

Mit Hochdruck zu neuen Phasen

Russische Forscher fanden erste experimentelle Hinweise auf einen Plasmaphasenübergang von Wasserstoff.

Das Phasendiagramm vieler Substanzen ist für einen großen Bereich von Temperatur und Druck bekannt: Koexistenzlinien trennen die feste, flüssige und gasförmige Phase, die Lage des Tripelpunkts und des kritischen Punkts ist bestimmt (Abb. 1). Das Verhalten von Materie unter extremen Bedingungen, d. h. bei Drücken von einigen Megabar bzw. Temperaturen von einigen Tausend Kelvin wird dagegen noch intensiv erforscht. So ist selbst der Verlauf der Schmelzdrucklinie in diesem Bereich für viele Materialien nicht bekannt. Solche extremen Bedingungen treten auch im Inneren von Planeten auf. Um ihren inneren Aufbau modellieren zu können, sind daher die genaue Kenntnis des Phasendiagramms und der Zustandsgleichung für diese Bedingungen erforderlich.

Nichtmetallische Materialien wie Wasserstoff oder Helium gehen unter solch hohen Drücken zu metallischem Verhalten über. Ob dieser elektronische Übergang mit einem Phasenübergang 1. Ordnung, dem sog. Plasmaphasenübergang (PPÜ), verknüpft ist oder alternativ eine stetige Umwandlung stattfindet, haben Landau und Zeldovich bereits in den 40er-Jahren untersucht [1]. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass eine Trennung zwischen leitender und nichtleitender Phase möglich ist. Seither wurde in vielen theoretischen Arbeiten, insbesondere unter Verwendung eines chemischen Bildes, die Zustandsgleichung für das einfachste und häufigste Element Wasserstoff unter hohem Druck berechnet. Modelle im chemischen Bild behandeln Bindungszustände aus einzelnen Teilchen als neue Teilchensorten, die im chemischen Gleichgewicht stehen und die Zusammensetzung des Systems sowie dessen Eigenschaften bestimmen. Im Gegensatz dazu bestimmt im physikalischen Bild das Verhalten der einzelnen Grundbausteine die Eigenschaften des Systems.

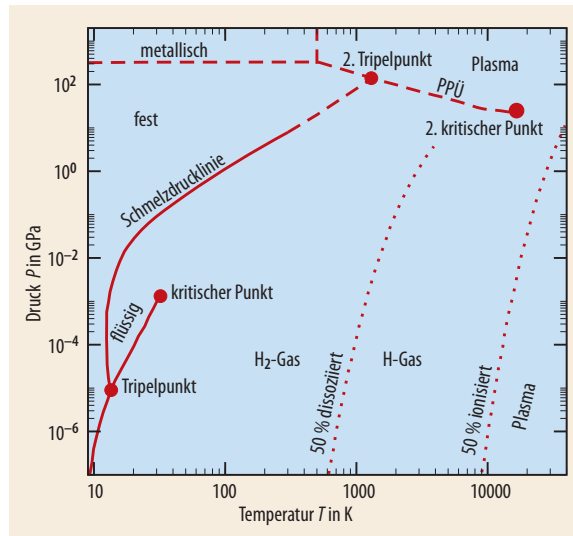


Abb. 1 Das Phasendiagramm von Wasserstoff zeigt die bekannten (durchgezogen) und vorhergesagten (gestrichelt) Koexistenzlinien, die Tripelpunkte und kritischen Punkte. Zur Orientierung sind die Linien eingezichnet, auf denen 50% Dissoziation bzw. Ionisation vorliegen.

Der Verlauf der Koexistenzlinie, welche die metallische von der nichtmetallischen Phase trennt und in einem 2. kritischen Punkt bei etwa 15 000 K und 0,5 Mbar enden soll (Abb. 1), hängt dabei stark von den verwendeten Näherungen für die Wechselwirkung zwischen den Atomen und Molekülen ab [2].

Ein experimenteller Nachweis des Plasmaphasenübergangs gelang bisher nicht – trotz enormer Fortschritte bei der Erzeugung hoher Drücke mit statischen und dynamischen Methoden. So wurde metallischer Wasserstoff zwar erstmals im warmen Fluid bei etwa 2500 K

und 1,4 Mbar in Stoßwellenexperimenten nachgewiesen [3] – mehr als 60 Jahre nach der Vorhersage von festem metallischen Wasserstoff durch Wigner und Huntington [4] – jedoch ohne die üblichen Anzeichen eines Phasenübergangs 1. Art zu finden. Ein solcher würde sich durch einen Dichtesprung und eine latente Wärme zusammen mit dem gleichzeitigen, starken Anstieg der Leitfähigkeit äußern.

Ein russisches Forscherteam aus Moskau und Sarov um Vladimir E. Fortov hat nun erstmals Hinweise auf einen Plasmaphasenübergang in Stoßwellenexperimenten gefunden [5]. Dazu haben die Wissenschaftler Wasserstoff und Deuterium mit chemischen Explosionen in einer Zylindergeometrie bei weitgehend gleichbleibender Entropie (isentrop) auf über 1 Mbar komprimiert und mit Röntgen-Radiographiemethoden analysiert. Die gewonnenen Daten zeigen zwischen 127 und 140 GPa einen Dichtesprung von rund 25%. Dieser liegt genau in dem Bereich, in dem andere Experimente bereits nachgewiesen haben, dass die elektrische Leitfähigkeit dort um bis zu fünf Größenordnungen ansteigt [3, 6]. Zuvor war der Plasmaphasenübergang in theoretischen Arbeiten mit einem ähnlichen Dichtesprung in etwa diesem Bereich vorhergesagt worden [7–9].

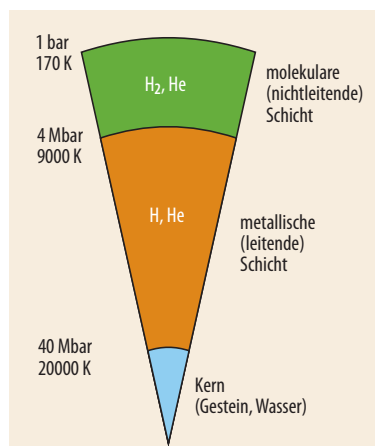


Abb. 2 Dreischichtmodell von Jupiter mit festem Kern und zwei fluiden Schichten. Der Plasmaphasenübergang würde die Grenze zwischen der äußeren nichtleitenden und der mittleren leitenden Schicht festlegen.

Die Stoßwellenexperimente haben der Diskussion zum Plasmaphasenübergang neue Impulse gegeben. Bisher haben vor allem chemische Modelle einen Plasmaphasenübergang vorhergesagt, während andere ab-initio-Simulationen keine eindeutigen Anzeichen dafür finden konnten [10]. Allerdings lassen sich in diesen Simulationen nur wenige Hundert Teilchen betrachten, was noch nicht ausreicht, um Phasenübergänge und kritische Phänomene zu beschreiben.

Weiterhin sind präzisere Ergebnisse von Stoßwellenexperimenten entlang Isothermen erforderlich, um das mögliche Instabilitätsgebiet auflösen zu können und die Frage des Phasenübergangs zu klären. Stoßwellenexperimente für diesen Bereich gestalten sich allerdings

außerordentlich schwierig, und die Ergebnisse sind mit relativ großen Fehlerbalken versehen.

Diese laufenden experimentellen und theoretischen Projekte werden nicht nur unser Verständnis von Materie unter extremen Bedingungen erweitern, sondern sind auch wichtig, um große Planeten wie Jupiter und Saturn modellieren zu können. Der Plasmaphasenübergang würde die Grenze zwischen einer äußeren nichtleitenden und der darunter liegenden metallischen fluiden Schicht festlegen (Abb. 2) und somit die Zahl der freien Parameter in bisherigen Planetenmodellen weiter einschränken. Bei einem kontinuierlichen Übergang wäre diese Grenze alternativ durch eine unter diesen Bedingungen vermutete Entmischung von Wasserstoff

und Helium festgelegt. Die Untersuchung des Hochdruckphasendiagramms von Wasserstoff verspricht damit für verschiedene Gebiete spannende neue Erkenntnisse.

Ronald Redmer und Bastian Holst

- [1] Y. B. Zeldovich und L. D. Landau, JETP **14**, 32 (1944)
- [2] W. Ebeling et al., Plasma Phys. Contr. Fusion **38**, A31 (1996)
- [3] S. T. Weir, A. C. Mitchell und W. J. Nellis, Phys. Rev. Lett. **76**, 1860 (1996)
- [4] E. P. Wigner und H. B. Huntington, J. Chem. Phys. **3**, 764 (1935)
- [5] V. E. Fortov et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 185001 (2007)
- [6] V. E. Fortov et al., JETP **97**, 259 (2003)
- [7] D. Beule et al., Phys. Rev. B **59**, 14177 (1999)
- [8] V. S. Filinov et al., JETP Lett. **74**, 384 (2001)
- [9] S. Scandolo, PNAS **100**, 3051 (2003)
- [10] S. A. Bonev, B. Militzer und G. Galli, Phys. Rev. B **69**, 014101 (2004)

Prof. Dr. Ronald Redmer und Dipl.-Phys. Bastian Holst, Universität Rostock, Institut für Physik, 18051 Rostock

■ Was eine Sandburg im Innersten zusammenhält...

... und wie robust diese ist, wird durch das Verhalten der Flüssigkeit zwischen den Sandkörnern bestimmt.

Alle, die schon einmal eine Sandburg gebaut haben, werden bestätigen, dass das Mengenverhältnis von Wasser zu Sand dabei eine eher untergeordnete Rolle spielt – jedenfalls lässt es sich über einen großen Bereich verändern, ohne die Stabilität des Bauwerks merklich zu gefährden. Der Bau einer Sandburg braucht also keinem speziellen Rezept zu folgen: Intuition reicht völlig aus.

Hinter dieser Alltags- oder vielmehr Urlaubsbeobachtung steckt jedoch mehr [1], denn das physikalische Verhalten granularer Medien – insbesondere nasser granularer Medien – ist noch wenig verstanden [2]. Für viele technische und auch geologische Fragestellungen ist es jedoch von Bedeutung. Umso wichtiger also, ein besseres Verständnis der grundlegenden Mechanismen in solchen komplexen Systemen zu erlangen.

Mit diesem Ziel vor Augen ist Stephan Herminghaus vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen, gemeinsam mit Mitarbeitern und Kollegen aus Erlangen, Grenoble



Für die Stabilität einer Sandburg spielt das Mengenverhältnis von Wasser zu Sand keine so große Rolle.

und Canberra (Australien), dem Problem der Sandhaufen-Mechanik genauer auf den Grund gegangen. Die Wissenschaftler wendeten verschiedene experimentelle Methoden an und liefern auch eine theoretische Erklärung [3].

Hauptzielrichtung dieser Arbeit ist es, die mechanischen Eigenschaften eines nassen granularer Mediums auf Basis der im Medium „verborgenen Fluidik“ zu erklären. Um das Verhalten der Flüssigkeit im Inneren von Sandhaufen zu bestimmen und sie mit der beobachtbaren

mechanischen Robustheit in Zusammenhang zu bringen, haben die Autoren geometrisch ideale Sandhaufen aus kleinen Glaskugeln gebaut. Die Kugeln sind unterschiedlich groß (mittlerer Durchmesser 280 Mikrometer), um eine Kristallisation zu vermeiden. Mechanische Tests charakterisierten zunächst die Robustheit dieser Glaskugel-Haufen. Eine interessante Größe für diese Tests ist z. B. die Zugspannung, die man beim Glaskugelhaufen durch ein Rotationsexperiment bestimmen kann. Dabei