

Der steinige Weg zu metallischem Wasserstoff

Warum sich Forscher mit dem einfachsten Element im Universum so schwertun

Seit mehr als 70 Jahren steht die Behauptung im Raum, dass fester Wasserstoff bei hohem Druck elektrisch leitfähig werden sollte wie ein Metall. Allen Anstrengungen zum Trotz ist es Forschern bis heute allerdings nicht gelungen, das zu bestätigen.

Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum – und es ist zugleich das einfachste. Ein Wasserstoffatom besteht aus einem einzigen Proton, um das ein Elektron kreist. Trotzdem widersetzt sich der Wasserstoff bis heute hartnäckig einer eindeutigen Klassifizierung. Im Periodensystem ist er zwar der Gruppe der Alkalimetalle (Lithium, Natrium, Kalium usw.) zugeordnet, weil er wie diese nur ein einziges Valenzelektron besitzt. Damit hören die Gemeinsamkeiten aber bereits auf. Während die Alkalimetalle unter normalen Bedingungen fest sind, liegt Wasserstoff gewöhnlich als molekulares Gas der Form H_2 vor. Und auch mit seinen metallischen Eigenschaften ist es nicht weit her. Selbst wenn man Wasserstoff auf minus 259 Grad Celsius abkühlt und ihn dadurch zum Gefrieren bringt, wird er nicht zum elektrischen Leiter, sondern zum Isolator. Manche Forscher glauben deshalb, der Wasserstoff wäre in der 7. Gruppe des Periodensystems besser aufgehoben. Wie den Halogenen (Fluor, Chlor, Brom usw.) fehlt dem Wasserstoff nämlich nur ein einziges Elektron zur vollständigen Besetzung einer Elektronenschale.

Der heilige Gral der Hochdruckphysik

In den 1930er Jahren sagten Forscher allerdings voraus, dass man den Wasserstoff nur hinreichend komprimieren müsse, um ihn elektrisch leitfähig zu machen. Durch die Kompression, so die Idee, rücken die Wasserstoffatome im Kristallgitter so eng zusammen, dass ihre zuvor isolierten Elektronenwolken zu überlappen beginnen und die Elektronen sich wie in einem Metall frei bewegen können. Im Jahr 1968 setzte Neil Ashcroft von der Cornell University noch eins obendrauf. Er berechnete, dass metallischer Wasserstoff ein ausgesprochen guter Supraleiter sein sollte. Anders als die gewöhnlichen Supraleiter, die ihren elektrischen Widerstand erst bei Temperaturen von minus 250 Grad Celsius und weniger verlieren, könnte Wasserstoff den elektrischen Strom bei sehr viel höheren Temperaturen – vielleicht sogar bei Raumtemperatur – verlustlos leiten. Zwar wäre dieser Supraleiter für praktische Zwecke wertlos, weil er vermutlich nur unter hohem Druck stabil wäre. Dennoch gilt metallischer Wasserstoff seither als heiliger Gral der Hochdruckphysik. Dass ausgerechnet das einfachste Element zu solchen Kapriolen fähig sein soll, reicht den Forschern als Motivation.

Bis heute stehen die Gralsucher allerdings mit leeren Händen da. Selbst mit Drücken, die annähernd so hoch sind wie im Inneren der Erde, ist es ihnen bisher nicht gelungen, festen Wasserstoff leitfähig – geschweige denn supraleitend – zu machen. Das hält die Forscher allerdings nicht von weiteren Anstrengungen ab. Gemäss neueren

Berechnungen könnte sich Wasserstoff unter hohem Druck nämlich noch viel sonderbarer verhalten, als man bisher gedacht hat.

Historisch gesehen sei die Suche nach metallischem Wasserstoff ein gegenseitiges Hochschaukeln von Theorie und Experiment gewesen, sagt Reinhard Boehler, der am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz die Hochdruckgruppe leitet. Tatsächlich mussten die theoretischen Vorstellungen, wie fester Wasserstoff vom Isolator zum elektrischen Leiter wird, bereits mehr als einmal revidiert werden. Ursprünglich glaubte man, der gefrorene Wasserstoff müsse zunächst von einer molekularen in eine atomare Form übergehen, bevor er den Strom leiten könne. Unter Druck, so die Vorstellung, würden die in einem Kristallgitter angeordneten H_2 -Moleküle in einzelne Wasserstoffatome zerfallen, die sich dann zu einem neuen Kristallgitter mit metallischen Eigenschaften anordneten. Der Druck, bei dem dies geschehen sollte, wurde in den 1930er Jahren auf 25 Gigapascal (das entspricht dem 250 000-fachen Atmosphärendruck) geschätzt, später aber laufend nach oben korrigiert. Zum Vergleich: Graphit wandelt sich bereits bei einem Druck von 6 Gigapascal in Diamant um.

Solche Drücke erzeugt man im Labor mit sogenannten Diamant-Hochdruckzellen. Diese bestehen aus zwei spitz zulaufenden Diamant-Stempeln, zwischen denen sich eine Metallfolie mit einer winzigen Aussparung für die Wasserstoff-Probe befindet. Presst man nun die beiden Diamant-Stempel zusammen, verformt sich das Metall, und es wird ein Druck auf die Probe ausgeübt. Da die Diamanten durchsichtig sind, lässt sich das Verhalten des komprimierten Wasserstoffs mit optischen Methoden untersuchen. Das klingt einfacher, als es ist. Tatsächlich gehören die Experimente zu den anspruchsvollsten, die es in der Festkörperphysik gibt. Der Grund hierfür sei in der chemischen Aggressivität des Wasserstoffs zu suchen, so Boehler. Dieser dringe durch winzige Defekte in das Kristallgefüge der Diamanten ein und lasse diese zerbrechen. Man brauche für die Experimente auserlesene Diamanten, die sich jedoch nur wenige Forschungsgruppen leisten könnten. Deshalb, so Boehler, gehe es in diesem Forschungsgebiet nur langsam voran.

Stabiler als gedacht

Der gegenwärtige Stand der Dinge sieht folgendermassen aus: Entgegen den Vorhersagen wurden selbst bei Drücken von bis zu 342 Gigapascal keine Anzeichen dafür gefunden, dass fester Wasserstoff metallisch wird. Die Experimente belegten vielmehr, dass die Wasserstoffatome selbst bei diesem Druck immer noch zu H_2 -Molekülen gepaart sind. Offensichtlich ist die molekulare Phase stabiler als gedacht. Das hat die Physiker zu einem Umdenken bewegt. Inzwischen hält man es für möglich, dass fester Wasserstoff bereits in seiner molekularen Form (also ohne vorherige Spaltung der H_2 -Moleküle) metallisch wird. Neuere Berechnungen sagen voraus, dass dies in der Gegend von 400 Gigapascal geschehen könnte. In die gleiche Richtung weisen Experimente von Paul Loubeyre und seinen Mitarbei-

tern vom französischen Commissariat à l'Énergie Atomique. Aus dem gemessenen Absorptionsverhalten des Wasserstoffs bei Drücken oberhalb von 300 Gigapascal extrapolierten die Forscher, dass dieser bei einem Druck von 450 Gigapascal metallisch werden könnte. Erst bei noch viel höheren Drücken, so die Vorstellung, sollte sich ~~das molekulare Metall dann zu einem Alkali-~~ metall mit atomarer Kristallstruktur umwandeln.

Auch in seiner molekularen Form könnte metallischer Wasserstoff ein formidabler Supraleiter sein. Wie Eberhard Gross von der Freien Universität Berlin im vergangenen Jahr berechnet hat, sollte das molekulare Metall seinen elektrischen Widerstand bei einer Temperatur von minus 31 Grad Celsius verlieren (dieser Wert gilt für einen Druck von 450 Gigapascal). Das wäre geradezu ein Klacks, wenn man bedenkt, dass der beste Hochtemperatursupraleiter auf minus 135 Grad Celsius abgekühlt werden muss, um supraleitend zu werden. Noch verblüffender ist, dass die Supraleitung des Wasserstoffs laut den Berechnungen auf einer Paarung von Elektronen beruht, die durch Schwingungen des Kristallgitters vermittelt wird. Das strafe jene Lügen, die behaupteten, diese Art der Bindung könne Elektronen nur bei tiefen Temperaturen zusammenhalten, so Gross.

Bei ihren Experimenten hatten sich Physiker lange Zeit darauf konzentriert, festen Wasserstoff unter Druck zu setzen. Dabei hatte das starke Magnetfeld der Planeten Jupiter und Saturn schon früh Hinweise darauf geliefert, dass auch flüssiger Wasserstoff unter Druck metallisch werden könnte. Man vermutete, dass das Magnetfeld von elektrischen Strömen erzeugt wird, die tief im heißen Inneren der Planeten fließen – also dort, wo der flüssige Wasserstoff wegen der immensen Drücke am ehesten elektrisch leitfähig sein sollte. Im Jahr 1996 schickten sich Forscher am Lawrence Livermore National Laboratory an, die Bedingungen im Inneren der Planeten im Labor nachzustellen. Mit einer 20 Meter langen Gaskanone schossen sie Projektile auf eine flüssige Wasserstoff-Probe, die dadurch schockartig komprimiert und gleichzeitig erhitzt wurde. Bei einem Druck von 140 Gigapascal und einer Temperatur von mehreren tausend Grad wurde der flüssige Wasserstoff tatsächlich für wenige Augenblicke leitfähig. Der relativ geringe Druck liess Planetenforscher aufhorchen. Er deutete nämlich darauf hin, dass der flüssige Wasserstoff im Inneren der Planeten bis dicht unter die Oberfläche metallisch sein könnte.

Zitternde Atome

Für die flüssige Phase des Wasserstoffs interessieren sich neuerdings auch Forscher, die den heiligen Gral bisher in der festen Phase (also bei tiefen Temperaturen) zu finden hofften. Der Grund dafür ist der folgende: Bei tiefen Temperaturen macht sich die sogenannten Nullpunktsbewegung der Atome bemerkbar. Dabei handelt es sich um eine Zitterbewegung quantenmechanischen Ursprungs, die selbst am absoluten Temperaturnullpunkt nicht zum Stillstand kommt. Diese Nullpunktsbewegung hat durchaus Konsequenzen. Sie sorgt zum Beispiel dafür, dass Helium selbst bei tiefsten Temperaturen keine kristalline Ordnung ausbilden kann und flüssig bleibt (zumindest bei normalem Umgebungsdruck). Im Jahr 2000 warfen Ashcroft und sein Student Stanimir Bonev die Frage auf, ob die Nullpunktsbewegung der leichten Wasserstoffatome im gleichen Sinne ein Gefrieren des komprimierten Wasserstoffs verhindern könne. In einem gewissen Druckbereich würde der Wasserstoff dann selbst am

absoluten Temperaturnullpunkt als Flüssigkeit vorliegen (bevor noch höhere Drücke eine Kristallisation erzwingen).

Diese Hypothese hat in den letzten Jahren zusätzliches Gewicht erhalten. Im Jahr 2004 sagte Bonev anhand theoretischer Berechnungen voraus, dass die sogenannte Schmelzkurve von Wasserstoff bei einem Druck von 90 Gigapascal ein Maximum hat und danach wieder abfällt. Dieses Maximum ist inzwischen auch experimentell bestätigt worden. Während die Temperatur, bei der ein fester Stoff zu schmelzen beginnt, normalerweise mit wachsendem Druck immer weiter ansteigt, verhält es sich bei Wasserstoff also umgekehrt. In dieser Hinsicht zeigt Wasserstoff gewisse Parallelen mit Eis, das unter Druck bereits bei Minusgraden schmilzt.

Durch eine Extrapolation der theoretisch berechneten Schmelzkurve zu tiefen Temperaturen sagte Bonev weiter voraus, dass bei einem Druck von 400 Gigapascal der Punkt erreicht sein sollte, wo selbst der kälteste Wasserstoff nicht mehr gefriert. Wenn er recht behält, müssten sich die Gralssucher auf eine neue Fährte machen. Statt als molekulares oder atomares Metall könnte der kalte Wasserstoff in einem Zwischenbereich nämlich als metallische Flüssigkeit vorliegen.

In doppelter Hinsicht «supra»

Diese Flüssigkeit hätte es allerdings in sich. Wegen der tiefen Temperaturen wäre sie nicht mit der metallischen Flüssigkeit zu vergleichen, die man im heißen Inneren von Jupiter und Saturn vermutet. Vielmehr würde das Verhalten dieser Flüssigkeit von Quanteneffekten dominiert. Man kennt das von flüssigem Helium, das bei tiefen Temperaturen suprafluid wird und reibungsfrei durch engste Kapillaren fließen kann. Bei flüssigem Wasserstoff würden sich die Quanteneffekte allerdings sowohl auf das Verhalten der Protonen als auch auf das der Elektronen auswirken. Wie Ashcroft und seine Mitarbeiter im Jahr 2005 berechnet haben, sollte der flüssige metallische Wasserstoff bei hinreichend tiefen Temperaturen zu einer «supraleitenden Supraflüssigkeit» werden, in der die reibungsfreie Bewegung der Protonen aufs Engste mit jener der Elektronen verzahnt ist.

Eine solche Quantenflüssigkeit, die sowohl suprafluide als auch supraleitende Eigenschaften verkörpert, wäre mit nichts zu vergleichen, was man bis heute kennt. Eine andere Frage ist allerdings, ob sie existiert. Dass kalter Wasserstoff bei einem Druck von 400 Gigapascal zu einer metallischen Flüssigkeit wird, ist nämlich – wie so vieles auf diesem Gebiet – eine Hypothese. Es wäre nicht das erste Mal, dass die Physiker mit ihren Berechnungen danebengelegen hätten.

Christian Speicher