

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2020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 (2021年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年・学生番号		氏名		
	☐ 博士前期課程 年 ☒ 博士後期課程 2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	☒ 自然 ☐ 人文 ☐ 社会		個人・共同の別	☒ 個人 ☐ 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) ※2021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 2年		飯澤 正登実		
研究期間	2020 年度				
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 250,000 円 / (採択金額) 250,000 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知られるようになった。一方、分子雲中で生じているそれらの衝突素過程は実験室上での再現が難しく、衝突によって生じる諸反応の断面積は十分に調査されていない。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再現し、その反応断面積の測定を通し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。

meV オーダーの低エネルギー衝突は、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(合流ビーム法)を用いて実現する。分子イオンの振動回転状態の冷却は、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システムを開発した。このようにして得られた中性原子ビームは、角度拡がり少なく合流ビーム実験に適するうえ、準安定状態の電子励起状態を持たないため、状態選択的に素過程を追究することを可能にする。本年度の目標は、この中性原子ビーム源を理化学研究所に移設・RICE に接続し、合流試験を行うことを目標とした。

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 $C+H_2^+ \rightarrow CH^+ + H$ 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 25 nA、 H_2^+ のビームカレントを 240 nA、 H_2^+ 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 21 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 1cps オーダーであり現実的に計測可能である。

1. 中性炭素ビーム源の収量評価

本中性炭素ビーム源は、炭素の負イオンビームを大強度半導体レーザーによって電子脱離することで実現している。開発した光量子束密度を増大させる光増幅器を用いる事で、中性化効率が約 6 倍に増大することを確認した。これにより、レーザーパワー 1.4 kW で照射したとき、46 nA の中性炭素ビームを得た。

2. 中性炭素ビーム源の立教大学から理化学研究所への移設・RICE への接続

理化学研究所へ搬送した中性炭素ビーム源の組み立て・電気水道等のインフラの整備、大強度レーザー使用に関する各種安全対策などを行った。また、差動排気チェンバーを新設、RICE へ接続し、蓄積リングの対岸のポートから中性炭素ビームが 100 nA オーダーで得られることを確認した。ただしこの値は、残留ガスにより中性化したビームも含めた収量である。

研究成果の概要 (つづき)

3. RICEにおける各種分子イオンの冷却シミュレーション

極低温イオン蓄積リングによる冷却は輻射のみに依っている。よって、永久双極子モーメントを持つ分子イオンのみが冷却できる。今回は合流ビーム実験における適切な標的を探るべく、 HD^+ 、 CH^+ 、 CaH^+ 、 SH^+ の冷却シミュレーションを、レート方程式を解くことで行った。

基底状態以外の振動回転状態の分子イオンビームは、冷却時間をコントロールすることで生成する。シミュレーションにより、 HD^+ は、レーザーポンピングを行わないとき、RICEで100秒蓄積することでおおよそ50%が $\nu = 0$, $J=1$ 、のこりの50%が $\nu = 0$, $J=0$ となることが分かった。よって、あらかじめ $\nu = 0$, $J=0$ を用いたデータ(合流ビーム実験による反応断面積など)を得ておきその影響を差し引くことで、 $\nu = 0$, $J=1$ のデータを得ることができる。

4. 生成物ディテクターの設置とテスト・合流試験

合流ビーム実験の最初期の目標として、中性炭素Cと水素イオン H_2^+ を衝突させることで生じる反応のうち $\text{C} + \text{H}_2^+ \rightarrow \text{CH}^+ + \text{H}$ のカウントレートを測定することを目指した。 CH^+ を検出するディテクターは平行平板2枚とCEMを構成要素としている。電氣的ノイズやイオンビーム・中性炭素ビームに起因するノイズなどに悩まれ、その多くは原因が特定されたが、中性炭素ビームに起因するノイズの抑制には成功していない。当該ノイズは 10^4 cpsオーダーのカウントレートがあり、 10^0 cpsオーダーのカウントレートしか持たない本実験にとって致命的な問題である。

ノイズによるカウント(CH^+ に起因しないカウント)は、約100 cps以下にしなければならない。その理由は、目標とするSNRを2、CEMから得られる CH^+ に起因しないカウントレートを N 、 CH^+ のカウントレートを1 cps = 86400 count/day、測定時間を24時間とすると、 $2 > \sqrt{86400 / N}$ より、 $N < 146$ であるからである。

また、中性炭素Cと水素イオン H_2^+ を合流させた場合、 $\text{C} + \text{H}_2^+ \rightarrow \text{C}^+ + \text{H}_2$ という反応も生じているはずであるが、今回開発された検出器では C^+ と CH^+ は分離できていない可能性がある。類似の実験を行っている国外のチームでは、この問題を解決するために90度ディフレクターを3台用いた装置を開発している。今後我々も C^+ と CH^+ を用いた検出器のテストを行い、今回の試作機で得られた知見を生かして再開発する必要がある。

5. H_2^+ のRICEへの蓄積

検出器の制限により、本研究で標的となる分子イオンは、 H_2^+ 、 H_3^+ 、 HD^+ の3つに限定された。うち、極低温イオン蓄積リングで冷却可能なのは HD^+ のみである。 H_2^+ 、 H_3^+ は永久双極子モーメントを持たない。今回はまず、ECRイオン源によって十分な収量を確保できると考えられる H_2^+ について、蓄積するための各種パラメータの最適化を行った。

中性炭素原子ビームの収量は、運動エネルギーを増大させるほど少なくなる。レーザー照射区間を通過する時間が短くなるためである。よって、運動エネルギーは極力低くしたい。一方、ECRイオン源は5 keV以下の低エネルギーでの引き出し能力は優れない。両者は等速度で合流させねばならないため、中性炭素原子ビームの運動エネルギーは15 keVとして、 H_2^+ を2.5 keVで引き出す試験を行った。結果、無事数十nAオーダーの引き出しに成功し、蓄積リングを30周させることができた。今後、 H_3^+ で同様のパラメータ最適化を行う。 HD^+ は H_3^+ と質量電荷比が等しいため、 H_3^+ と同じ条件で引き出し・蓄積できる見込みである。

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)

・論文

[1] S. Kosugi, F. Koike, M. Iizawa, M. Oura, T. Gejo, K. Tamasaku, J.R. Harries, R. Guillemin, M.N. Piancastelli, M. Simon, and Y. Azuma, "Fluorescence Time Delay in Multistep Auger Decay as an Internal Clock," *Physical Review Letters* **124** (18), 183001 (2020).

[2] M. Iizawa, S. Kosugi, F. Koike, and Y. Azuma, "The quantum and classical Fano parameter q ," *Physica Scripta* **96** (5), 055401 (2021).

・国内会議

[3] 河上剛, 飯澤正登実, 大阿久貴博, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司, 「極低温イオン蓄積リングRICEを用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 I」, 日本物理学会 2020年秋季大会, オンライン, 2020年9月.

[4] 飯澤正登実, 大阿久貴博, 河上剛, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司, 「極低温イオン蓄積リングRICEを用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 II」, 日本物理学会 2020年秋季大会, オンライン, 2020年9月.

[5] 河上剛, 大阿久貴博, 飯澤正登実, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司, 「極低温イオン蓄積リングRICEと中性ビーム源を用いた中性炭素原子と水素分子イオンの合流ビーム実験 I」, 原子衝突学会第45回年会, オンライン, 2020年12月.

[6] 飯澤正登実, 大阿久貴博, 河上剛, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司, 「極低温イオン蓄積リングRICEと中性ビーム源を用いた中性炭素原子と水素分子イオンの合流ビーム実験 II」, 原子衝突学会第45回年会, オンライン, 2020年12月.

[7] 大阿久貴博, 飯澤正登実, 河上剛, 飯田進平, 久間晋, 木村直樹, Chartkunchand Kiattichart, 岡田信二, 東俊行, 中野祐司, 「極低温イオン蓄積リングRICEを用いた中性ビームと分子イオンビームの合流実験 III」, 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン, 2021年3月.