

# 小型電子ビームイオントラップ装置CoBITを用いた多価イオン原子物理学

坂上裕之

## はじめに

原子は、中心部分に正の電荷をもった原子核とそれを取り巻く一つ、あるいは複数の電子から成っています。原子から電子を取り去る(電離と呼ぶ)とイオンになり、一つの電子を取り去ったものを一価のイオンと呼びます。また、複数の電子を取り去ることも可能であり、そのようなイオンを多価イオンと呼び、取り去られた電子の数が $q$ 個の時、 $q$ 価の多価イオンと呼びます。このような多価イオンは、価数 $q$ が大きくなればなるほど通常の原子とは異なる性質が顕著に表れてきて、物理学者の興味を集めてきました。天然に存在する最も重い元素はウランですが、そのウラン原子から92個全ての電子を取り去ると92価( $U^{92+}$ )のイオンになります。そのような多価イオンを真空中に取り出しその性質を研究することは、電子ビームイオントラップ(EBIT)という実験装置が開発されるまで至難の業でした。このEBITが開発されたおかげで、多価イオン科学は急速に発展することになります。図1に我々が開発し核融合研で駆動している小型電子ビームイオントラップ(CoBIT)と呼ばれる実験装置の概念図を示します。ソレノイド型の高温超伝導磁石による高磁場と、それを貫く高密度の電子ビームによる空間電荷及び電極(DT)による井戸型ポテンシャルによって、イオンは3次的に閉じ込められます。閉じ込められたイオンは次々と電子ビームの衝撃を受け、1価が2価、2価が3価というように、徐々に電離を繰り返す(逐次電離)、やがて高電離多価イオンとなって我々の前に姿を現します。このイオン源の一番の特長は、導入する原子を選ぶことで任意の多価イオン種を生成でき、電子ビームのエネルギーで、その

多価イオンの価数を制御することが可能であるということにあります。この多価イオンから発せられる光を分光器で捉えることにより多価イオンの研究が行われています。

多価イオンは、いろいろなところ、特に高エネルギーの領域に存在します。しかもエネルギーの高い(波長の短い)光を発しています。多価イオンについて、我々の研究所で取り組んでいる研究の一端をご紹介します。

## 核融合研究の多価イオン

核融合研究において、多価イオンはやっかいなものです。有用な情報を発する研究対象でもあります。核融合炉では、燃料プラズマを磁場で閉じ込め高温にして核融合反応を起こしますが、このとき炉壁に使われるタングステン(W)が不純物として高温プラズマ内に侵入し、そのエネルギーを吸収して多価イオン化し、光を放出してプラズマを冷やしてしまう現象が起こります。これは、核融合炉にとって重大な問題ではありますが、一方でタングステン多価イオンは、いろいろな光を放出するため、それを解析することで閉じ込められているイオンの価数分布や電子状態の情報、プラズマの電子温度や密度、また、プラズマ中の粒子輸送などの情報まで得ることが可能です。図2に本研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の概念図と放電時のスペクトル(上段)を示します。無数の輝線が観測され、その複雑さ故に解析は困難でしたが、下段のCoBITによるタングステンスペクトルと比較することで、その輝線は、何価のイオンから放出されるかなどの理解が進み、詳細な解析が行われています。

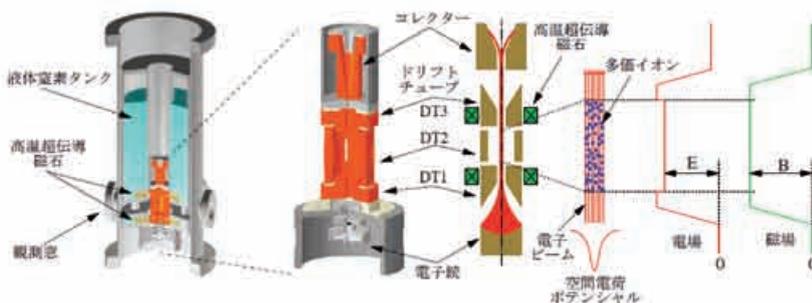


図1 小型電子ビームイオントラップ(CoBIT)の概念図

## 太陽コロナの多価イオン

次に舞台を宇宙に移しましょう。我々の生活の中で一番関わりのある天体・太陽は古くから興味の対象となってきました。太陽外層の最上層部には、コロナと呼ばれる希薄な高温プラズマが広がっています。可視域の分光スペクトルには、コロナ中に存在する多価イオンからの輝線が観測されます。中でも、1869年8

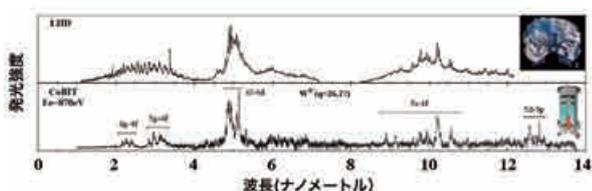


図2 タングステン多価イオンのスペクトル (上段:LHD、下段:CoBIT)。eVは電子のエネルギーを表す単位で、上段のLHD実験の電子の温度は2keV=2000eVに相当。

月の皆既日食で観測された530.29nm(ナノメートル、ナノは10億分の1)の波長を持つ強い輝線には逸話があります。この輝線は発見された当時には、知られていたどの元素のものとも解釈できなかったため(当時は多価イオンのデータがほとんどありませんでした)、太陽で「新元素」が発見されたと考えられ、コロニウムと呼ばれていました。しかし、1942年になってその輝線が鉄の13価イオン( $Fe^{13+}$ )の発光線であることが確かめられました。このように、太陽からのスペクトルには鉄の多価イオンの輝線が多数存在し、そのスペクトル解析により太陽コロナの温度や密度を推定することが可能であるため、多くの研究者が研究を進めています。図3に太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)のスペクトルとCoBITによる密度・温度の分かっている鉄の多価イオンスペクトルのエネルギー依存性を示します。これらを比較することで、輝線の同定や強度比からコロナの密度や温度を推定することができます。

### 半導体プロセスの多価イオン

多価イオンは、その性質を利用することでいろいろな分野で応用の研究が進められています。次に紹介するのは、半導体製造技術に関する応用例です。精細な電子回路で構成される大規模集積回路(LSI)は、まず写真技術を応用したリソグラフィ

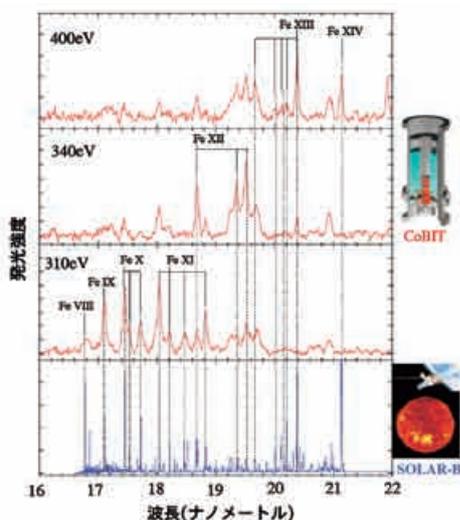


図3 鉄多価イオンのスペクトル (赤: CoBIT, 青: 太陽観測衛星ひので(SOLAR-B))

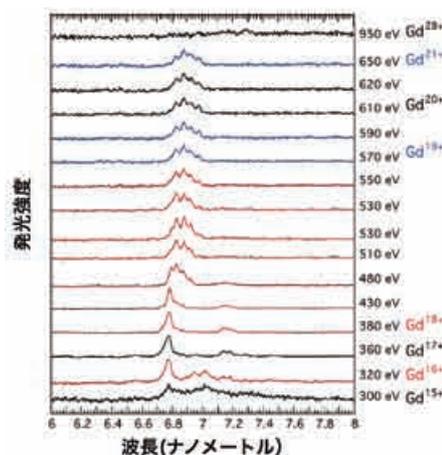


図4 CoBITによるガドリニウム多価イオンのスペクトル

技術によって回路パターンを基板上に縮小露光、転写し、次にプラズマエッチング、デポジションの技術によって個々の電子素子とそれを組み合わせた電子回路を作るという工程を経て製造されています。このLSIの性能は、どれだけ細かい加工ができるかで決まります。その最も重要な要素がエッチングに用いられる光の波長であり、どれだけ波長の短い光源を開発できるかにかかっています。EUV(Extreme Ultravioletの略)リソグラフィとは、極端紫外線と呼ばれる非常に短い波長(13.5nm)の光を用いるリソグラフィ技術で、従来のArFエキシマレーザー光(波長~200nm)を用いた光リソグラフィ技術では、加工が難しい20nmより微細な寸法の加工が可能となっており、現在は、スズ(Sn)多価イオンの発光を用いたレーザー生成プラズマ光源を用いたものが、最先端の製造装置となっています。しかし技術開発は更にその先の6nm帯光源に進んでおり、世界の研究者達がしのぎを削っています。我々はCoBITを用いて、いろいろな元素の多価イオンの6nm付近のスペクトルを取得し、光源の候補となる多価イオンの探査を行ってきました。その有力候補となるのがガドリニウム(Gd)多価イオンです。図4にCoBITによるGd多価イオンスペクトルのエネルギー依存性を示します。6nm付近に輝線が集中していることが確認でき、次世代EUV光源の有力候補となることが分かってきました。

### おわりに

ここまで紹介してきたものの他にも、EUV光源を用いた、生きたまま細胞を観察できる生体顕微鏡やX線レーザーなど、紙面の関係上紹介できなかった多価イオン研究分野は数多くあります。このように多価イオン物理学は、基礎原子物理学ばかりでなく、核融合分野から宇宙物理学分野、そして産業応用技術分野にまで幅広く広がっており、多くの研究者の興味を惹きつけています。

(核融合システム研究系 助教)