

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02993

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Cryogenic storage-ring experiments on the formation of interstellar hydrocarbon 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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では星間空間における低エネルギーイオン・中性衝突過程を極低温イオン蓄積リングRICE内に再現し、衝突速度や量子状態に依存した反応断面積や反応分岐比を実験的に調べることを目的とした。分子イオンビームをRICEに蓄積し、レーザー分光によって内部状態の診断および時間発展の様子を明瞭に観測することができた。また、新たに開発した光増幅キャビティによって炭素負イオンビームの中性化効率を向上し、およそ10倍の強度が得られるようになった。これら分子イオン・中性ビームを用いた合流ビーム実験セットアップの構築を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分解能、高感度の宇宙観測によって、星間空間や星形成領域に物質が多様に存在する様子が見えてきている。星間物質の性質や振る舞いを単一原子分子レベルで解明することにより、その存在量や空間分布から天体に関する詳細な情報を得ることが可能になる。このようなアプローチを実現するための新たな実験手法として極低温イオン蓄積リングを用いたイオン・中性衝突実験の手法の開発を推進した。本研究は、物質の「静的」な同定から、「動的」な挙動に研究対象をシフトするものであり、人類がより詳しく宇宙の姿、そして太陽系の起源を知る上で意義のある研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to reproduce the low-energy ion-neutral collision process in the interstellar space in the cryogenic ion storage ring RICE and to experimentally investigate the reaction cross-section and branching ratio depending on the collision velocity and quantum state. We stored a molecular ion beam in the RICE and diagnosed their time evolution of internal state by laser spectroscopy. Besides, the newly developed optical cavity increased the neutralization efficiency of the negative ion beam by ten times. We have completed most of the experimental developments, are ready to carry out the ion-neutral merged-beam experiment.

研究分野：原子分子物理

キーワード：イオン衝突 イオン蓄積リング 合流ビーム 星間分子 星間物質

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電磁波の観測により既に 200 種近くの星間分子の検出が確認されており、分子の動きや化学組成をプローブとすることにより、遙か彼方にある星間物質の状態や環境の観測が可能になってきている。特に近年の技術進歩によって観測の高分解能化、高感度化が進み、これまでにない明瞭な観測データが次々と得られている。このような観測事実をもとに天体の物理化学的状态やその進化過程を知るためには、低温、孤立下における星間分子の素過程を理解することが鍵となる。

研究開始当初、世界 3 拠点で極低温の静電型イオン蓄積リング (理研 RICE、Max-Planck 研究所 CSR、Stockholm 大学 DESIREE) の開発が進んでおり、いずれも本格稼働を開始したタイミングであった。CSR、DESIREE では既に蓄積イオンを用いた実験によって負イオンの寿命測定や分子イオンの冷却過程の観測が報告され、申請者らの開発した RICE でも装置の R&D を完了し、およそ 4 K の極低温、圧力 10^{-11} Pa の超高真空下でのイオンビーム蓄積に成功していた。図 1 は蓄積リングの写真 (左) と、15 keV Ne⁺イオンビームの蓄積データ (右) である。

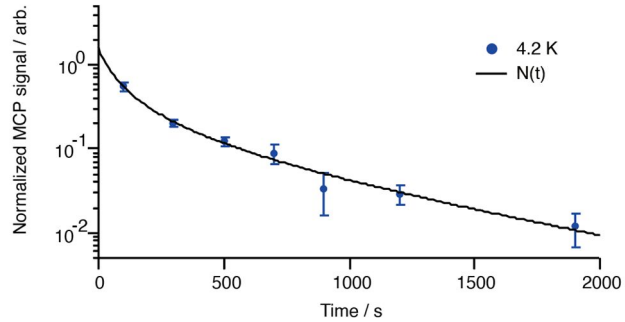
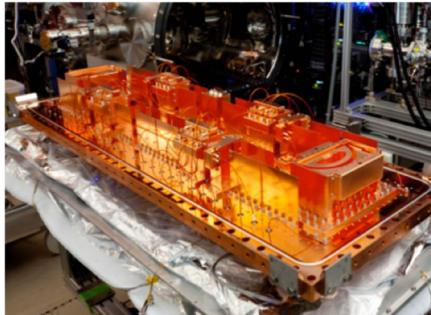


図 1: (左) 理化学研究所の極低温イオン蓄積リング RICE。(右) 温度 4 K に冷却された RICE に蓄積された 15 keV Ne⁺イオンの減衰曲線。

2. 研究の目的

星間空間のような低温・希薄な環境では、荷電粒子 (イオン) と中性粒子の低エネルギー衝突が反応を引き起こす主要な過程であり、物質の進化に重要な役割を果たしている。本研究では、このような低エネルギーイオン・中性衝突過程を極低温イオン蓄積リング内に再現し、衝突速度や量子状態に依存した反応断面積や反応分岐比を実験的に調べることを目的とした。

Kinetic Database for Astrochemistry (KIDA) に代表されるような反応速度データベースでは、統計モデルを仮定した計算値や外挿値などが用いられるケースが多いが、実際には反応速度が非熱的な挙動を示すような系も報告されている。このような背景から、低温下での実験的研究を行う必要性は高まっている。本実験では、星間ガスに豊富に存在する H₂⁺ や H₃⁺ などのシンプルな分子イオンと中性炭素原子 (C) との反応に着目する。プロトン移行反応や組み換え反応によって炭化水素分子 C_nH_n や複雑な有機分子 (Complex Organic Molecules: COM) が生成されるメカニズムを実験的に明らかにし、物質進化モデルへとフィードバックすることにより、天体形成プロセスの追究へと結びつけることをゴールとした。

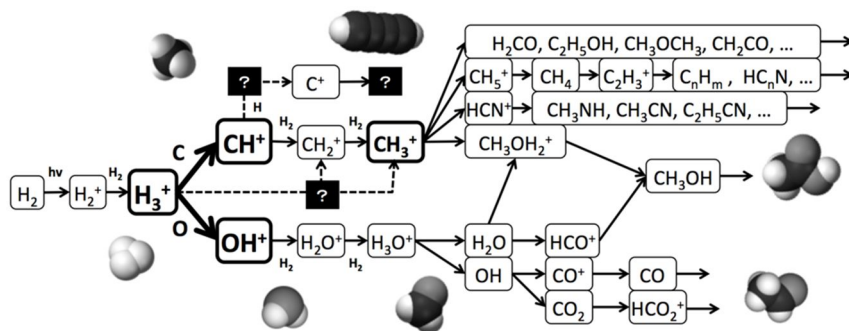


図 2: H₂⁺、H₃⁺ を起点とした星間分子の進化経路

3. 研究の方法

本研究では重心系エネルギー 10~100 meV の領域で衝突速度を高精度に制御して反応過程を観測する必要がある。このような低速の荷電粒子ビームの制御は困難であるため、2 つの高速ビームを合流衝突させる「合流ビーム法」を採用し、エネルギー 1~10 keV 程度のビームを用いて実験を行った。2 つのビームの質量と速度をそれぞれ m_1, v_1, m_2, v_2 とすると、重心系衝突エネルギーは $m_1 m_2 (v_1 - v_2)^2 / (m_1 + m_2)$ のように表され、高速ビームを用いながらも低速の衝突実験を

行えることが特徴である。図3に、RICEに蓄積した分子イオンビーム (H_2^+ または H_3^+) と中性炭素原子ビームの合流軌道シミュレーションの結果を示した。

実験的には、分子イオン、中性原子の2つビームを生成し、目的とする速度で合流させ、反応の生成物を検出する。分子イオンについては、分子の内部状態(電子、振動、回転状態)を明確にした上で衝突させる必要があるため、熱輻射の無い極低温イオン蓄積リング内で一定時間以上周回させることで、電子、振動、回転ともに基底状態の「冷たい」分子を準備する。分子の内部状態は波長可変レーザーを用いた“Action spectroscopy”によってリアルタイムに診断する。他方、中性原子ビームは電荷を持たないため電磁場を用いた加速やビーム制御を行うことができない。そのため、まず負イオンビームを生成してその速度や角度広がり等を十分に制御した後、光電子脱離によってビームを中性化する。

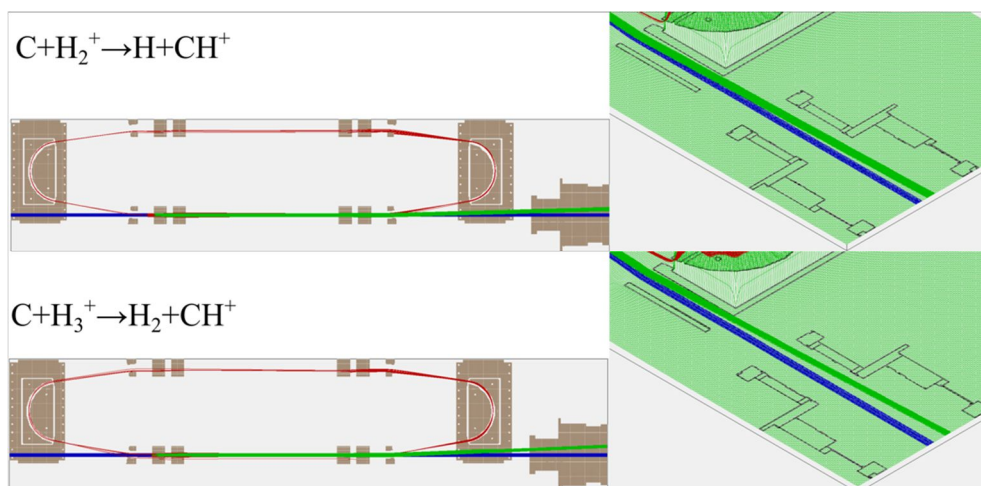


図3: イオン蓄積リング RICE における合流ビーム衝突のシミュレーション

4. 研究成果

合流ビーム実験のために分子イオンビームを RICE に蓄積し、レーザー分光によって内部状態の診断および時間発展の様子を明瞭に観測することができた。また、新たに開発した光増幅キャビティによって炭素負イオンビームの中性化効率を向上し、およそ 10 倍の強度が得られるようになった。これら分子イオン・中性ビームを用いた合流ビーム実験のセットアップを行った。2020 年に RICE において中性ビーム合流実験をスタートする予定であったがコロナウィルスの影響により遅延しているため、研究期間内に得られた成果についてのみ、以下に詳細を報告する。

(1) 分子イオンビームの振動回転分光

電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源で生成した 15 keV N_2O^+ イオンビームを RICE に蓄積し、波長可変レーザーを用いて $\text{A}^2 \Sigma^+ + \text{X}^2 \Sigma_{3/2}^-$ 遷移の振動回転スペクトルを観測した。図4(左)に示すように $\text{A}^2 \Sigma^+$ 状態がポテンシャル交差によって $\text{NO}^+ + \text{N}$ へ解離することを利用し、パルスレーザー照射直後に周回軌道から外れた N 原子の収量を計測することで“action spectroscopy”を行った。得られた振動回転スペクトルを図4(右)に示す。PGOPHOR コードによるシミュレーションとよく一致しており、RICE 入射直後の N_2O^+ イオンの実効回転温度はおよそ 300 K と見積もられた。蓄積時間を ms~100 s 程度の領域で変化させてもスペクトル形状にほとんど変化はなく、これは N_2O^+ の回転脱励起の時定数が $10^4 \sim 10^5$ 秒のオーダーであることと矛盾しない。一方で振動状態の占有率には蓄積時間内に有意な変化が見られ、脱励起する様子を刻々と観測することができた。

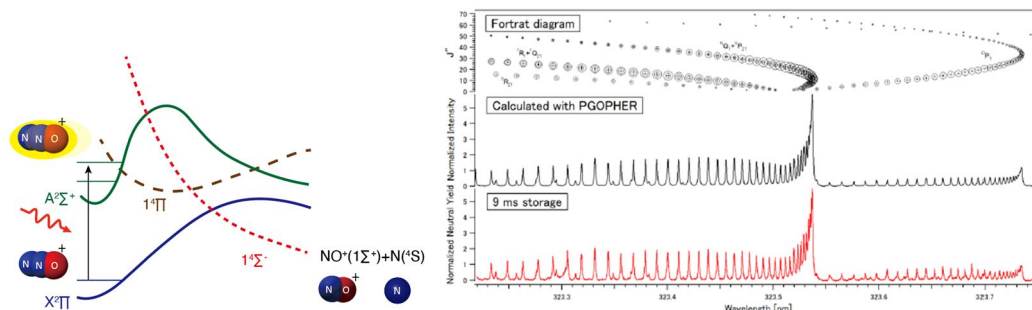


図4: (左) N_2O^+ 分子のポテンシャルエネルギー曲線。 $\text{A}^2 \Sigma^+$ 状態は $\text{NO}^+ + \text{N}$ への前期解離がおこる。(右) $\text{A}^2 \Sigma^+ + \text{X}^2 \Sigma_{3/2}^-$ (000-200)の振動回転スペクトル。実験値(赤)と PGOPHOR によるシミュレーション(黒)がよく一致している。

(2) 中性原子ビームの生成と高強度化

本実験では、セシウムスパッタ型イオン源で生成した 10 keV C⁻ビームを四重極電場を用いて平行化し、波長 808 nm、最大出力 5 kW の大強度 CW 半導体レーザー光を用いた電子脱離によって中性化する。光電子脱離の断面積は 10^{-17} cm² 程度であり、負イオンビームに対して垂直にレーザーを交差させる方法だと、中性化効率は最大で 0.1%程度である。実効的な光強度を増幅させるため、図 5 (右) のようなマルチパス光学系 (光増幅キャビティ) を設計した。図 5 (右) は中性化のテスト測定結果を示しており、レーザー強度に比例して中性ビーム収量が増加する様子が観測された。さらに、光増幅キャビティの導入により、中性化効率をおよそ 10 倍向上することに成功した。光増幅について原理を実証できたので、最大強度でのレーザー運用を想定し、レンズやミラーの材質、コーティングをアップグレードし、最大 50 nA 程度の中性原子ビームが得られるセットアップが完成した。合流実験を行うための最低目標である 10 nA を大きく上回る成果が得られた。

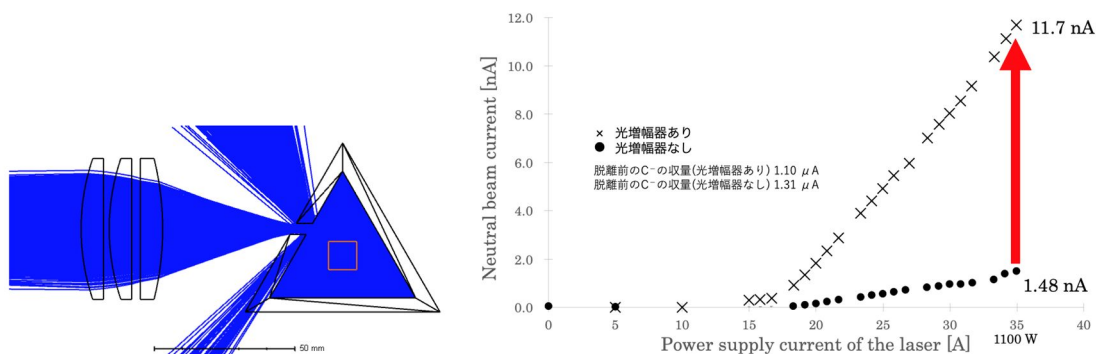


図 5: (左) 光増幅キャビティの構成と光線追跡シミュレーションの結果。(右) レーザー強度に対する中性原子ビームの強度変化。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Y. Nakano, R Igosawa, S. Iida, S. Okada, M. Lindley, S. Menk, R. Nagaoka, T. Hashimoto, S. Yamada, T. Yamaguchi, S. Kuma, T. Azuma	4. 巻 -
2. 論文標題 Status of the Laser Spectroscopy and Merged-beam Experiments at RICE	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Menk S., Bertier P., Enomoto Y., Masunaga T., Majima T., Nakano Y., Azuma T.	4. 巻 89
2. 論文標題 A cryogenic linear ion trap beamline for providing keV ion bunches	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 113110 ~ 113110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5051044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakano Y., Enomoto Y., Masunaga T., Menk S., Bertier P., Azuma T.	4. 巻 88
2. 論文標題 Design and commissioning of the RIKEN cryogenic electrostatic ring (RICE)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 033110 ~ 033110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4978454	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計37件（うち招待講演 2件/うち国際学会 11件）

1. 発表者名 S. Iida, S. Kuma, J. Matsumoto, T. Furukawa, H. Tanuma, H. Shiromaru, T. Azuma, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen
2. 発表標題 High-resolution excitation spectroscopy of delayed detachment of Si ²⁺
3. 学会等名 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Iizawa, S Iida, S Kuma, T Azuma and Y Nakano
2. 発表標題 Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE
3. 学会等名 31st International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Iida
2. 発表標題 High-resolution spectroscopy of Si ²⁻ stored in the TMU E-ring
3. 学会等名 8th International Workshop on Electrostatic Storage Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田進平
2. 発表標題 高温Si ²⁻ の振動・回転励起に伴う遅延電子脱離過程の発見
3. 学会等名 第44回原子衝突学会ホットトピック講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田進平, 久間晋, 松本淳, 古川武, 田沼肇, 城丸春夫, 東俊行, V Zhaunerchyk, K Hansen
2. 発表標題 Si ²⁻ の振動回転状態を経由した遅延電子脱離
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯澤正登実, 飯田進平, 大阿久貴博, 河上剛, 東俊行, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 III
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大阿久貴博, 河上剛, 飯澤正登実, 飯田進平, 東俊行, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Iida, S. Kuma, J. Matsumoto, T. Furukawa, H. Tanuma, H. Shiromaru, T. Azuma, V. Zhaunerchyk, and K. Hansen
2. 発表標題 Si ²⁻ - 負イオンの振電子相互作用を伴う遅延電子脱離過程
3. 学会等名 第20回分子分光研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田進平
2. 発表標題 Si ²⁻ の振動・回転状態を反映した遅延脱離による電子励起スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会シンポジウム講演
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M Iizawa, S Iida, S Kuma, T Azuma and Y Nakano
2. 発表標題 Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE
3. 学会等名 RIKEN Summer School 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯澤正登実, 飯田進平, 大阿久貴博, 河上剛, 東俊行, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 IV
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村直樹, 廣田彩音, 飯澤正登実, 久間晋, 田沼肇, 城丸春夫, 山口貴之, 中野祐司, 東俊行
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICE での分光実験に向けたCaH ⁺ イオンビームの生成
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 椎名陽子, 江淵欣久, 羽尾真礼, 安原杏香, 中野祐司
2. 発表標題 低温移動度分析を用いた異性体分別技術の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第44回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 椎名陽子, 中野祐司
2. 発表標題 低温移動度分析を用いた異性体分子の分別
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Nakano
2. 発表標題 An experimental study of the UV-induced photo-isomerization of interstellar molecules
3. 学会等名 International workshop on Interstellar Matter 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Nagaoka, S Iida, M. Iizawa, S. Kuma, T Azuma, Y. Nakano
2. 発表標題 An experimental study of the gas-phase ion-neutral reaction by merged-beam collisions
3. 学会等名 International workshop on Interstellar Matter 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田 進平, 中野 祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験による低速イオン・中性衝突実験
3. 学会等名 第7回イオン移動度研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根本 拓海, 飯田 進平, 高谷 一成, 植田 寛和, 平山 孝人, 中野 祐司
2. 発表標題 移動管とレーザープラズマ光源を使った星間分子の光異性化の研究
3. 学会等名 第7回イオン移動度研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊五澤涼・中野祐司・久間晋・山口貴之・東俊行
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEを用いたN20+の輻射冷却の観測
3. 学会等名 第19回分子分光研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊五澤涼, 中野祐司, 久間晋, 東俊行, 山口貴之
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICEを用いたN20+の輻射振動冷却
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯澤正登実, 飯田進平, 小泉航, 東俊行, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 II
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長岡諒祐, 小田中隼人, 浜島慶子, 飯澤正登実, 中野祐司
2. 発表標題 デュオプラズマトロンイオン源を用いた分子イオンビームの生成
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nakano, R. Igosawa, S. Iida, S. Okada, M. Lindly, S. Menk, R. Nagaoka, T. Hashimoto, S. Yamada, T. Yamaguchi, S. Kuma, T. Azuma
2. 発表標題 Status of the cryogenic ion storage ring RICE
3. 学会等名 19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Nakano
2. 発表標題 Development of RICE
3. 学会等名 7th International workshop on electrostatic storage devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuji Nakano
2. 発表標題 Cryogenic ion storage ring RICE for atomic and molecular physics
3. 学会等名 The 10th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI '17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Transition-edge-sensor microcalorimeters for mass spectrometric identification of neutral molecules
3. 学会等名 International workshop on low temperature detector (LTD17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Cryogenic detector for mass spectrometric identification of neutral molecules towards atomic and molecular collision experiments
3. 学会等名 International conference on exotic atoms and related topics (EXA2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊五澤涼, 山口貴之, 中野祐司, 久間晋, 東俊行
2. 発表標題 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
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性原子の開発
3. 学会等名 原子衝突学会第42回年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Nakano, Y. Enomoto, T. Masunaga, S. Menk, P. Bertier, and T. Azuma
2. 発表標題 Commissioning of a new cryogenic ion storage ring RICE
3. 学会等名 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊五澤涼, 山口貴之, 中野祐司, 久間晋, 東俊行
2. 発表標題 極低温静電型イオン蓄積リングRICE中で輻射冷却されたN20+の回転分光
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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, 上田周太郎
2. 発表標題 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)
3. 学会等名 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田進平, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験による低速イオン・中性衝突実験
3. 学会等名 第7回イオン移動度研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田進平, 東俊行, 中野祐司
2. 発表標題 合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根本拓海, 飯田進平, 高谷一成, 植田寛和, 平山孝人, 中野祐司
2. 発表標題 移動管とレーザープラズマ光源を使った星間分子の光異性化の研究
3. 学会等名 第7回イオン移動度研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ウェブサイト
<https://www2.rikkyo.ac.jp/web/nakano/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	飯田 進平 (IIDA Shinpei) (20806963)	首都大学東京・理学研究科・助教 (22604)	
研究分担者	椎名 陽子 (SHIINA Yoko) (70845221)	立教大学・理学部・助教 (32686)	