

識別番号 P 2

2010 年度完了学内共同研究

研究課題 イオントラップと ECR イオン源を用いた星間物理学の研究

研究代表者 岡田邦宏（理工学部物質生命理工学科）

共同研究者 星野正光（理工学部物質生命理工学科）

Summary We report on new experimental projects for studying interstellar physics using ion traps and an Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion source. First, a novel experimental method to study cold molecular ion-polar molecule reactions is described. Then, a new experimental project for studying the X-ray emissions caused by solar winds is presented.

### はじめに

イオントラップは原子・分子イオンを摂動のない真空中に捕獲するための実験装置であり、質量分析器としては物理・化学・生物学をはじめとする様々な分野で活躍する汎用性の高い実験装置である。一方、電子サイクロトロン共鳴（ECR）イオン源は理学・工学・生物学にわたる、様々な分野で利用されている汎用性の高いイオン源であることが知られている。例えば、工学的応用として、半導体素子へのイオン注入、イオン注入による高温超電導物質の生成、イオン照射による材料特性の制御、多価イオンを利用したイオンビーム加速（加速器技術として）、などがあげられる。また、生物学・医学的応用として、マイクロイオンビームの生体照射による遺伝子操作（DNA 損傷、品種改良）、重イオン照射によるがん治療（イオン源として）、などにも利用されている。ECR イオン源は多種多様な応用の可能性をもつイオン源であるが、本学に設置されている ECR イオン源は、これまで全くその機能を活用できていなかった。そこで我々は様々な研究目的で ECR イオン源を利用できるような実験室の構築を目指し、スイッチング電磁石を備えた新規ビームラインの建設を行うことを目的として学内共同研究“電子サイクロトロン共鳴イオン源のための汎用ビームラインの建設（平成 22 年度）”を行った。共同研究では ECR イオン源への新規イオンビームラインの建設という“インフラ”を整備することを主目的とすることから具体的な研究成果を上げることが困難な研究課題であり、実際に学科再編に伴う実験室の制約の問題から計画を 1 年間に短縮こととなった。そこで、本研究機構 Festival では、汎用性の高い 2 つの実験装置であるイオントラップと ECR イオン源を活用した今後の研究計画「イオントラップと ECR イオン源を用いた星間物理学の研究」について紹介することとしたい。なお、本研究計画の一部は基盤研究 A「太陽風起源の禁制 X 遷移の実験室における観測」（研究代表者：田沼肇（首都大）、平成 23 年～26 年度）の研究分担者・岡田邦宏（上智大）「イオントラップの開発」として今後行われる予定であることを付記したい。

### 研究背景と目的

本研究計画では以下の 2 つの星間物理学に関する研究を行う予定である。①星間分子雲での分子生成に重要な役割を果たしている極低温イオン-極性分子反応の測定、②太陽風において観測される多価イオン-中性分子衝突による軟 X 線の実験室における観測とその発光断面積の決定、である。

イオントラップを用いた研究の最大の利点は、実験者自らが選択したイオンを、長時間にわたり狭い空間に閉じ込め、必要なだけ相互作用を与えたり、観測し続けることができる点にある。この利点は特にレーザー冷却法を用いて生成される極低温イオン（とりわけ

クーロン結晶と呼ばれる状態のイオン) に対して最大限に発揮される。例えば相互作用が電磁波である場合、エネルギーと時間の不確定性関係から原子イオンの超精密分光が可能であり、実際に光周波数領域での精密測定が行われている。一方、相互作用の相手が電磁波ではなく中性分子の場合、クーロン結晶のなかで配列した極低温イオンと中性分子の反応、すなわちイオン-分子反応を測定することが可能となる。極低温領域でのイオン-分子反応は、宇宙空間のなかでとりわけ星間分子雲と呼ばれる領域における化学反応で重要な役割をしていることが分かっている。本研究の目的の一つは、イオントラップ中で生成された極低温イオンと低速極性分子を反応させることによって、10K 以下の温度領域におけるイオン-極性分子反応の反応速度定数の測定を行い、星間分子雲の研究に必要な基礎データを得ることである。本研究のもう一つの目的は、ECR イオン源で生成された多価イオンと原子・分子の衝突によって生じる X 線を定量測定し、X 線天文学にとって重要な実験室データを得ることである。例えば 1996 年には、Chandra 衛星によって 1 keV 以下のエネルギーの発光強度が非常に強くなる軟 X 線が百武彗星で観測されている。その後、他の彗星からも同様な X 線放出が観測されており、X 線天文学におけるホットトピックスとなっている。その後の考察により、彗星からの X 線の起源は太陽風にわずかに含まれている酸素などの裸に近い多価イオンが彗星から蒸発した H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> と衝突することで電荷移行反応:  $O^{8+} + H_2O \rightarrow O^{7+}(nl) + H_2O^+ \rightarrow O^{7+}(1s) + H_2O^+ + hv$  を起こし、励起状態の多価イオンが、脱励起過程において放出する X 線であることが判明している。このように、様々な X 線観測衛星で観測されている太陽風の電荷交換に起因する軟 X 線発光スペクトルには、地上では観測の難しい禁制遷移が、許容遷移と同程度の強度で観測されている。X 線天文学の精密化には原子物理学的な視点から、禁制遷移についても発光断面積を測定することが不可欠である。そこで、本研究計画では、分子との衝突によって準安定励起状態にある多価イオンをイオントラップに直接捕獲し、X 線を観測することで禁制遷移の発光断面積を得ることを目標としている。イオントラップを利用することで、イオンビーム実験では通常検出することが困難な、多価イオン準安定状態からの発光スペクトルを観測することが可能となる。なお、測定候補となる寿命の長い禁制遷移としては、許容遷移  $O^{6+}: 1s2p \ ^1P \rightarrow 1s^2 \ ^1S$  に伴って発光しているはずの  $O^{6+}: 1s2p \ ^3P \rightarrow 1s^2 \ ^1S, 1s2s \ ^3P \rightarrow 1s^2 \ ^1S$  遷移などがある。

## 展望

### ● 極低温イオン - 極性分子反応の測定

今後は分子イオンを冷却するための冷媒として用いるカルシウムイオンのクーロン結晶と低速極性分子の反応測定を行う予定である。冷媒である Ca<sup>+</sup>イオンが極性分子と反応してしまうと、本来の目的である分子イオン-低速極性分子間の反応測定が不可能となるからである。現在までのところ、極性分子 NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>CN と Ca<sup>+</sup>クーロン結晶との反応速度は、典型的な分子イオン-極性分子間の反応速度よりも十分に遅いことが確かめられている。今後、CH<sub>2</sub>O, ND<sub>3</sub> で同様の確認を行った後、分子イオン-低速極性分子反応の測定を系統的に行い、星間物理学の中で、とりわけ星間分子雲の生成に関わる研究への貢献として、極低温における分子イオン-極性分子反応の反応速度定数データの蓄積を行っていきたいと考えている。

### ● 多価イオントラップを用いた X 線観測実験

既存の ECR イオン源を利用して、今後新たに実験装置の開発を行っていく予定である。本学では、多価イオントラップのために必須となる Kingdon イオントラップの開発を行い、ECR イオン源による Ar<sup>q+</sup> (q = 1 ~ 8) の多価イオントラップシステムの完成を目指す。