

磁気圏型プラズマ閉じ込め装置RT-1における イオン閉じ込めと荷電交換の可視分光による評価

学生証番号 47126087 氏名 野上 智晃
(指導教員 吉田 善章 教授)

Key Words : magnetosphere, spectroscopy, charge exchange, confinement, rate equation, highly charged ion

RT-1 では電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) によって電子 β が局所的に90%を超えるようなプラズマを生成しており、ドリフト運動による電子の流れが誘起されている。磁気圏型プラズマで流れを駆動することで到達するダブルベルトラミ平衡では流れが圧力と平衡になり、最小の磁場でプラズマの閉じ込めが可能となるため、更なる高 β 化が期待される[1]。現在はイオン加熱によって高イオン β なプラズマを生成することでイオン流を駆動して流れの効果の検出を目指しているが、イオン温度、流速の支配パラメータが明らかでなく、熱損失やエネルギー緩和過程等の基礎的な理解を深める必要がある。イオンに関する研究では RT-1 をイオントラップとして用いる多価イオン研究にも着手している。多価イオンとは2価以上の高電離イオンを指し、物理的・工学的に広く研究が行われていが、研究に不可欠な原子データが不足しているのが現状である。それを踏まえて RT-1 の多価イオン源としての活用を考えているが、高電子温度・長時間閉じ込めにも関わらず、低価数イオンの検出に留まっている。加熱手法が同じである ECR 多価イオン源では荷電交換が電離を妨げ、高温電子が電離を進める効果を持つことが分かっており、かつ RT-1 では荷電交換が閉じ込めを決定しうることが示唆されていることから、荷電交換と高温電子の原子分子過程への寄与を明らかにする必要がある[2][3]。

イオン加熱、多価イオン研究に共通する課題に閉じ込めや原子分子過程等のイオンに関する基礎的な理解の不足が挙げられる。そのため、モデル計算と可視分光の両面からイオンのパラメータ決定条件、原子分子過程、閉じ込め機構の解明を目的とした。

単純な電離再結合モデルに電離を妨げる効果として荷電交換を加え、高温電子の評価のために電子2成分をそれぞれ別に作用させるレート方程式を構築し、電離平衡時のイオン価数分布について評価した。その結果、RT-1 プラズマでは荷電交換が電離を妨げているために低価数イオンの検出に留まっており、高温電子は超高温・低密度のために反応があまり起きずに電離過程への寄与が小さいことが分かった。

エネルギー緩和とパラメータ決定要因について調べるために可視分光によってイオンスペクトル He II(468.65 nm)、C III(464.74 nm)のドップラー広がり・シフトからイオン温度・流速と、He I スペクトル強度比 (728 nm/706 nm) から低温電子温度の同時計測を行った。イオン温度が低温電子温度に対してほぼ線形に分布していることが分かり、イオン温度が低温電子からのエネルギー緩和により決定されることが分かった。イオン温度によって駆動されるドリフト運動から流速が決定されており、また、磁場強度、磁力線の曲率半径によるドリフト速度の径方向分布からイオンの空間分布の見積もりも行い、2階電離の C III がコアプラズマ近傍に、1階電離の He II がその外側に分布しているという知見が得られた。

実験結果を基に不純物イオンと考えられる He II と C III の閉じ込め時間 τ_c と荷電交換時間 τ_N の評価を行ない、荷電交換と閉じ込めに関する考察を行なった。すると先行研究とは異なり、荷電交換が閉じ込めを決定することを支持する結果は得られなかった。この原因に中性粒子密度(= 放電前の水素原子密度 - 電子密度)の過大評価が考えられる。 $\tau_c = \tau_N$ の仮定から中性粒子密度を逆算すると一桁程度小さい値が得られるものの、荷電交換が価数分布に与える効果を評価すると、荷電交換による電離の妨げは検出された。このことから逆算値は RT-1 プラズマにおいて妥当な範囲の値であると言え、中性粒子密度の適切な評価により、閉じ込めと荷電交換の関係を明らかにできると考えられる。

[1] Z.Yoshida, S.Mahajan, Phys. Rev. Lett. 88 (2002)095001.

[2] G. D. Shirkov, Plasma Sources Sci. Technol. 2 (1993) 250-257.

[3] 水島龍徳, 東京大学院修士論文(2010).