

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月10日現在

**極低温静電型イオン蓄積リングが拓く極限科学：  
宇宙化学から放射線生物学までの展開**

Interdisciplinary science explored by cryogenic electrostatic storage ring: from astrochemistry to radiation biology

課題番号：26220607

**東 俊行 (AZUMA TOSHIYUKI)**

国立研究開発法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・主任研究員



研究の概要

我々が開発した極低温静電型イオン蓄積リング装置は、極低温、極高真空という環境下で大きさや質量数に制限されない冷却原子分子イオンを長時間蓄積周回させることが可能である。小型分子からクラスターや生体分子イオンまでを蓄積し、レーザー光や中性粒子ビームを合流衝突させることにより今まで観測不可能であった孤立系の反応やダイナミクスを探索する。

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：イオンビーム

1. 研究開始当初の背景

イオン蓄積リングは、高エネルギー物理や核物理の実験においてイオンビームの強度や品質を向上させるために開発された加速器科学における大型装置である。ところが、磁場を使わずにすべてを静電的に制御することによって、周回蓄積イオンの質量と無関係に同一条件下で運転できる静電型イオン蓄積リングが近年登場した。これにより、イオン蓄積リングでは全く取り扱われたことのなかったはるかに重いイオン、すなわち多原子分子イオン、クラスターイオン、さらには生体分子イオンまでが周回蓄積可能となった。



2. 研究の目的

我々は、装置の大きさを磁場の場合より遥かに小型化できる利点を活かして、装置全体を極低温(5K)、極高真空環境下に設置しテーブルトップサイズの静電型イオン蓄積リン

グ RICE を最近開発した。本装置の特徴としては、1) 多彩な原子分子イオンを極低温という環境下で、振動回転状態を制御しながら数分から数時間という長い時間スケールで真空中に孤立させて用意できること、2) 10-20keV という一定のエネルギーを保持して周回しているため、リング内で蓄積イオンが衝突や反応を起こした時に生成する粒子を高効率かつ容易に検出できること、3) さらに分子の個性が明確に現れるエネルギー差が小さい低速衝突ダイナミクスの研究に最適であり、衝突相手の粒子ビームを合流させ相互の速度差を変化させることによりエネルギーの関数としての反応確率すなわちエネルギー微分断面積の測定が可能であることが挙げられる。

本研究では、本装置を基盤としてこれらの特徴を最大限に活用し加速器技術、光技術を原子分子物理実験に適用することにより、宇宙・化学・生物分野への新しいビーム科学の展開を目指した。

3. 研究の方法

周回する対象のイオンを生成するため様々なタイプのイオン源を導入する。特にエレクトロスプレーイオン源(ESI)によって生成した大型分子イオンは、リングに導入する前に用意する極低温 RF 型イオントラップで予め冷却し、かつ個数を増大させた後パルス状に加速してリングに導入する。リング周回軌道

の途中には直線部分を設け、波長可変 OPO レーザー及や色素レーザーを駆使した分光や中性粒子ビームとの合流衝突実験を行う。前者では大型分子の準安定状態や脱励起過程を追跡するのみならず、極低温下で振動冷却したイオンの分光を行う。また後者では中性粒子ビームを負イオン源とレーザーによる電子脱離を利用して生成し、宇宙における分子化学進化で重要な役割を果たすイオン・中性衝突反応を観測する。

#### 4. これまでの成果

極低温リング RICE の最も重要な機能のひとつが、蓄積した分子イオンの冷却である。周囲温度 5K の環境下に長時間蓄積する間、分子イオンは赤外輻射によってその内部エネルギーを放出し、振動・回転基底状態へと緩和していく。この冷却過程をリアルタイムに観測し、また最終的な到達温度を見積もるために、 $N_2O^+$ 分子イオンを用いた時間分解回転分光実験を開始した。色素レーザーによって  $A^2\Sigma^+(200) \leftarrow X^2\Pi(000)$  遷移を励起し、 $1^4\Pi$  を経由した  $NO^+ + N$  への前期解離に伴って放出される N を中性粒子検出器によって検出した。分子温度によってスペクトル形状が大きく変化するため、その観測結果より RICE に蓄積された分子温度の時間変化を観測した。極低温リングにおける分子分光スペクトルとして極めて高分解能で回転バンドの観測に成功した。

また、RICEへ導入する冷却大型分子生成装置を開発した。これは、エレクトロスプレーイオン源(ESI)、4重極質量フィルター、8重極の電極間にさらにフィン型補正電極を追加した極低温RFイオントラップ、および加速装置によって構成され、バンチ化された冷却イオンをRICEに導入する。予め冷却したイオンをリングに導入できるため、長い冷却時間を必要とする大きな分子イオンに対して効果的であると期待される。数10 $\mu$ s時間幅の10-20keVのパルス状イオンバンチ生成に成功した。

加えて、さらに低温度の分子イオンビームを用意するために、温度 0.4 K にある超流動ヘリウムのナノ液滴中に分子イオンを内包させるビームの開発を行った。その結果ヘリウム原子をおよそ  $10^{11}$  個からなる巨大な液滴の生成に初めて成功した。これは大型分子イオンをも内包させるのに十分なサイズである。

#### 5. 今後の計画

既に開始している小型分子イオンの分光に関しては、高繰り返し YAG レーザーを用いた光源アップグレードを予定しており、

$N_2O^+$ を始めとする分子イオンの回転スペクトルの変化をレーザー照射のタイミングを遅らせて観測することにより、冷却過程を数 10 分から 1 時間オーダーにわたって観測することを計画している。これにより極低温までの分子冷却の様子を刻々と追跡できると期待される。また、一度冷却したイオンを可視レーザーで再加熱する手法で、我々が最近見出した電子励起状態からの再帰蛍光過程による冷却過程の全容を明らかにする予定である。さらに完成した極低温プリオントラップおよび加速バンチビーム引き出し加速系を利用して、クラスターイオンや大型分子イオンに対しても同様の実験を行う予定である。この観測は、生体分子イオンに展開することで、放射線生物学におけるエネルギー移動過程や損傷過程の基礎を原子分子レベルで明らかにする。

また、イオン・中性衝突反応を観測に関しては、大強度半導体レーザーによる C-炭素負イオンビームの中性化を行った後、RICE に周回する  $CH_n^+$  炭化水素イオンとの合流実験を実施する計画である。極低温環境下にある分子イオンが反応して次々と大型のイオンを生成する様子を地上で実際に実験することを可能にする。

加えて、エネルギー分散型粒子検出器の開発により、中性生成粒子の運動エネルギーを直接検出する。これは達成できれば、生成物の同定が可能となりさらに反応のポテンシャル曲面に関する情報を引き出すことができる。そのため、超伝導遷移端センサー (TES) をマイクロカロリメータとして中性粒子検出へ応用する実験を展開する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma, "Design and commissioning of the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)", Rev. Sci. Instrum. 88, 033110(2017).
- [2] Y. Enomoto, Y. Nakano, T. Masunaga, T. Azuma, "Development and commissioning of RIKEN Cryogenic Electrostatic ring (RICE)", J. Phys. Conf. 635, 022028(2015).
- [3] Y. Ebara, T. Furukawa, J. Matsumoto, H. Tanuma, T. Azuma, H. Shiromaru, and K. Hansen, "Detection of recurrent fluorescence photons", Phys. Rev. Lett. 117, 133004 (2016).

ホームページ等

<http://www.riken.jp/amo/>  
toshiyuki-azuma@riken.jp