

氏 名 小 瀨 隆

学位（専攻分野） 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大甲第520号

学位授与の日付 平成13年3月23日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 LHDプラズマにおける真空紫外域でのC⁶⁺イオン
と水素原子の低エネルギー荷電交換反応の研究

論文審査委員	主 査 教授	須藤 滋
	教授	加藤 隆子
	教授	濱田 泰司
	助教授	佐藤 國憲
	教授	藤本 孝 (京都大学)

論文内容の要旨

LHD プラズマにおいて C^{6+} イオンと基底準位にある水素原子との低エネルギー衝突における荷電交換反応による線スペクトルが観測された。 C^{5+} $n=4$ 準位からの遷移に対応するスペクトル線強度の異常は、原子衝突分野が与える低エネルギー衝突での C^{5+} $n=4$ 準位への強い選択的捕獲性に対応している。また空間分布計測によって、この荷電交換反応が生じている領域が最外殻磁気面の近傍にあることが見いだされた。

中性粒子ビームとイオンとの荷電交換反応は、イオンの高励起準位への電子捕獲断面積が大きいことを利用し、ドップラープロファイル測定によるイオン温度計測、プラズマ回転速度計測に使用されている重要な計測法である。本研究は高エネルギービームの中性粒子ではなくプラズマ中に存在する低エネルギー水素原子と不純物多価イオンとの荷電交換反応を分光法によって検出し、低エネルギー水素原子、周辺プラズマでの多価イオンについての知見を得ることを目的としている。プラズマ中の中性粒子は荷電交換による粒子損失や放射によるエネルギー損失などに深く関わるため、閉じ込め特性やエネルギーバランスの研究において磁気閉じ込めプラズマ中の中性粒子の挙動を知ることは必要である。特に NBI 加熱においては NBI 加熱の吸収パワーの増加と共にプラズマ中の水素原子密度が増加するという報告がある。これらは入射された高エネルギー粒子が一度は電離されるが、再度荷電交換により中性化しプラズマの外へ高いエネルギーを持って飛び出し、その粒子が内壁で反射され Frank-Condon よりも高いエネルギーを持ってプラズマ内に侵入するものとされている。このプラズマ中へ侵入水素によってプラズマ中心部での水素原子密度は 10^8 cm^{-3} に及ぶことが多くの実験やシミュレーションで示されており、この水素原子が荷電交換反応によって不純物イオンの電離バランスに大きな影響を与える可能性にも興味もたれる。

プラズマ中における原子素過程を考慮した衝突輻射モデルを利用し、ここで対象とするスペクトル線の強度分布を比較のために求めた。モデル計算では COLRAD コードを用いて C^{5+} イオンにおけるライマン系列の発光強度分布を求めた。電子密度範囲 $n_e = 10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、電子温度範囲 $T_e = 100 \sim 1000 \text{ eV}$ で求めた C VI Ly α (1s-2p)、C VI Ly β (1s-3p) と Ly γ (1s-4p) の比は、 n_e および T_e における依存性は非常に小さくほぼ一定となり、それぞれの強度比は $I(\text{Ly } \beta)/I(\text{Ly } \alpha) = 0.09 \pm 0.03$ 、 $I(\text{Ly } \gamma)/I(\text{Ly } \beta) = 0.26 \pm 0.03$ が得られた。

実験では対象としたライマン系列のスペクトル線（特に C VI Ly α 、Ly β 、Ly γ ）を 18-41 Å の波長領域において同時に観測を行った。NBI 加熱時に観測された強度比 $I(\text{Ly } \gamma)/I(\text{Ly } \beta)$ は 0.6-1.0 となり COLRAD コードから求められた値と大きくくい

ちがった結果が得られた。一方、 $I(\text{Ly } \beta)/I(\text{Ly } \alpha)=0.06-0.12$ は COLRAD コードの予想する値によく一致したことから、 C^{5+} $n=4$ 準位のポピュレーションが増加していると判断される。またこれは原子衝突の分野で与えている C^{6+} イオンと基底準位にある水素原子との荷電交換反応によって電子が捕獲される選択的準位 $n=4$ と一致することから、ここで観測された C^{5+} $n=4$ 準位のポピュレーションの増加は低エネルギー衝突によるものと結論される。

次にライマン系列の各スペクトル線の空間分解計測を行った。さらに観測された結果をアーベル変換することによりスペクトル線強度の空間分布を調べている。まず観測された $\text{Ly } \alpha$ と $\text{Ly } \beta$ の発光強度分布を観るとよく類似した分布であることが確認され、規格化半径 $\rho=0.9$ 近傍にピークした分布が得られた。一方 $\text{Ly } \gamma$ はこれらと大きく異なった分布が観測された。これは低エネルギー荷電交換反応の影響が表れているものと判断され、荷電交換反応領域と C^{5+} イオンの存在領域が大きく異なっていることを示唆している。さらに反応領域をより明確にするために、衝突輻射モデルから予想される $\text{Ly } \gamma$ と $\text{Ly } \beta$ の関係を利用して、観測された $\text{Ly } \gamma$ から荷電交換反応の成分 $\text{Ly } \gamma_{\text{cx}}$ を見積もり、その分布を調べた。その結果 $\text{Ly } \gamma_{\text{cx}}$ は $\text{Ly } \alpha$ 、 $\text{Ly } \beta$ よりも外側の最外殻磁気面近傍にピークを持った分布を示した。これは最外殻磁気面の内側寄りの領域で荷電交換反応が起きていることを示唆している。また、LHD プラズマの特質である電子温度の急峻な立ち上がりが上述の反応領域とほぼ一致して観測される場合に、強度分布の異常が多く観られることからこの特質との関係が考えられる。

分光器の感度較正を行い観測される $\text{Ly } \alpha$ の発光強度から C^{5+} イオンの基底状態のポピュレーションを見積もった。感度較正は遷移の上準位が同一である二本のスペクトル線を一組とし、異なった波長領域にある数組の強度比を利用することにより感度曲線を求め、標準光源より較正された可視分光器を利用して絶対値を与えた。次に COLRAD コードを利用して基底準位と $n=2$ のポピュレーション分布を求めると、 $n_e=10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T_e=300 \text{ eV}$ の条件下で約 10^9 の分布比が得られた。これから C^{5+} イオンのほとんどが基底状態にあることが分かる。ここでこの分布比と先の絶対感度曲線を利用すると $\text{Ly } \alpha$ から $2p$ 準位のポピュレーションと C^{5+} イオン密度を求められる。その結果 $n_e=10^{13} \text{ cm}^{-3}$ に対して 1.5% 程度の C^{5+} イオン密度を得た。つぎに COLRAD コードに荷電交換反応の効果を追加し、ライマン系列線スペクトルの強度分布の変化を調べた。モデル計算の初期条件としては実験条件である $n_e=10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 、 $T_e=300 \text{ eV}$ 、他の測定から得られた水素原子密度 $n_H=10^{10} \text{ cm}^{-3}$ と先で求めた C^{5+} イオン密度を与えた。最後に C^{6+} イオン密度を自由変数として強度分布の変化を調べると、 10^{11} cm^{-3} の場合に観測結果に近い強度分布が得られた。これからより詳細な計測を行うことにより、 C^{6+} イオンの密度分布が得られる可能性が示された。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、プラズマにおける多価イオンと水素原子との間に生じる低エネルギー衝突での荷電交換反応の分光計測に関するものである。原子衝突分野における多価イオンと水素原子間の荷電交換反応の顕著な特質のうち、高エネルギー衝突に関するものでは電子の高励起準位への捕獲があり、この高エネルギーでの荷電交換は、プラズマの研究において水素ビーム ($E > \text{数十 keV}$) を利用した荷電交換分光として確立されプラズマ診断に多く利用される。一方、プラズマに進入するリサイクリング水素原子 ($E < \text{数十 eV}$) と多価イオンとの低エネルギー荷電交換反応は、反応断面積としては 10^{-15} cm^2 におよぶ大きな値をもち、プラズマ中不純物の電離バランスにおいて電離度を下げる効果を持つことが報告されている。しかし、素過程としての低エネルギー衝突における水素と多価イオンの荷電交換過程の観測は数例にとどまり、いまだ不明な点が多い。

本申請者は、低エネルギー衝突における荷電交換反応の特徴である低励起準位への選択的な電子捕獲に着目し、LHD プラズマにおいて、完全電離した炭素イオン C^{6+} が水素原子との荷電交換によって C^{5+} の主量子数 $n=4$ に電子を捕獲していること ($\text{C}^{6+} + \text{H} \rightarrow \text{C}^{5+} (n=4) + \text{H}^+$) を実験で検証した。測定対象としたプラズマは中性粒子ビーム入射により加熱されており、中心電子温度が 2 keV 程度であり、観測に用いた真空紫外分光器の視野の中には高エネルギーの水素ビームは存在しない。実験は、水素様炭素イオン C^{5+} のライマンシリーズ線スペクトル強度を測定する形で行われ、 $\text{Ly}\gamma$ 線 2.69 nm ($1s-4p$) が異常に高い強度を有することが見出され、再現性も確認された。 $\text{Ly}\beta$ 線 2.84 nm ($1s-3p$) との比較では、プラズマの条件によっては準位 $n=3, 4$ の間に電子の反転分布 (population inversion) が観測された。衝突放射モデルによる計算コード (COLRAD) からの計算結果との比較からも、ライマンシリーズの強度分布の異常は $n=4$ 準位の高い分布密度、すなわち低エネルギー荷電交換による選択的電子捕獲に起因することが結論された。次に上記の反応が生じている領域を特定するために、ライマンシリーズ放射強度の空間分布計測が行われ、アーベル変換の結果 $\text{C}^{6+}-\text{H}$ の系での荷電交換が最外殻磁気面近傍で生じていることが示された。ホローな強度分布を示す $\text{Ly}\alpha$ 線からは、絶対強度測定により C^{5+} イオン密度が平均半径 $\rho=0.9$ でピーク値 10^{11} cm^{-3} をもつことが与えられる。これを利用し、水素 $\text{H}\alpha$ 線から見積もられた水素原子密度を COLRAD コードで組み合わせることにより完全電離イオン C^{6+} の密度が推定された。計算の結果与えられる最外殻磁気面近傍での C^{6+} イオン密度 $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ は、不純物輸送コードの与えるものと同程度である。

本論文は、プラズマの磁場閉じ込め装置において現在も不明な点が多い多価イオンとリサイクリング水素との低エネルギー荷電交換反応を $\text{C}^{6+}-\text{H}$ の系において観測したものであり、反応領域の特定、衝突放射モデルとの対比等の解析結果は周辺プラズマの理解に資することが大きいと考えられる。よって、本審査委員会は、新しい知見を得た成果と当該分野への貢献の程度から判断して、本論文が博士学位論文として十分な資格があると認めた。