

磁場・電場・電磁場による有機化合物の並進運動操作と捕捉
(ブリティッシュ・コロンビア大学化学・物理・天文)
百瀬孝昌

Taming organic molecules by magnetic, electric,
and electromagnetic fields
(The University of British Columbia) Takamasa Momose

レーザー光技術の発展で、原子分子集団の精密なコヒーレント操作が可能になりつつある。原子では数ナノケルビンまでの冷却が達成され、ボーズ凝縮やフェルミ縮退などの新しい物理が大きく発展した。一方、分子はまだその並進運動の制御には限界があり、分子のコヒーレント操作は超短パルスを用いた瞬間的な研究に限られている。分子を極低温まで冷却し、その並進運動を完全制御することは、真の分子コヒーレント操作をする上で、不可欠である。我々はこれまでに、分子の空間捕捉を目指した磁場・電場・電磁場による分子の減速、空間運動制御など、分子冷却技術の開発を進めてきた。その結果、最近ようやく分子を空間捕捉することが可能になってきた。ここでは、磁場・電場・電磁場による分子の空間運動制御の基礎原理および現在の分子冷却技術の現状をまとめ、これらが今後どのように分子科学の発展に寄与するか議論したい。

静電場による分子減速：周期静電場を用いたシュタルク分子減速器はG. Meijerのグループによって2000年頃に開発された[1]。永久双極子モーメントを持つ分子は、静電場によりシュタルク効果によるエネルギー準位のシフトを受ける。たとえば対称コマ分子はその回転準位 $|J, K, M\rangle$ が1次のシュタルク効果により

$$\Delta E_{Stark} = \mu E \frac{MK}{J(J+1)}$$

というシフトを受ける。ここで μ は分子の双極子モーメント、 E は与える静電場である。電場勾配がある中を極性分子が進むと、このシュタルクシフトにより電場勾配に比例した力が分子に与えられ、分子の運動エネルギーを増減させることができる。分子の並進方向に周期的に与えられた静電場を分子の位置に対応してうまく瞬間的に切り替えることにより、分子の運動エネルギーを連続的に取り除くことができる。これがシュタルク分子減速器の原理である。たとえば2 debyeの双極子モーメントをもつ分子に 10 MV m^{-1} の電場を与えると、およそ 3.4 cm^{-1} ($\sim 4.7 \text{ K}$)のエネルギーシフトを分子が受ける。この6割程度に対応するエネルギー($\sim 3 \text{ K}$)を運動エネルギーとして取り除くと、 300 K の並進エネルギーを持つ分子をおよそ100ステージの周期静電場によって空間的に静止させることができる。この手法によりこれまでに NH_3 や OH などの分子が 100 mK 程度の並進エネルギーに対応する速度まで減速され、静電場トラップの中に捕捉されている[2]。ごく最近、米国NIST(コロラド)のJ. Yeのグループは、 OH ラジカルをシュタルク分子減速器により減速し、静電場・静磁場を組み合わせたトラップの中で蒸発冷却を行うことに成功し、 10 mK 程度の温度まで OH ラジカルを冷却させている。

静磁場による分子減速：周期静磁場を用いたゼーマン減速器はスイスのF. Merktおよび米国のM. Raizenのグループによって、最初原子の減速用に開発された[4, 5]。原理はほとんどシュタルク分子減速器と同じであるが、ゼーマン減速器の場合は静磁場と磁気双極子モーメントとのゼーマン相互作用を応用している。最近カナダの我々のグループは、Raizenらのゼーマン減速器を改良することにより、永久磁気双極子を持つ分子の減速に成功した[6]。不対電子をもつフリーラジカルは不対電子の電子スピンによってその磁氣的性質がほぼ決まっている。したがって、ほとんどすべてのフリーラジカルはおよそボーア磁子程度の磁気双極子モーメントをもつ。したがってたとえば 5 T の磁場を与えることにより、およそ 4.6 cm^{-1} ($\sim 6.6 \text{ K}$) のゼーマンシフトが起こる。シュタルク分子減速器とゼーマン分子減速器の大きな違いは、シュタルクシフトが回転準位間の相互作用によって起こるために強電場環境下では低い回転準位はすべてエネルギーが下がってしまう（すなわち減速できない）のに対して、ゼーマンシフトが電子スピンのゼーマン効果によっておこるため、どのような回転準位でも減速できることにある。この方法を用いて最近我々は CH_3 ラジカルを 100 mK の並進エネルギー相当まで冷却し、永久磁石のトラップの中にラジカルを捕捉することに成功した。化学的に興味のある、反応性の高いフリーラジカル空間捕捉は低温化学研究を進める上で非常に重要な技術である。

電磁場による分子減速：強い電磁場を原子・分子に照射すると、そのエネルギー準位はACシュタルク効果によってシフトする。原子の光トラップはこの原理を応用したものである。我々は、分子の回転準位を強いマイクロ波によりシフトさせることにより、分子の減速、捕捉ができることを提案した[7]。この方法を用いた分子減速は最近G. Meijerらによって実現されている[8]。電磁場を用いる利点は静電場や静磁場よりも空間的に正確な周期ポテンシャルを作ることができるため、10 mK 以下の分子の正確な空間操作に適している点である。この手法はまだ開発段階であるが、静電場・静磁場を用いた分子の100 mK 程度までの予備冷却を行った上で電磁場による捕捉およびさらなる冷却を行う手法が今後確立されると期待される。

- [1] H. L. Bethlem, G. Berden, and G. Meijer, “Decelerating Neutral Dipolar Molecules”, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1558 (1999).
- [2] S.Y. T. van de Meerakker, H. L. Bethlem, N. Vanhaecke, and G. Meijer, “Manipulation and Control of Molecular Beams”, *Chem. Rev.* **112**, 4828 (2012).
- [3] B. K. Stuhl, M. T. Hummon¹, M. Yeo, G. Quemener, J. L. Bohn, and J. Ye. “Evaporative cooling of the dipolar hydroxyl radical”, *Nature*, **492**, 396 (2012).
- [4] N. Vanhaecke, U. Meier, M. Andrist, B.H. Meier, and F. Merkt, “Multistage Zeeman deceleration of hydrogen atoms”, *Phys. Rev. A* **75**, 031402(R) (2007).
- [5] E. Narevicius, A. Libson, C. G. Parthey, I. Chavez, J. Narevicius, U. Even, and M. G. Raizen, “Stopping Supersonic Beams with a Series of Pulsed Electromagnetic Coils: An Atomic Coilgun”, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 090303 (2008).
- [6] T. Momose, Y. Liu, S. Zhou, P. Djuricanin and D. Carty, “Manipulation of translational motion of methyl radicals by pulsed magnetic fields”, *PCCP* **15**, 1772 (2013).
- [7] Y. Liu et al. “Taming an organic molecule: Confinement of cold, quantum-state pure methyl radicals”, submitted.
- [8] K. Enomoto and T. Momose, “Microwave Stark decelerator for polar molecules”, *Phys. Rev. A* **72**, 061403 (R) (2005).
- [9] S. Merz, N. Vanhaecke, W. Jager, M. Schnell and G. Meijer, “Decelerating molecules with microwave fields”, *Phys. Rev. A* **85**, 063411 (2012).