

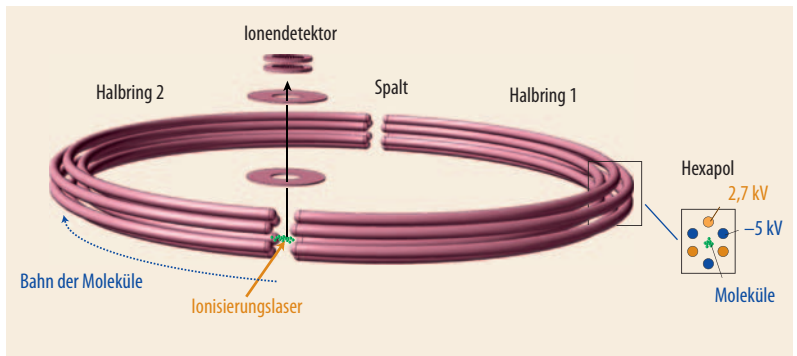
■ Kalte Moleküle ziehen ihre Kreise

Teilchenphysiker nutzen Synchrotrons für Experimente mit geladenen Teilchen bei hohen Energien. Ein handliches Synchrotron ermöglicht es nun, auch neutrale Moleküle geringer Energie zu speichern.

Seit mehreren Jahrzehnten sind Synchrotrons Standardinstrumente der Teilchenphysiker, um mit elektrisch geladenen Elementarteilchen bei hohen Energien zu experimentieren. Dabei werden die Teilchen durch starke Magnetfelder auf einer Kreisbahn gehalten und durch hohe elektrische Felder auf Energien von vielen Giga-Elektronenvolt beschleunigt. So verschieden die Teilchen auch waren, die bislang in Synchrotrons gespeichert wurden – eines hatten sie gemeinsam: eine elektrische Ladung. Daher verblüfft es auf den ersten Blick, dass es nun gelungen ist, ein Synchrotron für neutrale Moleküle zu entwickeln [1].

Elektromagnetische Felder üben gewöhnlich auf neutrale Teilchen wie Neutronen oder ungeladene Atome und Moleküle viel zu geringe Kräfte aus, um deren Flugbahnen merkbar zu beeinflussen. Um sie dennoch mit EM-Feldern speichern zu können, müssen sie sich sehr langsam bewegen: Ihre Temperatur darf dafür höchstens in der Gegend von einem Kelvin liegen.

Atome lassen sich mit Laserlicht sogar auf Temperaturen weit unter einem Kelvin kühlen und dann mit Hilfe von Magnetfallen oder optischen Dipolfallen speichern. Dadurch sind revolutionäre Experimente der Grundlagenforschung möglich geworden wie die Nobel-



In dem Synchrotron für neutrale Moleküle werden die polaren Moleküle durch das elektrostatische Hexapolfeld zwischen den Elektroden im Kreis gebogen. Der Spalt zwischen den beiden Halbringen ermöglicht es, die Moleküle immer wieder neu zu bündeln, sie zu beschleunigen oder abzubremesen. Die Moleküle lassen sich im Spalt zudem durch Laser-Ionisation und Nachweis der produzierten Ionen detektieren. Das Paket aus einer Million Molekülen hat eine Länge von drei Millimetern (nach [1]).

preis-gekrönte Bose-Einstein-Kondensation atomarer Gase.

In die Fußstapfen dieser Experimente ist in den letzten Jahren ein neues Gebiet getreten, in dem Techniken zur Kühlung und Manipulation von Molekülen entwickelt werden [2]. Laserkühlung ist bei Molekülen wegen der Komplexität ihrer Spektren leider nicht ohne weiteres möglich. Stattdessen ist jedoch gelungen, aus lasergekühlten, atomaren Gasen mit Hilfe von Laserlicht oder magnetisch einstellbaren Stoßresonanzen (sog. Feshbach-Resonanzen), kalte Moleküle zu erzeugen. Darüber hinaus wird versucht, „natürliche“ Moleküle wie Ammoniak und Formaldehyd oder Radikale, wie das für die Atmosphärenchemie wichtige OH, auf alternative Weise zu kühlen.

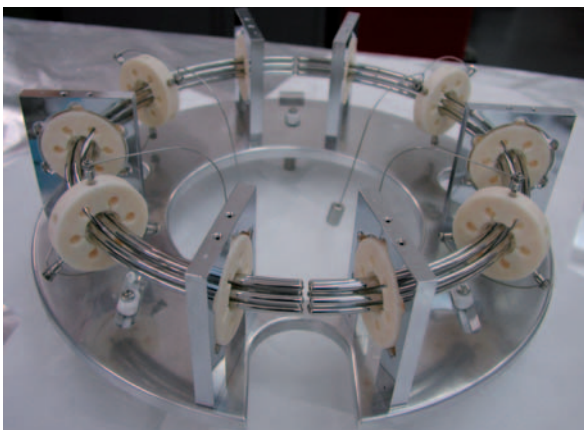
Obwohl nach einer ähnlich erfolgreichen Kühlmethode wie der Laserkühlung noch gesucht wird, gibt es bereits mehrere Erfolge bei der Speicherung dieser kalten Moleküle [3]. Meistens wird dabei ausgenutzt, dass die verwendeten Moleküle ein permanentes elektrisches Dipolmoment aufweisen und sich daher mit elektrostatischen Feldern beeinflussen und z. B. in einem elektrischen Feldminimum speichern lassen. Im Vergleich zu solchen Fallen erlaubt ein Speicher-

ring eine weit bessere Kontrolle über die Relativbewegung der Teilchen: Ihre Richtung ist bereits durch den Ring vorgegeben, und die Geschwindigkeit kann eng um einen relativ großen Wert verteilt sein.

Die Gruppe von Gerard Meijer hatte dies frühzeitig erkannt und bereits 2001 in einem Prototyp eines solchen Rings kalte, neutrale Moleküle gespeichert. Allerdings lief ein darin injiziertes Molekülpaket im Laufe der Zeit langsam auseinander, sodass die maximale Teilchendichte mit der Zeit abnahm und das Paket schließlich den ganzen Ring ausfüllte.

Geteilte Ringe

Wie Cynthia Heiner und ihre Kollegen berichten, ist die Forschergruppe am Fritz-Haber-Institut in Berlin jetzt einen bedeutenden Schritt weiter gekommen [1]: Ein neues Synchrotron ermöglicht es, Pakete von rund einer Million Ammoniak-Molekülen über Dutzende von Umdrehungen zusammenzuhalten. Ihre Geschwindigkeit beträgt dabei 87 m/s, was wenigen Milli-Elektronenvolt entspricht. Im mitdrehenden Bezugssystem beträgt die Temperatur lediglich rund ein Millikelvin. Um dies zu erreichen, haben die



C. Heiner / FHI

Das Synchrotron für neutrale Moleküle hat einen Radius von nur 12,5 Zentimetern.

Physiker den Ring in zwei Hälften geteilt (Abb.).

Sobald ein Molekülpaket in den Spalt zwischen den beiden Halbringen fliegt, werden die Elektroden kurz auf eine andere Spannung gelegt. Dabei wird die Feldsymmetrie in der Laufrichtung der Moleküle so gebrochen, dass die langsamsten Teilchen im Spalt etwas beschleunigen, die schnellsten dagegen leicht bremsen, sodass das Paket insgesamt gebündelt bleibt. Dieses schon 1944 beschriebene Prinzip der Phasenstabilität hat es erst ermöglicht, geladene Teilchen in Synchrotrons zu beschleunigen.

Der Spalt erlaubt es auch, die gespeicherten Molekülpakete insgesamt zu beschleunigen oder abzubremesen. Die im Experiment gezeigte Änderung der Geschwindigkeit um etwa 2 m/s ist zwar nicht groß, aber das Erreichen hoher Geschwindigkeiten war auch nicht das Ziel. Es ging vielmehr darum zu beweisen, dass es möglich ist, gezielt bestimmte Geschwindigkeiten anzusteuern. Dies wäre für

die Untersuchung von Stoßresonanzen extrem hilfreich.

Auch einen anderen wichtigen Trick aus der Beschleunigerphysik konnte das Physikerteam vom Fritz-Haber-Institut zeigen: Während ein Paket im Ring seine Runden drehte, injizierten sie ein zweites Paket, das 20 cm hinter dem ersten her lief. Auch das zweite Paket ließ sich zusammenhalten.

Dieses schöne Experiment eröffnet hochinteressante Perspektiven: Wenn es gelänge, im Speicherring zwei Molekülpakete in entgegengesetzte Richtungen zirkulieren zu lassen, träfen die Pakete wiederholt aufeinander und die Untersuchung von kalten Stößen würde möglich. Hiermit ließe sich sehr genau untersuchen, ob die kalten Stöße bei bestimmten Energien Resonanzen aufweisen – immer noch ein aktuelles Thema in der Chemie [4]. Auch könnte man davon träumen, eines Tages die Moleküle so weit abzukühlen, dass sie sich, ähnlich wie Ionen in einem Speicherring [5], in einem

Kristall anordnen. Das ergäbe einen kalten Molekülstrahl von unvergleichbarer Brillanz.

Pepijn Pinkse

Dr. Pepijn Pinkse,
Max-Planck-Institut
für Quantenoptik,
Hans-Kopfermann-
Str. 1, 85748 Garching

- [1] C. E. Heiner, D. Carty, G. Meijer und H. L. Bethlem, *Nature Physics* **3**, 115 (2007)
- [2] siehe z. B. J. Doyle et al., *Eur. Phys. J. D* **31**, 149 (2004) [Editorial zum Sonderheft „Ultracold Polar Molecules“]
- [3] H. L. Bethlem, G. Berden, F. M. H. Crompvoets, R. T. Jongma, A. J. A. van Roij und G. Meijer, *Nature* **406**, 491 (2000); T. Rieger, T. Junglen, S. A. Rangwala, P. W. H. Pinkse und G. Rempe, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 173002 (2005)
- [4] R. N. Zare, *Science* **311**, 1383 (2006)
- [5] T. Schätz, U. Schramm und D. Habs, *Nature* **412**, 717 (2001)