

光でわかるプラズマの振る舞い ～真空紫外分光による不純物計測～

大石 鉄太郎

磁場で閉じ込めたプラズマの中には、炭素や酸素、金属等のいろいろなイオンが不純物として存在しています。不純物イオンは、プラズマからエネルギーを吸収して、そのエネルギーを「光」として放出します。そのためプラズマの温度を下げてしまうことがあり、あまり好ましくないと考えられがちです。しかし、実はこの「光」には、プラズマの性質や振る舞いに関する情報が数多く含まれているのです。不純物イオンを介した、プラズマから私たちへのメッセージとも言えるでしょう。今回は、不純物イオンが放出する光を計測してそのメッセージを読み解く研究について紹介し、プラズマの何が「わかる」のかをお話しします。

不純物イオンが放出する真空紫外光

図1は、大型ヘリカル装置(LHD)の断面図と磁力線の構造を表しています。磁力線が閉じてプラズマを閉じ込める「かご」を形成する「閉じ込め領域」、その周辺で長短さまざまな長さの磁力線が折り重なった「エルゴディック層」、磁力線が加熱板(ダイバータ板)に連結する「ダイバータレッグ」が主な構造です。主要な不純物である炭素イオンは、まずダイバータ板の表面から中性原子として放出され、電離して価数の高いイオンになりながらエルゴディック層へと向かいます。図1で $C^0 \rightarrow C^+ \rightarrow C^{2+} \rightarrow C^{3+} \rightarrow \dots$ と描かれているような様子を想像してみてください。エルゴディック層は不純物の振る舞いを決定する大きな役割を持っており、不純物を閉じ込め領域に引き入れたりダイバータ板に押し戻したりします。ここで不純物に何が起きているかを実際に知るために役に立つのが、光を波長ごとに分けて計測する「分光」という手法です。エルゴディック層のプラズマの温度は10万度から500万度程度で、この中にある不純物イオンは、波長が数10から約400ナノメートル(1ナノメートルは10億分の1メートル)の「真空紫外光」を強く放出します。ちなみに紫外光は英語で“Ultraviolet (UV)”といい、サングラスなどに表示されている“UV400”とは「波長400ナノメートル以下の紫外光をカットする」という意味です。それではこの真空紫外光を分光計測することで何がわかるのか、具体的に見ていきましょう。

不純物の種類と量が分かる

LHDの真空紫外分光計測では、30~320ナノメートルの波長領域を計測しています。その波長スペクトル(波長ごとの発光強度分布)のうち116.5~118.0ナノメートルの部分拡大したものを図2に示します。図2(a)を見ると、116.87ナノメートルにヘリウム中性原子の、117.49~117.64ナノメートルに2価の炭素イオンの線スペクトルが観測されています。原子やイオンはそれぞれ特有の波長を持った光を線スペクトルとして放出するため、波長からその種類を特定できるのです。さて、ここで、このプラズマの中に、別の種類の不純物を「わざと」導入してみます。図2(b)は、タングステンという金属の薄片(「タングステンペレット」と呼んでいます)をプラズマに入射し、その直後の真空紫外スペクトルを観測したものです。もともと観測されていたヘリウムと炭素に加え、矢印で示した116.82ナノメートルに新しい線スペクトルが観測されました。これが、タングステンイオンがプラズマ中で発光した時の線スペクトルということになります。LHDではこのように、金属不純物をわざとプラズマ中に導入して発光させる実験を盛んに行っています。発光波長を調べ、発光強度や発光位置がどのように変化するかを観測することで、プラズマ中での金属不純物の振る舞いが見られるのです。特にここで紹介したタングstenは、

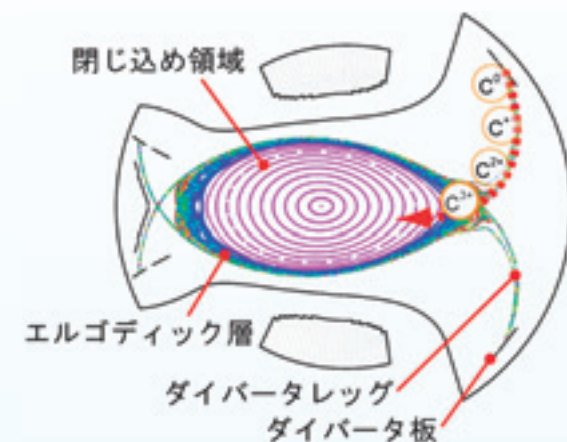


図1 LHD装置の断面図と磁力線構造。主要な不純物である炭素イオンはダイバータ板から発生し、電離しながらダイバータレッグとエルゴディック層を経て閉じ込め領域に至る。

国際熱核融合実験炉ITERでダイバータ板の材料として用いられ、将来の核融合炉でも使用される可能性があります。そのため、不純物としてプラズマ中に入ってきた時の振る舞いが注目されていますが、真空紫外の波長領域でタングステンイオンの発光を計測した例はほとんどなく、LHDでの研究が大いに役に立つものと思われる。

プラズマの温度と「流れ」が分かる

線スペクトルの形状を正確に計測することもまた重要です。図3(a)は、3価の炭素イオンの線スペクトルを拡大したものです。静止した3価の炭素イオンの発光は154.82ナノメートルの波長を持ちますが、その2倍の波長309.64ナノメートルにも線スペクトルが現れます(2次光)。これを実際に計測してみると、309.64ナノメートルを中心に、長波長側にも短波長側にも広がりをを持った、釣り鐘型のスペクトル形状をしています。これは炭素の不純物イオンがプラズマ中である熱速度(イオン温度)をもって運動していることに起因しています。「ドップラー効果」という現象によって、観測者(計測器)に近づく方向に運動しているイオンの発光は波長が短く、遠ざかるイオンの発光は波長が長く観測されます。大きな速度で運動するイオンの発光ほど、静止したイオンの発光から波長が大きく変化します。プラズマ中には様々な速度を持ったイオンが分布していますので、それらの重ね合わせの結果、スペクトルが広がって見えるのです(ドップラー広がり)。従って、スペクトル

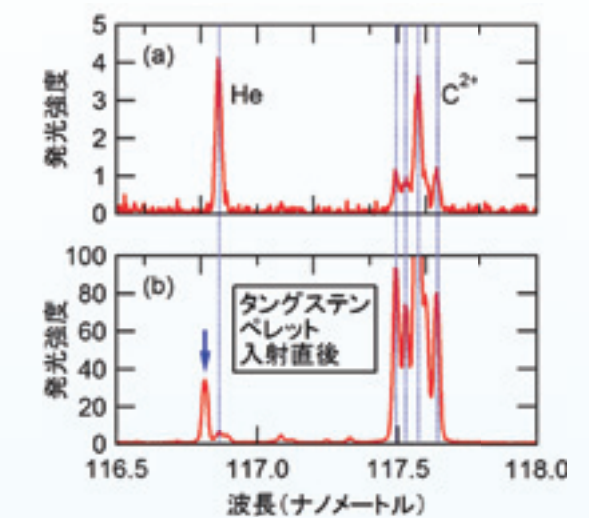


図2 (a) LHDプラズマの真空紫外光スペクトルに、ヘリウム中性原子と2価炭素イオンの線スペクトルが観測されている。(b) プラズマ中にタングステンという金属の薄片(ペレット)を入射すると、入射前には見られなかった線スペクトルが現れ(矢印)、タングステンイオンが発光していることが分かる。

の広がりを計測することで、プラズマ中でイオンが運動する熱速度、すなわちイオン温度が分かり、図3(a)の場合は26万度に相当します。3価の炭素イオンが発光することが分かっている、エルゴディック層でのイオン温度として解釈できます。さて、この時の実験では、プラズマの電子密度を増加させていったのですが、それに伴って炭素イオンの線スペクトルの波長の中心が短波長側にシフトすることが観測されました。これも原因はドップラー効果です。ランダムな熱運動の場合と異なり、イオンがある方向にまとまった「流れ」を持って運動している場合、線スペクトルの波長の中心が丸ごとシフトします。図3(b)に示したスペクトルは、図3(a)と比較すると短波長側に0.0083ナノメートルのシフトがあり、流れの大きさに直すと秒速8キロメートル程度です。エルゴディック層の中に「流れ」があることが示唆されます。プラズマの流れを形成する原因には様々なものがありますが、ここで流れの大きさが測れるようになったことで、その原因の特定に近づいたと言えます。今後、このような流れがプラズマの閉じ込め性能や不純物の振る舞いとどのような関係にあるのかを調べていく予定です。

ニュートンがプリズムを使って太陽光を分光したのが、分光研究の始まりとされています。現代に生きる私たち核融合研究者もまた、光を頼りにプラズマからのメッセージを読み解きながら、「地上の太陽」の実現を目指しているのです。

(高密度プラズマ物理研究系 助教)

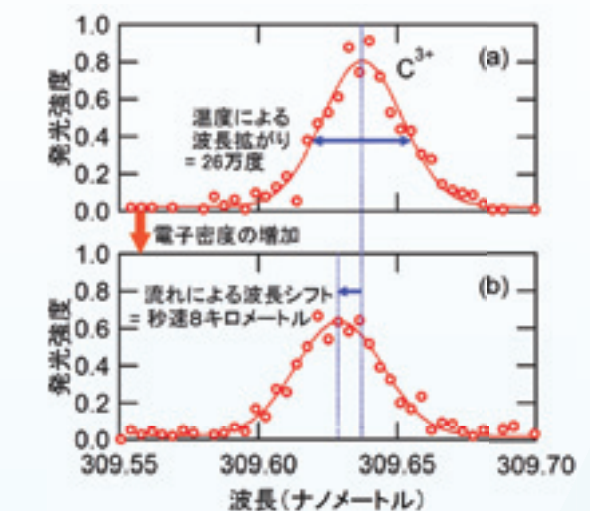


図3 3価の炭素イオンの発光スペクトル。(a) 線スペクトルの広がりからイオン温度が求められ、(b) 波長シフトはプラズマに流れがあることを示している。