

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

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)

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.

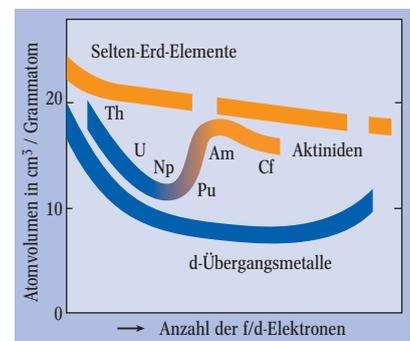
J.-M. P. Franosch et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 158101 (2003)

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



ein größeres Atomvolumen auf, das wenig von der Anzahl der Elektronen abhängt. Diese Eigenschaft ist von den Selten-Erd-Elementen bekannt: die 5f-Elektronen sind dann lokalisiert und nicht an der Bindung beteiligt (Abb.).

Plutonium befindet sich am Übergang zwischen diesen beiden Eigenschaften, und es ist diese besondere Position, die für eine Fülle an ungewöhnlichen Eigenschaften verantwortlich ist [3]. So durchläuft Plutonium sechs verschiedene Phasen – mehr als jedes andere Element –, bevor es schmilzt. Viele Untersuchungen konzentrieren sich auf die einfache fcc-Phase (*face centered cubic*), die bei hohen Temperaturen stabil ist und sich bei Raumtemperatur durch eine geringe Zugabe von Gallium (weniger als ein Gewichtsprozent) stabilisieren lässt.

Da Plutonium radioaktiv ist, sind Experimente damit nur unter strengen Sicherheitsauflagen durchzuführen. Daher sind beispielsweise auch die Frequenzen der elementaren Anregungen, der sog. Phononen, kaum bekannt. Viele elastische und thermodynamische Eigenschaften hängen aber von den Phononen ab. Diese Eigenschaften sind für praktisch alle anderen Elemente sowie für viele Verbindungen bekannt, vor allem aus der inelastischen Neutronenstreuung. Für Plutonium kommt diese Methode jedoch nicht infrage, da sie relativ große Einkristalle mit einem Volumen von mindestens 100 mm³ und einer Masse in der Größenordnung von 1 g voraussetzt. Da das häufigste Plutonium-Isotop ²³⁹Pu Neutronen stark absorbiert, statt sie zu streuen – gerade deswegen wird es ja in Kernwaffen eingesetzt –, bräuchte man darüber hinaus eine Probe aus dem seltenen Isotop ²⁴²Pu.

Dass die Phononen in Plutonium interessante Eigenschaften aufweisen, war nicht nur aufgrund der Position im Periodensystem, sondern auch aufgrund von wichtigen Experimenten zu erwarten, die bereits vor 27 Jahren durchgeführt wurden [4]. Diese Messungen zeigten, dass die elastischen Eigenschaften von fcc-Plutonium hochgradig richtungsabhängig (anisotrop) sind. Seither warten die Festkörperphysiker auf neue experimentelle Resultate, insbesondere zu den Phononenfrequenzen bei endlichem Wellenvektor *q*.

Innerhalb von nur zwei Monaten sind nun zwei Pionierarbeiten zu

den Phononen in fcc-Plutonium erschienen. Zunächst veröffentlichten Dai et al. eine Vorhersage im Rahmen der dynamischen Mean-field-Theorie (DMFT), welche die für Plutonium so wichtigen Elektronenkorrelationen berücksichtigt [1]. Diese Rechnungen reproduzierten die große Scher-Anisotropie von Plutonium. Den Autoren gelang es auch, einige der Hochtemperaturphasen von Plutonium auf die starke Anharmonizität und den Einfluss der Phononen-Entropie zurückzuführen.

Wong et al. führten an der Europäischen Synchrotronstrahlungsquelle ESRF in Grenoble Experimente mit inelastischer Röntgenstreuung durch, für die bereits eine Probe von rund 10⁻¹ mm³ bzw. 1 mg ausreicht [2]. Die Autoren bestimmten damit die vollständige Phononendispersion von Plutonium und ergänzten die theoretische Arbeit von Dai et al. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist überraschend gut. Eine bemerkenswerte Abweichung taucht jedoch in der [111]-Richtung auf, insbesondere bei kleinen Wellenlängen. Vermutlich wird diese Abweichung durch die Elektron-Phonon-Wechselwirkung verursacht. Die nahe liegende Erweiterung wird darin bestehen, solchen Effekten in Abhängigkeit von der Temperatur nachzugehen. Ähnliche Untersuchungen an Uran (mit Neutronen) führten zur Entdeckung von einer Reihe von komplexen Ladungsdich-

tewellen in diesem Material [5].

Die beiden Arbeiten [1, 2] liefern wichtige Einsichten in einige der grundlegenden elastischen und thermodynamischen Eigenschaften von Plutonium. Darüber hinaus eröffnen sowohl die DMFT-Methode als auch die im Experiment eingesetzte Mikrostrahl-Methode neue Zugänge nicht nur zu den Aktiniden.

Plutonium entpuppt sich als ein faszinierendes Element. Im vergangenen Jahr haben wir gelernt, dass einige Verbindungen von Plutonium sogar bei überraschend hohen Temperaturen supraleitend werden [6]. Jetzt, da wir die Vibrationen in dem Element selbst besser verstehen, wird es zusätzliche Anstrengungen geben, um einige der Rätsel der vergangenen 60 Jahre zu lösen. Es bleibt zu hoffen, dass diese Untersuchungen dazu beitragen werden, all diejenigen, die von den kontroversen nuklearen Eigenschaften von Plutonium abgeschreckt sind, davon zu überzeugen, dass es auch eine andere Seite von Plutonium gibt.*)

GERARD H. LANDER

- [1] X. Dai et al., Science **300**, 953 (2003)
- [2] J. Wong et al., Science **301**, 1078 (2003)
- [3] S. S. Hecker, MRS Bull. **26**, 872 (2001)
- [4] H. M. Ledbetter und R. L. Moment, Acta Metallurg. **24**, 891 (1976)
- [5] G. H. Lander et al., Adv. Phys. **43**, 1 (1994)
- [6] J. L. Sarrao et al., Nature **420**, 297 (2002)

KURZGEFASST...

■ **Neuer Wert für Avogadro-Konstante**
Physiker der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt haben gemeinsam mit belgischen Kollegen die Avogadro-Konstante mit bisher unerreichter Genauigkeit zu $N_A = 6,0221355 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ bestimmt.¹⁾ Dazu haben sie die Gitterkonstante, die Dichte sowie die molare Masse eines hochreinen Silizium-Einkristalls mit Röntgenstreuungsmethoden gemessen. Das Ziel dieser Arbeiten besteht darin, das Kilogramm künftig so wie die anderen SI-Einheiten auf fundamentale Größen zurückzuführen.

■ **Rekordkälte erreicht**
Der Arbeitsgruppe von Wolfgang Ketterle am MIT ist es gelungen, eine Wolke aus 2500 Na-Atomen, die zum Teil ein Bose-Einstein-Kondensat bildeten, bis auf eine Temperatur von nur $450 \pm 80 \text{ pK}$ abzukühlen.²⁾

■ **Grenzwert für CPT-Verletzung**
Das für die Teilchenphysik grundlegende CPT-Theorem fordert, dass die Massen von Teilchen und Antiteilchen exakt überein-

stimmen. In einem Experiment am CERN wurde nun gezeigt, dass der Massenunterschied zwischen Protonen und Antiprotonen weniger als 10⁻⁸ beträgt.³⁾ Dies folgt aus der Spektroskopie eines „Atoms“, das aus einem Heliumkern, einem Elektron sowie einem Antiproton besteht.

■ **Laser-Transmutation von Jod-129**
In Jena ist es gelungen, das langlebige Radionuklid ¹²⁹I (*T*_{1/2}: 15,7 Mio. Jahre), das in Kernreaktoren entsteht, in das kurzlebige Isotop ¹²⁸I umzuwandeln. Dazu wurden Pulse eines Terawatt-Lasers auf ein Tantal-Target fokussiert. Dabei bildet sich ein Plasma, in dem Elektronen auf relativistische Energien beschleunigt werden. Beim Abbremsen der Elektronen wird anschließend Bremsstrahlung in Form von γ -Quanten emittiert, die ein Neutron aus dem ¹²⁹I herauszuschlagen.

- 1) P. Becker et al., Metrologica **40**, 271 (2003)
- 2) A. E. Leanhardt et al., Science **301**, 1513 (2003)
- 3) M. Hori et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 123401 (2003)
- 4) J. Magill et al., Appl. Phys. B **77**, 387 (2003)

Prof. Dr. Gerard H. Lander, Institut für Transurane der Europäischen Kommission, Postfach 2340, 76125 Karlsruhe

*) Dieser Artikel ist die übersetzte und überarbeitete Fassung eines zuerst in Science **301**, 1057 (2003) erschienenen Artikels.