

レーザーアシステッド電子散乱による
強レーザー場中 Xe 原子内電荷分布の超高速応答

(東京大学) ○森本 裕也, 歸家 令果, 山内 薫

Ultrafast Responses of an Electron Distribution in Xe to
Intense Laser Fields by Laser-Assisted Electron Scattering

(The University of Tokyo) ○Yuya Morimoto, Reika Kanya, and Kaoru Yamanouchi

【序】レーザー場中での電子と原子の散乱により、電子の運動エネルギーが光子エネルギーの整数倍だけ変化する現象は、レーザーアシステッド電子散乱 (laser-assisted electron scattering, 以下 LAES と省略) 過程と呼ばれている。これまでの理論的な研究により、強レーザー場中 ($\geq 10^{12}$ W/cm²) での LAES 過程では、レーザー場と原子が強く相互作用した光ドレスト電子状態の形成によって、LAES 信号の小角散乱に特徴的なピーク構造が現れることが予想されている [1]。しかしながら、従来の LAES 過程の観測実験 [2]においては、集光強度が比較的小さい ($\leq 10^9$ W/cm²) 中赤外域のレーザーを用いて行われてきたため、光ドレスト電子状態の効果を観測することはできなかった。

我々は、2010年に近赤外域のフェムト秒レーザー ($\lambda = 800$ nm, $I = 1.8 \times 10^{12}$ W/cm²) を使用することによって、高強度超短レーザー場中での LAES 過程の観測に初めて成功した [3]。このように高強度レーザー場中での LAES 過程の観測実験が可能となったため、理論研究によって予想されてきた小角散乱パターン中に現れるピーク構造の観測が可能となり、その構造を通じて、強レーザー場に対する原子内電子の超高速応答の様子を明らかにすることができると期待されている [3]。そこで、本研究では、高強度レーザー場 ($I = 1.5 \times 10^{12}$ W/cm²) 中での Xe 原子による LAES 過程の小角散乱 ($\theta \geq 0.1^\circ$) を観測することによって、光ドレスト電子状態に由来するピーク構造の観測を試みた。さらに、得られた LAES 過程の散乱角度分布から、Xe 原子内電子の強レーザー場に対する応答を考察した。

【実験】図1に実験装置の概略を示す。光陰極型電子銃で生成された単色電子パルス ($E_0 = 1$ keV, $\tau = 19$ ps) は、散乱点にて、Xe 原子線およびレーザーパルス ($\lambda = 800$ nm, $\tau = 970$ fs, $I = 1.5 \times 10^{12}$ W/cm²) と直交する。散乱電子は分析器入口のスリットで切り出された後、運動エネルギーおよび散乱角度分布が分析され、2次元検出器に投影される。非散乱電子は、エネルギー分析器の直前に設置された直径 0.35 mm の Mo ワイヤに衝突するため、分析器内には侵入しない。本装置で観測可能な散乱角度の範囲は $0.1^\circ \leq \theta \leq 10.0^\circ$ であり、散乱角度の分解能は、1光子分だけエネルギーが変化した ($\Delta E = \pm \hbar\omega$) 散乱電子の場合、0.3 deg (FWHM) である。

【結果と考察】図2(a)に $\Delta E = +\hbar\omega$, (b)に $\Delta E = -\hbar\omega$ だけ運動エネルギーが変化した散乱電子の散乱角度分布を赤丸で示す。

(a) $\Delta E = +\hbar\omega$ と (b) $\Delta E = -\hbar\omega$ の散乱角度分布は、誤差の範囲内で一致しており、共に $\theta \leq 0.5^\circ$ において明確なピーク構造を示している。観測されたピーク構造が原子の光ドレスト電子状態に由来していることを確認するために、Kroll-Watson 近似 [4] を用いて計算した散乱角度分布との比較を行った。Kroll-

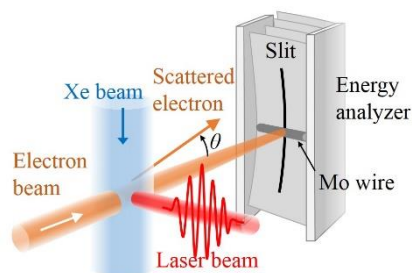


図1. 実験装置概略

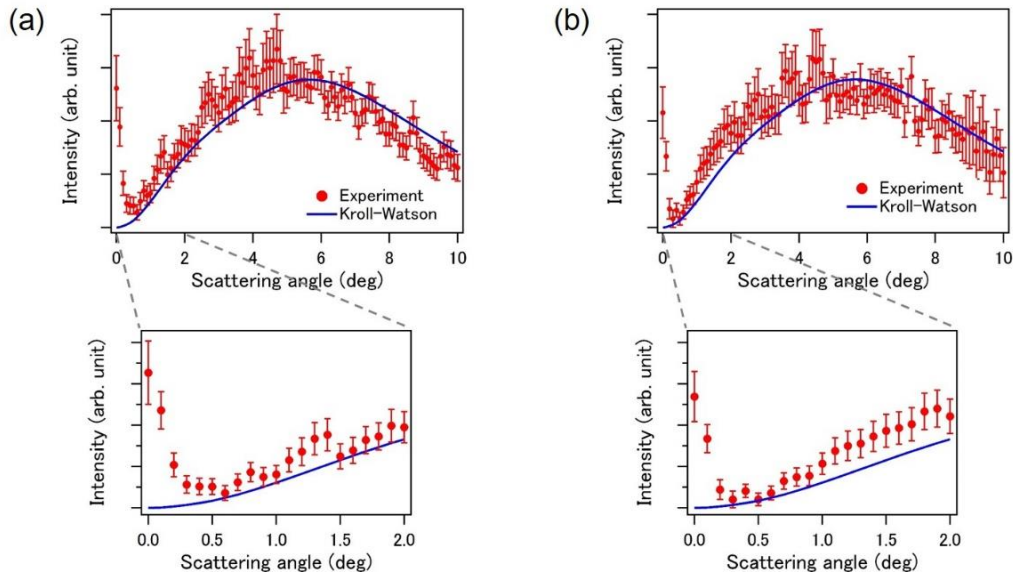


図 2. Xe による LAES 過程の散乱角度分布. 赤丸は実験値, 青色実線は Kroll-Watson 近似によるシミュレーションの結果. (a), (b)はそれぞれ $\Delta E = +\hbar\omega$, $\Delta E = -\hbar\omega$ の散乱角度分布を表している.

Watson 近似は, 従来の低いレーザー場強度における LAES 実験の結果を非常に良く再現することが知られているが, レーザー場と原子の相互作用は考慮されていない. 従って, Kroll-Watson 近似に基づく計算結果と一致しなければ, その不一致は光ドレスト電子状態の形成に由来するものと考えられる. 図 2 中に青色実線で示した Kroll-Watson 近似によるシミュレーションの結果には, 小角散乱のピーク構造が現れず, 観測された小角のピーク構造が, 光ドレスト電子状態に由来する信号であることが確かめられた.

実験結果とシミュレーション結果をさらに詳細に比較すると, ピーク構造が現れた散乱角度以外においても有意な差が見られ, 特に 0.5° から 5.0° の広い散乱角度範囲において, 実験結果の方が高い信号強度を示していることがわかる. 同様の傾向は我々の過去の実験においても観測されている [5]. より広い散乱角度分布に影響する効果ほど, 原子核のより近くに局在した電子に由来することが知られている. したがって, この 0.5° から 5.0° の広い角度範囲の散乱に寄与している電子は, 小角のピーク構造に寄与している電子よりも, 原子核により近い領域に存在していることになる. 光ドレスト電子状態の効果によって, LAES 信号強度が増強されるか抑制されるかどうかは, レーザー電場に対して電子が変位する方向で決定される [6]. 本研究の実験条件において, 0.5° から 5.0° の散乱角において電子がレーザー電場と同じ方向に変位する場合には, LAES 信号強度が増強されるが, 電子がレーザー電場とは逆方向に変位した場合は LAES 信号強度が抑制される [1]と予想される. 本実験結果は LAES 信号強度が Kroll-Watson 近似によって得られる信号強度よりも大きいため, Xe 原子核近傍の電子は, レーザー電場と同じ方向に変位していると予想される. 本研究で得られた LAES 散乱角度分布は, レーザー電場中で起こる通常に分極のように, レーザー電場とは逆方向に変位する Xe 原子内電子に加えて, レーザー電場と同じ方向に変位する原子核近傍の電子が存在することを示している.

- [1] F. W. Byron Jr and C. J. Joachain, *J. Phys. B* **17**, L295 (1984).
- [2] N. J. Mason, *Rep. Prog. Phys.* **56**, 1275 (1993).
- [3] R. Kanya, Y. Morimoto, and K. Yamanouchi, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 123202 (2010).
- [4] N. M. Kroll and K. M. Watson, *Phys. Rev. A* **8**, 804 (1973).
- [5] Y. Morimoto, R. Kanya, and K. Yamanouchi, *J. Chem. Phys.* **140**, 064201 (2014).
- [6] B. A. Zon, *Sov. Phys. JETP* **46**, 65 (1977).