

平成 31 年 4 月 18 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03753

研究課題名(和文) 星間分子雲における低温イオン-極性分子反応の系統的測定と量子効果の観測

研究課題名(英文) Systematic study of cold ion-polar molecule reactions for interstellar chemistry

研究代表者

岡田 邦宏 (Okada, Kunihiro)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90311993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、新たに並進・回転温度可変な低速極性分子源を開発し、星間分子生成の理解に重要な低温イオン-極性分子反応の反応温度依存性を明らかにすることである。本研究では、従来には無かったWavy Stark velocity filterを開発し、極性分子線の出射位置を変化させることなく、CH₃CNの並進温度を6.5-110 Kにわたって変化させることに成功した。また、CH₃CN + Ne⁺反応の低温での測定に成功し、反応確率に大きな並進反応温度依存性があることを見出した。本研究の成功によって、これまで測定が困難であった低温イオン-極性分子反応の温度依存性の測定が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果によって、これまで実験が困難であった低温(-260 ~ -173 K)におけるイオンと極性分子の気相化学反応を測定する手段を新たに提供できるようになったこと、およびそれを用いた実証実験に成功したことが学術的に重要な貢献であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a new temperature variable Stark velocity filter in order to clarify the reaction temperature dependence of various ion-polar molecular reactions at low temperatures. In this study, we developed a Wavy Stark velocity filter and succeeded in changing the translational temperature of acetonitrile (CH₃CN) over 6.5-110 K without changing the output beam position of polar molecular beams. Additionally, we succeeded in measuring the translational temperature dependence of the reaction rate constant of CH₃CN + Ne⁺ products and found that there is a large translational temperature dependence in the reaction probability. The completion of the Wavy Stark velocity filter has paved the way to experimentally reveal the translational temperature dependence of ion-polar molecular reactions at low temperatures.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：イオン極性分子反応 シュタルク分子速度フィルター イオントラップ クーロン結晶 星間分子 レーザー冷却

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

星間分子雲の物理・化学的性質を理解することは、恒星の起源を理解する上で非常に重要である。分子雲の数密度 n と環境温度 T はそれぞれ $n = 10^2\text{-}10^6 \text{ cm}^{-3}$, $T = 10\text{-}100 \text{ K}$ であることが明らかとなっているが、このような超高真空・極低温環境においても様々な星間分子が生成されており、確認された分子種はおよそ 200 種にも及ぶ。近年、アルマ望遠鏡の稼働によって天文観測（特にミリ波、マイクロ波領域）における空間分解能が向上し、分子雲内部の化学組成に対する詳細な情報が得られるようになった。そのため、分子雲の化学進化モデルの精密化が求められるようになってきており、星間分子生成に関わる反応の正確な反応速度定数と、その温度依存性の情報が必要となりつつある。分子雲での気相分子生成過程では、地球環境のもとで進行するような中性分子同士の反応は殆ど起こらず、イオン分子反応が分子生成の主役となるが、特に捕獲速度の大きなイオン-極性分子反応が果たす役割は大きい。しかしイオン-極性分子反応を低温で直接測定した例は極めて少なく、確認できる範囲で約 20 例しかない。従って、分子雲進化の研究ではもっぱら室温で測定された反応速度定数の外挿値 $k(T) = k_{\text{RT}} (300/T)^{0.5}$ (k_{RT} : 室温の反応速度定数, T : 温度) が利用されている [D. McElroy *et al.*, *A&A* **550**, A35 (2013)]。また室温での測定値さえ存在しない場合には、古典軌道計算に基づく Su-Chesnavich の半経験式 [T. Su *et al.*, *JCP* **76**, 5183 (1982)] が用いられているのが現状である。イオン-極性分子反応の低温での測定値が存在しない理由は、極性分子ガスの凝縮温度が通常の中性分子ガスに比べて高温（一般に 100 K 以上）であり、気相で 100 K 以下に冷却すること自体が困難だからである。

そのような背景のもと、本研究代表者はシュタルク分子速度フィルターによる低温の極性分子生成法とレーザー冷却イオンを冷媒としたイオンの共同冷却法を組み合わせた、従来には無い実験装置を開発し、並進温度約 3 K における $\text{CH}_3\text{CN} + \text{N}_2\text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{CNH}^+ + \text{N}_2$ の反応速度定数の測定に初めて成功した [K. Okada *et al.*, *Phys. Rev.* **A87**, 043427 (2013)]。しかし実験装置の制約によって星間分子雲の環境温度 10-100 K に亘って自由に並進温度を変化させた測定を行うことはできなかった。また分子の回転温度が反応速度定数に与える影響を調べるには至っていない。本研究分担者・崎本らの理論的研究によると、 ND_3 のような対称コマ分子を含むイオン-極性分子反応系では、回転量子数 (J, K) の分布の違いによって捕獲速度定数が大きく変化することが予測されている。これらは星間分子雲の化学進化の理解にとって極めて重要な情報であるが、単に実験的困難さのために、これまでその実験的検証が行われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、まず低速分子線の並進温度を自由に変更することが可能な、新しい構造をもつ温度可変シュタルク分子速度フィルターを開発し、その性能評価を行うことである。また、分子イオンの回転準位分布を制御するための温度可変冷却イオントラップを製作し、極性分子及び分子イオンの回転準位分布を制御しながら並進温度 10 K から 100 K に亘るイオン-極性分子反応の反応速度定数を系統的に測定できる装置を開発することである。また、得られた実験結果と Perturbed Rotational State (PRS) 理論 [K. Sakimoto, *JPSJ* **48**, 1683 (1980)] から求められる捕獲速度定数を比較し、低温イオン極性分子反応における反応確率の温度依存性に関する情報を得ることが目標である。

3. 研究の方法

3-1. 低速分子線の生成

シュタルク分子速度フィルターは極性分子の回転準位におけるシュタルク効果を利用し、ある速度分布をもつ分子集団から低速部分の分子を取り出す実験装置である。極性分子の回転準位はシュタルク効果によって分裂・シフトする。電場の増加に伴って正にシフトする回転準位にある分子が強電場中に入ると、エネルギー保存則によって並進運動が減速されることになる。このような分子は電場の弱い方向に力を受けるため、low field seeker (LSF) と呼ばれる。図 1 に以前に我々が開発した低温イオン-極性分子反応測定装置の概略図を示す。図 1 左側の 90 度偏向した 4 重極電極（ガイド電極）がシュタルク分子速度フィルターである。ガイド電極内には、4 重極中心からの距離 r に比例する不均一電場が生じるので、ガスノズルから入射した極性分子のうち、 r 方向に低速の成分を持つ分子だけが即座に選別され、四重極電極に沿ってガイドされていく。したがって、このガス入射部分で殆どの分子が失われることになる。さらにガス入射方向（軸方向）の速度選別を行うため、従来のシュタルク分子速度フィルターでは四重極電極を 90° 偏向させる。偏向部では、回転準位のシュタルクシフトによって決まる向心力が遠心力より大きくなる極性分子だけガイ

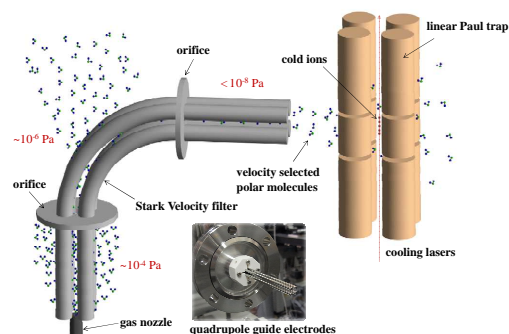


図1. 低温イオン-極性分子反応測定装置の概略図。挿入写真はガイド電極の出口付近を撮影したもの。

ドされる。つまり、低速分子の最大速度は、偏向部の曲率半径 R 、及び回転準位のシュタルクシフトの最大値(電場の最大値)によって決定される。

この装置の問題点は、分子線の並進温度を大きく変更するためには軌道半径 R を変更しなければならない点にある。

従来の 90° 偏向型では、曲率半径 R を変更するたびに分子線の出射位置が変わってしまう。つまり同一のビームアライメントで広範囲に亘る並進温度依存性の測定はできない。そこで本研究では速度選別部分のシュタルク電極の偏向角 θ を $10\sim 30^\circ$ に抑え、波打ち構造とすることによってビームアライメントを変えずに“軌道半径 R が異なる速度選別部”を交換して利用できる構造を考案した(図2)。この工夫により同一のビームアライメントで並進温度を大きく変更した実験を行うことが可能となる。この構造は、低速分子線を用いた反応速度測定を行う上で大変実用的であり、本研究で初めて提案したものである(Wavy Stark velocity filter と命名した)。

一方、極性分子の回転温度制御を行うため、図2(左)に示した冷却ガスセルを極性分子源とした。ガスセルをスターリング式冷凍機に接続し、セラミックヒーターを駆動することで 27 K から室温に亘ってガスセルの温度を変化させることが可能となっている。将来的に 4 K 極低温冷凍機に接続することで $4\text{--}300\text{ K}$ までセル温度変化させる予定である。

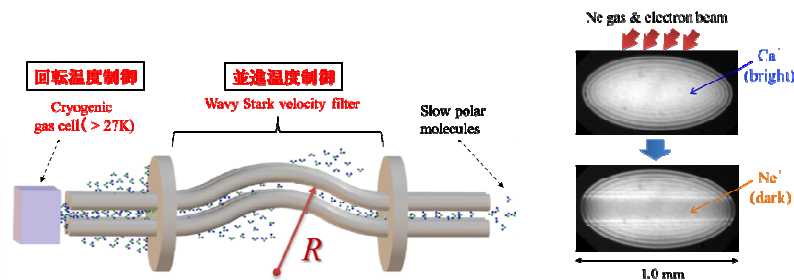


図2. (左)Wavy Stark velocity filterの概念図。曲率半径 R の異なる電極を交換すれば、低速極性分子の出射ビーム位置を変更せず並進温度を大きく変更できる。(右) Ca^+ と Ne^+ からなる混合クーロン結晶のレーザー誘起蛍光(LIF)画像。

3-2. 反応速度測定法

反応速度測定は従来と同様の方法により行った[Phys. Rev. A87, 043427 (2013)]。レーザーアブレーション法を用いて Ca^+ イオンを冷却イオントラップ内に導入し、レーザー冷却を行う。冷却が進行するとイオンは相転移を起こし、 Ca^+ イオンのクーロン結晶が生成される。次に、反応標的となるイオンを導入する。本研究では主にネオンイオンを標的とした実験を行ったため、真空槽内に Ne ガスを導入し、電子衝撃イオン化法によって Ne^+ を生成した。生成した Ne^+ は Ca^+ クーロン結晶とのクーロン相互作用により数 K 程度の低温まで冷却される。 Ne^+ は Ca^+ よりも小さな質量を持つため、イオントラップ中でより強い束縛力を受けるため、クーロン結晶の中心に分布する。したがってレーザー誘起蛍光(LIF)を発しない Ne^+ は Ca^+ クーロン結晶の中心に軸対称な暗部として確認される(図2(右))。その後、シュタルク分子速度フィルターに電圧を印加し、反応させるための極性分子を混合クーロン結晶に照射する。

線形イオントラップ中の冷却イオンの数密度は近似的に一定であることが分かっているので、標的イオンと Ca^+ イオンからなる混合クーロン結晶の LIF 画像に現れる Ne^+ に起因する中心暗部の体積を求めると、 Ne^+ の相対数を決定することができる(雑誌論文12)。従って、低速分子線照射時の混合クーロン結晶の画像変化を観測することによって反応速度 γ が求められる。低速 CH_3CN 分子の数密度 n を用いることによって反応速度定数を $k = \gamma/n$ として求められる。なお、 Ca^+ と CH_3CN の反応は非常に反応速度が遅いため、本測定に影響を及ぼさない。

3-3. イオン温度と並進反応温度の評価

イオントラップに捕獲されたイオン運動の平均エネルギーは、高周波電場によるマイクロ運動によって支配されることがわかっているが、直接測定することは困難である。そこで本研究では、実験で得られた混合クーロン結晶の LIF 画像を古典的分子動力学シミュレーションによって再現し、その計算結果から温度に換算したイオンの平均エネルギー T_{ion} を求める手法を開発した(雑誌論文12)。分子動力学シミュレーションでは、数 1000 個に及ぶ全てのイオン間のクーロン相互作用を考慮してイオントラップ内の全イオンの運動方程式を解く必要があるため、天文学で利用されている Grape9 並列計算機を用いている。以上の方法によって、反応速度測定中の Ne^+ の平均エネルギーを $T_{\text{ion}} = 2 \pm 1\text{ K}$ と評価した。

なお本実験の条件では、 CH_3CN と Ne^+ が衝突する際互いにランダムな向きをもつ熱的な相対速度分布をもっていると考えられるので、イオン-極性分子間の並進反応温度 T_{trans} は以下の式を用いて求めた。

$$T_{\text{trans}} = \frac{\mu}{m_{\text{ion}}} T_{\text{ion}} + \frac{\mu}{m_{\text{PM}}} T_{\text{PM}} \quad (1)$$

ここで、 m_{ion} 、 m_{PM} はイオンと極性分子の質量、 T_{ion} 、 T_{PM} は並進温度、 μ は換算質量である。

4. 研究成果

4-1. Wavy Stark velocity filter の性能評価

本研究で開発した Wavy Stark velocity filter の性能評価を行った。フィルター電極は曲率半径 R 及び偏向角 θ がそれぞれ $(R, \theta) = (50 \text{ mm}, 30^\circ), (600 \text{ mm}, 10^\circ), (1000 \text{ mm}, 5^\circ)$ の3種類 のものを準備した。各電極を用いて低速分子線の速度分布 (並進温度) とイオントラップ領域における数密度を測定した。

速度分布は飛行時間測定法を用いて決定した (雑誌論文5)。ガスセル圧力を一定に保ち、極性分子を Wavy シュタルク分子速度フィルターに入射し、高電圧スイッチを用いて電極に高電圧を印加する。高電圧をスイッチした時刻を 0 として四重極質量分析計 (QMS) で検出される極性分子の信号 (イオンカウント) の時間変化をマルチチャンネルスケーラーで測定する。CH₃CN を用いた測定結果の例を図 3 に示す。ここで、速度分布の情報は信号の立ち上がり部分に含まれる。低速分子線の速度分布 $P(v, T_{PM})$ は以下の式で表せる。

$$P(v, T_{PM}) = \frac{2v}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{v^2}{\alpha^2}\right), \quad \alpha \equiv \sqrt{\frac{2k_B T_{PM}}{m}} \quad (2)$$

ここで、 m : 分子質量, k_B : ボルツマン定数, T_{PM} : 並進温度, である。実験で得られた飛行時間信号を再現するために次式を用いた。

$$I(t) = I_0 \int_0^t P(L/t', T_{PM}) / t'^2 dt' + BG \quad (3)$$

ここで、 I_0 は $t \rightarrow \infty$ における低速分子線強度, BG はバックグラウンド信号, L は分子線ガイド出口から検出器までの距離, を表す。式(3)は時刻 t における分子線強度を表す。速度分布関数を求めるため、非線形最小二乗法フィッティング法を用いて式(3)を実験データにフィットし、並進温度 T_{PM} を決定した。CH₃CN の測定結果を図 5(a) に示す。CH₃CN については星間分子雲の環境温度 10 - 100 K をカバーした並進温度が得られている。

一方、シュタルク分子速度フィルターを透過した低速分子線の数密度は、校正された全圧真空計による極性ガスの圧力と、QMS を用いた極性分子イオンのカウント信号との相関測定を行うことによって決定した。図 4(b) に低速 CH₃CN のイオントラップ領域における数密度の測定結果を示す。反応速度測定に十分な $10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ の数密度が得られた。

4-2. Ne⁺ + CH₃CN 反応の並進温度依存性

測定結果を図 5 に示す。図 5(a) には反応速度測定の結果を示した。縦軸は Ne⁺ イオン数の相対値の対数, 横軸は反応時間である。極性分子の並進温度 T_{PM} が高いほど反応速度 γ が急激に速くなっていることがわかる。この理由は、ガイド電圧 $|V_{GI}|$ が高いと並進温度 T_{PM} は高くなるが、同時に透過分子数が劇的に増加するからである。図 5(b) は反応速度 γ と数密度 n から求めた反応速度定数の並進反応温度依存性を示すグラフである。なお、グラフ中の "90° Stark" と示したプロット点は、90° 偏向型シュタルク分子速度フィルターを用いた測定結果である。図 5(a) の結果とは逆に、(b) では T_{PM} が高いほど反応速度定数 k が小さくなっている。

4-3. PRS 理論との比較

図 6 に PRS 理論によって求めた捕獲速度定数の温度依存性 (●) と実験値 (■) の比較結果を示す。参考のため、並進・回転エネルギーがともに同じ熱的分布をとると仮定した場合の PRS 理論による値 (◆), 及び Su-Chesnavich 式 (●) から求めた値も示した。PRS 理論と Su-Chesnavich 式は同じ傾向を示していることがわかる。並進温度が約 5 K のとき PRS 理論は実験値をよく再

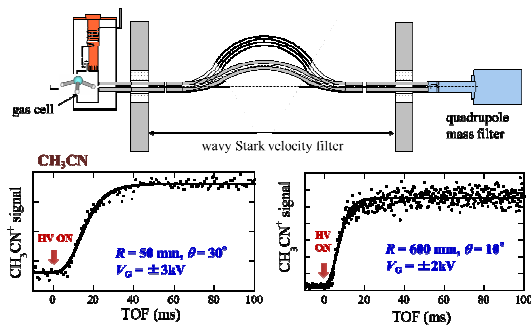


図3. CH₃CN 低速分子線の飛行時間信号の測定例。左グラフは $(R, \theta) = (50 \text{ mm}, 30^\circ)$, 右グラフは $(600 \text{ mm}, 10^\circ)$ を用いて測定した結果である。

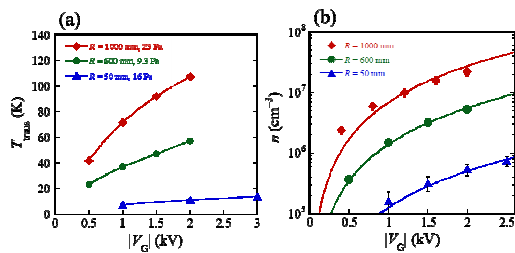


図4. 低速CH₃CNの測定結果。(a) 並進温度, (b) 数密度。横軸はガイド電圧の大きさ。

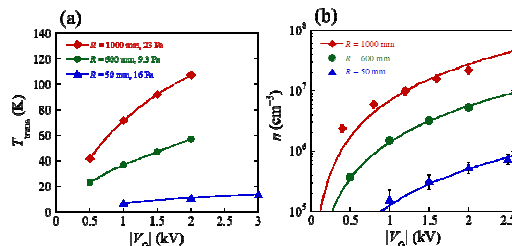


図5 (a) Wavy Stark velocity filterを用いたCH₃CN + Ne⁺ → products 反応における反応速度測定結果。グラフ中の赤字 T_{PM} は入射極性分子の並進温度を表す。(b) 反応速度定数の並進反応温度依存性。青い実線はイオン-分子反応における Langevin 捕獲速度定数であり、これは反応温度に依存しない。

現しているが、 $T_{\text{trans}} > 10 \text{ K}$ では明らかに一致していない。この結果は、反応確率が並進温度依存性をもつことを示唆している。一方、実験値の温度変化は、熱的分布を仮定した場合に得られる PRS 理論値と似た傾向を示しているように見える。

4-4. まとめ

図 6 に示した結果は $\text{Ne}^+ + \text{CH}_3\text{CN}$ 反応における反応確率の温度依存性の存在を示唆しており、仮に高温側で反応速度定数が増加に転じるならば、低温側での反応速度定数の上昇はトンネル反応によるものである可能性がある。今後は反応の分岐比や極性分子の回転温度を大きく変化させた反応速度測定を行い、PRS 理論と比較することで、反応確率の温度依存性を解明していく。また、様々な反応系について測定を行い、イオン-極性分子間相互作用と反応機構の詳細を明らかにし、実験・理論の両面から反応速度定数と反応分岐比のデータを蓄積し、星間化学分野へ提供していきたい。

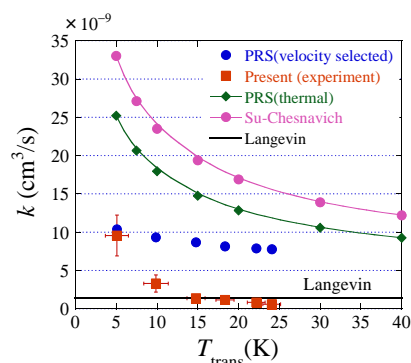


図6. 実験値と理論的に求められた捕獲速度定数との比較。黒線はLangevin 速度定数。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

1. N. Kimura, K. Okada (他 7 名), “Direct Wavelength Measurement of the Visible M1 Transition in Ba^{7+} with a Novel Calibration Method”, *Plasma and Fusion Research* 14, 1201021 (2019) (2 pp.) 査読有, DOI: 10.1585/pfr.14.1201021
2. K. Sakimoto, “Exotic molecules consisting of an antiproton and a hydrogen atom”, *Phys. Rev. A* 98, 042503 (2018) (14 pp.) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.98.042503
3. K. Sakimoto, “Dipole enhancement of the protonium formation cross section in antiproton collisions with excited hydrogen atoms”, *Eur. Phys. J. D* 17, 1-7(2018) (7pp.) 査読有, DOI: 10.1140/epjd/e2017-80394-0
4. 崎本一博, “衝突反応における形状共鳴の系統的な見方”, *日本物理学会誌* 73, 6-14 (2018) (9pp.) 査読有
5. K. Okada 他4名, “Development of a wavy Stark velocity filter for studying interstellar chemistry”, *Review of Scientific Instruments* 88, 083106 (2017) (11 pp.) 査読有, DOI: 10.1063/1.4997721
6. N. Kimura, M. Kajita, K. Okada, “Photodissociation of sympathetically crystallized CaH^+ ”, *Journal of Physics: Conference Series* 875, 022042 (2017) (1 p.) 査読有, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/875/3/022042/meta>
7. 岡田邦宏, “イオンのクーロン結晶が拓く星間分子生成反応の研究”, *日本物理学会誌* 71, 695-700(2016) (6pp.) 査読有
8. K. Sakimoto, “Systematics of shape resonances in reactive collision”, *Phys. Rev. A* 94, 042701(2016) (12pp.) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.94.042701
9. Y. Takada, K. Okada, “Reaction rate measurements between sympathetically cooled ions and velocity selected polar molecules: search for the deuterium isotope effects”, *Journal of Physics: Conference Series* 635 (2015) 022031 (1 pp) 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/635/2/022031
10. K. Okada and M. Kajita, “Toward laser spectroscopy of rotationally cooled CaH^+ ions trapped in a cryogenic linear Paul trap”, *Journal of Physics: Conference Series* 635 032060 (2015) (1 pp.) 査読有, DOI: 10.1088/1742-6596/635/3/032060
11. K. Okada, M. Ichikawa, M. Wada, “Characterization of ion Coulomb crystals for fundamental sciences”, *Hyperfine Interactions* 236: 87 (2015) (8 pp.) 査読有, <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10751-015-1188-y>
12. K. Okada, M. Ichikawa, M. Wada, and H. A. Schuessler, “Quasi-equilibrium characterization of mixed ion Coulomb crystals”, *Phys. Rev. Appl.* 4, 054009 (2015), (11 pp.) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.054009
13. K. Sakimoto, “Formation of antiprotonic helium and ionization in low-energy collisions of antiprotons with He atoms in the ground and metastable states”, *Phys. Rev. A* 91, 042502 (2015) (10 pp.) 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.91.042502
14. K. Sakimoto, “Theoretical study of true-muonium formation in muon collision processes”, *Eur. Phys. J. D* 69, 276 (2015) (9 pp.) 査読有, DOI: 10.1140/epjd/e2015-60427-6

[学会発表] (計 17 件)

1. 岡田邦宏, “星間空間イオン-極性分子反応の実験的研究の進展”, *日本物理学会第 74 回年次大会*, シンポジウム講演 17pK404-6, 九州大学, 2019 年 3 月 (依頼講演)

2. 崎本一博, “イオン・ダイポール相互作用による共鳴散乱”, 日本物理学会第 74 回年次大会 15aK201-13, 九州大学, 2019 年 3 月
3. 崎本一博, “反陽子と水素原子は分子として結合できるか?”, 日本物理学会 2018 年秋季大会 11pA216-11, 同志社大学, 2018 年 9 月
4. 岡田邦宏, 木村直樹, 和田道治, H. A. Schuessler, “低温イオン-極性分子反応の分岐比測定へ向けたイオントラップ飛行時間型質量分析計の開発”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 24pK204-10, 東京理科大学, 2018 年 3 月
5. K. Okada, “A laboratory study of interstellar ion-polar molecule reactions”, 1st North American Conference on Trapped Ions (NACTI 2017), Wednesday August 16, 2017, NIST, Boulder, Colorado, USA. (invited)
6. 崎本一博, “反陽子とポジトロニウムの衝突による反水素生成: elliptic state による違い”, 日本物理学会 2017 年秋季大会 21aA29-10, 岩手大学, 2017 年 9 月
7. 高田裕介, 岡田邦宏 他 3 名, “リニア型シュタルク分子速度フィルターによる低速分子線の生成”, 日本物理学会第 72 回年次大会 18pC24-10, 大阪大学, 2017 年 3 月
8. 崎本一博, “反陽子と励起水素原子の衝突における反陽子水素生成断面積の異常増大”, 日本物理学会第 72 回年次大会 20aB22-4, 大阪大学, 2017 年 3 月
9. 高田裕介, 岡田邦宏, “温度可変シュタルク分子速度フィルターの開発”, 原子衝突学会第 41 回年会, 富山大学, 2016 年 12 月
10. Y. Takada, K. Okada, “Study on the Effective Rotational Temperature Dependence of the Reaction-Rate Constants between Cold Ions and Slow Polar Molecules”, 12th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP12), Goethe-University, Germany, 2016 年 9 月
11. 崎本一博, “衝突反応に見られる形状共鳴の系統的解析”, 日本物理学会 2016 年秋季大会 14aKK-9, 金沢大学, 2016 年 9 月
12. 高田裕介, 岡田邦宏, “温度可変シュタルク分子速度フィルターの開発 II”, 日本物理学会 2016 年秋季大会 14aKK-4, 金沢大学, 2016 年 9 月
13. 岡田邦宏, “イオンのクーロン結晶が拓く低温イオン化学”, 第 64 回質量分析総合討論会, ホテル阪急エキスポパーク (大阪) 2016 年 5 月 18 日 (招待講演)
14. 高田裕介, 岡田邦宏, “温度可変シュタルク分子速度フィルターの開発”, 日本物理学会第 71 回年次大会 21pBE-7, 東北学院大学 2016 年 3 月
15. 岡田邦宏, “陽子-電子質量比測定のための冷却 CaH^+ のレーザー分光: 現状と展望”, 第 8 回光領域および精密周波数発生の回路技術調査専門委員会, 情報通信研究機構, 2015 年 12 月 8 日 (依頼講演)
16. 高田裕介, 岡田邦宏, “低温イオン-極性分子反応における回転温度依存性の検出”, 原子衝突学会第 40 回年会, P1-23, 首都大学東京, 2015 年 9 月 28 日-30 日
17. Y. Takada, K. Okada, “Reaction rate measurements between sympathetically cooled ions and velocity selected polar molecules: search for the deuterium isotope effects”, XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC2015) Toledo, Spain, 2015 年 7 月

[図書] (計 1 件)

1. 岡田邦宏, 低温と環境の科学事典 (河村公隆編集代表), 11-14 “宇宙低温下の気相反応と分子生成” 執筆, 朝倉書店 2016 年

[その他]

ホームページ等

<http://www.ph.sophia.ac.jp/~ttak-ken/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 崎本 一博

ローマ字氏名: SAKIMOTO, Kazuhiro

所属研究機関名: 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

部局名: 宇宙科学研究所

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 60170627

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。