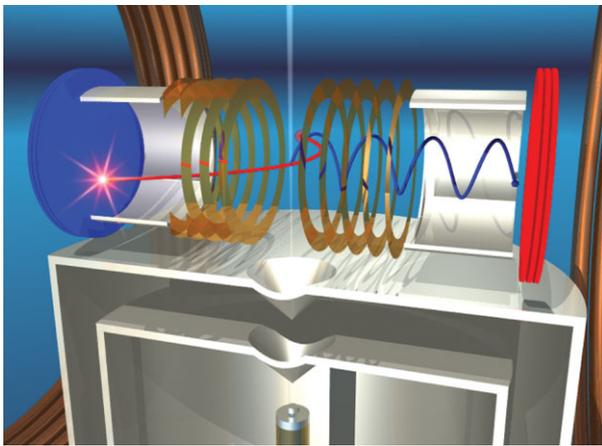


## MOLEKÜLPHYSIK

## Verschränkte Elektronenbewegung in Deuteriummolekülen

Der Aufbruch von Molekülen ist ein grundlegender natürlicher Prozess mit großer Bedeutung auch für organische Vorgänge. Hierbei werden Teilchen frei und reagieren mit Ihrer Umgebung. Ein grundlegendes Verständnis der Dynamik von Molekülfragmentationen steht aber noch aus. Jüngste Untersuchungen eines internationalen Teams unter der Leitung der Universität Frankfurt ermöglichten neue Einblicke in diesen Vorgang [1].



**Abb. 1** In der Apparatur verläuft der Überschallgasstrahl aus Deuteriummolekülen von unten nach oben und wird in der Mitte des Impulsspektrometers mit Photonen gekreuzt. Die Kupferringe innen definieren ein homogenes elektrisches Feld, die Spulen außen sorgen für ein Magnetfeld parallel dazu. Die Deuteronen werden nach links und die Elektronen nach rechts (auf Zykloidenbahnen) zu ortsauflösenden Detektoren geführt.

Um der Dynamik solcher Fragmentationen auf die Spur zu kommen, werden in Experimenten Moleküle aufgebrochen und dabei Richtung und Energie aller Bruchstücke studiert. Technisch ist dies erst seit kurzem hochdifferenziell und mit vollem Raumwinkel möglich.

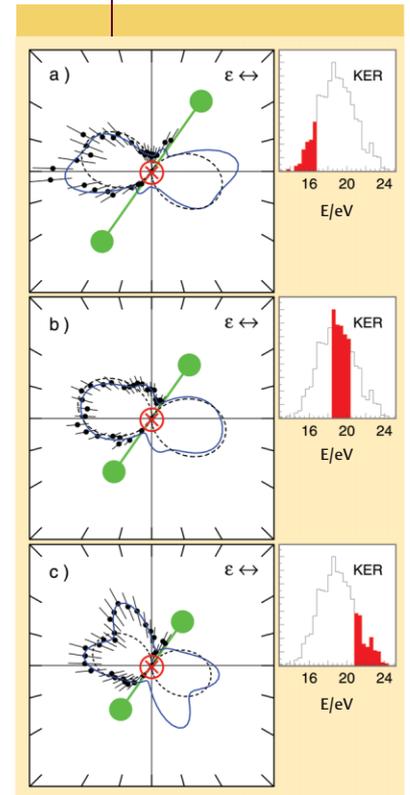
In unserem Experiment wurde das Deuteriummolekül als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Obwohl es mit zwei bindenden Kernen (Deuteronen) und zwei Elektronen ein recht einfaches System bildet, stellt es für die Quantenmechanik und Vielteilchenphysik bereits eine äußerst hohe Herausforderung dar, da geschlossene mathematische Lösungen nur für Zweiteilchen-Systeme bestehen.

Um die vollständige Fragmentation des Deuteriummoleküls einzuleiten, eignet sich ein einzelnes Photon besonders gut, da es lediglich seine Energie und seinen Drehimpuls im Target deponiert. Aus einem gebundenen Deuteriummolekül werden somit vier freie Teilchen, deren Bewegung es aufzuklären gilt. Gewisse Größen bleiben in einer solchen Photo-Doppelionisation erhalten. Dazu zählen Energie, Impuls, Drehimpuls und Parität. Diese Größen unterliegen damit Auswahlregeln, welche die Auswahl der möglichen Endzustände einschränken.

Für ein Deuteriummolekül ist es uns erstmals gelungen, einen kompletten Aufbruch kinematisch vollständig zu beobachten, also Richtung und Energie aller vier Bruchstücke gleichzeitig zu vermessen. Diese Größen lassen sich zu vieldimensionalen „Bildern“ zusammensetzen, die es ermöglichen, den Einfluss der Triebkräfte des Fragmentationsprozesses (Coulomb-Abstoßung der Teilchen, Auswahlregeln, Symmetrien und Beugungseffekte) auf die Winkelverteilung der Elektronen zu studieren.

Für solche Experimente wurde ein Reaktionsmikroskop entwickelt, das die Trajektorien der Elektronen und Kerne des Fragmentationsprozesses sichtbar macht (Abbildung 1). Ein dünner Überschallgasstrahl aus Deuteriummolekülen wird im Innern des so genannten Impulsspektrometers mit dem gepulsten Photonenstrahl aus einem Synchrotronring gekreuzt. Das Impulsspektrometer

**ABB. 2 | WINKELVERTEILUNG**



**Winkelverteilung (schwarze Punkte) eines Elektrons in der Ebene der Molekülachse (grün) und des Polarisationsvektors des eingestrahlt Lichts für a) großen, b) mittleren und c) kleinen Kernabstand gemäß dem Intervall ihrer kinetischen Energieverteilung (rechts). Das zweite Elektron kommt senkrecht aus der Ebene heraus (rotes, eingekreistes Kreuz). Die blaue Linie zeigt einen Fit (aus Kugelflächenfunktionen) durch die Datenpunkte. Die gestrichelte, schwarze Linie repräsentiert die zur Zeit best mögliche quantenmechanische Beschreibung.**

selbst ist dabei nichts anderes als eine Kombination aus einem schwachen elektrischen und magnetischen Feld, das die Elektronen und Kerne gemäß ihrer Ladung auf unterschiedliche ortsauflösende Detektoren führt. Das Magnetfeld hält die leichten Elektronen auf Zykloidenbahnen im Spektrometer. Aus den Auftrefforten auf den Detektoren und den Flugzeiten lassen sich die Impuls-komponenten der Teilchen errechnen. Insbesondere kann damit die Stellung der Molekülachse zum Zeitpunkt der Photoionisation bestimmt werden.

Misst man nun die Winkelverteilung der Elektronen im Vergleich zur Ausrichtung der Molekül- und der Polarisationsachse des eingestrahnten Lichts, so findet man eine deutliche Abhängigkeit: Die Emission der Elektronen verläuft vorwiegend rechtwinklig zur internuklearen Achse und spiegelt damit ihre Impulsverteilung im gebundenen Zustand wider (Abbildung 2).

Nach der Quantenmechanik lässt sich der Abstand der Kerne in einem Molekül nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorhersagen. Durch die Messung der Energie der beiden Kerne nach der Fragmentation konnte nun für jedes einzelne Molekül der tatsächliche Kernabstand zum Zeitpunkt des Aufbruchs bestimmt werden – und dies mit einer Genauigkeit, die viel höher ist als die Breite der quantenmechanischen Verteilung der Kerne im Molekül.

## METROLOGIE

### Die Feinstrukturkonstante bleibt konstant

Sind die Naturkonstanten seit dem Urknall unverändert geblieben? Diese Frage beschäftigt Theoretiker und Experimentatoren immer wieder. Physiker der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig haben jüngst eine zeitliche Änderung der Feinstrukturkonstanten aufzuspüren versucht. Das Ergebnis: Eine Variation war nicht feststellbar, womit sich für die Feinstrukturkonstante im Rahmen der Messgenauigkeit eine maximal mögliche Variation von  $2 \cdot 10^{-15}$  pro Jahr ergibt.

Die PTB-Gruppe um Ekkehard Peik verwendete für ihr Experiment die weltweit präzisesten Atomuhren und optischen Frequenznormale. Die Messungen basieren darauf, dass Elektronen eines Atoms von einem Energieniveau auf ein anderes wech-

Die hierbei gefundenen Ergebnisse überraschen: Sie zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen die Winkelverteilung der Elektronen sehr empfindlich von diesem internuklearen Abstand abhängt. Interferenz und Beugungseffekte können dafür nicht verantwortlich sein, da die Kerne dank ihrer geringen Ladung sehr schwache Streuzentren für die Elektronen darstellen. Die Ursache für diese Emissionsmuster muss in der verschränkten Bewegung der Elektronen in der chemischen Bindung zu suchen sein. Zur Zeit kann jedoch kein mathematisches Modell diese komplexen Winkelverteilungen reproduzieren.

[1] Th. Weber et. al, Nature **2004**, 431, 437

*Thorsten Weber, Uni Frankfurt,  
zur Zeit Universität Berkeley,  
Kalifornien*

seln und dabei Quanten mit einer bestimmten Energie absorbieren oder emittieren. Peik und Kollegen haben diese Energiequanten genau gemessen, denn ihr Wert sollte sich ändern, sofern die Feinstrukturkonstante zeitlich variiert. Ein Ytterbium-Ion in einer elektrischen Falle diente als Messobjekt und die Mikrowellenfrequenz aus einer Cäsium-Atomuhr als Referenz. Bei den drei Jahre auseinander liegenden Messungen konnten keine signifikanten Änderungen dieser „elektronischen Sprunghöhen“ beobachtet werden.

Genau genommen macht dieses Experiment nur eine Aussage über eine mögliche Variation der Feinstrukturkonstante in der derzeitigen Ära. Astronomen der Hamburger Sternwarte hatten aber zudem vor einigen Monaten bereits herausgefunden, dass diese Konstante auch über den Zeitraum der letzten zehn Milliarden Jahre um höchstens  $6 \cdot 10^{-7}$  geschwankt haben kann (Physik in unserer Zeit **2004**, 35, 115).

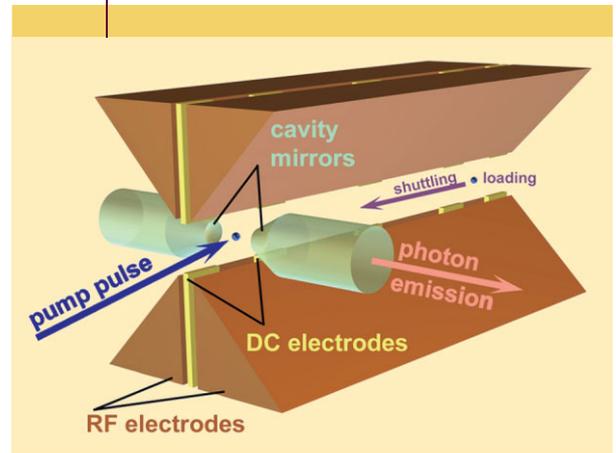
[1] E. Peik et al., Phys. Rev. Lett. **2004**, 93, 17.

## QUANTENOPTIK

### Photonen unter Kontrolle

Einer Forschergruppe am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching ist es gelungen, die Emission von Photonen durch Atome zu kontrollieren. Das Team um Matthias Keller sperrte ein Kalzium-Ion in einen aus zwei Spiegeln bestehenden Resonator ein. Dann regten die Physiker das Ion mit einem von der Seite kommenden Laserpuls an. Die Emission eines Photons erfolgte dann gleich-

ABB. 1 | EXPERIMENT MIT ION IM RESONATOR



(Graphik: MPQ).

zeitig in Richtung der Spiegel. Die Dauer des Anregungspulses legte auch die spektralen Eigenschaften des Photons fest: Bei einem längeren Impuls ist die Frequenzverteilung schärfer, bei einem kürzeren breiter. Zeitpunkt der Emission und Form des Photonenpulses können mit dieser Quelle somit optimal kontrolliert werden. Das Außergewöhnliche der Quelle ist deren permanente Betriebsdauer, die der Speicherzeit der Ionen von typischerweise mehreren Stunden entspricht.

Eine kontrollierte Schnittstelle zwischen Atomen und Photonen ist der zentrale Baustein, um Operationen an atomaren Quantenzuständen mit dem optischen Quanteninformations-Austausch über längere Strecken zu verbinden.

[1] M. Keller et al., Nature, **2004**, 431, 1075.