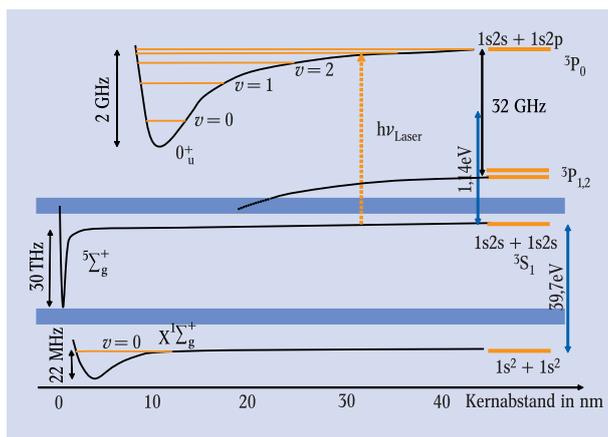


Heliummolekül im XXL-Format

Das Helium-Atom als einfachstes Zweielektronensystem ist schon seit Jahrzehnten ein fundamentales Untersuchungsobjekt in der Atomphysik, insbesondere zum Studium der Elektronenkorrelationen. Doch auch innerhalb der Molekülphysik ist das Interesse an Helium in den letzten Jahren stark gestiegen. Im Jahr 2000 gelang es Jan Peter Toennies und Mitarbeitern, das Dimer



Energieniveaus von Helium-Atompaaren (rechts) sowie des Dimers (links). Im Molekülpotential des He₂-Grundzustands mit seiner flachen Mulde existiert nur ein einziges Vibrationsniveau (unten). Der darüber liegende Zustand 5¹Σ_g⁺ gehört zum Paar von metastabilem ³S₁-Zuständen der He-Atome, wenn man von spinpolarisiertem He wie in einer magnetischen Falle ausgeht. Der Zustand 0_u⁺ kann aus einem Atompaar 1s2s ³S₁ + 1s2p ³P₀ entstehen. Die dunkelblauen horizontalen Streifen deuten große Energielücken an.

He² im Grundzustand zu erzeugen [1]. Der mittlere Kernabstand beider Atome beträgt darin 5,2 nm. Angesichts der sehr geringen Bindungsenergie, die einer Temperatur von 1,1 mK bzw. einer Frequenz von 22 MHz entspricht, überrascht es nicht, dass die Existenz dieses Dimers lange angezweifelt wurde. Nun ist es Claude Cohen-Tannoudji und Mitarbeitern sogar gelungen, He-Dimere zu erzeugen, die bis zu einer Größenordnung größer sind und in denen sich die Atome praktisch nie näher als 15 nm kommen [2]. Der Überlapp der Elektronenhüllen ist dabei vollkommen vernachlässigbar. Diese Zustände nennt man auch „pure long range states“ [3].

Die äußerst schwache Bindung kommt dabei ausschließlich aufgrund der langreichweitigen elektrischen Dipol-Dipol-Wechselwirkung zustande. Da die innere Energie dieses Moleküls fast doppelt so groß ist wie die Ionisationsenergie

des He-Atoms, lässt sich das Dimer nicht aus He-Atomen im Grundzustand des He erzeugen, sondern nur aus elektronisch angeregtem He. Warum autoionisiert der Zustand nicht in kürzester Zeit? Wie kann man einen solchen Zustand, der labil ist im Sinne kleinster Störungen, präparieren?

Toennies und Mitarbeiter erzeugten das schwach gebundene Dimer im Helium-Düsenstrahl, mit dem sich die inneren Freiheitsgrade auf weit unter 1 K abkühlen lassen. Das neue Experiment benötigt jedoch sehr viel tiefere Temperaturen, die sich durch Techniken erreichen lassen, die im Zusammenhang mit der Bose-Einstein-Kondensation (BEC) entwickelt wurden. Aus einem Ensemble von kalten gefangenen Atomen, das als Reservoir von ungebundenen Atompaaren mit großen mittleren Kernabständen angesehen werden kann, lassen sich dann durch Laserstrahlung (Photoassoziation) gezielt gebundene Molekülzustände anregen (Abb.). Die Methoden zur Erzeugung eines Strahls von metastabilem He^{*} aus einer Gasentladung und zum Abbremsen und Einfangen des Heliums in einer magneto-optischen Falle (MOT) mit einem Kühlaser (λ = 1083nm) auf dem Übergang ³S₁ → ³P₂ sind schon länger bekannt, z. B. durch die ersten in Holland durchgeführten Experimente zur Photoassoziation von He [4]. Schließlich gelang es 2001 parallel zwei Pariser Gruppen, ein Bose-Einstein-Kondensat aus He^{*} zu erzeugen.

Die Gruppe um Cohen-Tannoudji hat das holländische Experiment nun geschickt verändert, um die Photoassoziation zum Atompaar ³S₁ + ³P₀ mit den reinen langreichweitigen Molekülzuständen zu versuchen (Die Abbildung zeigt die Anregung zur Resonanz v = 3). Dazu wird das Ensemble kalter He^{*}-Atome durch Verdampfungskühlung bis nahe an den Phasenübergang zum BEC bei einigen μK geführt, und gleichzeitig werden in einer reinen Magnetfalle um mehrere Größenordnungen höhere Dichten (etwa 10¹⁵ Atome/cm³) erreicht. Beides erhöht die Wahrscheinlichkeit für die Photoassoziation von Atompaaren mit sehr großen Kernabständen wesentlich. Die magnetische Falle garantiert auch die Spinpolarisation, wodurch die Stoßionisation stark unterdrückt ist.

Zum Nachweis der gebildeten Molekülzustände wurden in dem

holländischen Experiment die Ionen He⁺ detektiert, die mit großer Wahrscheinlichkeit bei Molekülvibrationen bis zu kleinen Kernabständen (siehe Potentialast zu ³P₂) erzeugt werden [4]. Wie jedoch aus dem Potentialbild des Zustandes 0_u⁺ deutlich wird, kommen sich die Kerne bei der Vibrationsbewegung nicht nahe genug, als dass ein signifikanter Elektronenüberlapp der Atome für eine Ionisation auftreten könnte. Stattdessen detektieren die Autoren die Temperaturerhöhung der Atomwolke, die auftritt, wenn das Molekül während der Vibration durch spontane Emission dissoziativ zerfällt und ein Paar He^{*} mit größerer relativer kinetischer Energie in der Atomwolke entsteht. Zum kalorimetrischen Nachweis wird die Wolke mit einem Laserpuls auf der Atomresonanz beleuchtet und mit einer CCD-Kamera ein Absorptionsbild detektiert, aus dem die Temperatur, die optische Dichte im Zentrum und die Atomzahl der Wolke bestimmt wird. Scant man den Laser über eine Resonanz z. B. zu v = 3, so beobachtet man, dass sich die Wolke um einige μK erwärmt und die optische Dichte im Zentrum abnimmt. Die Atomzahl des Ensembles ändert sich dagegen praktisch nicht. Dies ist ein klarer Beweis dafür, dass Ionisationsprozesse keine signifikante Rolle spielen, weswegen die Suche nach diesen gigantischen Dimeren im Jahr 2000 scheitern musste.

Cohen-Tannoudji et al. haben alle fünf möglichen Vibrationszustände in dem Potential 0_u⁺ gefunden und konnten damit die theoretische Vorhersage, die nur das Dipolmoment für den Übergang ³S₁ → ³P₀ und die Spin-Bahn-Kopplung im ³P-Zustand benötigt, quantitativ prüfen. Die beste Übereinstimmung ergab sich, wenn man die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (Retardierung) der Dipol-Dipol-Wechselwirkung berücksichtigt. Dies ist verständlich, da die Größe des Moleküls von bis zu 60 nm einem Drittel der reduzierten Wellenlänge (λ/2π) des Resonanzüberganges (λ = 1083 nm) entspricht. Die Resonanzen weisen eine Breite von 3 MHz auf, was ausgezeichnet verträglich mit einer reinen Strahlungslanglebensdauer ist. Zugleich ist die mögliche schnelle Autoionisation effektiv unterdrückt, nicht etwa vornehmlich durch die Spinpolarisation wie im Ausgangsensemble von ³S₁-Atomen, sondern

durch Vermeidung des Elektronenüberlapps im supergroßen Dimer.

Nach dieser hervorragenden Übereinstimmung sind spannende Fragen an das molekulare He-System offen: Kann man diese supergroßen Dimere in „metastabile“ Zustände transferieren? Welche Lebensdauer haben solche Zustände? Oder wird die hohe interne Energie von 40 eV neue Ionisationskanäle in dem ultrakalten Ensemble wahrscheinlich machen? Natürlich denkt man bei kalten Stößen auch an die Bestimmung der Streulänge, um die Dynamik des He-BEC quantitativ beschreiben zu können. Nach diesem Durchbruch werden auch Präzisionsexperimente wie am Wasserstoff denkbar, nicht nur für das Atom He, sondern nun auch für verschiedene Zustände des molekularen He, was von genereller Bedeutung für die Frage nach der Konstanz von Naturkonstanten beim Vergleich unterschiedlicher Quantensysteme sein könnte.

EBERHARD TIEMANN

- [1] R. E. Grisenti et al., Physikalische Blätter, November 2000, S. 53
- [2] J. Léonard et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 073203 (2003)
- [3] W. C. Stwalley, Y.-H. Uang und G. Pichler, Phys. Rev. Lett. **41**, 1164 (1978)
- [4] N. Herschbach et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 1874 (2000)
- [5] A. Robert et al., Science **292**, 463 (2001); F. Pereira dos Santos et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3459 (2001)

Gemeinsamkeiten ziehen sich an

In der DNS, in Viren oder in Spermien spielen attraktive Wechselwirkungen zwischen gleichnamig geladenen Objekten eine wichtige Rolle.

Weiche Materie, zum Beispiel Polymere, Membranen oder Proteine, ist in Wasser häufig elektrisch geladen. Dies gilt insbesondere auch für biologische Materialien, also Proteine, die Erbsubstanz DNS oder andere Biopolymere. Die elektrostatische Abstoßung zwischen den Ladungen macht die supermolekularen Bestandteile im Allgemeinen wasserlöslich und ist damit technologisch und biologisch relevant.

Wichtig für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen geladenen Objekten ist, dass das Gesamtsystem immer elektrisch neutral ist, das heißt, für jede durch Dissoziation

gebildete Oberflächenladung wird ein „Gegenion“ in die Lösung abgegeben. Tatsächlich sind die Kräfte zwischen geladenen Objekten in erster Linie durch das Verhalten der diffus an die Oberflächenladungen gebundenen Gegenionenwolken bestimmt: Diese fluktuieren stark, sind also thermisch angeregt. Andererseits herrschen zwischen den Gegenionen und Oberflächenladungen langreichweitige elektrische Kräfte. Als Resultat ist die Wechselwirkung zwischen zwei gleichnamig geladenen Oberflächen, je nach Temperatur und Beschaffenheit der Gegenionenwolke, repulsiv (das typische und intuitiv einleuchtende Verhalten) oder, insbesondere für mehrwertige Gegenionen, auch attraktiv.

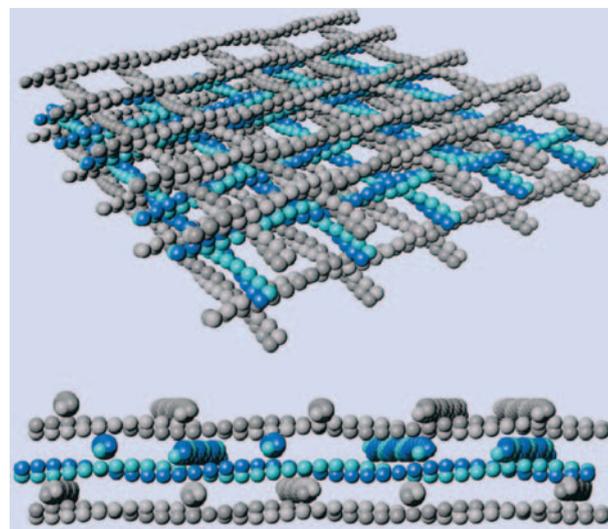
Attraktive Wechselwirkungen zwischen gleichnamig geladenen Objekten spielen in der Biologie bei der Kompaktifizierung der fadenförmigen DNS im Zellkern, in Viren und in Spermien eine große Rolle; tatsächlich wirken bei diesem Prozess mehrwertige Gegenionen mit. In der Physik sind diese attraktiven Wechselwirkungen aus Experimenten an geladenen Membranen bereits seit längerem bekannt [1] und lassen sich mit Hilfe von feldtheoretischen Methoden und Computersimulationen verstehen [2].

In neuen Experimenten wurden kürzlich stark attraktive Kräfte zwischen negativ geladenen Aktin-Filamenten festgestellt, die zur Bildung von stabilen Netzwerken führen [3]. Aktinfilamente sind etwa zehn Nanometer dicke, bis zu mehrere Mikrometer lange Proteinstrukturen, die Zellen Gestalt und Festigkeit verleihen. Die Abbildung zeigt schematisch die aus Röntgenstreuendaten abgeleitete Struktur, bestehend aus kreuzweise vernetzten Aktin-Filamenten (Länge: 100 nm, Durchmesser: 8 nm, negative Ladung: $4e$ pro nm). Diese Strukturen werden nur bei genügend hoher Konzentration von divalenten kationischen Ionen gebildet, die in dem Experiment von außen zugesetzt werden. Dabei spielt der Ionentyp eine untergeordnete Rolle, die Strukturen sehen also ähnlich aus, egal ob Kalzium-, Magnesium- oder Barium-Ionen verwendet werden. Es wird vermutet, dass die zweiwertigen Gegenionen in den Kreuzungspunkten sitzen und eine Anziehung zwischen den stark geladenen Filamenten vermitteln.

In einer anderen experimentellen Arbeit wurde die Aggregation von

nahezu zylindrischen Viren untersucht (Länge: 880 nm, Durchmesser 7 nm, negative Ladung: $6e$ pro nm). In diesem Experiment wurden der wässrigen Virenlösung zweiwertige Diamine als Gegenionen zugesetzt. Zum Einsatz kamen vier verschiedene Diamine, bei denen der Abstand zwischen den beiden positiven Ladungen auf dem Molekül durch Variation der chemischen Struktur in einem Bereich von 0,2 nm bis 0,8 nm eingestellt wurde. Nur das kleinste Gegenion führte bei genügend hoher Konzentration zur Attraktion zwischen den Viren und damit zur Bildung von Bündeln [4].

Das einfachste Argument zur Erklärung dieser Phänomene basiert auf einer Berechnung der elektrostatischen Gesamtenergie von zwei negativen Ladungen $-qe/2$ im Ab-



stand $2d$ (die zwei Ladungen auf zwei verschiedenen Biopolymeren entsprechen sollen) die mit einer in der Mitte befindlichen positiven Ladung $+q$ wechselwirken (die einem Gegenion entspricht). Das Gesamtsystem ist neutral. Die elektrostatische Gesamtenergie setzt sich zusammen aus der Abstoßung zwischen den beiden negativen Ladungen und der Anziehung zwischen dem Gegenion und den beiden negativen Ladungen. In Einheiten der thermischen Energie $k_B T$ erhält man $E/k_B T = -(7/8) q^2 \ell_B / d$, wobei die Bjerrum-Länge $\ell_B = e^2 / (4\pi\epsilon k_B T)$ dem Abstand entspricht, bei dem zwei Elementarladungen gerade mit der thermischen Energie wechselwirken (in Wasser ist $\ell_B \approx 0,7$ nm). Die Gesamtenergie ist um so negativer, je kleiner der Abstand d zwischen den Ladungen ist. Das positive Gegenion führt also zu einer Anziehung zwischen den nega-

Prof. Dr. Eberhard Tiemann, Institut für Quantenoptik, Welfengarten 1, 30167 Hannover

Ein Aktin-Netzwerk, hier in schematischer Auf- bzw. Seitenansicht, wird durch zweiwertige Gegenionen (nicht eingezeichnet) nahe der Aktin-Filamente stabilisiert. (aus [3])