

# 多様化する軟X線発光分光

原田 慈久  
東京大学物性研究所

放射光を用いた軟X線発光分光は、電子状態を元素ごとに分離して観測することができ、さらに共鳴過程及び光の偏光を利用すれば、特定の化学結合状態を抽出し、さらに終状態の対称性を分離できるという特長がある。また、励起源と検出対象が両方とも軟X線領域の光であるため、物質表面から数10nm～数100nm程度の深さにおける電子状態が観測対象となり、表面が変化しやすい物質でも比較的容易に測定できる、電場、磁場下で測定できる、絶縁体など帯電しやすい物質でも測定ができるなど数々の特長を有する。しかし一方で、原子量が軽くなればなるほど発光遷移確率が減少し、3d遷移金属でも1%程度になってしまうため、検出立体角を稼ぎにくい回折格子分光器が主体となる軟X線領域では非常に不利になる。この困難を押し、2000年以降いくつかの大きな進展が見られた。偏光可変アンジュレータの出現により精密な偏光依存性実験が行われるようになり、分光器の大型化に伴って、従来のであったエネルギー分解能( $E/\Delta E \sim 1000$ )を凌ぐ高分解能化( $E/\Delta E > 2000$ )に成功した。特に、Swiss Light Source (SLS) ADDRESS ビームラインに設置された全長5mの分光器 SAXES では  $E/\Delta E \sim 10000$  が達成された。これにより、軟X線発光は光電子分光と相補的な手段としての位置づけからようやく脱し、これまでの分解能や手法では解決できなかった問題にアプローチできるところまで到達した。さらに分光器を回転させて散乱角依存性を測ることでより運動量分散の情報を取得する機能が付加され、固体内素励起を元素選択的に観測する手段として軟X線発光分光は確固たる地位を築きつつある。

これと平行して、「固体材料から溶液、固液界面、ガス吸着、触媒反応など、測定対象を選ばない」という軟X線発光分光のもう一つの特長を最大限活かす応用展開も急速に進んでいる。その一つの大きな流れは「溶液系」への展開である。真空隔離膜、マイクロジェットを用いた2つの技術により、測定対象は純水から塩酸、酢酸等の溶液、アルコール、アミノ酸、タンパク質、金属錯体などの溶液、さらに固液界面、固気界面へと広がり、種々の相界面が混在した電池触媒材料のような複雑系の分析まで始まっている。

我々は放射光を用いた軟X線発光分光を1990年代半ばにPF BL19Bで始め、分解能の向上、偏光依存型実験、CCDの利用、溶液系への展開と、世界の軟X線発光分光をリードする形で開発を進めてきた。現在は東大ビームライン BL07LSU の HORNET ステーションに2.5m長の超高分解能軟X線発光分光器を建設し、in situ/オペランド分光セルを組み合わせることにより、水の多重振動解析、希薄磁性半導体の磁性不純物の電子状態解析、燃料電池触媒のオペランド解析などを可能にしている。しかし'photon-hungry'な軟X線発光実験のクオリティは光源の輝度に依存する部分が多く、昨今世界中で中型高輝度光源の建設ラッシュが続いている状況では、もはやエネルギー分解能で世界をリードすることは難しくなっている。

講演では世界の軟X線発光分光の流れを俯瞰しつつ、我々が今取るべき戦略と、中型高輝度光源が実現した暁に期待される実験について、展望を述べる。