

stimmte Grenzflächen, etwa einen Grundwasserspiegel, bis in eine Tiefe von 5 km erkennen zu können.

Die Marsrover „Spirit“ und „Opportunity“ haben Instrumente an Bord, mit denen sich Wasser indirekt erkennen ließe. Der Spektrometer Mini-TES arbeitet ähnlich wie TES auf Global Surveyor und untersucht die spektralen Signaturen von Böden und Gesteinen. Die NASA glaubt, damit eine grobkörnige Varietät des Minerals Hämatit in der Nähe der Landestelle von Opportunity entdeckt zu haben, die vorwiegend im Zusammenhang mit hydrothermalen Prozessen entsteht. Diese Meldung wird aber von vielen Forschern mit Skepsis gesehen. Der direkte Nachweis in situ gelang aber bereits 1976 den Viking Landern. Durch Erhitzung von Bodenproben konnten Wassermoleküle im Boden freigesetzt werden [9]. Derzeit wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an einem Pilotprojekt gearbeitet, in dem quantitative elektrische und chemische Messmethoden für Instrumente auf Landegeräten entwickelt werden. Neben flüssigem Wasser und Eis im Untergrund soll nach extrem dünnen Schichten (Monolayern) von nicht gefrorenem Wasser an Mineralpartikeln gesucht werden. Dieses so genannte Adsorbatwasser hat auch bei Temperaturen weit unter 0°C, wie sie an und in der Marsoberfläche herrschen, flüssigkeitsartige Eigenschaften. Das weiß man von Untersuchungen im irdischen Permafrost, wo es bis zu -40°C flüssig bleibt. Also müssten bei der Präsenz von Adsorbatwasser auf dem Mars dort auch chemische Prozesse ablaufen können, die ihre Energie z. B. aus der UV-Strahlung der Sonne beziehen könnten. Die ersten diesbezüglichen Experimente im DLR bestätigen diese Annahme.

Dass Wassereis auf der Marsoberfläche existiert, kann nun nicht mehr bezweifelt werden. Ungeklärt ist allerdings nach wie vor, wann und wie viel Wasser in der Vergangenheit vorhanden war und wo der Großteil davon verblieben ist.

ERNST HAUBER

- [1] D. J. Milton, J. Geophys. Res. **78**, 4037 (1973)
- [2] S. Byrne und A. P. Ingersoll, Science **299**, 1051 (2003)
- [3] T. N. Titus, H. H. Kieffer und P. R. Christensen, Science **299**, 1048 (2003)
- [4] I. Mitrofanov et al., Science **297**, 78 (2002)

- [5] W. V. Boynton et al., Science **297**, 81 (2002)
- [6] H. Spinrad, G. Münch und L. D. Kaplan, Astrophys. J. **137**, 1319 (1963)
- [7] H. H. Kieffer et al., Science **194**, 1341 (1976)
- [8] C. B. Farmer, D. W. Davies und D. D. LaPorte, Science **194**, 1339 (1976)
- [9] K. Biemann et al., J. Geophys. Res. **82**, 4641 (1977)

Super Festkörper beobachtet?

Ultralkaltes festes Helium zeigt Eigenschaften einer Supraflüssigkeit

Die Aufregung unter Festkörper-Physikern war weltweit groß, als kürzlich in *Nature* berichtet wurde, dass in den USA wahrscheinlich der *Supersolid* entdeckt worden sei [1]. *Supersolid*? Ist das womöglich ein superhartes Material, mit dem man bessere Panzer bauen kann? Nein. Das Attribut *Super* ist dem Wort *Superfluid* (oder Supraflüssigkeit) entlehnt – so bezeichnet man Helium unterhalb etwa 2 K, das leichtfüßig durch kleinste Poren fließt und einen Massenstrom im Kreis ohne Energiezufuhr aufrecht erhalten kann. *Super* bedeutet hier also „besonders flüssig, reibungsfrei beweglich“. Ein solches Verhalten ist eng mit der Bose-Einstein-Kondensation verwandt, also mit der massenhaften Besetzung eines einzigen (Einteilchen-) Zustandes: Wenn sich ausreichend viele Helium-Atome im gleichen Impulszustand befinden,

kann wegen des Bose-Zusammenhalts kein einzelnes Teilchen mehr gebremst werden – etwa wie Soldaten, die in Kolonnen marschieren.

Das Phänomen supraflüssiger Elektronen ist in Metallen als Supraleitung bekannt. Viele *Supergase*, d. h. Gase, die Bose-Kondensation aufweisen, sind in letzter Zeit entdeckt und untersucht worden – einige Pionier-Arbeiten wurden mit dem Nobelpreis 2001 ausgezeichnet. (Das Nobel-Komitee liebt offenbar *Super-Phänomene* und hat in den vergangenen acht Jahren neun auf diesem Gebiet tätige Nobel-Laureaten gekürt.) Ein *Supersolid* hat bislang noch gefehlt – dabei erscheint es durchaus klärungsbedürftig, wie ein Festkörper *superfluid* sein kann.

Penrose und Onsager stellten 1956 fest, dass Bose-Kondensation nicht in einem idealen Kristall vorkommen kann [2]. Das ist nachvollziehbar, denn sie nahmen an, dass die Atome lokalisiert an ihren Gitterplätzen sitzen. Also sind sie unterscheidbar, klassisch und können sich gar nicht an der quantenmechanischen Bose-Kondensation beteiligen. In einem realen Kristall gibt es jedoch Leerstellen und Zwischengitteratome. Diese Massendefekte können durch das Gitter wandern, was kollektiv eine Defekt-Diffusion darstellt. Da die zugehörige Mobilität der Atome einen (kleinen) Überlapp der Wellenfunktionen bedingt, ist Bose-Kondensation wieder möglich [3]. Leggett schätzte den supraflüssigen Anteil der Teilchen im festen Helium über den

KURZGEFASST...

■ Elemente 113 und 115 entdeckt

Am Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna, Russland, ist es gelungen, vier Kerne des bislang unbekanntes Elements 115 zu erzeugen. Dazu wurde ein Target aus Americiumdioxid (AmO_2), in dem das Isotop ^{243}Am auf 99,9 % angereichert war, mit einem Strahl aus ^{48}Ca -Ionen beschossen. Bei einer Projektilenergie von 248 MeV hat Yuri Oganessian gemeinsam mit russischen und amerikanischen Kollegen drei Zerfallsketten des Isotops $^{288}\text{115}$ beobachtet, bei einer Energie von 253 MeV eine Kette des Isotops $^{287}\text{115}$. In einer Folge von fünf α -Zerfällen sind diese Isotope dabei zunächst in die Isotope $^{284}\text{113}$ bzw. $^{283}\text{113}$ des bislang ebenfalls unbekanntes Elements 113 zerfallen. (Yu. Ts. Oganessian et al., erscheint in Phys. Rev. C)

■ Neue Physik am Myon?

Im Rahmen der relativistischen Dirac-Gleichung hat der g -Faktor des Myons, das

Verhältnis zwischen magnetischem Moment und Spin, exakt den Wert 2, d. h. $g-2 = 0$. Abweichungen von diesem Wert erklärt das Standardmodell der Teilchenphysik damit, dass das Myon aufgrund der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung virtuelle Teilchen emittiert und absorbiert. Die $g-2$ -Kollaboration am Brookhaven National Laboratory, der auch deutsche Physiker angehören, hat nun neue Ergebnisse an negativen Myonen bekannt gegeben, die gemeinsam mit älteren Ergebnissen an positiven Myonen eine Abweichung zwischen Experiment und Theorie von 2,8 Standardabweichungen ergeben. Sollte sich diese Diskrepanz bestätigen, könnte dies ein erster Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells, z. B. die Existenz von supersymmetrischen Teilchen, sein.

(G. W. Bennett et al., arxiv.org/hep-ex/0401008)

Überlapp ab und erhielt eine winzige obere Schranke von 10^{-4} [4].

Einen Massendefekt zu erzeugen kostet viel Energie. Daher stellt sich die Frage, ob sie bei tiefen Temperaturen vorkommen können oder „ausgefroren“ werden. Heliumatome gehören zu den leichtesten Kristall-Bausteinen, ihre quantenmechanischen Nullpunkt-Schwankungen sind entsprechend groß. Andreev und Lifshitz spekulierten daher, dass es in Helium zum einen vollkommen delokalisierte Massendefekte und zum anderen eine Bose-Kondensation dieser *Flüssigkeit* geben kann [5]. Damit wäre ein neuer Kristalltyp postuliert, denn delokalisierte Massendefekte bedeuten, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen an einem Gitterplatz zu finden, nicht mehr 1 (und ab und zu 0) ist, sondern einen beliebigen Werte um 1 herum annehmen kann. Da auch die Energie der Massendefekte kontinuierlich ist, werden delokalisierte Defekte nicht ausgefroren.

Trotzdem: Kann reibungsfreie Fluidität wirklich mit Festkörpersteifheit koexistieren? Wird nicht ein *Supersolid* auf Grund der Gravitation die Leerstellen in die Höhe, die Atome nach unten und in die Breite schicken, um schließlich als eine Monolage von periodischen Atomen zu enden? Nein, es gibt keinen Anlass für die Atome, die Gravitationsenergie allein zu minimieren; sie müssen auch die Kondensationsenergie berücksichtigen, die kleiner wird, wenn die Anzahl der Nachbaratome wächst.

Welche besonderen Eigenschaften weist ein *Supersolid* auf und wie lassen sich diese im Experiment nachweisen? Jedes Bose-Kondensat lässt sich mit einer „Wellenfunktion“ $\psi = |\psi|e^{i\phi}$ beschreiben. Wegen der makroskopischen Besetzung beschreibt die Wahrscheinlichkeitsdichte $|\psi|^2 \equiv \rho_s$ aber eine wirkliche Teilchen-Dichte, die den superflüssigen Anteil charakterisiert. ρ_s fließt mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_s = (\hbar/m)\nabla\phi$ und nimmt nicht an Rotationen teil, da $\nabla \times \vec{v}_s = 0$. (Vortex-Linien treten erst ab einer kritischen Geschwindigkeit auf.) Diese Eigenschaft lässt sich durch eine Messung des Trägheitsmomentes nachweisen und erlaubt es, den *Supersolid* direkt zu identifizieren [4]. Genau das haben Kim und Chan von der Pennsylvania State University in den USA gemacht. Sie benutzten ein Torsionspendel

und beobachteten, wie dessen Resonanzfrequenz ab etwa 0,2 K um insgesamt 1% in die Höhe ging [1]. Die naheliegende Interpretation besteht darin, dass bei den höheren Temperaturen das gesamte Helium oszilliert und zum Trägheitsmoment beiträgt. Unterhalb von 0,2 K gibt es aber einen superflüssigen He-Anteil, der in Ruhe bleibt – das Trägheitsmoment ist entsprechend kleiner.

Im Gegensatz zu früheren Experimenten haben Kim und Chan das Helium in Vycor-Glas gefüllt, dessen Nanometer-skalige Strukturen vermutlich viele Massendefekte und eventuell eine größere flüssige Komponente bewirken. Aber es provoziert auch die Frage, ob der fehlende Beitrag zum Trägheitsmoment nicht nur eine Schicht supraflüssigen Heliums anzeigt, die trotz des hohen Druckes (20 bar größer als der Erstarrungsdruck) zwischen der Vycor-Wand und dem Heliumkristall liegt. Das verneinen die Autoren, weil die gemessene kritische Geschwindigkeit viel zu klein sei. Außerdem haben im Querschnitt eines Vycor-Schlauchs (linear) nur etwa 30 Atome Platz. Falls die flüssige Komponente in der Nähe der Wand ansteigt, wird nicht immer klar sein, welches Atom noch fest und welches schon flüssig ist.

Andreev und Lifshitz schlugen ursprünglich vor, zum Nachweis des *Supersolids* die elastischen Wellen zu messen [5], deren Geschwindigkeit ihrer Berechnung nach um den Faktor $(1+\rho_s/\rho)^{1/2}$ modifiziert wird. Außerdem wird aus der Defekt-Diffusion eine Propagation. (Das passiert wegen der gebrochenen Phasensymmetrie, deshalb nennt man diese die Goldstone-Mode.) Später wurde erkannt, dass die longitudinale Welle mit der Goldstone-Mode koppelt und stärker verändert wird [6]. Der zusätzliche Nachweis des geschilderten Sachverhalts wäre ein eindeutiger Beleg der Existenz eines *Supersolids*.

MARIO LIU

- [1] E. Kim und M. H. W. Chang, Nature **427**, 225 (2004)
- [2] O. Penrose und L. Onsager, Phys. Rev. **104**, 576 (1956)
- [3] G. V. Chester, Phys. Rev. **A 2**, 256 (1970)
- [4] A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **25**, 2543 (1970)
- [5] A. F. Andreev und I. M. Lifshitz, JETP **29**, 1107 (1969)
- [6] M. Liu, Phys. Rev **B 18**, 1165 (1978)