

化学反応中の原子の運動状態を可視化する新規時間分解分光法の開発

Development of a time-resolved spectroscopy for visualizing atomic motions during chemical reactions

東北大学 山崎優一

我々の身の回りに多種多様な形で存在する化学反応は、微視的な原子や分子レベルでは、ピコ秒 (10^{-12} 秒) というとてつもなく短い時間スケールで進行している。そうした超高速化学反応が進む様子を実時間で観測することは、物理化学者全体が抱く大きな夢の一つであり、その目的のために今日まで、フェムト秒 (10^{-15} 秒) パルスレーザーの発達と相まって種々の時間分解分光法がめざましい発展を遂げてきた。近年では、時間分解電子線回折などの構造解析手法の進歩により、化学結合の生成・切断の瞬間における分子構造さえも観測することが可能となってきている。そうした手法に対して我々は、化学反応とは分子中の電子運動の変化が先導して起こる構成原子核配置の変化であるという本質的な観点に立ち、反応中の原子核運動の変化そのものを直接観測する新規時間分解分光法の開発を進めている。本研究では、ピコ秒オーダーのごく短い時間に、原子核運動を高感度に計測するための新規装置の開発を目的とした。

本分光法の実験的基盤となるのが、電子準弾性散乱を利用した原子運動量分光である。原子運動量分光は、高速 (> 1 keV) の電子を真空中に孤立した分子内の特定の原子核と衝突させ、散乱した電子のエネルギーを測定することで、衝突前に標的原子核がもっていた運動量の大きさを調べる手法である。すなわち、分子を構成する原子は量子力学に従った運動量分布を示すため、本分光により原子核運動の波動関数形状を探ることができる。こうした本手法の特質を化学反応研究に利用するためには、時間分解化に伴い4~5桁も低下してしまう信号強度の問題を克服する必要がある。そこで本研究では、あらゆる方位角に散乱してきた電子を一度に測定する形の高感度マルチチャンネル型原子運動量分光装置を開発した。

開発した装置を用いて、メタン分子 (CH_4) を対象とした原子運動量分光実験を行った結果、原子運動量分布を測定するのに必要な所期の性能を得ることができた。すなわち、スペクトルにはメタンを構成する炭素原子と水素原子の信号が明瞭に分離して現れ、また、各々のバンド形状は各原子核の運動エネルギーの違いを反映したプロファイルを示した。さらに、マルチチャンネル化の威力は予期していた以上のもので、単位時間あたりの信号計測数は従来の装置と比べて少なくとも2000倍以上にまで飛躍的に改善した。

以上本研究により信号強度の問題を概ね解消し、時間分解原子運動量分光の実現へ向けて大きく前進した。すなわち、実験条件の最適化などによってさらに1桁程度の信号強度の改善を見込めば、本装置と、我々が最近開発に成功した時間分解電子散乱計測法とを高度に組み合わせることにより、フェムト秒レーザーで誘起した光化学反応開始後の任意のタイミングにおいて、各原子核がどのような速さで運動しているかを直接動画撮影することが可能になると期待される。