

氏 名 片井 隆志

学位 (専攻分野) 博士 (理学)

学位記番号 総研大甲第 1036 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Spectroscopic study on forbidden magnetic dipole
transitions in LHD

論文審査委員	主 査 教授	松岡 啓介
	教授	森田 繁
	教授	居田 克巳
	教授	州鎌 英雄
	教授	田原 讓 (名古屋大学)
	教授	近藤 克己 (京都大学)

不純物イオンは電離が進むと、放射されるスペクトル線の波長は可視から真空紫外、X線とより短い波長領域へ移動する。すなわち、高温プラズマの中心部ではX線領域における放射が主体となり、LHDにおいても状況は同様である。このため、従来から可視光を利用した分光法はNBIを利用した荷電交換分光を除けば、プラズマエッジ部の診断に限定されていた。一方、磁気双極子禁制線(M1遷移)は多価イオンの基底準位内の遷移である為、通常観測に用いている真空紫外やX線領域にある許容遷移(E1遷移)と比較してスペクトル線の波長は大きく長波長側へ移動し、主に可視領域で放射される。これを利用することができれば、多価イオンの振舞いを可視分光によって観測することが可能となる。LHDを代表とするヘリカル装置は3次元磁場構造を有しており、磁気面構造を反映している多価イオンの空間構造を可視像で観測できればプラズマ平衡に基づく磁気面変形の3次元構造を解明する直接的な手がかりを得ることが可能となる等、計測上の利点は数多く存在する。また、核燃焼を目指した次世代核融合装置のプラズマ対向面材料としてモリブデンやタングステンのような高Z材料が現在候補として挙げられている。これら不純物イオンの振舞いを磁気双極子禁制線を利用し、可視領域において光ファイバーを通して観測することができれば、真空紫外分光のような装置に直結する必要のある計測器に不可避であるトリチウムや中性子に起因する問題を一気に解決することが可能となる。本研究は以上に述べた事柄を念頭に置き、多価不純物イオンから放射される磁気双極子禁制線の構造やその放射強度に関する基礎的な研究を行うことにより、LHDや次期核融合装置における新たな計測手法の可能性を探求しようとするものである。

多くのM1遷移は可視領域に存在するが、一部のM1遷移は真空紫外領域にも存在するので、その観測のために真空紫外分光器の計測開発を行った。具体的には、M1遷移観測に用いた3m直入射真空紫外分光器の空間分解スリット、前置ミラー光学系及びトロイダルスリットの最適化を行い、スペクトルの2次元画像を観測可能にすると共に多価に電離された炭素、ネオン及びアルゴンイオンから放射される真空紫外スペクトルの空間分布を取得した。また、LHDプラズマ中には存在しない高Z元素を発光させるために不純物ペレット入射装置を用いて固体不純物ペレットを入射した。通常の高Z金属不純物ペレット入射によるプラズマ放射崩壊を回避するために、炭素ペレット内部に直径0.2mmの高Z材料細線を挿入した手法や炭素ペレット外部に高Z材料をコーティングする手法を考案した。これにより、安定な高Z元素不純物入射が可能となった。

LHDのアルゴン放電において可視及び真空紫外分光計測を行い、多価アルゴンイオンM1遷移をトラスプラズマでは初めて観測した。スペクトルのドップラー広がりや空間分布を計測することによりM1遷移の同定を行った。また、前置ミラー光学系を取り外して計測系を明るくした後、回折格子の設定位置や入口スリットを最適化することにより最高の波長分解能($\pm 0.02\text{\AA}$)を達成した。これにより真空紫外M1遷移波長の観測精度を格段に向上させることができた。

一方、1991年にFeldmanらによりネオディウム($Z=60$)からウラン($Z=92$)のチタン様のM1遷移($3d^4\ ^5D_J\ J=3'$)が可視領域で非常に強く発光する可能性が示された。現在

のところ、これらチタン様高 Z イオンのエネルギー準位は 1% 程度の精度でしか理論計算がなされていないが、その波長は元素の違いによらずほぼ一定値となり、3000–4000Å の可視域に存在することが予測されている。次世代核融合装置における不純物及びイオン温度計測を目的として、クリプトン、キセノン及びモリブデンの M1 遷移を探求した。その結果シリコン様電離状態 ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$) にある KrXXIII (3841.07±0.05Å), MoXXIX (2842.10±0.05Å) 及びチタン様電離状態 ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^4$) にある XeXXXIII (4139.01±0.05Å) について可視 M1 遷移を観測することに成功した。また、これらスペクトル線が非常に大きな強度で発光していることを確認すると共に、その遷移波長測定精度をこれまでの EBIT (Electron Beam Ion Trap) 等の実験に比べて一桁以上向上させることができた。これらの成果は、次世代核融合装置におけるプラズマ対向面材料の候補であるタングステンの M1 遷移を利用した観測の可能性を強く示唆するものである。

次に、M1 遷移の発光強度の物理過程を研究するために禁制線と許容線の発光線強度比 (M1/E1) の観測とその解析を行った。これまでのところ、その発光線強度比は密度に大きく依存することが理論的に予測されているが、実験的な確証は全く得られていない。そこで、フッ素様電離状態 ($1s^2 2s^2 2p^5$) にある ArX (5533Å/165Å), TiXIV (2218Å/122Å) 及び FeXVIII (975Å/94Å) とベリリウム様電離状態 ($1s^2 2s^2$) にある ArXV (5944Å/221Å) の M1/E1 発光線強度比を電子密度の関数として観測した。次に、分光器間の感度の違いを補正するために、可視標準光源であるタングステンランプを用いて可視分光器を絶対較正し、同上準位を有する分岐線強度比を用いて真空紫外分光器の感度較正を行った。その結果、それらの強度比が密度の関数として記述できることを初めて実験的に証明した。この密度依存性は M1 遷移の発光機構に起因していると推測されるので、それを解明するためにフッ素様イオンについては 3 準位モデルを、また、ベリリウム様イオンについては 5 準位モデルを用いて解析を行った。計算モデルには電子衝突による励起・脱励起、イオン衝突による基底準位内での励起・脱励起及び輻射過程を考慮した。実験データを解析した結果、強度比の密度依存性は M1 遷移を発光する基底準位内の電子及びイオンの衝突脱励起によって説明できることが判った。また、脱励起係数は M1 輻射遷移確率と密度の競合過程で決まり、M1 輻射遷移確率が大きくなるとより高い密度領域で密度依存性を示すことが明らかとなった。計算値と実験値の間には 10–50% 程度の違いが観測されたが、これは分光器の感度較正や計算に用いた原子データ (電子衝突励起断面積等) に起因する誤差によるものと思われる。次に、LHD における高速イオン密度分布の計測や次世代燃焼プラズマにおけるアルファ粒子計測を念頭に置き、NBI からの高速陽子による励起及び脱励起過程による強度比への寄与を解析した。強度比に占めるその寄与は数% 以下であり、現在のところその影響は無視できる程度であるが、確実に M1 遷移強度に寄与することが判明し、将来の計測発展にむけて可能性を示した。

片井君の博士論文は、ヘリカルプラズマ中の多価イオンの磁気双極子禁制線 (M1 遷移) の測定に関するものである。大きな原子番号 (Z) を持つ多価イオンに関する分光学的な研究は、スピンや軌道角運動量を始めとする非常に大きな核・軌道電子間相互作用を有する多体系原子物理のみならず、核融合や天文学等の応用分野においても、その学術的な重要性が高まっている。M1 遷移からの発光波長は許容線 (E1 遷移) と比較して大きく長波長側にシフトする。その結果、多くの禁制線が可視領域に存在し、且つ Z が大きくなると遷移確率が急激に増大するという特徴を有する。このため、M1 遷移に関する研究は、将来の核融合実験装置における高 Z 不純物の計測において、測定技術上有利な可視分光が可能になる点で非常に重要である。

片井君は先ず、高 Z 不純物の導入に対してプラズマ崩壊現象が発生しにくいというヘリカルプラズマの特長に着目した。実験を行った大型ヘリカル装置 (LHD) は、プラズマの小半径が 50~60cm と大きく、且つ長時間放電が容易に行われるという特長も併せ持つ。希ガスである Ar, Kr, Xe はガスパフによりプラズマ中に導入することが出来、その導入量を比較的容易に制御できる。一方、Ti, Fe, Mo については、不純物ペレットを開発することによりプラズマ中に導入した。高 Z 不純物ペレットの入射実験の例は殆どなく、不純物による輻射損失が電子温度や電子密度などのプラズマパラメータに局所的に大きな摂動を与えることから、ヘリカルプラズマといえどもプラズマ崩壊現象を避けることは容易ではない。そのため片井君は、最初に高 Z 不純物入射の予備実験を行い、プラズマ崩壊現象を避けうる高 Z 原子の概略の個数を見積もった。ペレットの大きさそのものは、ヘリウムガスによる加速を容易にするため、少なくとも 0.5mm 以上の寸法が必要である。そこで、高 Z 金属を炭素ペレットにコーティングする、或いは、微小な金属円筒をプラスチックに埋め込む、等の方法を考案し、2 層構造ペレットを作成した。一方、計測には、3m 直入射真空紫外分光器、50cm Czerny-Turner 型可視分光器を用いた。真空紫外光スペクトルの半径方向分布を得るために、分光器には平面及び凸面の前置ミラーを設置し、LHD プラズマの縦方向分布を計測した。

片井君は、これらを用いて、可視から真空紫外域にわたるスペクトル線の情報を得た。M1 遷移については、ドップラー広がり等を丹念に調べ同定した。以下に結果をまとめる。

- ①Ar について真空紫外域の M1 遷移を実験室プラズマにおいて初めて観測した。これは、真空紫外分光器と光源としての LHD プラズマという組み合わせの特長を活かした成果である。±0.02Å の分解能を達成し波長観測精度を格段に向上させた。
- ②Ar の可視域 M1 遷移は真空紫外域の結果から推測された通り炭素など他のスペクトルと同程度の発光強度を持つことを確認し、ファイバーアレイを用いて ArX5533Å の空間分布を得ることに成功した。将来の不純物計測にとって有用な貢献と考えられる。
- ③Ti, Fe, Kr, Mo, Xe の高電離イオンから発光する M1 遷移の可視域の波長を精度よく測定した。その中には、核融合プラズマにおける測定では世界初の成果が含まれている。特に、より高 Z の Kr, Mo, Xe については、EBIT など他の実験装置においてこれまで得られた結果よりも 1 桁以上精度良く波長を決定した。理論計算では到底達成しえない精度であ

り、当該分野において大きな貢献を果たしたと言える。現在のところ、最終的にはプラズマの回転によるドップラーシフトの影響が波長分解能を決定しているが、多価イオンを大量に含むプラズマ光源としての特長を活かした成果である。

④M1 遷移に関する物理的な理解を深めるために、LHD プラズマの密度領域のうち、 $0.2 \sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において、E1 遷移に対する M1 遷移の強度比を Ar、Ti、Fe について測定した。解析モデルとして準定常速度方程式を用い、電子、陽子の他、中性粒子ビーム加熱による高速陽子による衝突励起効果を含め、Ar について計算を行った。具体的には、より簡単な電子配列を有する F 様アルゴンの強度比 ($\text{ArX}5533 \text{Å}/165 \text{Å}$) を実験の対象とした。密度の上昇につれて強度比が減少するという理論計算予測が示す密度依存性が実験的に初めて得られ、電子密度依存性は基底準位内の衝突脱励起過程による M1 遷移強度の飽和によって説明出来ることが示された。絶対値については計算結果と実験結果の間に差があるが、分光器の感度校正や計算による断面積の誤差をその原因とした。

以上のように、片井君の研究は、LHD において Ar、Ti、Fe、Kr、Mo、Xe の M1 遷移の観測を行い、特に高 Z イオンにおいては $0.02 \sim 0.05 \text{Å}$ という高精度の波長分解能を達成し、将来の核融合プラズマにおける不純物計測に貴重な貢献を行った。よって、本論文の内容は学位（理学）の授与に十分値すると判断した。