

# シュタルク分子速度フィルターを用いた 極低温分子イオン-極性分子反応の研究

(上智大理工<sup>a</sup>, 理研<sup>b</sup>, テキサス A&M 大<sup>c</sup>)

○古川貴浩<sup>a</sup>, 市川雅也<sup>a</sup>, 和田道治<sup>b</sup>, H. A. Schuessler<sup>c</sup>, 岡田邦宏<sup>a</sup>

A study of cold molecular ion-polar molecule reactions using a Stark velocity filter

(Sophia Univ.<sup>a</sup>, RIKEN<sup>b</sup>, Texas A&M Univ.<sup>c</sup>)

Takahiro Furukawa<sup>a</sup>, Masanari Itikawa<sup>a</sup>, Michiharu Wada<sup>b</sup>, Hans A. Schuessler<sup>c</sup>, Kunihiro Okada<sup>a</sup>

We have developed a new setup to directly measure cold molecular ion-polar molecule reactions by combining the sympathetic laser-cooling technique and the Stark velocity filter. In fact we have successfully measured the reaction rates between sympathetically cooled molecular ions ( $N_2^+$  and  $N_2H^+$ ) and slow  $CH_3CN$  molecules. Moreover, the reaction-rate constants at very low temperature were estimated. The results and a discussion of this research will be presented.

我々は線形ポールトラップで生成された極低温イオンのクーロン結晶とシュタルク分子速度フィルターで生成された低速極性分子を衝突させ、分子イオン-極性分子反応を低温で直接測定するための実験装置を開発した。その目的は、星間分子が関わるイオン-極性分子反応の反応速度定数を極低温で直接測定すること、及び、データ収集の観点から星間分子の関わる未知のイオン-分子反応を極低温領域で測定することである[1]。

今回新たに開発した実験装置の全体図を図 1 に示す。実験装置はシュタルク分子速度フィルターと線形ポールトラップから構成される。シュタルク分子速度フィルターは、直径 2 mm の円柱電極を間隔 1 mm で配置した四重極によって構成され、分子線の速度選別は 2 段の屈曲部分 (中心軌道半径  $r = 12.5, 25\text{mm}$ ) により行う[2,3]。印加電圧は最大  $\pm 3.0\text{ kV}$  である。実験的に得られた飛行時間信号から導出された低速  $CH_3CN$  の速度分布を図 2 に示す[4]。グラフからピーク速度は約  $30\text{ m/s}$  (約  $5\text{ K}$  に相当) であり、低温の  $CH_3CN$  が得られていることが確かめられた。また、電離真空計を用いた極性分子の計数信号の校正を別途行い、反応速度定数の決定に必要な  $CH_3CN$  の分子数密度を  $1.2(2) \times 10^5\text{ cm}^{-3}$  ( $\pm 3.0\text{ kV}$  の場合) と決定した[4]。

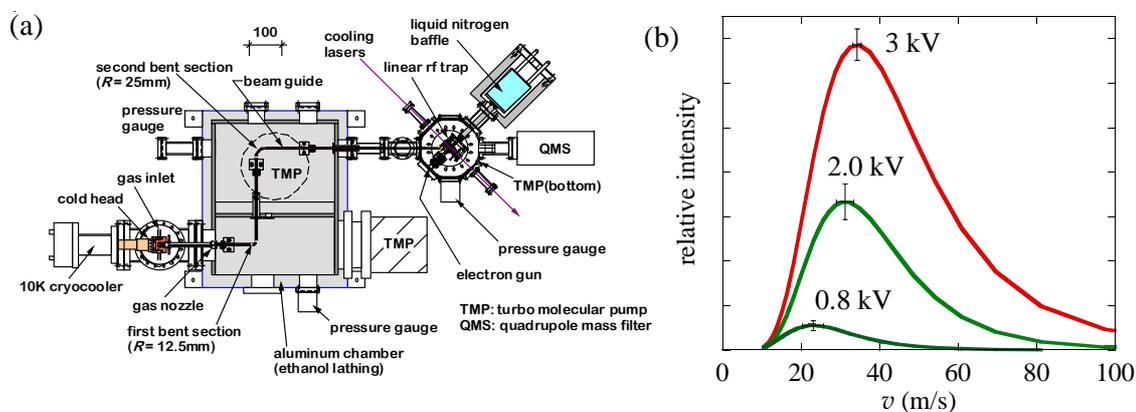


図 1. (a) 実験装置全体図, (b) 飛行時間法によって測定された低速  $CH_3CN$  の速度分布。図中の数字は、シュタルク分子速度フィルターに印加した電圧である。代表的なエラーはピーク速度での誤差棒によって示した。

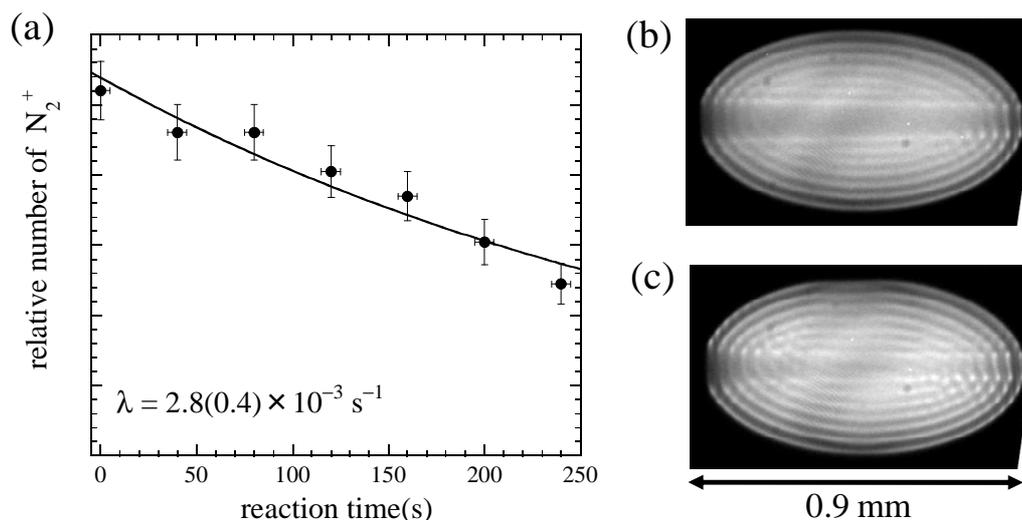


図 2. (a) CCD 画像から得られた反応速度測定の予備的な結果, (b)  $\text{Ca}^+$  (~1750 個) と  $\text{N}_2^+$  (~70 個) からなる混合クーロン結晶の CCD 画像。 (c) 画像(b)の混合クーロン結晶に低速  $\text{CH}_3\text{CN}$  を 250 秒間照射した後の CCD 画像。

一方、反応標的となる極低温分子イオンは、レーザー冷却された  $\text{Ca}^+$  と分子イオンをイオントラップ中に同時に閉じ込めることによって生成される（共同冷却法）。共同冷却法で得られた混合クーロン結晶の画像を図 2(b)に示す。画像中央の暗部には、 $\text{Ca}^+$  クーロン結晶によって共同冷却された約 70 個の  $\text{N}_2^+$  が存在しており、分子動力学シミュレーションの結果から、10 K 以下に冷却されていると考えられる[5,6]。なお、この分子イオンの温度はトラップのための高周波電圧に起因するマイクロ運動エネルギーで決定される。

本研究では、シュタルク分子速度フィルターによって生成された低速  $\text{CH}_3\text{CN}$  を共同冷却された  $\text{N}_2^+$  に照射し、反応速度測定を行った。反応時間 250 秒後の画像を図 2(c)に示す。 $\text{CH}_3\text{CN}$  との反応により、中心の  $\text{N}_2^+$  を含む暗部が減少していることがわかる。図 2(a)は画像から見積もられた  $\text{N}_2^+$  の相対個数を反応時間に対してプロットしたグラフである。最小二乗法により求められた反応速度定数  $k$  の概算値は  $k_{\text{exp}} \sim 2.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$  であり、locked dipole 近似による計算値 ( $k_{\text{LD}} = 4.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ ) と矛盾のない値が得られた[1]。また、trajectory scaling [7]による計算値 ( $k_{\text{ts}} = 2.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ ) と良い一致を示した。

このようにシュタルク分子速度フィルターによって生成された低速極性分子とレーザー冷却法による分子イオンの冷却技術を組み合わせることにより様々な極低温分子イオン-極性分子反応が実現できる。講演では実験装置の詳細について報告し、得られた実験結果について議論する。

### 【参考文献】

- [1] V. Wakelam *et al.*, *Space Sci. Rev.* **156**, pp. 13-72 (2010).
- [2] S. A. Rangwala *et al.*, *Phys. Rev. A* **67**, 043406 (2003)
- [3] H. Tsuji *et al.*, *Chem. Phys. Lett.* **436**, 331 (2007)
- [4] M. T. Bell *et al.*, *Faraday Discuss.* **142**, 73 (2009).
- [5] N. Kimura *et al.*, *Phys. Rev. A.* **83**, 033422 (2010).
- [6] K. Okada *et al.*, *Phys. Rev. A* **80**, 043405 (2009).
- [7] T. Su and W. J. Chesnavich, *J. Chem. Phys.* **76**, 5183 (1982).