

共同利用研究ハイライト

複雑原子準連続スペクトルUTA研究のための高精度極端紫外線分光器の開発

川手 朋子 量子科学技術研究開発機構 主幹研究員

多電子重元素イオンでは多数の電子遷移が狭い波長範囲に密集し、個々のスペクトル線として完全には分離されず、全体として幅を持った構造として観測される unresolved transition array (UTA) と呼ばれる複雑な発光スペクトルが現れる。原子番号の大きい元素では、電子数が多く、相対論効果や電子相関の寄与も大きいため、原子構造計算や遷移確率計算は容易ではない。そのため、理論計算だけでスペクトル構造を確定することは難しく、よく制御された実験データとの比較が不可欠である。

また原子物理学以外の分野においてもUTAの理解が必要とされている。核融合研究では、タングステンが将来炉のプラズマ対向材料として有力である一方、炉心プラズマ中に混入すると極端紫外線(EUV)・軟X線放射によってエネルギー損失を引き起こす。したがって、どの電離段階のタングステンイオンが、どの波長帯でどの程度放射するのかを把握することは、プラズマ性能評価や不純物輸送解析に直結する。加えて、半導体リソグラフィでは、スズ多価イオンの13.5 nm発光が実用EUV光源の中心であり、さらに短波長側の候補光源も検討されている。多層膜ミラーの反射帯域に発光を合わせるには、UTAの中心波長、幅、微細構造の理解と制御が必要である。

本研究では、UTAを高分解能で測定するための分光器開発と、その主要光学素子である回折格子の性能評価を行った。開発した分光器は、Tokyo EBIT (electron beam ion trap) で

の計測を想定している。EBITは、電子ビームによってイオンを段階的に高電離し、狭い空間に捕獲する装置である。電子ビームのエネルギーによりイオン価数や励起過程を制御しやすく、ドップラー広がりも小さいため、UTAの内部構造を調べるには有利である。本研究ではTokyo EBITに設置するための幾何制約の中で、球面不等間隔回折格子を用いた斜入射EUV分光器を設計し、タングステンの5 nm帯とスズの13.5 nm帯で高い波長分解能を実現することを目標とした。特にUTA測定では、観測されたスペクトル強度分布からイオンの電離状態や励起状態を議論するため、分光器の波長依存感度を広い範囲で把握しておく必要がある。

本研究では製作された大面積回折格子の回折効率をUVSOR放射光施設BL5Bで実験的に評価した。放射光ビームラインでは、波長を選択したEUV光を既知の条件で格子に入射できるため、光学素子の絶対効率をラジオメトリックに測定できる。UVSOR実験では、5–20 nm

の範囲で単色化されたEUV光を回折格子に照射し、入射光と回折光をシリコンフォトダイオードで測定した。さらに、格子面内の異なる位置にビームを当て、刻線領域内での効率の差を調べることで、製作された不等間隔回折格子が実用上どの程度均一に働くかを検証した。特に大面積回折格子では広い領域が使われるため、面内均一性は全体の分光効率やスペクトル応答に影響する。また、UVSORの放射光は偏光を持つため、格子に対する電場方向、すなわちTE/TM条件の違いも考慮した。理論比較にはPCGrate-SXを用いた。

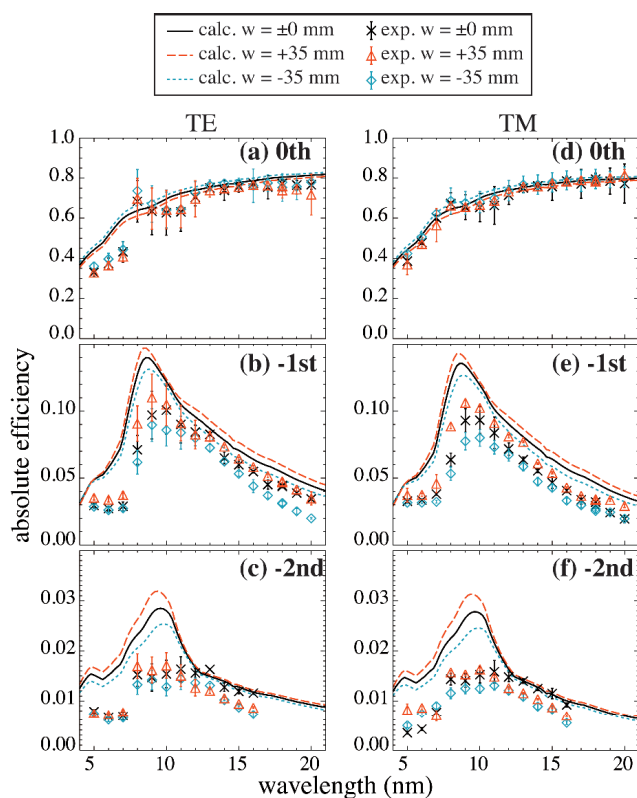


図1 回折効率の実験値および計算値の比較。色・シンボルの違いは回折格子面上の異なる点における結果を表す。

この計算では、格子の溝形状、溝深さ、デューティ比、金コート厚、入射角、偏光条件などを与え、各回折次数の効率を電磁場計算により求めている。設計段階ではこの計算を用いて、タングステン測定に重要な短波長側の二次回折効率を高める溝形状が検討された。実験と計算の比較では、0次光については比較的よい一致が得られた一方、1次・2次回折では計算値と測定値の間により大きな差が見られた(図1)。特に短波長側および高次回折で差が大きくなる傾向が示されている。この結果は、理想化された溝形状や膜厚だけでは実際の効率を完全には再現できない

ことを示している。その要因として格子表面の微小粗さが挙げられる。短波長EUVでは、表面粗さや界面粗さが散乱損失や効率低下に強く影響するため、計算モデルと実物の差が高次回折ほど顕在化しやすい。

このように本研究では、重元素多価イオンのUTA研究に向けた高分解能EUV分光器の設計と、放射光を用いた回折格子の実測を組み合わせることにより、波長・偏光・格子面内位置に依存する回折効率を定量的に評価した。今後、分光器全体をTokyo EBITに組み込み、実際のタングステン・スズUTAスペクトルを測定することで、原

子計算の検証や核融合プラズマにおける不純物評価、EUV光源設計に資するデータが得られると期待される。



かわて・ともこ
2012年3月京都大学大学院理学研究科博士課程修了。宇宙科学研究所ポスドク、核融合科学研究所助教等を経て2025年3月より現職。主な研究分野は天体・核融合プラズマとその分光計測および原子・分子物理過程。

共同利用研究ハイライト

がん細胞特異的結合分子探索効率を向上させるマイクロ流路デバイスの開発

神永 真帆 豊田工業高等専門学校 機械工学科 講師

がん治療薬の副作用を低減するためには、がん細胞だけに特異的に結合する分子を標的とする「分子標的薬」の開発が不可欠である。近年、計算科学やAIを用いた候補分子設計が進展しているものの、実際の探索では、膨大な種類の候補分子を細胞に長時間反応させ、結合した分子を選び出すという手作業が依然として中心であり、時間と労力を要する。この課題を解決するため、マイクロ流路を用いた自動化システムの研究が進められてきた。

マイクロ流路を用いた分子標的薬探索では、ランダムに作製した候補分子ライブラリを流路内に流し、流路内に固定した標的に結合した分子を捕獲・回収する。しかし、標的として用いる細胞の状態が生体内に近いほど、得られる分子標的薬

の有効性は高まるため、近年では立体培養細胞(スフェロイド)が注目されている。スフェロイドは、薬剤応答や細胞表面分子の発現が生体内に近く、標的として用いることで、より実環境に近い探索が可能になると期待されている。

一方で、スフェロイドの表面は凹凸が多く、候補分子が本来の標的以外の領域に残留しやすい。また細胞表面には多種の分子が存在するため、標的以外に結合した候補分子も回収されてしまう。これらは副作用の原因となるため、探索過程で確実に除去する必要があるが、既存のフィルタリング技術では完全に取り除くことが難しい。そこで、探索操作中に「どの候補分子が細胞表面のどこに結合しているか」をリアルタイムに観察できれば、この問題

を根本的に解決できると考えられる。

細胞膜直下の分子結合を高感度に観察できる手法として、全反射蛍光顕微鏡(TIRFM)が知られている。TIRFMは、ガラス面から100~200 nmだけ染み出すエバネッセント光を利用し、細胞膜近傍の蛍光分子を選択的に励起できるため、分子標的薬候補の結合位置を一分子レベルで観察できる。しかし、観察対象がガラス面に密着している必要があるため、培養液中に浮遊する3Dスフェロイドの表面全体を観察することはほぼ不可能であった。

バルーン型アクチュエータを備えた新規マイクロ流路デバイスの開発

本研究では、この課題を解決するために、水圧駆動のバルーン型アクチュエータを備えたマイクロ流路デバ