

分光計測による電子密度評価と不純物分布の研究

村上 泉

大型ヘリカル装置(LHD)で実験しているプラズマは、その大部分が水素ガスを電離してできた水素イオン(つまりは陽子)と電子からできていますが、その中に、それ以外の元素のイオンが微量含まれていて、不純物といわれています。その不純物は、プラズマを閉じ込める容器などの壁にプラズマがぶつかって壁の材料から出てくる鉄や炭素、容器の壁の中に取り込まれていた大気中の酸素、あるいはプラズマの状態を調べたり多価イオン研究などのためにわざわざ中に入れるヘリウムやアルゴン、ネオンなどのガスや金属元素などです。これらの不純物は、量が少なれば問題はないのですが、プラズマのエネルギーの一部を光に変換して放出し、プラズマを冷やしてしまう性質があるため、プラズマの中心では多くあっては困ります。一方、その性質を逆に利用してプラズマの周辺部分を冷やして壁を保護するために不純物ガスを入れることもあります。不純物がプラズマ中でどのように分布しているか、どのように振舞っているかを調べることは、高い温度のプラズマを生成して保持するために必要となってきます。

プラズマ中の不純物を調べるための一つの方法として、プラズマ分光があります。不純物が発する光を調べる方法です。プラズマからの光を、その光の波長(エネルギー)ごとに分解して強さを測る分光計測をすると、不純物が出す固有の波長の光、スペクトル線を調べることができ、不純物の様子を知ることができるのです。ここでは、プラズマ中にペレットという小さな鉄の粒を入れて分光計測して、LHDプラズマでの鉄イオンの様子を調べてみました。

もともと鉄は26個の電子を持った原子ですが、鉄の原子がプラズマ中に入ると、プラズマ中の電子と衝突して自分の電子を失って電離し、鉄イオンとなります。いくつ電子を失った鉄イオンとなるかは、プラズマの電子温度によってだいた

決まり、温度が高いほうがたくさんの電子を失い高い価数のイオンとなります。"価数"は失った電子の数と同じになります。LHDの典型的なプラズマでは、中心では電子温度が高いため、1個か2個程度の電子しか持たない25価や24価などの鉄イオンですが、周辺へ行くに従って温度が低くなり価数も低い鉄イオンになると考えることができます。鉄のペレットがプラズマへ入ると、短時間で固体表面から溶発してガス状になり、更に電離して価数の低いイオンが初めに現れ、次々に電離して、価数の高いイオンになります。その様子は、分光計測をすると、それぞれの価数の鉄イオンに固有のスペクトル線がいつ見えるかわかります(図1)。さらに、スペクトル線の強さはイオン密度、プラズマの電子温度や密度によって変わってきます。同じイオンから出た異なる波長のスペクトル線2本の強度比を使うと、電子温度や電子密度を調べることもできます。

ここでは特に20価の鉄イオン(電子を6個持っている)が発する2本のスペクトル線の強度比に着目します。原子データを使った分光モデル(衝突輻射モデルといいます)を用いると、強度比は、電子密度によって大きさが変化することがわかります(図2)。これを用いると、強度比から電子

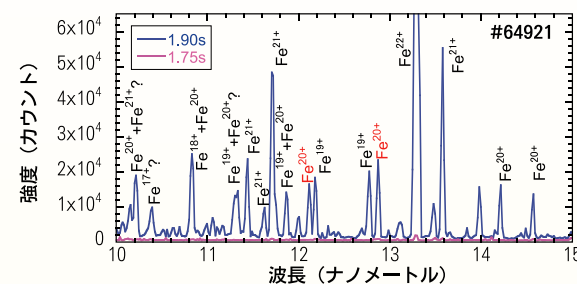


図1 鉄ペレット入射(1.8秒)の前(1.75秒、紫線)と、後(1.90秒、青線)の極端紫外スペクトル。入射後、いろいろな価数の鉄イオンからのスペクトル線が見えています(ラベルをつけていないスペクトル線は未同定です)。このなかの12.1ナノメートルと12.8ナノメートルの波長の2本の20価の鉄イオンのスペクトル線(赤字)の強度比を調べました。

密度を見積もることができるのです(図3)。一方、電子密度は、ほかの方法を使って分布が計測されています。その分布と、先ほど強度比から見積もった電子密度を使うと、鉄イオンが光っている場所を見積もることができます(図4)。その場所の時間変化を見ると、この鉄イオンは、鉄ペレットの溶けた場所付近に初め現れ、しばらくその場にとどまった後、周辺方向へ移動したことがわかりました。図5にその様子を概略で表しました。分光計測だけでは、計測した方向のどの場所で鉄イオンが光っているかはわかりませんが、モデルやほかの計測結果を組み合わせることで、鉄イオンの場所や動きを見積もることができたのです。不純物である鉄イオンが、なぜそのような振る舞いをするかは、輸送過程というプラズマの問題をさらに考える必要があり、更なる研究が必要です。

さて、このような研究方法では、分光モデルが解析する上でポイントとなってきます。モデルに使われる原子データの精度とモデル自身の精度が良いことが求められます。モデルに使われるたくさんの原子データを評価することが大切です。原子分子データの収集や評価といった原子分子データベース活動は、非常に地味ではありますが、いろいろな分野への応用が可能な基礎的

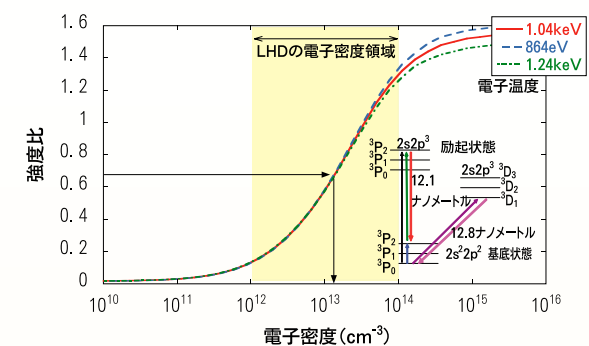


図2 強度比の電子密度依存性。LHDプラズマではちょうど、変化しているあたりの電子密度に相当し、この領域では、電子温度による違いはほとんどありません。この依存性を使い、強度比から電子密度を求めることができます。図中右下に、20価の鉄イオンのエネルギー準位の模式図を示します。測定した2本のスペクトル線のうち、12.1ナノメートルのスペクトル線(赤)の強度は、主に、電子密度依存性が強い基底状態の微細構造レベル間の電子衝突励起過程(青矢印)とそこから電子衝突励起過程(緑矢印)によって決まりますが、12.8ナノメートルのスペクトル線(ピンク)のほうは、直接基底状態からの電子衝突励起過程(紫矢印)によってスペクトル線強度が主に決まるため、それぞれのスペクトル線強度の電子密度依存性が異なっています。そのため、強度比に電子密度依存性が現れます。

なデータを提供する重要な研究活動です。このような活動によって整備されたNIFSの原子分子データベースは<http://dbshino.nifs.ac.jp/>で公開されており、研究所内外の様々な研究者に利用頂いています。

(核融合システム研究系 教授)

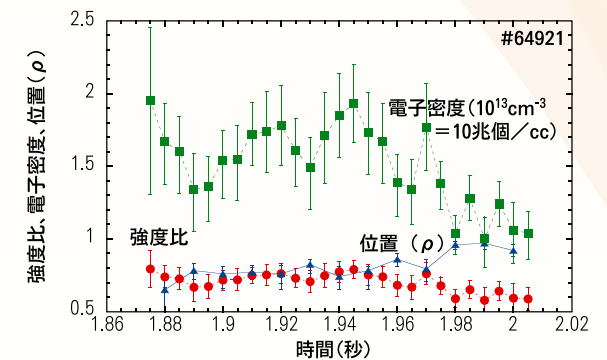


図3 分光計測で得られた鉄20価イオンからのスペクトル線の強度比の時間変化(●)、モデルを使って見積もった電子密度の時間変化(■)、図4のように電子密度分布と比較して見積もった鉄イオンの場所(プラズマ中心からの位置)の時間変化(▲)。

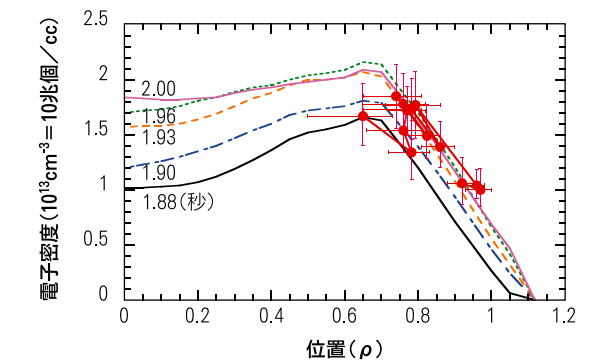


図4 遠赤外干渉計で計測した電子密度分布と、スペクトル線強度比を使って見積もった電子密度を比較し、鉄20価イオンの場所(●)を推定しました。

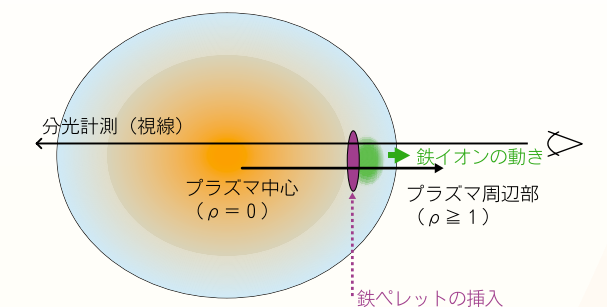


図5 実験の様子の概略。プラズマに鉄ペレットが入ると、溶けてガス状(紫楕円)になり、電離して鉄イオン(緑)が現れます。図3のように分光計測を解析し、電子密度分布(図4)と比較することにより、20価の鉄イオン(図4の●)は時間とともに周辺部へ移動して行くことがわかりました。