

論文の内容の要旨

Search For the Vacuum Polarization using a high-field laser and an XFEL (高強度レーザーと X 線自由電子レーザーを用いた真空偏極の 探索)

氏名 清野 結大

この論文では、高強度レーザーと X 線自由電子レーザー (XFEL) を用いた新しい実験手法による真空偏極の探索実験について報告する。真空偏極は量子電磁気学で予言される、光が仮想的な荷電粒子を生成する過程である。これは量子電磁気学において、真空とは空の入れ物ではなく様々な特性をもつことを示す非常に基礎的な過程であるが、真空中においては未だに観測されていない。真空偏極の効果で電荷を持たない光同士の相互作用が可能になる。

真空偏極の探索は、量子電磁気学の検証の他にも様々な意義がある。ひとつは未知の素粒子の探索である。Axion、Axion-like particle、Milli-charged particle などの標準理論を超えた未知粒子も真空偏極の引き起こす光の相互作用に影響を与えることが示唆されているため、真空偏極の探索を通じてこれらの未知粒子を探索することができる。また、これまで検証されてこなかった高強度電磁場下での物理現象の探索という意義ももつ。高強度電磁場下では schwinger 効果や unruh 効果といった様々な物理現象が生じることが予言されている。これらの効果を計算するには高強度電磁場下での光と電子の相互作用の強さの情報が必要であるが、真空偏極の観測によってこの強さを測定することができる。

真空偏極は複数の先行実験によって探索されてきたが、そのどれもが様々な問題により実験感度が制限されてしまっている。真空偏極は光同士の散乱である光子光子散乱や、電磁場中の真空が複屈折性をもつ真空複屈折といった現象を引き起こす。これらを探索することで、真空偏極の探索が行われてきた。光子光子散乱の探索は光子数の多い高強度レーザーや XFEL を用いて行われてきた。信号の統計量が観測まで 18 桁足りないため実験感度が制限されており、こ

の手法を用いた真空偏極の観測は困難である。真空複屈折実験では、磁石の数テスラの磁場中を通過させたレーザー光に引き起こされる偏光変化を探索する。実験感度向上のため、プローブであるレーザー光を共振器によって磁場中を何度も往復させている。実験感度はグループによって様々で観測まで 2 桁から 11 桁であるが、そのどれもが共振器由来のノイズによって感度を制限されており、これ以上の感度向上が見込めなくなっている。そのため新しい実験手法の開発が求められていた。

私は真空偏極の引き起こす真空回折現象に着目し、この探索実験を考案した。真空偏極の効果で、高強度電磁場は真空の屈折率を 1 からわずかに変化させるため、真空に局所的な高強度場を印加すると真空の屈折率に勾配が生まれる。その真空を通過する光が回折する現象が真空回折である。真空回折実験では、ペタワット級の高強度レーザーを $1\ \mu\text{m}$ まで集光して生み出した高強度電磁場で真空に屈折率変化を引き起こし、そこにプローブ光として XFEL の X 線ビームを照射して X 線ビームを回折させる。信号数は真空に印加する電磁場強度の 2 乗と、プローブ光の光子エネルギーの 2 乗に比例する。高強度レーザー場は $\mathcal{O}(10^6)$ テスラと強力で、プローブ光の X 線は可視光レーザーと比べて光子エネルギーが 4 桁も大きい。そのため真空複屈折実験のように共振器を用いずとも非常に大きな信号数が期待でき、高強度レーザーと XFEL ビームのパルス同士の 1 回の衝突で $\mathcal{O}(1)$ 光子の信号が期待される。

しかしながらこの手法は、高強度レーザーと XFEL ビームのパルス同士を衝突させることが、その小ささ ($\sim 1\ \mu\text{m}$) とパルス幅の短さ ($\sim 100\ \text{fs}$) ゆえに困難だったため、これまで行われてこなかった。そのため私は、両パルスを衝突させる技術など、実験に重要な計算や実験技術の開発を行った。はじめに真空回折の回折分布の理論的な計算を行った。従来の計算には、XFEL パルスの角度発散など実際の実験上では不可避な効果が計算に含まれていなかったため、これらを考慮した実効的な回折分布の表式を導出した。これを用い、真空回折の信号を算出した。

次にレーザーを集光するための、レーザーの位相を制御する光学系を構築した。強い信号強度を得るには、レーザーを μm 級にまで集光して高強度電磁場を作り出すことが必要になる。レーザーは波面の位相が乱れていると、小さく集光することができない。そのため私はレーザー波面の位相を、波長の $1/100$ の精度で精密に制御することができる光学系を構築した。形状可変ミラーと呼ばれる、表面の形状を調整することができるミラーをレーザーの光路に導入した。形状可変ミラーの表面形状を数 nm の精度で調整することでレーザーの位相を制御し、レーザー集光像の最適化を行った。これによりレーザーを $1.9\ \mu\text{m}$ まで集光できるようになった。

バックグラウンドを抑制するための素子の開発も行った。真空回折実験の信号は大角度に回折した X 線であるため、XFEL の集光ビーム中の X 線のうち大角度をもつものがバックグラウンドとなる。この XFEL ビーム中の大角度の X 線はスリットによって除去することが通常行われるが、スリットが XFEL ビームを幾何的に回折させて新たなバックグラウンドを生み出してしまうため、バックグラウンドを十分抑制することができなく問題であった。そのため私は、幾何的な回折を起こさせずに大角度の X 線を除去できる X 線光学素子 (shaper) を発案

し、開発を行った。shaper はシリコン単結晶で作られた透過型の光学素子で、自身の厚みによる attenuation を利用して、大角度の X 線を選択的に吸収する。この shaper によって、最も大きいバックグラウンドであった XFEL ビーム中の大角度の X 線を除去することができるようになり、バックグラウンドは 3 桁減少した。

実験技術の一番の課題は、高強度レーザーと XFEL ビームの両パルスが衝突していることを、空間的・時間的に確実に保証することである。空間的な衝突を保証するには、両パルスの相対距離を精度良く測定することが重要で、その測定手法の開発を行った。開発には 15 μm の XFEL パルスと 1.9 μm のレーザーパルスが用いられた。空間的な衝突の保証には、相対距離の測定精度が XFEL パルスの大きさ以下であることが求められる。私は相対距離を確実に測定するため、両パルスの照射痕を用いた手法を考案した。衝突点に金属箔を設置し、両パルスを照射して作られる照射痕の位置を比べることで両パルスの相対距離を測定した。この手法により、15 μm の XFEL パルスより十分小さい 4 μm の精度で相対距離を測定することができ、両パルスの空間的な衝突を保証できるようになった。

両パルスの衝突を時間的に保証する手法も確立した。レーザーと XFEL ビームはどちらもパルスレーザーのため、両パルスをレーザーが集光しているタイミングで衝突させる必要がある。レーザー集光点での衝突を保証するには、レーザー集光点に両パルスが同時に照射されたタイミングを測定する必要がある。レーザーが集光されている時間 (~ 100 fs) より、使用した XFEL とレーザーのタイミングジッターの 300 fs のほうが大きかったため、同時照射のタイミングの測定に要求される精度は 300 fs であった。そのため私は、GaAs の光学的性質が高速で変化する現象を利用した。GaAs は X 線を吸収すると、レーザーに対する透明度が 100 fs 以下の速さで変化する。この現象を利用することで、両パルスがレーザー集光点に照射されたタイミングを 160 fs の精度で測定することができ、両パルスの時間的な衝突を保証できるようになった。

兵庫県にある高強度 XFEL 施設 SACLA のビームライン 3 にて、真空回折の初めての探索を行った。真空を偏極させるために 0.6-TW レーザーのレーザー場を用い、8.4 keV の XFEL ビームをプローブ光として用いた。shaper によって XFEL ビームに由来するバックグラウンドの除去を行った。またレーザーの位相を制御することで、レーザーを 1.9 μm まで集光した。開発した技術を用いてレーザーと 15 μm の XFEL の両パルスは高精度 (± 4 μm , ± 160 fs) で衝突させ、回折した X 線を探索した。有意な信号は観測されなかったが、真空回折に対して信頼区間 90% の上限値を得た。上限値は、量子電磁気学で予測される信号 X 線数 $n_{\text{QED,sum}} = (3.9_{-2.5}^{+6.1}) \times 10^{-14}$ photons に対する観測された X 線光子数 $n_{\text{xray,sum}} = (1.02 \pm 1.07) \times 10^4$ photons の比として、以下のように得た。

$$\frac{n_{\text{xrays,sum}}}{n_{\text{QED,sum}}} < 2.3 \times 10^{18} \quad (90\% \text{ 信頼区間}).$$

これにより真空回折実験による、真空偏極に対する初めての制限を得た。またこれは真空回折現象に対する初めての実験的な制限でもある。開発された実験手法や技術によって、将来の真空偏極の初観測に向けた道筋をつけることが出来た。