

レーザーアシステッド電子散乱による光ドレスト原子の観測

歸家 令果 〈東京大学大学院理学系研究科 kanya@chem.s.u-tokyo.ac.jp〉

森本 裕也 〈マックス・プランク量子光学研究所 yuya.morimoto@mpq.mpg.de〉

山内 薫 〈東京大学大学院理学系研究科 kaoru@chem.s.u-tokyo.ac.jp〉

電子が原子や分子によって弾性散乱されるとき、散乱電子の方向は変化するが、散乱電子の運動エネルギーは変化しない。ところが、この散乱の瞬間に光が存在すると、電子は光の場と相互作用した結果、光子エネルギーの整数倍のエネルギーをもらったり、失ったりする。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; 以下 LAES) と呼ばれる。この LAES 過程は、光の場の存在下で電子が原子・分子に散乱された場合にのみ誘起される現象であるため、散乱電子は光の場の中の原子・分子に関する情報を持っている。したがって、LAES 過程を観測することによって、原子・分子が光と強く相互作用している状態、つまり、光ドレスト状態を調べることができる。

LAES 過程については、その理論的定式化が 1966 年に行われて以来、多くの関心を集めてきたが、実験上の困難さから、理論研究が主導的な役割を演じてきた。1976 年に CO₂ レーザー場を用いた LAES 過程の実証実験が行われたものの、光の波長が長く、原子・分子系の共鳴波長からは大きく隔たっており、しかも光の強度が低いため、得られた実験結果は、光と原子・分子の相互作用を無視した理論式によって説明できるものであり、光ドレスト状態に関する情報は得られなかった。そのため、より短波長・高強度のレーザー場を用いた LAES 過程の観測が長い間待ち望まれていた。

我々は 2010 年に、近赤外域のフェムト秒レーザー光を用いて、Xe による LAES 過程の観測に成功した。そして、LAES 過程によって、光の場からエネルギーを獲得した電子、または、光の場によってエネルギーを失った電子のみを観測すれば、光の場と相互作用している瞬間だけの原子・分

子の状態を調べることができること、つまり、LAES 過程がフェムト秒領域の光学ゲートとなることを示した。さらに、LAES 実験を分子に適用し、電子回折像を観測することによって、極めて高い時間分解能で分子の幾何学的構造の変化を追跡できることを明らかにした。しかし、2010 年の研究では、光ドレスト状態の生成を確認するまでには至らなかった。それは、小角部分の LAES 信号の観測ができなかったためである。

1984 年の理論研究によって、一光子分だけ運動エネルギーが増減した LAES 信号の小角散乱領域には、光ドレスト状態の形成に起因する特徴的なピーク構造が現れることが予測され、その後、そのピーク構造が光と相互作用している瞬間の原子内での電荷の空間分布とその時間変動に敏感に応答することが理論的に示された。我々は、光ドレスト原子の検出を目指して、散乱角ゼロ度付近の小角散乱領域を観測できるように装置改良を進め、ついに、小散乱角領域に現れるピーク構造を観測することに成功した。入射エネルギー 1 keV の電子線パルスを高強度レーザー場中において Xe 原子に照射することによって LAES 過程を誘起し、散乱電子のエネルギー分布と角度分布を測定したところ、一光子分だけ運動エネルギーが増減した散乱電子の角度分布の小角領域に、光ドレスト原子の形成に由来するピーク構造が現れたのである。小角領域のピーク構造を詳細に解析することによって、光の場に応答して原子・分子内の電子分布が如何に変化するかを明らかにできると期待される。本研究の成果は、LAES を用いた超高速原子・分子過程研究の第一歩である。

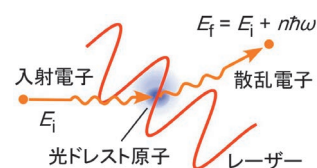
—Keywords—

光ドレスト状態：

物質のハミルトニアンに加えて、光と物質の相互作用項も物質のハミルトニアンの一部と見なすことによって記述される物質状態。光と物質の相互作用が顕著な状況下での物理現象を記述するのに適した描像である。

光ドレスト原子：

光と原子の相互作用によって、光ドレスト状態を形成した原子。



光ドレスト原子による LAES 過程の模式図。