

角度分解飛行時間型電子分析器による レーザーアシステッド電子散乱過程の観測

東大院理

○石川源基, 石田角太, 歸家令果, 山内 薫

Observation of laser-assisted electron scattering processes by an angle-resolved time-of-flight type electron analyzer

○Motoki Ishikawa, Kakuta Ishida, Reika Kanya, and Kaoru Yamanouchi
School of Science, The University of Tokyo, Japan

【Abstract】 We developed an apparatus equipped with an angle-resolved time-of-flight electron analyzer for the measurement of energy-resolved two dimensional angular distributions of laser-assisted elastic electron scattering (LAES) signals with high sensitivity. From the measurements of elastic electron scattering signals, we confirmed that the detection efficiency of the present apparatus is about 40 times as high as that of our previous apparatus equipped with a toroidal-type electron analyzer. By using this newly developed apparatus, we recorded LAES signals originating from the electron scattering by Xe atoms in a femtosecond intense laser field in the energy spectra of the scattered electrons. We also recorded a two dimensional angular distribution of the LAES signals for the one-photon energy gain.

【序】 レーザー場中において入射エネルギー (E_i) の電子が原子によって弾性散乱されると、散乱電子のエネルギー (E_f) が $E_f = E_i + n\hbar\omega$ (n : 整数, ω : レーザー場の角周波数) へと変化するレーザーアシステッド弾性電子散乱 (laser-assisted elastic electron scattering; LAES) と呼ばれる現象が起こる。我々は、トロイダル型電子分析器を備えたフェムト秒 LAES 観測装置を開発し[1], 近赤外域の高強度フェムト秒レーザー場中の LAES 過程の観測した[2]。さらに、レーザーアシステッド電子回折法を開発するとともに[3], 標的原子がレーザー場と強く相互作用して光ドレスト状態を形成したことを示す散乱信号の観測を行い [4], LAES 過程を観測することによって、分子の核波束ダイナミクスや強光子場中の原子・分子内の超高速電子ダイナミクスの研究が可能となることを示してきた。しかし、LAES 信号は極めて微弱であり、我々が最初に開発した装置を用いた場合、信号の取得には長時間の積算が必要であり、ポンプ-プローブ法による時間分解電子回折像の測定や、光ドレスト状態にある原子内や分子内の電子の光電場への超高速応答過程を解明するためには、LAES 観測装置の検出効率を大幅に向上させることが必要であった。

そこで我々は、角度分解飛行時間型電子分析器を備えた高感度 LAES 観測装置を開発した。そして、フェムト秒レーザーパルス照射によって誘起される Xe 原子による電子散乱における LAES 過程を高い検出効率で観測し、散乱電子の極角 (θ) 方向と方位角 (φ) 方向の 2 次元角度分布を散乱電子の運動エネルギーの関数として観測した。

【実験】 開発した LAES 観測装置の概略図を図 1 に示す. 光陰極型パルス電子銃に紫外レーザーパルス ($\lambda = 267 \text{ nm}$) を照射することによって生成した電子線パルス ($\Delta t = 20 \text{ ps}$, 5 kHz) を 1 keV に加速し, Xe 原子に衝突させた. 同時に直線偏光の近赤外レーザーパルス ($\lambda = 800 \text{ nm}$, 5 kHz , 0.6 mJ/pulse , $\Delta t = 50 \text{ fs}$, $I = 2.3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) を散乱点に集光照射した. 電子ビーム, 原子ビーム, レーザービームは互いに直交し, 赤外光の偏光方向は原子ビームと平行とした. 散乱電子を角度分解飛行時間型電子分析器に導入し, ディレイライン型位置時間敏感検出器によって検出した.

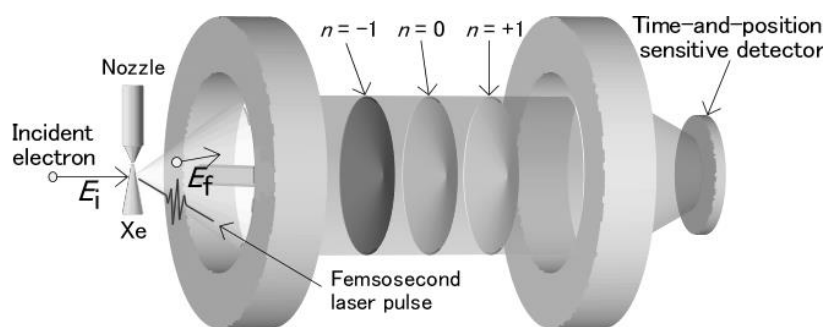


Fig. 1. Schematic of the angular-resolved time-of-flight type LAES apparatus.

角度分解飛行時間型電子分析器は, 入射電磁レンズ, 飛行管, 出射電磁レンズで構成される. 散乱電子は入射電磁レンズを経て, 飛行管に導入される. 飛行管は静電アインツェルレンズとなっており, 散乱電子が減速されることによって散乱電子のエネルギー差に応じた飛行時間の差が生じる. 減速された散乱電子は飛行管の出口で再び加速され, 電磁型出射電子レンズを経て位置敏感型電子検出器によって検出される. 検出器までの飛行時間 (t) と検出器上の位置座標 (x, y) から散乱電子のエネルギー (E_f) と散乱角 (θ, φ) を決定する. なお, 特定の散乱角の電子のみが通過できるマスクパターンを分析器の前に設置し, 入射電子エネルギーを様々に変えて弾性散乱によって散乱された電子を測定し, (t, x, y) から (E_f, θ, φ) への換算関数を決定した.

【結果と考察】 開発した装置を用いて Xe 原子を標的とした弾性散乱信号の測定を行ったところ, エネルギー分解能は 0.5 eV であった. このことは, この装置が光子エネルギー (1.55 eV) に相当するエネルギー差を分離するのに十分なエネルギー分解能を備えていることを示している. さらに, 本装置における散乱電子の検出効率, トロイダル型電子分析器を備えた従来の観測装置と比較して, 約 40 倍に達することが確認された.

近赤外レーザー光を照射したときの散乱電子のエネルギースペクトルと, 近赤外レーザー光を照射しないときのスペクトル (ともに積算時間: 8 時間) を比較したところ, 照射した場合のスペクトルには, $n = -1, +1, +2$ に相当するエネルギーにおいて明確な信号の増加がみられ, LAES 信号の検出が確認された. 弾性散乱の信号強度で規格化した LAES 信号強度はそれぞれ 1.2×10^{-4} ($n = -1$), 1.8×10^{-4} ($n = +1$), 3.1×10^{-5} ($n = +2$) であり, Kroll-Watson 理論に基づく数値シミュレーションの結果と良い一致を示した. さらに, $n = +1$ の LAES 信号に対して, 散乱角 (θ, φ) に関する 2 次元の分布を得た. この散乱角度に関する分布には, レーザー偏光方向の強度がレーザー偏光方向に垂直な方向の強度よりも大きく, この異方性は理論予測と良い一致を示した. これは, LAES 信号強度の 2 次元散乱角依存性を測定した初めての例である.

【参考文献】

【参考文献】

- [1] R. Kanya, Y. Morimoto, K. Yamanouchi, *Rev. Sci. Instrum.* **82**, 123105 (2011).
- [2] R. Kanya, Y. Morimoto, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 123202 (2010).
- [3] Y. Morimoto, R. Kanya, K. Yamanouchi, *J. Chem. Phys.* **140**, 064201 (2014).
- [4] Y. Morimoto, R. Kanya, K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 123201 (2015).