

4C12 六重極電場を用いた低速分子線の発生とその分光

(京大院理¹・UBC²) ○安藤大介¹, 久間晋², 坪内雅明², 百瀬孝昌²

【序】我々はこれまで、数ケルビン以下の低温領域での化学反応を観測するために、固体パラ水素結晶中に捕捉した分子を対象に研究を行い、非アレニウスの温度応答をするトンネル反応[1]等の低温特有の現象を研究してきた。しかし、さらに極低温 (< mK) 下で、かつ環境との相互作用の無い状態で素反応を研究する場合、孤立分子系での極低温の実現が不可欠となる。内部温度及び相対並進温度に対しては、超音速分子線の利用により1 K以下の低温が容易に得られるが、実験室系での並進温度の冷却は容易ではない。既に原子に対しては、磁気光学的相互作用を用いてnKまでの冷却が実現され、ボーズ・アインシュタイン凝縮を始めとした低温原子の物理的性質の解明が始められている。一方分子に対しては、Stark電場[2]、バッファーガス[3]、光定在波[4]による室温分子の減速や、回転分子線源を用いた機械的な低速分子発生[5]、あるいはStark電場による低速分子の選別[6]などが試みられている、しかしながら未だ到達温度は0.1 K程度であり、今後のさらなる発展が望まれている。

本研究では、Rempeらの手法[6]を発展させた六極子電場を用いた低速分子選別を行い、得られた速度分布の実測と計算結果との比較を行った。また、バッファーガス冷却による予備冷却を六極子電場による分子選別の前にを行い、予備冷却が速度分布に与える影響を精査した。

【Stark場による低速分子選別】室温でもボルツマン分布に従って一定量の極低温の分子が存在する。この極低温の分子だけをStark効果によってとりだすが、Stark場による低速分子選別法である。電場 E 下において、双極子モーメント μ を持つ極性対称コマ分子は回転状態に依存したStark場 V_{stark} を感じる。

$$V_{Stark} = -\frac{\mu KM}{J(J+1)} E$$

特に $KM < 0$ (Low field seeker)となる状態に対しては $V_{stark} \propto E$ となり、高電場を分子はエネルギー障壁と感知するため、低エネルギー（低速）分子はその障壁を越えることが出来ない。従って、図1(a)で示した様なStark場を作ることができれば、低速分子はガイドに従って運動方向が曲げられるため、結果として低速分子選別が実現される。従来の研究[6,7]では、四極子電場による分子選別が行われていたが、本研究では図1(b)(c)で示す六極子場を採用した。これは、六極子場では図1(c)に示す力が分子に働くため、低速分子を場の中心に捕捉することが可能となり、軌道の安定性が向上し分子の透過率が上昇することが予測されるためである。

【実験】図1(b)で示した六極子電極により、図の平面内の速度成分の選別を行い、進行方向に対しては、図1(a)に示

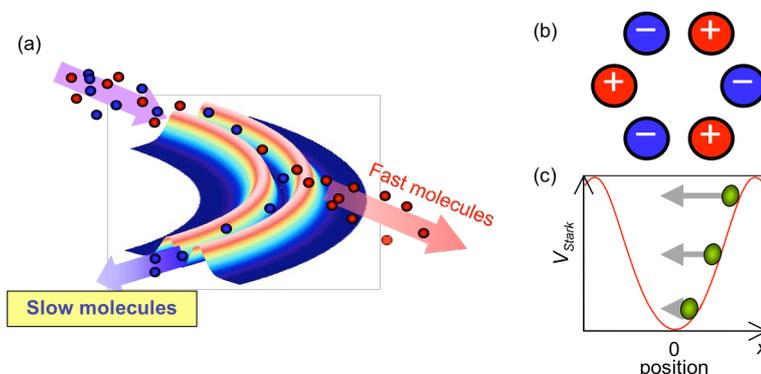


図1: (a) Stark場による低速分子選別の概念図 (b) 六極子電極の断面図。(c) 六極子低速分子選別で用いたStark場の断面図。

すように、電極（場）を曲げることにより行った。実験には永久双極子の比較的大きいベンゾニトリル ($\mu = 4.14$ D) を用いた。室温の液体ベンゾニトリルから蒸気圧0.5 Torrで気化した気体試料を流量調整器で押し圧50 mTorrに調整して、0.5 ~ 1 Hzで作動させたパルスノズル（開口1mm、開時間5 ms）から粘性流条件で真空中に導入した。電極間電位差10 kV

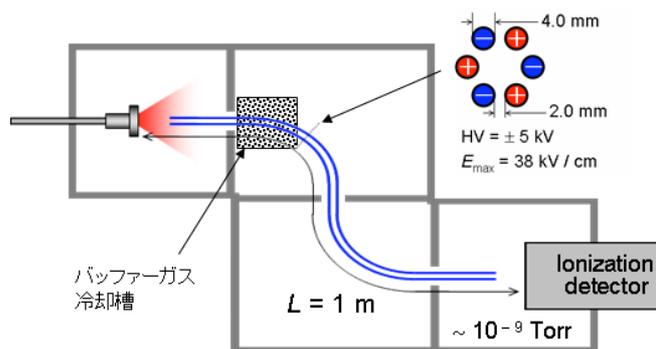


図2: 実験装置概念図

として六極子電極内を分子は進み、電場によって2回曲げられることで低速分子選別及び、背景気体からの隔離が行われる。電極の全長は1mである。速度選別された分子は、電極の末端近傍に設置した四重極質量分析器 (RGA200, SRS) でイオン化観測した。三度の差動排気により、観測領域では分子導入時で 10^{-9} Torrの高真空が維持された。イオン化信号は、ベンゾニトリルの質量 ($M = 103$) に対応する成分のみ積算し、ノズルから検出器までの飛行時間と信号強度との関係を測定した。

また、第二真空槽に冷凍機により液体窒素温度近く (80K) に冷却されたガスセルを設置し、種々の低温原子分子によるバッファーガスによる予備冷却も試みた。

【結果と考察】 図3(a)に、曲率 $R = 75$ mmの電極で測定された飛行時間分布を示す。高電場印加(HV ON)時にStark場により曲げられた低速分子が、50 ~ 100 msにピークを持ち観測された。図3(b)に、飛行時間分布から得られた速度分布を示す。速度分布に変換する際、 $dt \propto -dv/v^2$ を考慮する必要があるが、観測された数密度を流速に変換し、さらにイオン化検出器の検出効率が分子の速度に反比例することを加味すると、ヤコビアンに現れる $1/v^2$ の効果は相殺され消える。曲率75 mmの電極では10 ~ 30 m/s (5 K)、12.5 mmの電極では5 m/s (0.3 K) の分子が選別され、室温からの十分な冷却が達成された。講演では、バッファーガス冷却の効果及び、冷却分子の分光測定に関する考察も行う予定である。

【参照】

[1] T. Momose, M. Fushitani, H. Hoshina, *Int. Rev. Phys. Chem.* **24**, 533 (2005).
 [2] S.Y.T. van de Meerakker, N. Vanhaecke, G. Meijer, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **57**, 159 (2006).
 [3] S.E. Maxwell他, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 173201 (2005).
 [4] R. Fulton, A.I. Bishop, M.N. Shneider, and P.F. Barker, *Nature Phys.* **2**, 465 (2996).
 [5] M. Gupta, D. Herschbach, *J. Phys. Chem. A***105**, 1626 (2001).
 [6] T. Rieger, T. Junglen, S. A. Rangwala, G. Rempe, and P. W. H. Pinkse, *Phys. Rev. A***73**, 061402 (2006).
 [7] H. Tsuji, Y. Okuda, T. Sekiguchi, H. Kanamori, *Chem. Phys. Lett.* **436**, 331 (2007).

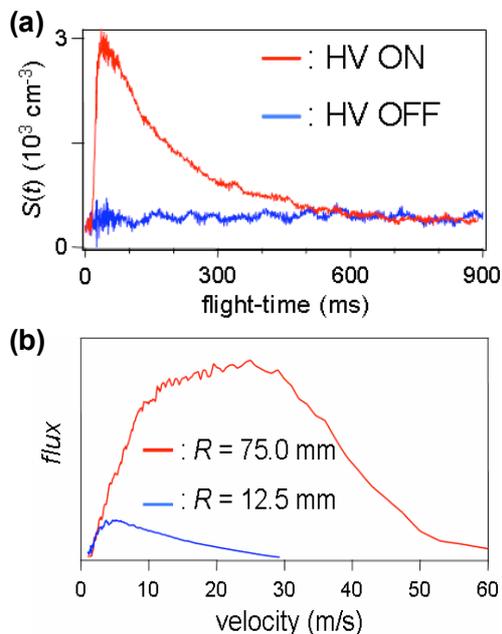


図3: (a) 曲率 $R = 75$ mmの電極で測定された飛行時間分布。(b) 飛行時間分布から得られた速度分布。