

## 論文の内容の要旨

### Development of an apparatus for femtosecond laser-assisted elastic electron scattering with high-sensitivity and the observation of high-order multiphoton processes

(高感度フェムト秒レーザーアシステッド弾性電子散乱観測装置の開発  
と高次多光子過程の観測)

氏名 石田 角太

#### 1. 序

レーザー場中の原子や分子によって電子が弾性散乱されるとき、散乱電子のエネルギーは、入射電子のエネルギーから  $n\hbar\omega$  ( $n$ : 整数,  $\hbar\omega$ : レーザー光子エネルギー) だけ増減する。この現象は、レーザーアシステッド弾性電子散乱 (laser-assisted elastic electron scattering; LAES) と呼ばれる。中赤外域の  $\text{CO}_2$  レーザー場による LAES 過程は 1970 年代にすでに観測されていたが、近赤外域の高強度フェムト秒レーザー場を用いた LAES 信号の観測は 2010 年になって初めて報告された。このフェムト秒 LAES 過程を利用すれば、分子中の電子や原子核の運動をフェムト秒の時間分解能で追跡することが可能となる。本研究では、高強度フェムト秒レーザー場における Xe 原子による LAES 測定実験を行い、高次多光子遷移を伴う LAES 信号 ( $+1 \leq n \leq +6$ ) が観測され、散乱電子のエネルギースペクトルには明らかなプラトー構造が確認された。そして、プラトー構造の解析から、電子と Xe 原子の衝突時刻の差を高い時間分解能で議論できることを示した。さらに、LAES 信号をより高い効率で検出する第二世代フェムト秒 LAES 観測装置を開発した。

#### 2. 高次多光子遷移 LAES 過程の観測

真空チェンバー中にガス導入ノズルから Xe ガスを噴出し、ガス試料上にフェムト秒レーザーパルス (5 kHz,  $\lambda = 800$  nm,  $\Delta t = 100$  fs) とレーザーパルスに同期した電子ビームパルス (1 keV,  $\Delta t = 19$  ps) を交差させて同時に入射した。交差領域でのレーザー場ピーク強度を  $8.8 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> とした。試料ガスによって散乱された電子の運動エネルギーと散乱角をトロイダル型静電電子エネルギー分析器に設置された二次元検出器によって検出した。実験により得られた散乱電子のエネルギースペクトルを図 1(a) に示す。赤丸は実験値を示す。図 1(b) は図 1(a) の破線によって囲まれた部

分を拡大したものである。図中には、 $n = +1, +2, +3, +4, +5, +6$  に対応するエネルギーシフトの位置にピーク構造が見出される。このピーク構造を説明するために、Kroll-Watson の式を用いて LAES 信号強度を計算した。その結果、実測のピークのエネルギー位置と強度は、図 1(a)の緑色の実線によって示される Kroll-Watson の式による計算値と良く一致した。このことから、観測されたピーク構造を高次多光子 LAES 過程と帰属することができた。

図 2(a)と図 2(b) に、散乱角がそれぞれ  $\theta = \pm 9.1^\circ$  と  $\pm 11.8^\circ$  のときの散乱電子のエネルギースペクトルを示す。ここで  $\theta$  は、Xe 原子ビームの上流側に散乱されたときを正と定義している。赤丸は実験値を、緑色の実線は Kroll-Watson の式に基づいて求められた計算値を示している。また、垂直の破線は古典力学的計算によって求められた散乱電子のエネルギーシフトの上限値をカットオフ次数  $n_c$  として表したものである。この散乱電子のエネルギーシフトは、散乱角を固定した場合には電子と原子の衝突時刻におけるレーザー場のベクトルポテンシャルの絶対値に比例することから、LAES 過程の各次数と散乱角毎に衝突の時刻を求めることができる。

図 2(a)と図 2(b) に示すように、それぞれの散乱角において実測の LAES 信号強度は次数が大きくなっても急激には散乱強度が下らないプラトー構造を示しており、これは理論値と良く一致している。このことから、理論式に従って衝突の時刻を推定することができる。例えば散乱角が  $\theta = +11.8^\circ$  の場合は、次数の違いによって 10 as のオーダーで衝突の時刻が異なることから、多光子 LAES 過程の観測によって電子と原子衝突の時刻の差をアト秒の時間領域で議論できることが示された。

### 3. 高感度フェムト秒 LAES 観測装置の開発

フェムト秒 LAES 信号を高感度で観測するための実験装置を新たに開発した。実験装置の概略図を図 3 に示す。開発した装置は、光陰極型超短パルス電子銃、ガス導入ノズル、電子エネルギー分析器、および、電子検出器によって構成される。金カソードへの紫外レーザーパルス照射による光電効果によって電子パルスを生成し、1 keV に加速した後、電磁レンズによって集束する。電子ビームパルス、フェムト秒レーザーパルス、および、ガス導入ノズルからの漏れ出し原子ビ

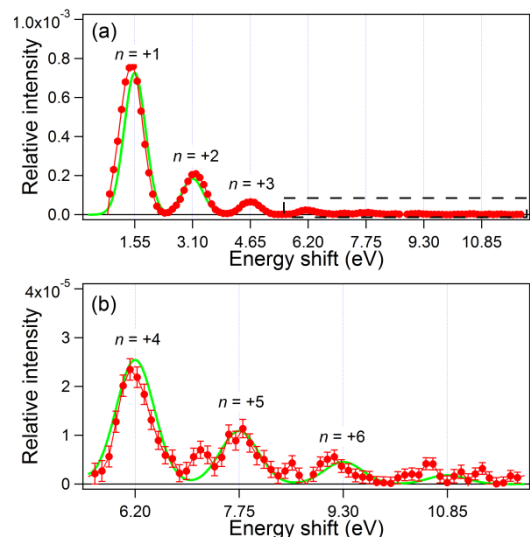


図 1. (a) Xe 原子を試料としたときの散乱電子のエネルギースペクトル。赤丸：実験値。緑実線：Kroll-Watson 理論から求められた計算値。(b)  $n = +4 \sim +6$  付近 (a) の黒色破線部分) の拡大図。

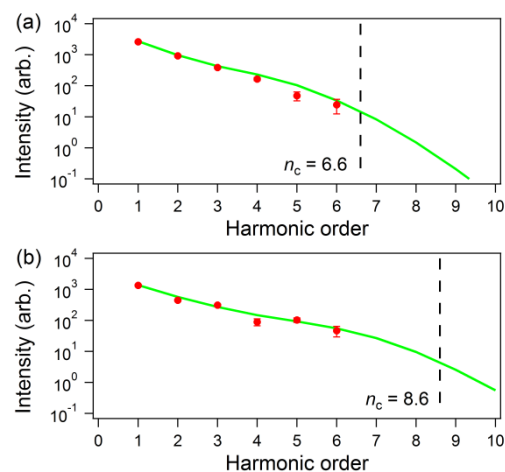


図 2. 散乱角が (a)  $\theta = \pm 9.1^\circ$ , (b)  $\theta = \pm 11.8^\circ$  のときの LAES 信号のエネルギースペクトル。赤丸：実験値。緑実線：Kroll-Watson 理論から求められた計算値。垂直の破線はカットオフ次数  $n_c$  の位置を示す。

ームは、散乱点において同時に衝突し、非散乱電子はビームブロックで阻止される。試料原子により散乱された電子は、スキマー（14 mmφ）を通過した後、角度分解飛行時間型電子エネルギー分析器に導入される。分析器内において、散乱電子は約 5 eV まで減速され、飛行管を通過した後に、もとのエネルギーまで再加速され時間位置敏感型検出器によって検出される。検出器における電子の検出位置と到達時刻から、散乱電子の散乱角とエネルギーが求めら

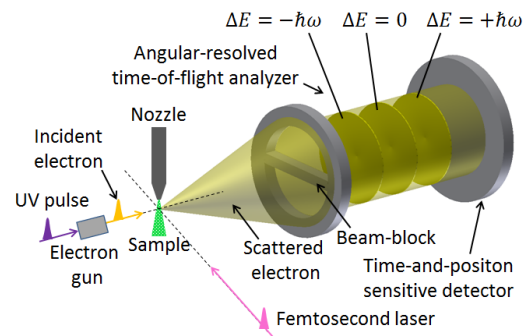


図 3. 第二世代フェムト秒 LAES 観測装置の概略図.

れる。開発した装置の性能を評価するために、レーザー場が存在しない条件の下、Xe 原子を標的とした電子散乱実験を行い、弾性散乱電子の散乱角度分布とエネルギー分布を計測した。

Xe 原子によって散乱された弾性散乱電子の散乱角度分布から、観測可能な散乱角  $\theta$  の範囲が  $2^\circ \leq \theta \leq 18^\circ$  であることが示された。また、散乱角  $2.5^\circ \leq \theta \leq 3.5^\circ$  に弾性散乱された電子のエネルギースペクトルから、本装置のエネルギー分解能は 0.5 eV と求められた。したがって、この装置を用いれば、LAES 過程に伴って 1 光子分だけエネルギーが変化した散乱電子を分離して観測できる。なお、本装置の信号検出効率は従来の装置の約 50 倍であり、フェムト秒 LAES 信号の S/N 比を大幅に向上することが可能となった。