

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740311

研究課題名(和文)中性ビーム合流法による極低温原子分子反応

研究課題名(英文)Low-energy ion-neutral collision by merged beam experiment

研究代表者

中野 祐司(Nakano, Yuji)

独立行政法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・研究員

研究者番号：20586036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：上層大気や星間空間で起こる気相の低温原子分子反応の実験的研究を目的として、分子イオン-中性粒子の合流ビーム実験技術の開発を行った。理研にて開発中の極低温静電型イオン蓄積リングRICEに分子イオンビームを蓄積し、中性ビームを合流入射させて反応を調べるために、負イオンビームライン開発、ビーム中性化技術開発、分子イオン入射・蓄積技術開発を行った。合流実験へ向けた準備が整ったところで、研究動向や他の開発状況を考慮して研究計画を再構築し、さらに発展した計画として科研費(基盤B)にて継続中である。

研究成果の概要(英文)：A new experimental development for low-energy ion-neutral reaction has been carried out. The research aims to study the ion-neutral reaction dynamics in upper atmosphere and interstellar spaces. The low-energy collision experiment will be realized by merging a molecular ion beam and neutral beam in a cryogenic ion storage ring RICE at RIKEN. The following apparatus/technique has been developed; 1. generation and transport of negative ion beam, 2. neutralization of the negative ion beam, and 3. injection and storage of molecular ion beam in RICE. Before the final year, the project was finished and reconstructed to be another KAKENHI project.

研究分野：原子分子物理

キーワード：中性ビーム

1. 研究開始当初の背景

原子・分子の衝突反応は日常的な自然現象において最も基本的な過程であり、その反応プロセスは衝突速度や内部状態等によって変化する。イオンビーム技術や加速器技術の発展により様々な衝突実験が精度よく行われるようになったが、熱エネルギー程度の低エネルギー領域においてはビーム制御が困難であるため、衝突速度に依存した反応ダイナミクスを実験的に調べることは一般的に容易でない。ところが2種類のイオンビームを合流させて互いの相対的な速度を変化させる『合流ビーム法』を用いると、高速のイオンビームを用いながらも低エネルギーの衝突実験を実現することが可能となる。例えば、重イオン蓄積リングと電子冷却器を用いた分子イオン-電子の解離性再結合反応の実験が90年代~2000年代にかけて各国で精力的に行われ、星間分子反応ネットワークの解明等に大きく貢献している。

2010年以降、極低温分子ビームの蓄積を目的とした、次世代リング、DESIREE(ストックホルム大学)、CSR(マックスプランク研究所)、及びRICE(理化学研究所)の開発が開始された。これらのリングは環境温度を10K以下まで冷却することで振動・回転状態ともに冷却された様々な分子イオンビームを蓄積・供給する強力なツールとして期待されており、DESIREE、CSRでは既に正負イオンビーム合流、分子-電子ビーム合流実験の計画が発表されている。一方で研究代表者は2010年より、科研費補助金(スタートアップ)を受け、『中性ビーム源』の開発を開始した。これを分子イオン-中性合流ビーム実験へと繋げるため、発展的テーマとして本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、現在開発中である高速中性原子ビームと、理研で開発中のイオン蓄積リングRICEを利用した中性原子-冷却分子イオン衝突実験を行うことである。冷却された分子イオンを利用することで極低温原子分子反応の実験的研究という新しい実験技術を開拓し、宇宙の分子進化過程、及び単一量子状態の分子イオンの反応ダイナミクスの研究への応用を目指す。

3. 研究の方法

中性ビーム-分子イオンビーム合流実験を行うために、以下3つのセクションに分割して装置・技術開発を行う。

負イオンビームライン開発

セシウムスパッタ型イオン源にて生成した負イオンを10~25kVの高電圧で引き出し、電磁石で荷電選別する。中性ビームは電場・磁場による制御ができないため、負イオンを十分にコリメートした後に中性化することが重要となる。ビーム輸送行列、及び有限要素法による軌道シミュレーションを行い、軌道設計、ビームライン建設、ビーム

診断系の導入を行う。

中性化技術開発

パルスYAGレーザー2倍波(波長532nm)を用いて負イオンビームの電子を脱離させて中性化を行う。合流ビーム実験において、反応断面積の絶対値を測定するためにはビームフラックスを合流区間に渡って積分する必要があるため、中性ビームの2次元的空间プロファイルを精密に測定することが重要となる。よって、ワイヤ回転式のビームプロファイルモニタにより中性ビームのプロファイルを測定し、中性化パラメータの最適化を行う。

分子イオン入射ビームライン開発

イオン源で生成した分子イオンはイオン蓄積リングへ入射された後に、リング内で中性粒子と合流衝突する。分子イオンを効率良く蓄積するためには、リング内の安定周回モードに合致したビーム形状でビーム入射する必要がある。このマッチングを取るためにビーム輸送軌道計算を行って入射ビームラインを設計し、ビーム診断系とともに建設する。

4. 研究成果

負イオンビームライン開発

セシウムスパッタ型イオン源から引き出した負イオンビームを輸送するためのビームラインを建設した(図1(a))。質量分析用60度偏向型電磁石を設置し、イオン軌道計算にもとづいてポールピース及びマグネットチャンバーの設計を行った。XY同時収束位置にスリットを設置することでM/M=100程度で負イオンビームの質量分解能が得られた。

また、エネルギー20keVの炭素負イオンC⁻を用いてビーム輸送の最適化(引き出し部アインツェルレンズ、四重極トリプレットレンズ)を行い、平行ビームを生成することに成功した(図1(b))。

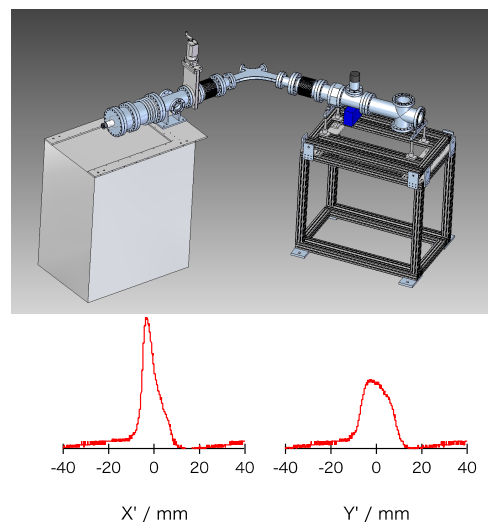


図1(a)負イオンビームライン概略図。(b)20keV C⁻ビームプロファイル。

中性化技術開発

負イオンビームを中性化テストを行うためにパルス YAG レーザーのセットアップを行った。10 Hz 繰り返しの Nd:YAG 基本波を 2 段階増幅後に倍波結晶に入射し、532 nm においておよそ 1 J/pulse の出力を得ることができた。波長 532 nm における C⁻イオンの光電子脱離断面積が 0.5 bohr² 程度であることから、1 パルスあたりの中性炭素原子数は 10⁶ 程度であると見積もられるが、個数の実測はまだできていない。

中性ビームのみを取り出すための負イオンコレクタを開発した。図 2 に示すように、2 枚の電極の一方に高電圧をかけることで負イオンビームを他方電極で回収し、ビーム電流の測定が可能である。シミュレーション上、回収電極から放出された二次電子も全て再回収可能することに成功しており、精度良くビーム電流の絶対値を測ることができる。製作されたビームコレクタは既にビームラインに取付けられた。

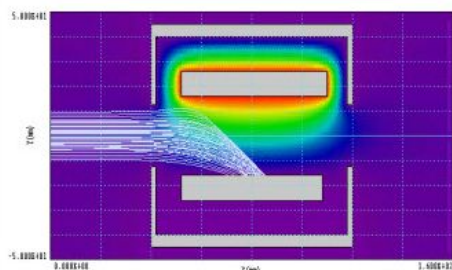


図 2：ビームコレクタ軌道計算

分子イオン入射ビームライン開発

図 3 に示したビームラインを設計・建設し、E C R イオン源を用いて 15keV Ne⁺ビームの輸送テストを行った。マイクロチャンネルプレート (MCP) と蛍光板を用いたビームモニターを設置し、輸送行列を用いた軌道計算と実際のビーム形状が一致することを実測した。価数選別後にビームチョッパーを設置し、高電圧スイッチングを行うことで、幅数 100ns から数 10 μ s のパルスビーム生成に成功した。また、3 方向よりビーム入射ができるよう、静電四重極型の 90°ビーム偏向器を製作した。ビームステアラー、四重極レンズ (トリプレット x1, ダブルレット x1) を利用することで任意の空間プロファイルにて蓄積リングへ入射することが可能となった。

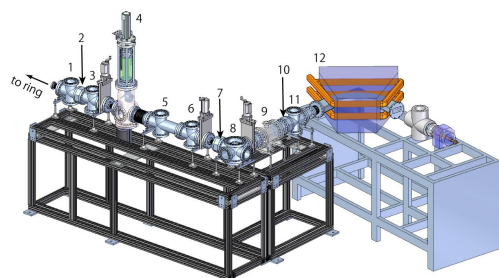


図 3：イオン入射ビームライン

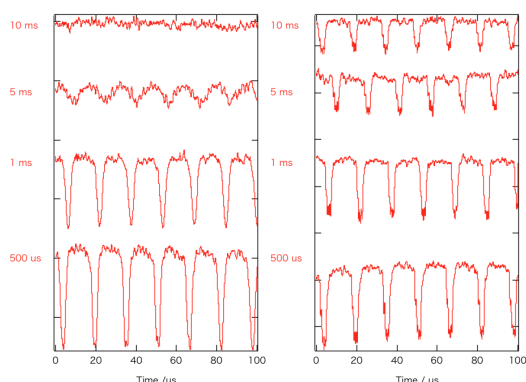


図 4：(左) ピックアップ電極で観測した、蓄積ビームの時間構造。(右) 同様、ただし空洞電極に高周波を印加した場合。

また、15keV Ne⁺ビームを用いて、極低温リング内でのイオン蓄積テストを行った。初回テストでは、リング内電極のアライメント精度不足により長時間安定蓄積することができなかった。軌道シミュレーションにより、160 度偏向電極のアライメント精度不足であることが判明したため、該当箇所を改良し、長時間蓄積に成功した。現在、蓄積寿命は 500 秒程度である。

入射ビームのパルス構造 (幅 2 μ s) を保持するためにリング内の空洞電極に高周波を印加した。図 4 は入射から 500 μ s, 1ms, 5ms, 10ms 経過後の蓄積ビームの時間構造を示している。高周波を使うことにより、ビームのパルス構造を保ったまま蓄積することに成功した。

以上の実績、及び世界各地で急速に進む極低温イオン蓄積リング開発の状況を考慮し、本研究をより発展した計画へと再構築し、最終年度前年度応募として科研費 (基盤 B) の申請を行い、採択された。これより本研究計画は平成 25 年度をもって廃止とし、平成 26 年度からは、さらに発展的な研究課題として継続中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

[1] Y Nakano, W Morimoto, T Majima, J Matsumoto, H Tanuma, H Shiromaru and T Azuma,
“A cryogenic electrostatic storage ring project at RIKEN”,
J. Phys.: Conf. Ser. **388** 142027
[doi:10.1088/1742-6596/388/14/142027](https://doi.org/10.1088/1742-6596/388/14/142027)
査読あり

[学会発表](計 10 件)

[1] 中野 祐司, 榎本 嘉範, 東 俊行
“極低温静電型イオン蓄積リングの入射ビームライン開発及び中性ビーム合流計画”
原子衝突学会第 38 会年会, 理研 2013 年 11 月 16 日-17 日

[2] Y. Enomoto, T. Masunaga, Y.Nakano, T. Azuma
“Development of a cryogenic electrostatic ion storage ring in RIKEN”,
ISIAC2013, 2013/7/19-22, 北京

[3] Y. Nakano, T. Masunaga, Y. Enomoto and T. Azuma
“Status of the injection beamline for the cryogenic electrostatic storage ring at RIKEN”,
5th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (ESD2013),
2013/6/17, Heidelberg

[4] Enomoto Y., Nakano Y., and Azuma T.
“Development of a cryogenic ion storage ring in RIKEN”,
19th international mass spectrometry conference, Kyoto International Conference Center, Sep.15-21,2012.

[5] 榎本嘉範, 中野祐司, 東俊行,
“極低温静電型イオン蓄積リングの開発”,
日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 2012.9 月 18-21 日

[6] 中野 祐司, 榎本 嘉範, 東 俊行
“極低温静電型イオン蓄積リングの開発”
原子衝突学会第 37 会年会, 電通大 2012 年 7 月 28 日-29 日

[7] 中野祐司, 榎本嘉範, 森本航, 東俊行,
“極低温静電イオン蓄積リングの開発 2-(a)”
日本物理学会 2011 年秋季大会,
2011/9/23, 富山大学

[8] 森本航, 中野祐司, 榎本嘉範, 東俊行
“極低温静電型イオン蓄積リングの開発 2-(b)”
日本物理学会 2011 年秋季大会
2011/9/23, 富山大学

[9] Nakano Y., Morimoto W., Majima T., Matsumoto J., Tanuma H., Shiromaru H., and Azuma T.,
“Cryogenic electrostatic storage ring project at RIKEN”,
ICPEAC, Belfast, UK, 27 Jul - 2 Aug 2011.

[10] Nakano Y., Enomoto Y., Morimoto W., and Azuma T.

“Design of a cryogenic electrostatic storage ring at RIKEN”,
ESD2011, Gatlinburg, TN, USA, June 8-11 (2011).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.riken.jp/amo/>

6. 研究組織
(1) 研究代表者

中野 祐司 (NAKANO Yuji)
独立行政法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・研究員
研究者番号: 20586036

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: