

立教大学学術推進特別重点資金 (立教 S F R)
大学院学生研究
2019年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学	研究科	物理学	専攻		
研究代表者 (2020年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名				
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年 (学生番号: 19RA004L)		飯澤 正登実 印				
指導教員	所属部局・職		氏名				
	理学部・准教授		中野祐司 印				
自然・人文・社会の別	<input checked="" type="radio"/> 自然	<input type="radio"/> 人文	<input type="radio"/> 社会	個人・共同の別	<input checked="" type="radio"/> 個人	<input type="radio"/> 共同	名
研究課題	極低温静電リングと中性ビームの合流実験による星間分子反応ダイナミクスの研究						
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2020年3月現在 のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年		氏名				
	理学研究科 物理学専攻 博士課程後期課程 1年		飯澤 正登実				
研究期間	2019		年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 280,000円		/ (採択金額) 280,000円				

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)

ALMA 国際望遠鏡の運用が開始され星間物質由来のミリ波・サブミリ波が史上最高の感度と分解能で観測できるようになったことで、惑星誕生のメカニズムをはじめとした様々な宇宙の謎が明らかにされようとしている。我々は、星間空間で主に生じていると考えられる低エネルギー衝突による化学反応の反応断面積が、振動状態・回転状態によって大きく異なる場合があることに注目する。本研究では極低温イオン蓄積リング RICE と中性原子ビーム源を用いて合流ビーム実験を行うことで、実験室上で振動状態・回転状態に依存した反応過程を分析する。ALMA 国際望遠鏡の観測結果と照合することで、星間空間でどのような化学反応が生じているか明らかになる。

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)

{ 原子分子物理学 } { 合流ビーム法 } { 光脱離 }

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

星間物質の化学進化に関する研究の進展によって、分子雲発生から恒星誕生までの過程に、炭素や窒素などの中性原子が関与する反応過程があることが明らかになってきた。本研究では、中性原子と、振動状態・回転状態を基底状態へ冷却した分子イオンを meV オーダーの超低エネルギーで衝突させることにより、分子雲中で生じていると考えられる衝突素過程を実験室上で再現し、その反応断面積を測定する。これによって星間空間でどのような化学反応がどの程度生じているかを明らかにすることを目標としている。

超低エネルギー衝突は、合流ビーム法を用いて実現する。合流ビーム法は2種のビームをほぼ等速度で合流させることで、相対的に低エネルギー衝突させる手法である。この手法はエネルギーの統計値である温度ではなく、衝突エネルギーそのものの制御が可能になるため、イオントラップ等で計測可能な(反応速度定数) vs (温度) のスペクトルではなく、(反応断面積) vs (エネルギー) のスペクトルを得ることができるという特徴がある。前者は原子分子集団の統計量に関するスペクトルであるのに対し、後者は個々の原子分子に関するスペクトルであり、このスペクトルを取得することで衝突エネルギーや状態に依存性がある過程を分析できる。また、分子イオンの振動状態・回転状態を基底状態へ冷却するため、理化学研究所で開発された極低温イオン蓄積リング RICE を利用する。

本研究で特筆すべき実験技術は、分子イオンと衝突させる中性原子ビームの生成技術である。中性原子の速度は電場や磁場によってコントロールができない。合流ビーム法ではビームの速度を高精度にコントロールする必要があるため、合流ビーム法に利用可能な中性原子ビームの生成は実現困難であった。そこで、セシウムスパッタイオン源を用いて負イオンビームを作り、電場・磁場・スリット等を用いて速度や変位をコントロールしたうえで、大強度半導体レーザーによって電子を脱離し、中性原子ビームを得る計画を立てた。本年度の目標は、この中性原子ビーム源の開発である。

中性炭素原子と分子イオンの反応過程のうち、星間分子雲中で生じていると考えられているものの1つが $C+H_3^+ \rightarrow CH_2^+ + H$ という衝突過程である。中性炭素原子ビームのカレントを 10 nA、 H_3^+ のビームカレントを 10 nA、 H_3^+ イオンに対する中性炭素原子の相対的な運動エネルギーを 0.1 eV、中性原子の運動エネルギーを 10 keV、両者のビーム径を 20 mm、両ビームが合流している区間の長さを 1 m とすると、この反応のカウントレートは 100 cps 程度であり現実的に計測可能なオーダーである。セシウムスパッタイオン源を用いて得られる負イオンビームは 1 μ A 程度であるため、この程度のカウントレートを得るためには 10^{-2} オーダーの中性化効率を要する。この中性化効率を実現するため、昨年度にレンズ 3 種 4 枚・平面ミラー 3 枚を用いてレーザー光の光子束密度を増幅させる装置(以下光増幅器と呼ぶ)を設計した。

本資金申請時の本年度の計画は ①大強度レーザーの光路上の光学系の安定性を向上させること、②大強度レーザー導入時の真空度悪化を抑えること、③中性原子ビーム源とイオン蓄積リング RICE との接続部の設計を行うこと であり、以下に具体的な進捗を記す。

① 大強度レーザーの光路上の光学系の安定性向上

光増幅器へ大強度レーザーを導入するためのレンズの多くは真空チェンバー内に設置されるため、水冷による冷却機構を備えている。これまで、チェンバー内レンズとして3枚のBK7製シリンドリカルレンズを用い、そのレンズホルダーを水冷することでレンズ自体の冷却を行っていた。しかし、レーザーパワー2 kW程度の光を入射するとレンズの温度ムラによる熱割れでレンズが破損してしまうため、熱膨張率が小さい合成石英製シリンドリカルレンズ2枚(特注品)を用いるシステムに設計変更を行った。この変更により、熱割れは生じなくなった。

研究成果の概要 つづき

一方で、レンズホルダーが熱により変形し光路を遮るため、レンズを固定する機構の再設計を行った。さらに、光増幅器に用いている誘電体多層膜ミラー表面の、レーザーが直接照射される領域が、白く変色されていることが確認された。このミラーはレーザーの波長である 808nm 付近の光に対しては 99.5%以上の反射率を持つが、大強度レーザーによって誘電体多層膜が破壊され、導入されたレーザー光の大部分が合成石英やその背後の水冷装置まで到達してしまっていたと考えられる。そこで、誘電多層膜を、開発している光増幅器に最適化されたハイパワーレーザー耐性を持つものに変更した。以上の変更によって、大強度レーザーの光路上の光学系は安定運用可能になった。

② 大強度レーザー導入時の真空度悪化の対策

負イオンから電子を脱離するには、本研究で用いている光脱離以外に気相原子分子との衝突によっても脱離する。この手法による脱離はビームの運動量の広がりが大きくなる上、得られた中性原子が準安定状態に励起している可能性があり、合流ビーム実験には適さない。このような気相原子分子による脱離は、残留ガスによっても生じる。

真空度を悪化させる主因となりうるのは、大強度レーザーの脱離チャンバー内への導入である。レーザーパワー1 kW 程度の光を入射したときの脱離チャンバー内の圧力は、目標としている 10^{-5} Pa 程度で維持されているが、レーザーパワーをさらに上げると 10^{-4} Pa 台へと急速に悪化する。アウトガスの主な原因は、真空チャンバー中で使用していたテフロン製スペーサーや、ミラーの冷却に用いた真空用グリースの気化であると考えられる。いずれも用いる材質の変更を行った。

③ 中性原子ビーム源とイオン蓄積リング RICE との接続部の設計

中性原子ビーム源の脱離チャンバー内は 10^{-5} Pa 程度の圧力であり、RICE は 10^{-10} Pa 程度の圧力である。この両者を接続するためには、差動排気の機構が必須である。排気速度 300 l/s 程度のターボ分子ポンプ 2 台を用いて当該部分の設計を行った。

本年度の計画になかった成果として、セシウムスパッタイオン源の安定運用のため、各種パラメータをリアルタイムで記録するデータベースを構築したことが挙げられる。実際にこのシステムは、セシウムスパッタイオン源のトラブル発生時の原因究明にも利用された。

その他各種調整により、最終的に本年度末には、光増幅器を用いないときと比較し 9.2 倍の中性化効率を得ることに成功した。これにより合流ビーム実験が可能な中性ビームの収量を得ることが出来る。

ポスター発表・口頭発表は ICPEAC2019 や日本物理学会等で行った。特に Max Planck Institute CSR の中性原子ビーム源開発チームとの情報交換は、我々の中性原子ビーム源の更なる安定性・安全性の向上を果たすための、参考となった。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて提出してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

国際会議

[1] James Harries, Hiroshi Iwayama, Susumu Kuma, Sigeki Owada, Ichiro Inoue, Tadashi Togashi, Masatomi Iizawa, Norihiro Suzuki, Yoshiro Azuma and Eiji Shigemasa, “Extreme ultraviolet superfluorescence from helium ions,” *The 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics*, Hiroshima, Japan, June 2019.

[2] [Invited] J R Harries, H Iwayama, S Kuma, M Iizawa, N Suzuki, Y Azuma, I Inoue, S Owada, T Togashi, and E Shigemasa, “Observation of extreme ultraviolet superfluorescence from helium atoms ionised and excited using soft x-ray free-electron laser pulses,” *the XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions*, Deauville, France, July 2019.

[3] M Iizawa, S Iida, S Kuma, T Azuma and Y Nakano, “Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE,” *the XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions*, Deauville, France, July 2019.

国内学会・研究会

[4] 大阿久貴博, 河上剛, 飯澤正登実, 飯田進平, 東俊行, 中野祐司, 「合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発」, 原子衝突学会第44回年会, 東京, 2019年9月.

[5] 飯澤正登実, 飯田進平, 大阿久貴博, 河上剛, 東俊行, 中野祐司, 「合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 III」, 日本物理学会 2019年秋季大会, 岐阜, 2019年9月.

[6] M Iizawa, S Iida, S Kuma, T Azuma and Y Nakano, “Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE,” *RIKEN Summer School 2019*, Chiba, Japan, October 2019.

[7] M Iizawa, S Iida, S Kuma, T Azuma and Y Nakano, “Photodetachment of negative ion beams for the ion-neutral merged-beam experiments at RICE,” 令和元年度 理研大交流会, 埼玉, 2019年12月.

[8] 飯澤正登実, 飯田進平, 大阿久貴博, 河上剛, 東俊行, 中野祐司, 「合流ビーム実験に向けた中性ビーム源の開発 IV」, 日本物理学会 第75回年次大会, 愛知, 2020年3月.

[9] 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, 「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」, 日本物理学会 第75回年次大会, 愛知, 2020年3月.