界唯一の方法となっている。また、感度としても、世界最高の感度となる。

3. 研究の方法

本研究の対象は真空である。量子電磁気学の予言する非線形効果(光子どうしの相互作用)を2種類の方法で探索し、測定する。それぞれ量子電磁気学の予言する値とのズレを見ることで、未知の場の存在を検証する。以下の2種類の方法を検討する。

(1)ポンプレーザー + SACLA X線プローブ

高エネルギー密度科学の手法を用いる。高強度レーザーを集光すると、集光点では大強度の電磁場が生じる。CPAに代表されるような近年のレーザー技術の進展とともに、高強度場は $\sim 10^{22} \text{W/cm}^2$ への到達が可能となり、仮想電子対を経由して引き起こされる真空の歪みが観測可能なレベルとなってきた(屈折率の異方性、 $n \sim 10^{-11}$)。ただし、レーザーの集光サイズは $\sim \mu\text{m}$ と小さいため、波長の短いX線で歪みをプローブすることで、真空の歪みによる真空回折を探索する。0.6TWのポンプレーザーを利用して真空回折の予備的な実験をおこなった後、その結果をもとに500TWのポンプレーザーを利用するスケールアップを検討する。

(2)SACLA SXFEL + XFEL 衝突

X線自由電子レーザー SACLAには、2本の異なる自由電子レーザーがある。1本は、X線の自由電子レーザーであり、ビームライン2とビームライン3に振り分け運転をおこなっている。もう1本、全く独立なビームライン1として、軟X線の自由電子レーザーがある。ビームライン1のSXFELと、ビームライン2のXFELを衝突させることで、世界初のX線領域での光子・光子コライダーを構築する。ビームラインの設置可能デザインについて検討するとともに、予想されるシグナル分布を計算し、検出器のデザイン、製作をおこなう。

4. 研究成果

2つの方法に分けて成果を述べる。

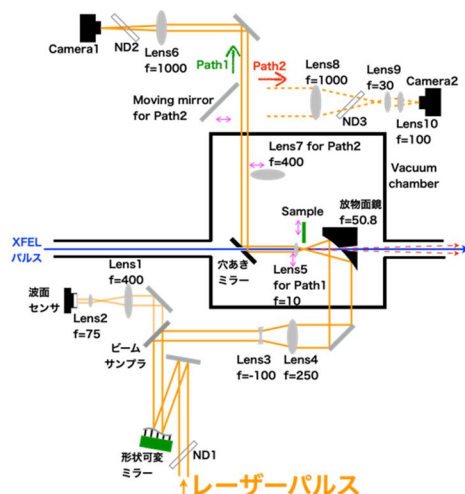


図 1 0.6 TW ポンプレーザーの取り回し

(1) ポンプレーザー + SACLA X線プローブ

0.6 TW fs レーザーと SACLA 硬 X 線を対向で衝突させ、真空回折データを取得した。データ解析にあたっては、衝突を時間的・空間的に保証することに重点を置き、図 1 に示すような取り回しでポンプレーザーを硬 X 線に集光衝突させた。空間的な位置は $(\pm 4.2 \mu\text{m}, \pm 3.7 \mu\text{m})$ の範囲で、時間的には $\pm 160 \text{ fs}$ の範囲で衝突したことが確認できた。得られた真空回折データを図 2 に示す。ポンプレーザーによる真空回折が生じていた場合、時間が一致する timing window 内に赤い色で示した形状のシグナルが観測されるはずであるが、そのような超過は観測されなかった。このことから、量子電磁気学の予言する真空回折シグナルに対して、 2.3×10^{18} 倍以下 (信頼区間 95%) という上限値を得ることができた。この結果は世界で初めての真空回折シグナルに対する上限値である。また、この結果から、スケールアップにあたってはオリジナルビームの X 線によるバックグラウンド除去が非常に重要であることがわかった。このため、シリコン (5, 1, 1) 結晶を利用した X 線偏光子を 2 台組み合わせ合わせてバックグラウンド除去をおこなう手法を開発した。真空回折したイベントは偏光も変化するため、偏光子の消光比の分だけバックグラウンドを排除できる。8 回反射を利用したペアを実測し、 10^{-7} 程度の高い消光比が確認できた。

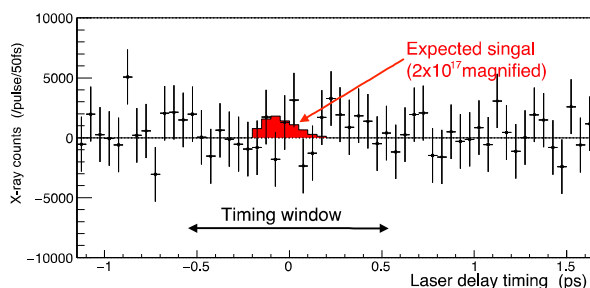


図 2 0.6 TW ポンプによる真空回折シグナル探索実験の結果

(2) SACLA SXFEL + XFEL 衝突

SXFEL と XFEL を衝突させるためのビームの取り回しを検討した結果、SXFEL を 6.5° (全反射ミラー) + 75° (Mo/Si 多層膜ミラー) + 10° (全反射ミラー) の 3 枚のミラーを使用して導くことで、ASCLA 実験ハッチ 4c の後方から導入し、正面衝突させることが可能であることがわかった。この組み合わせでも、50% 近い SXFEL のスループットが期待できる。

一方、予想されるシグナルの分布についても計算が進んだ。10 keV の硬 X 線と 1 keV の軟 X 線を衝突させるため、実験室系においては硬 X 線の進行方向に大きくブーストされたシグナル

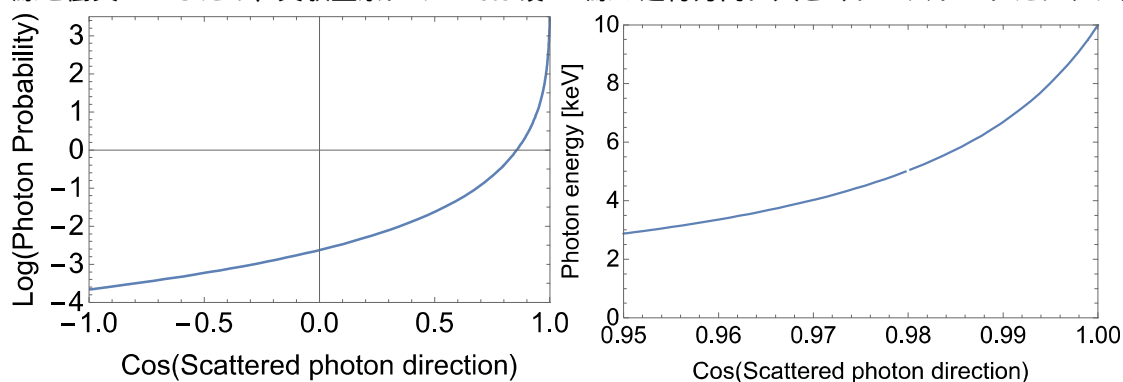


図 3 XFEL + SXFEL 衝突時の散乱イベント分布(左)と散乱光子のエネルギー(右)

となる。図 3(左) に散乱光子のイベント分布の対数を示す。横軸は、硬 X 線の進行方向に対する散乱角の余弦である。イベントの大部分は $\cos(\text{散乱角}) > 0.98$ ($=11.4^\circ$) に分布していることがわかる。また、その時の散乱光子のエネルギーを図 3(右) に示す。エネルギーは散乱角によって一意に決まり、 $\cos(\text{散乱角})=0.98$ の時に 5.0 keV である。この計算結果から、衝突点の硬 X 線に対して下流 10cm の位置に、内径 2cm、外径 4cm の同心円状の X 線検出器を配置すれば、イベントに対して 50% (シグナルに対して 25%) の検出効率を達成できることがわかった。そのような既存の検出器として、MPCCD があるため、MPCCD を設置して衝突の調整が可能な真空容器を設計、製作した。

2 種類の方法とも真空の構造に直接迫ることができ、世界的にも非常にユニークな実験である。前者に関しては世界で初めて真空回折の上限値を得ることに成功し、レーザー大強度かによる感度向上への道筋を示した。また、後者に関しては、期間内に測定まではいたらなかったが、基礎的な計算をもとに準備をおこない、ビーム取り回しや検出器について目処をつけることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 清野結大、難波俊雄	4. 巻 51
2. 論文標題 光子回折実験による真空偏極の探索	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 308、312
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清野結大
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
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Tabletop experiments
http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp

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