

重い元素の多価イオンが発する新しい波長の光を発見 ～極端紫外スペクトルの実験データベースを構築～

鈴木 千尋

よく知られているように、原子は正の電荷を持つ原子核と、その周りを取りまく複数の（負の電荷を持つ）電子から構成されており、原子全体としては電氣的に中性です。原子からいくつか電子を取り去る（電離する）と、全体として正の電荷を持つ正イオンとなります。プラズマは電離気体とも呼ばれるように、高温に加熱することにより気体が電離され、はぎ取られた電子と正イオンが乱雑に飛び回っている状態です。取り去られた電子が1つの場合は1価の正イオンですが、プラズマの温度が上昇するにつれて、次々と複数の電子がはぎ取られていき、イオンの価数が上昇していきます。このようなイオンは多価イオンと呼ばれます。

原子やイオンの内部の電子は、いくつかの異なるエネルギー状態を取ることができ、最低エネルギーの状態を基底状態、それ以外の状態を励起状態と呼びます。基底状態にある原子やイオンが、電子との衝突などによりエネルギーを受け取ると、励起状態に変化した後、より安定な低いエネルギー状態に戻ろうとしますが、その際に余分なエネルギーを光（スペクトル線）として放出します。その光の波長は、放出前後の状態のエネルギー差に反比例し、元素の種類やイオンの価数によって決まる固有の値となります。したがって、プラズマから出てくる光を分光器で波長に分けて、光の波長に対する強度分布（発光スペクトル）を計測することにより、プラズマ中に存在する元素の種類や価数が分かります。

炭素、酸素、鉄などの比較的軽い元素については、原子やイオンの発光スペクトルがすでに詳細に調べられ、各元素のスペクトル線についてのデータベースも公開されています。しかし、元素周期表で第5周期以降にある高原子番号の元素（例えば、スズや金など）で、特に多価イオンからの発光については、その生成に特殊な装置が必要であることなどから、スペクトル線の波長さえ、実験によって調べられていない元素もあります。これらの元素の多価イオンの中には、後述のように核融合研究やプラズマの産業応用

研究において重要なものも含まれており、発光スペクトルの物理的理解が求められています。

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置（LHD）で生成される高温プラズマにおいても、炭素や鉄などのプラズマ対向壁に由来する不純物の多価イオンからの発光スペクトルが観測されます。これらは発光によってエネルギーを閉じ込め領域の外に放出し、プラズマを冷却してしまうので、プラズマ閉じ込めの観点からは好ましくありません。一方、基礎的な原子物理学の観点からは、LHDは超高温プラズマを安定して比較的長時間閉じ込めることができるため、高原子番号の元素をごく少量混入させることによって、高価数の多価イオンを容易に生成して、その発光スペクトルを調べることが可能な、数少ない光源ともいえます。また、プラズマの温度や密度などが正確に測定できるため、発光スペクトルの理論予測の実験的検証に役立つデータベースが得られると考えられます。

そこで、元素周期表で第5周期および第6周期に位置する、スズ、ガドリニウム、タングステン、金、ピスマスなどの重い元素を、LHDの高温プラズマ中で多価イオンにし、極端紫外領域（波長1～15ナノメートル程度）の発光スペクトルを、斜入射型真空紫外分光器（図1）を用いて系統的に観

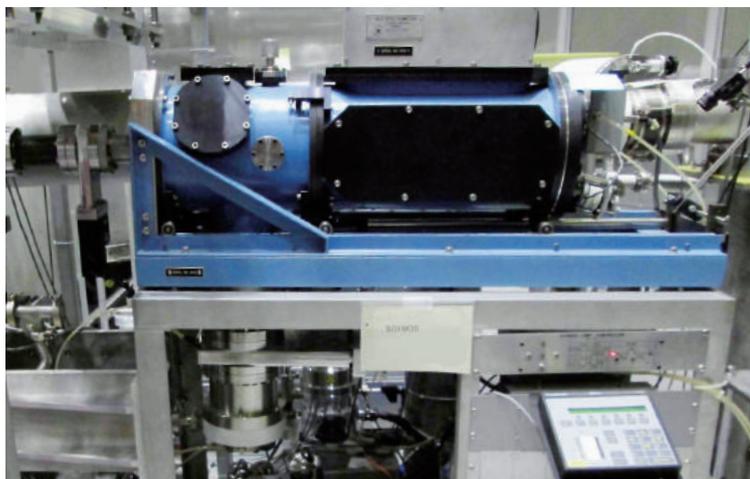


図1 斜入射型真空紫外分光器。極端紫外領域の光は空气中を透過できないため、機器全体が真空容器の中（青色の部分）に収められています。LHDプラズマからの発光は向かって左側から入射し、回折格子で分光されたのち、発光スペクトルとして検出されます。

測しました。この実験ではまず、高温プラズマ中の不純物の挙動を調べる目的で開発された、トレーサー内蔵固体ペレット (TESPEL) 装置を活用して、ごく少量の重い元素をプラズマ中に入射しました。その後、プラズマの加熱パワーを制御して、電子温度の高い状態から低い状態に変化させました。こうすることで、プラズマ中で支配的となるイオンの価数が電子温度に対応して変わることにより、スペクトルが劇的に変化する様子を一度の放電でまとめて計測することに成功しました (図 2)。一連の元素について発光スペクトルを原子番号順に整理すると、似た構造をもつスペクトル線が、原子番号の増加とともに短波長側へ移動していく様子が明瞭に分かります。このような解析の結果、原子番号が 65、67、69 の元素である、テルビウム (Tb)、ホルミウム (Ho)、ツリウム (Tm) の多価イオンの新たなスペクトル線を、世界で初めて実験的に発見しました (表 1)。理論的に予測される波長によく一致しているスペクトル線と、系統的にややずれているスペクトル線があります。この結果は、複雑な多価イオンの電子エネルギー構造の理論計算には、まだ改善の余地があることを示唆しており、理論予測の検証に有用なデータです。

同様の方法で、原子番号 50 ~ 83 の範囲のうち、これまでに半数以上の元素が LHD で系統的に調べられています。このうちスズなどは、次世代の半導体加工技術として期待されている極端紫外線リソグラフィ用のプラズマ光源材料として研究が進められており、金やビスマスは、いわゆる水の窓領域を用いた高コントラスト生体顕微鏡の光源材料の候補となっています。タングステン、国際熱

核融合実験炉 (ITER) におけるプラズマ対向材料として使用されるため、プラズマ中に混入したタングステン多価イオンの発光メカニズムの理解が求められています。本研究で得られた一連の実験データベースは、これらの研究開発において、シミュレーションの精度向上などに役立つ基礎データを提供するものです。

(高温プラズマ物理研究系 助教)

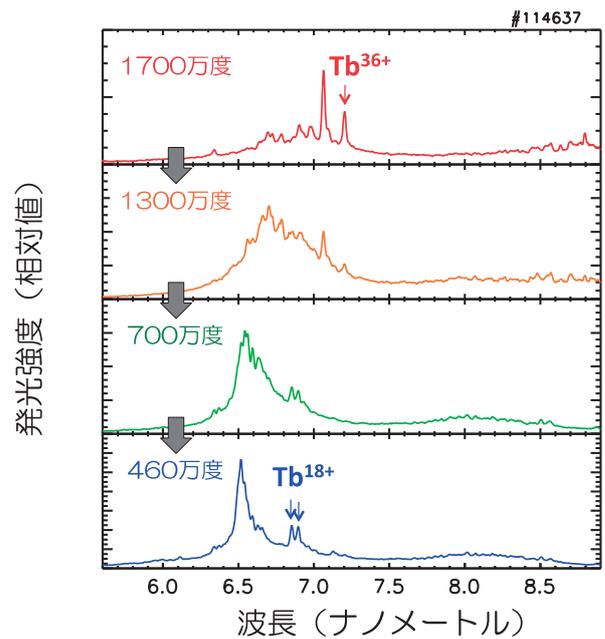


図 2 温度の変化ともなうテルビウム (原子番号 65) イオンの発光スペクトルの変化。波長 7.203 ナノメートルのピークが 36 価イオンのスペクトル線、6.852 ナノメートルと 6.896 ナノメートルの両ピークが 18 価のスペクトル線です。

表 1 LHD で初めて実験的に発見されたスペクトル線のリスト。

イオン	遷移 (下準位-上準位)	波長の実験値 (ナノメートル)	波長の理論予測値 (ナノメートル)
Tb ³⁶⁺	3d ¹⁰ 4p ² P _{1/2} - 3d ¹⁰ 4d ² D _{3/2}	7.203	7.202
Ho ³⁸⁺	3d ¹⁰ 4p ² P _{1/2} - 3d ¹⁰ 4d ² D _{3/2}	6.614	6.609
Tm ⁴⁰⁺	3d ¹⁰ 4p ² P _{1/2} - 3d ¹⁰ 4d ² D _{3/2}	6.072	6.069
Tm ²²⁺	4d ¹⁰ 4f ² F _{7/2} - 4d ⁹ 4f ² ² G _{9/2}	5.933	5.767
Tm ²²⁺	4d ¹⁰ 4f ² F _{5/2} - 4d ⁹ 4f ² ² G _{7/2}	5.986	5.817