

2B11 シュタルク効果を用いた速度選択による低速分子ビームの生成

(東工大院理工) 奥田泰壮、関口貴郎、辻秀伸、金森英人

【序】星間空間における分子の生成に代表されるように、低温下における化学反応には未知の部分が多い。現在幅広く用いられている超音速分子ビーム源は、分子の振動・回転の内部状態を冷却することは可能であるが、並進運動は冷却されていないので、低速衝突エネルギー領域の化学反応の研究はほとんどなされていない。一方、1985年に中性気体原子のレーザー冷却が成功して以来、気体原子の冷却・トラップ手法は飛躍的な進歩を遂げ、1995年のアルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮に到っている。分子においてもこのような冷却・トラップを実現しようとする試みが、近年盛んになってきた。分子の並進運動を冷却する手法としては、現在、シュタルク減速器¹やバッファーガス冷却²などが行われている。我々は、低速分子ビームを実現するために、分子を積極的に冷却するのではなく、熱平衡状態の気体分子集団中から低速の分子のみを取り出す方法³を採用し、低速パルス分子ビーム源を確立したのでこれを報告する。

【原理】速度選択による低速分子ビームの生成は、熱平衡状態にある気体分子集団中から速度の遅いものだけを選択して取り出すという方法によって行う。このため分子の振動・回転の内部状態は冷却されないことには注意する必要がある。この速度選択の概念は以下ようになる。適当な2次元トラップ (xy 方向) のガイドを z 軸方向に伸ばし、これを適当な曲率で曲げる。すると、 z 軸方向成分の速度の速いものは、曲がっている部分で遠心力がトラップの力に勝って、ガイドから飛び出てゆく。一方、速度の遅いものは、カーブでもトラップされたまま、ガイドに沿って運ばれてゆく。こうして速度の遅い成分のみを取り出すことができる。

速度選択における2次元トラップは、極性分子のシュタルク効果と、四重極電場によって実現される。極性を持った分子が電場中にあると、シュタルク効果によりエネルギー準位が分裂する(図1)。このうち、シュタルクシフトが正となるものは、電場が弱い方が安定となるため、不均一電場中では電場が弱い場所に向かう力を受ける。このようなものを”low-field seeker”と呼ぶ。このlow-field seekerを2次元的にトラップするための四重極電場は、図2のようになっており、四重極の中心で電場強度が最も弱く、中心から離れるに従ってだんだん強くなっている。このような電場中では、low-field seekerは中心方向に力を受けることになり、2次元トラップが実現する。

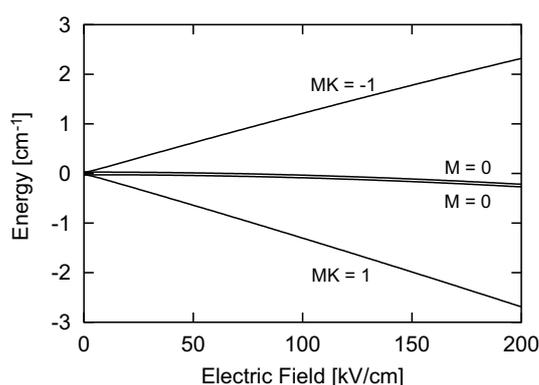


図 1: $\text{ND}_3(J=1, |K|=1)$ のシュタルク効果

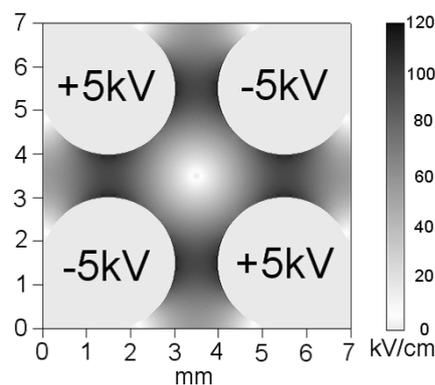


図 2: 四重極電場

¹G. Meijer, ChemPhysChem 3, 495-501 (2000)

²John M. Doyle, Bretislav Friedrich, Jinha Kim, and David Patterson, Phys. Rev. A 52, R2515 (1995)

³S. A. Rangwala, T. Junglen, T. Rieger, P. W. H. Pinkse, and G. Rempe, Phys. Rev. A 67, 043406 (2003)

【実験】実験装置の概要を図3に示す。本装置は、ガスを導入する分子源、速度選択を行う四重極ガイド、検出部から構成される。

分子源 気体分子は、パルスバルブから真空系へ導入される。バルブは液体窒素で-100 程度まで冷却できるようにしてあり、導入前のある程度の冷却を行うことが可能である。分子種としては極性分子であることが前提条件であり、特に1次のシュタルク効果を持っているものが有利である。これを満たすものとして、我々はND₃, NH₃を用いた。低速分子選択を行う場合、速度の遅い成分が存在しない超音速分子ビームの圧力条件にはできない。従って、この実験では effusive beam となる圧力条件、すなわち 20 ~ 200 mTorr 程度の押し圧で分子を導入した。

四重極ガイド 極性分子の2次元トラップのための電場を作るのが四重極ガイドである。電極は直径3 mm のステンレスの丸棒を1 mm 間隔で配置し、±5 kV の電圧をかけた。速度選択のための曲率半径は135 mm とした。

検出部 検出部の真空度は2枚の隔壁によって10⁻⁸ Torr 程度に保たれ、高速イオンゲージとセラトロン(二次電子増倍管)が配置されている。高速イオンゲージで分子をイオン化させ、このイオンをセラトロンが検出し、分子のTOFを測定することができる。

【結果】300 K のND₃ (双極子モーメント1.50 D) で、押し圧20 mTorr、パルスバルブのゲート幅20 ms で測定したTOF信号を図4に示す。この信号が低速分子の成分を示しており、1パルスあたりおよそ5.5 × 10⁷ 個の分子を取り出すことができている。図4には300Kの回転の内部準位分布を仮定したTOFの理論曲線も示してある。このフィッティングから並進の最確速度は90 m/s となり、これを温度に換算すると並進エネルギーが8 K に相当するパルス低速分子ビームが実現されていることが分かる。

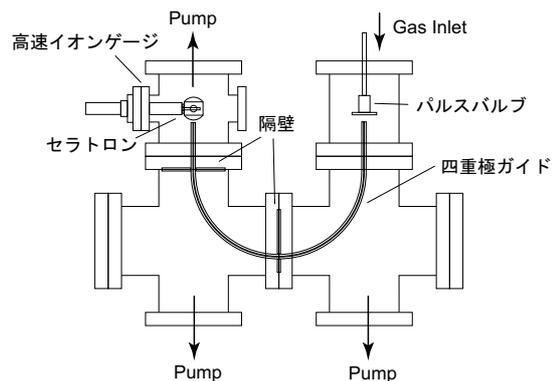


図3: 実験装置の概要

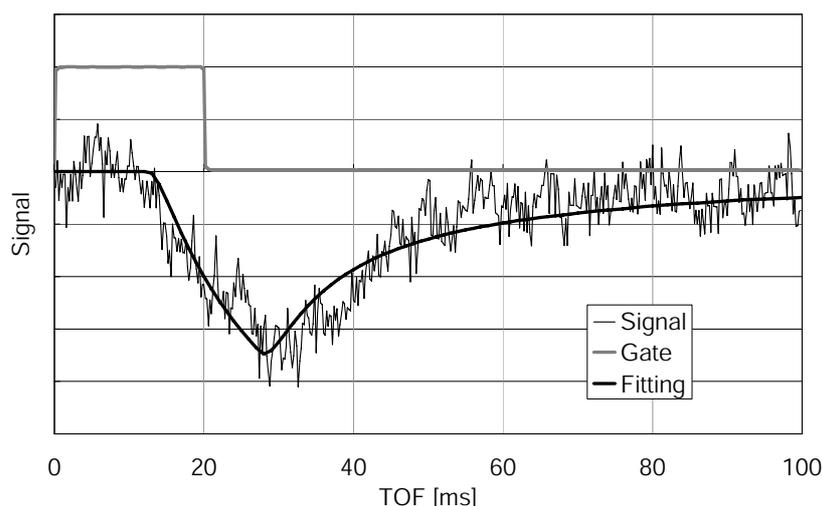


図4: 低速分子のTOF (ND₃)