

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287141

研究課題名(和文) 星間空間におけるC-H系, O-H系分子生成の起源に関する新しい実験研究

研究課題名(英文) Laboratory experiments on the synthesis of interstellar C-H and O-H series molecules

研究代表者

中野 祐司 (NAKANO, Yuji)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：20586036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：星間分子の反応を低温環境下に再現して実験的に精度良く調べることを目的とし、理化学研究所東原子分子物理研究室で開発中の極低温の静電型イオン蓄積リングRIKEN Cryogenic electrostatic ring (RICE)を用いた「低エネルギーのイオン-中性反応」の実験的研究を行った。蓄積リングへの長時間イオン閉じ込め、および中性ビーム生成技術の開発を行い、合流実験のセットアップが概ね完了した。最終年度前年度に、より発展した研究課題へと再構成され、科研費(基盤B)「星間雲におけるC-H系分子誕生と複雑有機分子への進化(2017-2019年度)」として引き継がれた。

研究成果の概要(英文)：A laboratory research on the interstellar ion-neutral reaction was carried out with the aid of a newly developed electrostatic ion storage ring. The RIKEN Cryogenic Electrostatic ring (RICE) was successfully commissioned for this experiment, and a neutral beam generation is being ready for injection to the RICE. The research will be expansively continued as an approved JSPS project 17H02993 (FY2017-2019).

研究分野：原子分子物理

キーワード：イオン蓄積リング 星間分子 中性ビーム

1. 研究開始当初の背景

20世紀後半に入ってから、電波天文観測によって様々な星間分子の発見が相次ぎ、現在までに有機分子や炭素クラスターを含む200種近い分子が発見されている。さらに、研究開始当初には、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) が本格運用を開始し、史上最高の感度、分解能による観測データとモデル計算によって物質の進化や星形成のメカニズムに関する理解が飛躍的に発展することが期待されていた。一方で、物質の進化を特徴付ける星間分子の反応過程について、極低温環境下における実験的研究が著しく欠如しており、多くの系について、反応の詳細は精度良く知られていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、近年急速に進んでいるイオン蓄積技術を用いて、星間分子の反応を実際に低温環境下に再現して実験的に精度良く調べることが目的とする。理化学研究所東原子分子物理研究室で開発中の極低温の静電型イオン蓄積リング RIKEN Cryogenic electrostatic ring (RICE)を用い、星間分子反応の中でも、分子進化に重要な役割を果たす「イオン-中性反応」に注目し、10%以下の確度で反応速度を決定する普遍的な手法を確立する。特に最も存在量の多い、水素分子を起点とした星間分子の進化に焦点を当て、様々な分子生成の起点となる H_3^+ イオンと中性炭素(C)および酸素原子(O)の低エネルギー反応に関する実験を行う。温度に依存した反応速度と反応分岐比を実験的に決定し、CH系分子とOH系分子の誕生と進化過程を探究する。

3. 研究の方法

本研究では、理化学研究所の極低温型イオン蓄積リング RICE を利用し、分子イオンと中性原子の低エネルギー衝突実験を行う。イオン源で生成した分子イオンを10-20 keV程度のエネルギーに加速して RICE に入射し、中性の原子ビームを合流衝突させ、反応生成物を検出する。これにより反応断面積や、反応経路間の分岐比等を測定する。

初年度に実験装置の開発、セットアップを中心に進め、2~3年目には、有機系分子生成の出発点となる、「 $H_3^+ + C$ 」、および「 $H_3^+ + O$ 」の反応について、反応速度、分岐比の測定を行う。究最終年度には、 CH_3^+ イオンを起点とした、より複雑な分子への進化過程へと研究を展開する。

4. 研究成果

本研究では RICE へのビーム入射と蓄積テストおよび中性ビーム入射ラインの開発を進め、合流ビーム実験のセットアップが概ね完了した。最終年度前年度に、より発展させた研究計画が科研費課題 (基盤 B) 「星間雲における C-H 系分子誕生と複雑有機分子への進

化」として採択されたため、本研究計画は平成 28 年度をもって廃止とし、新たな研究課題として継続された。以下に 26-28 年度の研究成果の概要を述べる。

(1)イオンビームの蓄積

当初計画通り、初年度は蓄積リング RICE へのビーム入射試験とマシンスタディに注力し、合流ビーム実験を行うための装置セットアップの構築を進めた。テスト用のビームとして、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 型イオン源を利用し、1 価のネオン原子イオン (Ne^+) をエネルギー15 keV に加速することでビーム化した。ビームの輸送および蓄積リングの運転パラメータについては、実験に先立ってビーム輸送行列および有限要素法を用いたビーム軌道シミュレーションを行い、最適な運転モードを決定した。RICE の温度を 4.2 K まで冷却した状態で 15 keV の Ne^+ イオンビームを入射し、30 分以上もの長時間、蓄積することに成功した。図 1 は蓄積リング内のイオン量の減衰を表しており、(a) は 0 から 20 秒の間のイオン量について、リング温度を変化させた測定結果を示す。温度が低くなるにつれて減衰の傾きが小さくなっており、蓄積寿命が延びている。これは、冷却によってリング内の残留ガス圧力が下がり、残留ガスとの衝突によるロスが抑制されていることを示している。(b) は温度 4.2 K の環境下において、0 から 2000 秒の間のイオン量変化を表しており、モデル関数を用いたフィッティングによって残留ガスとの衝突による蓄積寿命は 780 秒と測定された。 Ne^+ イオンと残留ガスの衝突断面積から、RICE 内の残留粒子密度は約 10^4 cm^{-3} と見積もられ、これは室温換算で $1 \times 10^{-11} \text{ Pa}$ 程度の圧力に相当する。以上よりイオン蓄積リング RICE を用いることで低温・極高真空環境下での衝突実験が実現可能であることが示された。

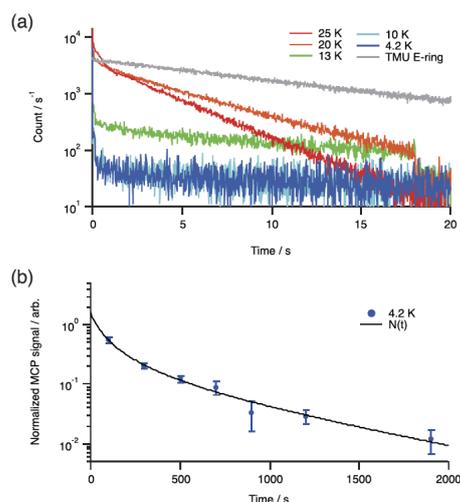


図1:(a) 様々な温度下におけるリング内イオン強度の減衰。横軸は蓄積時間で、イオン強度は残留ガスとの衝突にともなう中性粒子数より測定。(b) 2000 秒までのイオン減衰曲線。イオン量はイオンをリングから引き出して測定。

(Y. Nakano *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **88**, 33110 (2017))

(2) イオンビームのバンチング

蓄積リング内に設置された高周波キャビティを用いて、蓄積されたビームの時間構造のバンチ化を行った。図 2 (a) はピックアップ検出器を用いて観測した、RICE 内の 15 keV Ne⁺ ビームの時間構造を示す。入射時のバンチ幅が 2 μ s であったのに対し、蓄積時間とともに幅が広がり、10 ms 後には直流ビームとなり、時間構造が検出できなくなっている。これは入射ビームが $\Delta v/v=10^{-4}$ 程度の速度拡がりを持っているためである。キャビティにおよそ 2.6 MHz (harmonic number = 20) の高周波を印加したところ、ビームは図 2 (b) のようにバンチ構造を保ったままリング内に蓄積された。このようにビームのバンチ構造を操作することによって、合流ビーム実験において衝突タイミングを制御して測定することが可能となった。

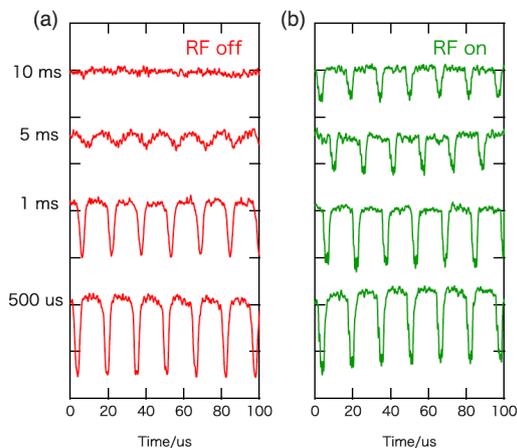


図 2: (a) 15 keV Ne⁺ ビームを入射後 500 μ s, 1 ms, 5 ms, 10ms に観測したピックアップ検出信号。(b) リング内キャビティに高周波を印加して、同様に測定したピックアップ信号。(Y. Nakano *et al.*, Rev. Sci. Instr. **88**, 33110 (2017))

(3) 中性ビーム生成

負イオンビームの光中性化による中性ビーム入射ラインの開発を行った。セシウムスパッタ型負イオン源 (SNICS II) で生成した負イオンの輸送・中性化のためのビーム光学系を設計し、RICE への入射ビームラインを組み上げた。最大磁束密度 500 mT 程度の電磁石を用いてビームの質量分析を行い、7 keV の炭素負イオン (C⁻) で数 μ A のビーム電流が得られた。

負イオンを光脱離によって中性化するために、カスタム設計の大強度レーザーダイオードアレイを導入した。波長 808 nm, 出力パワー 100 W のダイオードバーをスタック構造にすることで合計 6000 W のパワーを達成しつつ、発光部サイズを幅 100 mm, 高さ 12 mm 以内に抑えた。また、Fast axis 側にマイクロレンズアレイを搭載することで角度拡がりを 0.5° 程度に収めることに成功した。直流電源 (100V/150A) と冷却純水循環器、およびインターロック機構を実装して出力光のパワー特性と空間プロファイルを実測し

た。また、負イオンビームに照射するための中性化チャンバーを製作し、高強度レーザーを導入するための大型人工石英ビューポートを設置した。RICE への分子イオンビーム入射テストも完了しているため、中性ビームの合流実験を行える段階まで開発を進めることができた。

ここまでの成果は原著論文 (Y. Nakano *et al.*, Rev. Sci. Instr. **88**, 33110 (2017)) にて報告しているほか、国際会議の招待講演としても発表している。また、プロシーディングス 1 報 (Y. Nakano *et al.*, submitted to JPS Conference Proceedings) を投稿した。

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, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma, “Design and commissioning of the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)”, 査読有り Rev. Sci. Instrum. **88**, 33110 (2017).

[学会発表] (計 33 件)

- ① [ポスター] “合流ビーム実験による低速イオン・中性衝突実験”, 飯田進平, 中野祐司 第 7 回イオン移動度研究会, 2018/4/14 立教大学
- ② [口頭] “合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発”, 飯田進平, 東俊行, 中野祐司, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22-25 日, 東京理科大学野田キャンパス
- ③ [ポスター] “超伝導カロリメータを用いた低温下の星間分子計測実験 (1)”, 山田真也, 岡田信二, 東俊行, 久間晋, 中野俊男, D. A. Bennett, W. B. Doriese, J. W. Fowler, J. Hays-Wehle, G. Hilton, G. C. O’Neil, C. D. Reintsema, D. R. Schmidt, D. S. Swetz, J. N. Ullom, 橋本直, 早川亮大, 一戸悠人, 石崎欣尚, 中野祐司, 竜野秀行, 野田博文, 上田周太朗, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018/3/14-17, 千葉大学西千葉キャンパス.
- ④ [口頭] “極低温静電型イオン蓄積リング RICE 中で輻射冷却された N2⁺ の回転分光”, 伊五澤涼, 山口貴之, 中野祐司, 久間晋, 東俊行, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/21-24, 岩手大学.
- ⑤ [口頭] “分子検出に向けた多素子 TES マイクロカロリメータの性能評価”, 岡田信二, 東俊行, D. A. Bennett, W. B. Doriese, J. W. Fowler, 橋本直, 早川亮

- 大, J. Hays-Wehle, G. Hilton, 一戸悠人, 石崎欣尚, 久間晋, 中野俊男, 中野祐司, 野田博文, G.C. O'Neil, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, 竜野秀行, 上田周太郎, J.N. Ullom, 山田真也, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017/9/21-24, 岩手大学.
- ⑥ [ポスター] “合流ビーム実験に向けた中性原子の開発”, 飯田進平, 根本拓海, 菅沢卓也, 林遼平, 長岡諒祐, 大森徹也, 江淵欣久, 中野祐司, 原子衝突学会第 42 回年会, 2017/9/8-9, 上智大学
- ⑦ [ポスター] “極低温型イオン蓄積リング RICE を用いた N20+ の回転スペクトル測定”, 伊五澤涼, 山口貴之, 中野祐司, 久間晋, 東俊行, 原子衝突学会第 42 回年会, 2017/9/8-9, 上智大学.
- ⑧ [ポスター] “多素子超伝導遷移端マイクロカロリメータの中性分子質量分析応用”, 岡田信二, 東俊行, D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, 橋本直, 早川亮大, J. Hays-Wehle, G. Hilton, 一戸悠人, 石崎欣尚, 久間晋, 中野俊男, 中野祐司, 野田博文, G.C. O'Neil, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, 竜野秀行, 上田周太郎, J.N. Ullom, 山田真也, 原子衝突学会第 42 回年会, 2017/9/8-9, 上智大学.
- ⑨ [ポスター] “Cryogenic detector for mass spectrometric identification of neutral molecules towards atomic and molecular collision experiments”, S. Okada, T. Azuma, D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, T. Hashimoto, R. Hayakawa, J. Hays-Wehle, G. Hilton, Y. Ichinohe, Y. Ishisaki, S. Kuma, T. Nakano, Y. Nakano, H. Noda, G.C. O'Neil, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, H. Tatsuno, S. Ueda, J.N. Ullom, S. Yamada, International conference on exotic atoms and related topics (EXA2017), 2017/9/11-15, Wien, Austria.
- ⑩ [招待講演] “Cryogenic ion storage ring RICE for atomic and molecular physics”, Y. Nakano, The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI' 17), 2017/11/13-18, Kanazawa, Japan.
- ⑪ [ポスター] “Transition-edge-sensor microcalorimeters for mass spectrometric identification of neutral molecules”, S. Okada, T. Azuma, D.A. Bennett, W.B. Doriese, J.W. Fowler, T. Hashimoto, R. Hayakawa, J. Hays-Wehle, G. Hilton, Y. Ichinohe, Y. Ishisaki, S. Kuma, T. Nakano, Y. Nakano, H. Noda, G.C. O'Neil, C.D. Reintsema, D.R. Schmidt, D.S. Swetz, H. Tatsuno, S. Ueda, J.N. Ullom, S. Yamada, International workshop on low temperature detector (LTD17), 2017/7/17-21, Fukuoka, Japan.
- ⑫ [ポスター] “Commissioning of a new cryogenic ion storage ring RICE” Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma, 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX), 2017/7/26-8/1, Cairns, Australia.
- ⑬ [口頭] “イオン蓄積リング RICE における回転分光”, 中野祐司, Matthew Lindley, 久間晋, 東俊行, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017/3/17-21, 大阪大学.
- ⑭ [招待講演] “Development of RICE”, Y. Nakano, 6th International Workshop on Electrostatic Storage Devices, Tokyo 2017/6/19-22, Lyon, France.
- ⑮ [ポスター] “イオン蓄積リング RICE における N20+ イオンの回転分光”, 中野祐司, Matthew Lindley, 久間晋, 東俊行, 原子衝突学会第 41 回年会, 2016/12/10-11, 富山大学, .
- ⑯ [ポスター] “Resonant coherent excitation of the electron-cooled U89+ beam from ESR”, Y. Nakano, A. Bräuning-Demian, A. Ananyeva, S. Menk, H. Bräuning, C. Kleffner, Th. Stöhlker, T. Azuma, 原子衝突学会第 41 回年会, 2016/12/10-11, 富山大学, .
- ⑰ [口頭] “A laboratory experiment of interstellar molecular reaction at RIKEN Cryogenic Electrostatic ring (RICE)”, Y. Nakano, International Workshop on Interstellar Matter, 2016/10/19-20, Sapporo, Japan.
- ⑱ [招待講演] “Recent results from the RIKEN electrostatic storage ring project”, Y. Nakano, International Workshop on Research Opportunities at Cryogenic Electrostatic Storage Rings, 2016/5/19-20, Heidelberg, Germany.
- ⑲ [招待講演] “Status of the RIKEN Cryogenic Electrostatic Ring” Y. Nakano, 6th International Workshop on Electrostatic Storage Devices, 2015/6/8-11, Tokyo, Japan.
- ⑳ [ポスター] “Development and commissioning of Riken Cryogenic Electrostatic ring (RICE)”, Y. Enomoto, Y. Nakano, T. Masunaga, T. Azuma, International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collision (ICPEAC2015), 2015/7/22/28, Torredó, Spain.
- ㉑ [口頭] “極低温静電型イオン蓄積リン

- グ (RICE) の開発 IV” , 東俊行, 中野祐司, Sebastian Menk, Paul Bertier, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016/3/19-22, 東北学院大学.
- ②② [ポスター] “Dynamics of helium droplets in a cryogenic electrostatic ion storage ring” , S. Kuma, Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Azuma, Pacificchem 2015, 2015/12/15/20, Honolulu, USA.
- ②③ [ポスター] “イオン蓄積リング RICE における長時間イオン閉じ込め” , 中野祐司, 榎本嘉範, 増永拓也, 東俊行, 原子衝突学会第 40 回年会, 2015/9/28-30, 首都大学東京.
- ②④ [ポスター] “The 4K-pre-trap ion injection beamline for the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)” , S. Menk, Y. Enomoto, Y. Nakano, K. Oshimo, T. Masunaga, P. Bertier, T. Azuma, 原子衝突学会第 40 回年会, 2015/9/28-30, 首都大学東京.
- ②⑤ [ポスター] “Cold molecular ions in superfluid helium droplets: A new beamline for RICE” , S. Kuma, Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Azuma, 原子衝突学会第 40 回年会, 2015/9/28-30, 首都大学東京.
- ②⑥ [ポスター] “Commissioning of an electrospray source and a cryogenic ion trap dedicated to the study of biomolecules” , P. Bertier, Y. Enomoto, Y. Nakano, K. Oshimo, T. Masunaga, S. Menk, T. Azuma, 原子衝突学会第 40 回年会, 2015/9/28-30, 首都大学東京.
- ②⑦ [ポスター] “A cold ion-neutral collision experiment at RICE; concepts and current status” , Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, T. Azuma, 11th International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP11), 2014/6/6-10, Sendai, Japan.
- ②⑧ [ポスター] “Status of the 4K-pre-trap ion injection beamline for the RIKEN cryogenic electrostatic storage ring RICE)” , Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, T. Azuma, 11th International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP11), 2014/6/6-10, Sendai, Japan.
- ②⑨ [ポスター] “RIKEN Cryogenic Electrostatic ring (RICE)” , Y. Enomoto, Y. Nakano, T. Azuma, 11th International Seminar on Atomic and Molecular Physics (AISAMP11), 2014/6/6-10, Sendai, Japan.
- ③⑩ [口頭] “冷却 U89+イオンのコヒーレント共鳴励起” , Y. Nakano, A. Ananyeva, S. Menk, A. Bräuning-Demian, H. Bräuning, Th. Stöhlker, T. Azuma, 日

本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-25, 早稲田大学.

- ③① [口頭] “The 4K-pre-trap ion injection beamline for the RIKEN cryogenic electrostatic storage ring RICE) I” , P. Bertier, Y. Enomoto, Y. Nakano, K. Oshimo, T. Masunaga, S. Menk, T. Azuma, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-25, 早稲田大学.
- ③② [口頭] “The 4K-pre-trap ion injection beamline for the RIKEN cryogenic electrostatic storage ring RICE) II” , S. Menk, Y. Enomoto, Y. Nakano, K. Oshimo, T. Masunaga, P. Bertier, T. Azuma, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-25, 早稲田大学.
- ③③ [口頭] “極低温静電型イオン蓄積リングの開発 III” , 榎本嘉範, 中野祐司, 増永拓也, 木崎達也, S. Menk, P. Bertier, 東俊行, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015/3/21-25, 早稲田大学.

[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 0 件)

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

[その他]

ホームページ等
<http://www2.rikkyo.ac.jp/web/nakano/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 祐司 (NAKANO, Yuji)

理化学研究所・

東原子分子物理研究室・専任研究員

研究者番号 : 20586036