

FERMIのアト秒干渉計を利用した希ガス原子における光電子放出のコヒーレント制御

著者	You Daehyun
号	88
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3272号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00128525

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	YOU Daehyun	提出年	令和元年
学位論文の 題目	FERMI のアト秒干渉計を利用した 希ガス原子における光電子放出のコヒーレント制御		

論文目次

- 第1章 はじめに
 第2章 光電子放出遅延時間を測る新しい量子時計
 第3章 Ne 原子における単一光子レーザー誘起オージェ緩和

論文内容要旨

イタリアにある自由電子レーザー(FEL)施設、FERMI では空間的、かつ、時間的に完全可干渉な極端紫外 (extreme ultraviolet; EUV) 光を発生できる。多色の FEL パルスが発生して、その間の光学位相を制御することも可能である。本研究では、FERMI の位相を制御したパルスを利用して、光電子の放出に伴う遅延時間の測定と単一光子レーザー誘起オージェ緩和の観測に成功した。

光電子が放出される際に、数アト (10 の⁻¹⁸ 乗) 秒の遅延時間が生じる。遅延時間 τ は粒子が衝突する際に生じる位相変位 η と関係付けて定義される: $\tau(\epsilon) = \hbar \partial \eta(\epsilon) / \partial \epsilon$ 。ここで、 ϵ は光電子の運動エネルギーである。上記の式を使って光電子放出遅延時間の測定を試みた。標的は Ne 原子の $2p$ 電子である。本実験では、基本波 ω と倍波 2ω の EUV 光を用いて、この間の光学位相 ϕ を制御する。強度の強い基本波 ω は二光子イオン化を起こす。強度の弱い倍波 2ω は一光子イオン化を起こす。両イオン化経路はコヒーレントであり、光電子波は干渉し合う。その結果放出された光電子の角度分布は、光学位相とともに変化する。この変化には、異なるイオン化経路による光電子の位相差の情報が含まれる。本実験では、光電子の位相差を運動エネルギーの関数として測定し、位相差の微分係数を求めることにより、基本波 ω による二光子イオン化と倍波 2ω による一光子イオン化の相対遅延時間 $\Delta\tau$ を得た。レーザー場の偏光方向に水平な方向 $\theta = 0 \text{ deg}$ では二つのイオン化経路における遅延時間の差はほとんどみられなかった。しかし、垂直方向 $\theta = 90 \text{ deg}$ では二光子イオン化における遅延時間が一光子イオン化より 230 アト秒遅く測定された。異なる二つの理論、摂動論と第一原理計算に基づいて相対遅延時間 $\Delta\tau(\theta)$ を計算したところ、どちらの計算値も測定値とよく一致した。

単一光子レーザー誘起オージェ緩和は、オージェ緩和過程がエネルギー的に禁制なインナーバレンス正孔状態でもレーザー光を吸収して起こるオージェ緩和過程で、電子相関により引き起こされる。本実験では、Ne 原子を標的として、基本波 ω と倍波 2ω で構成される二色 EUV 光を使用し、この間の光学位相 ϕ を制御する手法を用いて単一光子レーザー誘起オージェ緩和の観測と制御を目指した。基本波の光子エネルギー ω は Ne 原子一価イオンを $2s$ - $2p$ 共鳴遷移させるエネルギー、26.85 eV に設定した。単一光子レーザー誘起オージェ緩和を含む、一価から二価へイオン化する二つの経路が、コヒーレントに起こり、電子放出角度分布が非対称となる。 $2s$ あるいは $2p$ に正孔を持つ一価イオンがそれぞれイオン化するモデルによる理論計算に基づいて、それぞれの初期状態から得られる光電子角度分の非対称率を計算し、光学位相 ϕ による変化を比べた結果、測定値と計算値がよく一致した。

別 紙

論文審査の結果の要旨

You Daehyun 君は、日本の放射光やX線自由電子レーザーを用いた多くの研究成果を有するが、本博士論文には、彼が実験の提案からデータ解析・理論的解析に至るまで主要な役割を果たしたイタリアの極紫外自由電子レーザーFERMI を用いて行った研究の成果に限って記されている。彼の研究の目的はアト秒の時領域で起こる超高速電子ダイナミクスを観測して制御することであった。この目標を達成するために、彼が選んだ研究主題は、光電子の放出に伴う遅延時間の測定と単一光子レーザー誘起オージェ緩和の観測と制御であり、これを実現するために選んだ手法が FERMI の位相を制御した 2 色パルスの利用であった。

原子または分子からの光電子放出は、数アト（ 10^{-18} 乗）秒の時間を要する。この遅延時間は光電子の位相変位と関係付けることができる。彼は FERMI で生成される位相制御可能な 2 色パルスを用いると 2 光子過程で放出される光電子と 1 光子過程で放出される光電子の位相差を測定できることに気づき、Ne 原子をターゲットとして、1 光子過程と 2 光子過程の光電子放出の時間差を決定することに成功した。2 種類の理論計算も実験結果をサポートするものであった。本研究は極めて独自性が高く、評価できる。

単一光子レーザー誘起オージェ緩和は、オージェ緩和過程がエネルギー的に禁制なインナーバレンス正孔状態でもレーザー光を吸収して起こるオージェ緩和過程で、電子相関により引き起こされる現象である。彼は FERMI で生成される位相制御可能な 2 色パルスを用いるとこの過程を観測して制御できることに気づき、実験と理論との両面から実証した。本研究は、位相制御した多色光パルスを用いて電子の動きを制御することにより反応制御する新たな方向性を示すものであり、高く評価できる。

以上のように、本博士論文は、You Daehyun 君が、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、You Daehyun 君提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。