

概要

宇宙に存在する通常の物質のほとんどは高温のプラズマ状態にあり、例えば銀河団や超新星残骸のような天体を形成しX線を放射している。天文学では、これらの天体の構造や成り立ち・元素組成などの重要課題を解き明かすために高温プラズマのX線観測が鍵となる。2023年に打ち上げられた最新のX線天文衛星XRISMが搭載する軟X線分光装置Resolveは非常に高い分光性能($\text{FWHM} < 5 \text{ eV} @ 6 \text{ keV}$)を有している。これを用いたX線精密分光観測によって天体に含まれる様々な元素に由来する特性X線を詳細に分離し、プラズマ状態や元素組成比など天体の重要な物理的情報をこれまでになく高精度に測定することができるようになった。例えば、プラズマの光学的厚さに感度を持つ共鳴散乱(イオンによる光子の吸収・再放射過程)による特性X線の精密な測定により、天体プラズマの3次元的な構造や速度分布を解明することができる。しかし、多数の電子を持つイオンは構造の複雑さゆえに特性X線の波長や遷移確率といった原子データの理論値の不定性が大きく、これに基づいた現状の放射モデルによる解釈では最新の精密分光データから情報を最大限に引き出すことができない。この問題を解決するためには、地上プラズマ実験を行い、天文学で用いる原子データベースを高精度な実験値で検証し、補っていく必要がある。そこで我々は、様々な重元素多価イオンの精密な原子物理学的データを網羅的に取得できるプラズマ実験装置「電子ビームイオントラップ(EBIT)」に着目し、天体プラズマで起こる様々な素過程を再現するために、放射光と併用可能なEBITをMPIKとの共同研究でISAS/JAXAに導入した(JAXA-EBIT)。EBITを使って原子データを網羅的に測定する研究の第一ステップとして、本修士論文では特に、銀河団ガスや超新星残骸の観測的研究でしばしば着目される鉄のL殻遷移輝線に注目した。閉殻構造で天体プラズマ中に安定して存在するネオン様鉄イオンの3d-2p, 3s-2p共鳴遷移による輝線3C, 3Gの強度比は、プラズマによる共鳴散乱の効果を調べるのに有効であるが、理論と観測が合わない問題が長年存在している。そこで我々は3C, 3G輝線の原子データを高精度に測定してこの問題を検証するべく、JAXA-EBITと放射光施設を組み合わせるこれらの輝線を精密分光する実験を行った。

本修士論文では、まずJAXA-EBITの基本的な性能を評価し、原子データ測定を行う上で必要な性能を有することを確認するために、EBITで生成した酸素・アルゴン・鉄の多価イオンの二電子性再結合輝線を測定する実験を行った。その結果、検出した光子数の電子ビームエネルギー依存性から、EBITに注入した重元素の多価イオンが生成・トラップされたことを確認し、本EBITの電子ビームエネルギーに、電子ビームとイオンが作る空間電荷に由来する12 eVから16 eV程度のオフセット(@ 2236 – 2425 eV)が存在することがわかった。また、電子ビームエネルギー Spektral 上の二電子性再結合の輝線幅から電子ビームのエネルギー分解能は $\text{FWHM} < 2.6 \text{ eV} (@ 2383.89 \text{ eV}, 2.07 \text{ mA})$ に制限され、非常に高い単色性が示された。これにより我々のEBITが、MPIKで先行して開発された同型の装置であるPolarX-EBITと同等の性能を実現し、放射光実験で様々な元素について原子データを測定するのに十分な性能を有していることが確認された。

次に、JAXA-EBITを大型放射光施設SPring-8に持ち込み、ネオン様鉄イオンのL殻遷移の精密分光測定を行った。EBIT内部のイオンに単色化した放射光を入射して共鳴散乱を再現、入射光子のエネルギーに対する散乱光子数の依存性を調べた。その結果、3C輝線が6%の精度で検出され、輝線幅が $\text{FWHM} = 0.189 \pm 0.009 \text{ eV} (@ 825.658 \pm 0.003 \text{ eV})$ の非常に精密なスペクトルの取得に成功した。一方で3G輝線についてはS/N比が十分ではなく今回の実験では検出に至らなかった。これらの測定結果をもとに、3G/3C振動子強度比の95%上限値を0.306に制限した。これは理論値から計算される値(~ 0.0504)と矛盾しない結果である。

本研究により、EBITと放射光施設を併用することで、放射光の高い単色性を活かして既存のX線検出器を凌ぐエネルギー分解能で多価イオンからの特性X線を精密分光する手法を確立することができた。今後は、EBITの装備をアップグレードするなどして今回は未検出となった3G輝線のフィジビリティの改善を行うとともに、今回確立された実験手法を用いて、天文学で重要な他の様々な遷移・元素について原子データの網羅的な測定を展開していく。