

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.

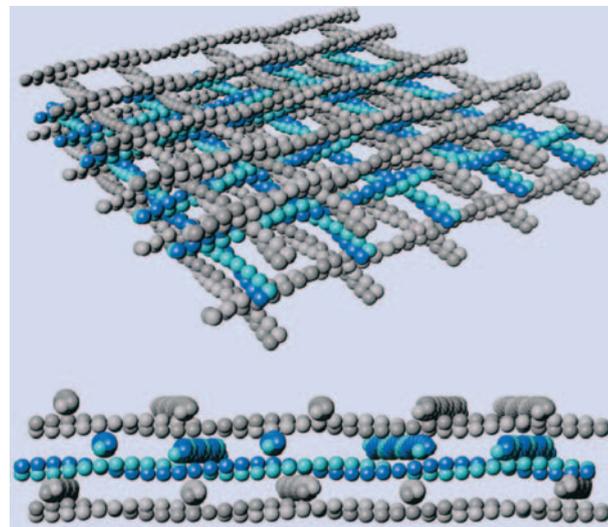
Attraktive Wechselwirkungen zwischen gleichnamig geladenen Objekten spielen in der Biologie bei der Kompaktifizierung der fadenförmigen DNS im Zellkern, in Viren und in Spermien eine große Rolle; tatsächlich wirken bei diesem Prozess mehrwertige Gegenionen mit. In der Physik sind diese attraktiven Wechselwirkungen 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])

tiven Ladungen, welche quadratisch proportional zur Gegenionenvalenz q ist. Dies erklärt, warum insbesondere *mehrwertige* Ionen eine Attraktion hervorrufen, wie in den oben erwähnten Experimenten eindrucksvoll gezeigt wird. Dieses simple Argument zeigt auch, warum die Größe der Gegenionen wichtig ist: Der minimale Abstand der negativen Ladungen entspricht dem Gegenionendurchmesser, je kleiner also das Gegenion, desto kleiner der minimale Abstand und umso größer die Attraktion, in Übereinstimmung mit dem Experiment [4].

Allerdings suggeriert dieses Argument, welches die Entropie der lokalisierten Gegenionen vollständig vernachlässigt, dass Gegenionen immer eine Attraktion hervorrufen müssten. Dies ist nicht richtig, da für einwertige Gegenionen die Gegenionenverteilung sehr diffus ist und damit eine homogene Ladungsverteilung erzeugt. Die Wechselwirkung wird dann tatsächlich repulsiv. Die genaue Grenze zwischen Attraktion und Repulsion hängt neben der Valenz der Gegenionen auch von der Oberflächenladungsdichte der geladenen Objekte ab und konnte mit Hilfe von Simulationen für den Fall von planaren Körpern bestimmt werden [2]. Für die bei biologischen Objekten typischen Oberflächenladungsdichten ergibt sich der Wechsel von Repulsion zu Attraktion tatsächlich, wenn man von einwertigen zu zweiwertigen Gegenionen übergeht.

Das Verständnis des für die effektive Wechselwirkung zwischen geladenen Körpern relevanten Gegenionenverhaltens ist also wichtig, da es die gezielte Kontrolle und Manipulation von supermolekularen Strukturen auf der Nanometerskala

erlaubt. Eine Anwendung ist die Konstruktion von künstlichen Viren im Reagenzglas, die es erlauben soll, fehlende oder fehlerhafte Gene im Körper durch passende DNS-Stränge zu ersetzen. Um die zahlreichen Barrieren im Körper auf dem Weg zum Zellkern zu passieren, muss die stark negativ geladene DNS in eine kompakte Form gebracht werden, was am einfachsten geschieht, indem durch Zugabe von positiven mehrwertigen Gegenionen eine Attraktion zwischen den DNS-Segmenten erzeugt wird.

Allerdings sind wir noch weit von einer vollständigen Beschreibung dieser Phänomene entfernt, aus den folgenden Gründen: In der Realität besitzt jeder geladene Körper eine inhomogene, charakteristische Ladungsverteilung [5], gibt es neben der elektrischen Wechselwirkung noch van-der-Waals- und andere Wechselwirkungen, und trägt das Lösungsmittel Wasser durch seine komplexe Struktur zu einer Vielzahl von hier nicht angesprochenen Phänomenen bei (dem die Wahl einer homogenen Dielektrizitätskonstante schwerlich Rechnung trägt). Quanteneffekte kommen auf kleinen Längenskalen ins Spiel. Die hier vorgestellten Modelle sind also extreme Vereinfachungen, die natürlich im Wechselspiel mit neuen experimentellen Erkenntnissen verfeinert werden müssen.

ROLAND NETZ

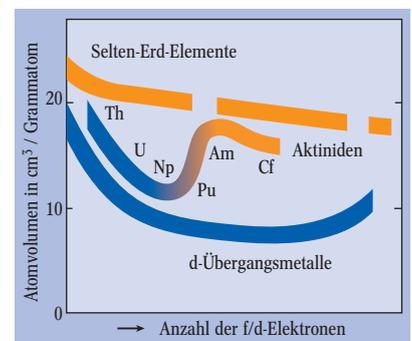
- [1] M. Dubois et al., J. Chem. Phys. **108**, 7855 (1998)
- [2] A. G. Moreira und R. R. Netz, Phys. Rev. Lett. **87**, 078301 (2001)
- [3] G. C. L. Wong et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 018103 (2003)
- [4] J. C. Butler et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 028301 (2003)
- [5] R. R. Netz, Phys. Rev. Lett. **91**, 138101 (2003)

Die andere Seite von Plutonium

Erst 60 Jahre nach der Entdeckung des in Verbindung mit Kernwaffen bekannten Elements kommt das Verständnis seiner Festkörpereigenschaften voran.

Das Element Plutonium ist in der Öffentlichkeit bestens bekannt. Berühmt und berüchtigt ist es wegen seiner nuklearen Eigenschaften: Plutonium ist ein Alpha-Strahler und daher radiotoxisch. Da es sich mit Neutronen spalten lässt, wird es in Kernwaffen eingesetzt.

Aber Plutonium hat auch ein anderes, „freundlicheres“ Gesicht. Seinem Platz im Periodensystem verdankt es außergewöhnliche elektronische Eigenschaften, die sich auch 60 Jahre nach ihrer Entdeckung



Während das Atomvolumen bei den Seltene-Erd-Elementen nur wenig von der Anzahl der 4f-Elektronen abhängt, weisen die Übergangsmetalle mit ihren d-Elektronen einen parabolischen Verlauf auf. Die Aktiniden (5f-Elemente) weisen ein intermediäres Verhalten auf, das sich zwischen Pu und Am stark ändert.

immer noch einer überzeugenden Erklärung entziehen. Zwei kürzlich erschienene Arbeiten, eine theoretische [1] und eine experimentelle [2], liefern nun neue Einsichten in die elementaren Anregungen des Festkörpers, die Eigenschwingungen der Atome, ein Aspekt von Plutonium, dem bislang keine Aufmerksamkeit gewidmet wurde.

Plutonium steht mitten in der Reihe der Aktinide, in der die Schale der 5f-Elektronen sukzessive aufgefüllt wird. Bei den ersten Elementen dieser Reihe tragen die 5f-Elektronen zur Bindung zwischen den Atomen bei. Daher nimmt das Atomvolumen mit steigender Anzahl an f-Elektronen ab, ähnlich wie dies bei den Übergangsmetallen mit den d-Elektronen der Fall ist. Im Gegensatz hierzu weisen Americium und die schwereren Aktiniden

Prof. Dr. Roland Netz, Sektion Physik, Theresienstr. 37, Ludwig-Maximilians-Universität, 80333 München

Beutefang durch Wellenformanalyse

Der Frosch *Xenopus* ist ein nachtaktiver Jäger, der unter Wasser nur schlecht sieht und sich mithilfe des sog. Seitenlinienorgans orientiert. Dieses Organ besteht aus mehreren tausend Sensoren auf der Haut, die den lokalen Wasserdruck detektieren. Eine Kollaboration um den Münchner Physiker Leo van Hemmen hat nun gezeigt, wie *Xenopus* und andere



Amphibien mithilfe dieser Sensoren Beutetiere orten können. Ein relativ einfacher neuronaler Algorithmus zur Rekonstruktion der Wellenform ist demnach in der Lage, aus den Sensorsignalen die Richtung zu bestimmen, in der sich z. B. ein Insekt auf der Wasseroberfläche aufhält.

J.-M. P. Franosch et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 158101 (2003)