

für weitergehende Beugungsexperimente zur Messung der chemischen Dynamik im Molekülkoordinatensystem. Dies ließe sich mit kohärenter Röntgenbeugung, Elektronenbeugung oder laserinduzierter Elektronenbeugung realisieren. Diese Methoden werden derzeit auf komplexe Moleküle übertragen.

Literatur

- [1] Y.-P. Chang, et al., *Int. Rev. Phys. Chem.* **2015**, *34*, 557.
- [2] E. T. Karamatskos et al., *Nat. Comm.* **2019**, *10*, 3364.
- [3] M. Berry, I. Marzoli, W. Schleich, *Phys. World* **2001**, *14*, 39.
- [4] S. Trippel et al., *Phys. Rev. A* **2014**, *89*, 051401.
- [5] S. Trippel et al., *Phys. Rev. Lett.* **2015**, *114*, 103003.

*Evangelos T. Karamatskos,
Jochen Küpper, CFEL, DESY & UHH*

TEILCHENPHYSIK

Neutrinos auf der Waage

Das Karlsruher Tritium Neutrino-Experiment (KATRIN) hat eine neue Obergrenze für die Masse von Elektron-Neutrinos geliefert. Demnach wiegen diese Elementarteilchen weniger als 1,1 eV. Das bisherige Limit lag bei 2 eV.

Das neue Ergebnis, das am 13. September auf einer Sitzung in Toyama, Japan, berichtet wurde, basiert auf nur 28 Tagen Messzeit. Letztendlich hoffen die KATRIN-Forscher, 1000 Tage lang Daten zu sammeln und den Grenzwert bis

auf 0,2 eV zu senken – oder zu zeigen, dass das Neutrino schwerer ist.

Das Messprinzip von KATRIN basiert auf der Analyse des Energiespektrums beim Betazerfall von Tritium. Insgesamt wurden in dem Messintervall rund zwei Millionen Elektronen vermessen. Die KATRIN-Kollaboration besteht aus 200 Mitgliedern.

<https://t1p.de/KATRIN-erstes-Ergebnis>

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG

Unter Hochdruck zur Supraleitung

Supraleitung ist eines der faszinierendsten physikalischen Phänomene der Festkörperphysik; eine Anwendung bei technologisch relevanten Temperaturen um 300 K konnte bis zum heutigen Tage allerdings nicht realisiert werden. In modernen Hochdrucklaboren ist es gelungen, wasserstoffreiche Metallhydride zu synthetisieren, die bereits bei 260 K – Temperaturen, die man im Tiefkühlschrank vorfindet – supraleitend werden. Unsere Gruppe am Bayerischen Geoinstitut (BGI) der Uni Bayreuth hat eine Methode entwickelt, mit der sich die elektronischen Eigenschaften der Wasserstoffatome in diesen Substanzen untersuchen lassen.

Die Suche nach alternativen Energiequellen und neuen, effektiv und möglichst kostengünstig nutzbaren Technologien bildet einen Schwerpunkt der modernen Materialwissenschaft. Insbesondere die Fähigkeit einiger Materialien, elektrischen Strom ohne jeglichen Widerstand zu leiten, fasziniert Festkörperphysiker seit deren erstem experimentellen Nachweis im Jahr 1911.

Im Jahr 1935 argumentierten Eugene Wigner und Hillard Bell Huntington, dass molekularer Wasserstoff unter hinreichend hohen Kompressionsdrücken in einen atomaren metallischen Zustand übergehen sollte.

Aufgrund signifikanter Elektron-Phonon-Wechselwirkung sollte die supraleitende Sprungtemperatur im Bereich weit oberhalb von 300 K liegen. Dieser supraleitende metallische Zustand konnte bis zum heutigen Tage jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, und theoretische Berechnungen resultieren in immer höheren Übergangsdrücken (Abbildung 1).

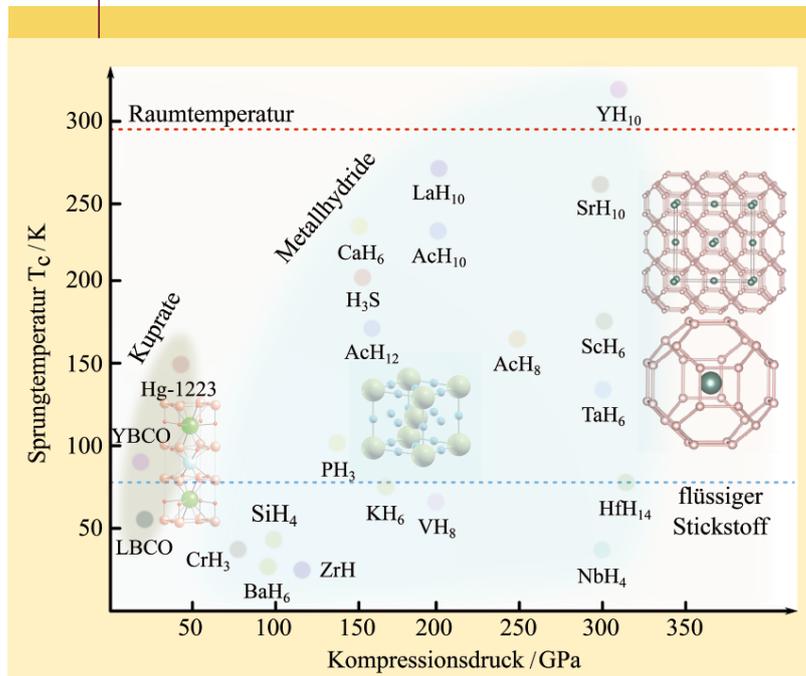
Ein alternativer Weg in Richtung Raumtemperatur-Supraleitung fußt auf der Idee, Wasserstoffatome in einer chemischen Verbindung „vordrücken“. In unter extremen Bedingungen synthetisierten Hydridsyste-

men sollen, so die Theorie, möglichst geringe Wasserstoffabstände realisiert werden, um eine Dissoziation der H₂-Moleküle zu begünstigen und ein metallisches Untergitter aus Wasserstoffatomen zu bilden.

Im Jahre 2015 kam es zu einem ersten experimentellen Durchbruch. Einer Forschergruppe aus dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz gelang es, eine mikroskopisch kleine Probe von Schwefelwasserstoff bei 150 GPa (1,5 Millionen Bar) in eine wasserstoffreichere Struktur umzuwandeln. Diese neu gewonnene Phase zeigt eine substanzielle elektronische Zustandsdichte an der Fermi-Energie der Wasserstoffelektronen sowie starke Elektron-Phonon-Wechselwirkung. Sie wies eine hohe Sprungtemperatur von 205 K auf [1].

Diesem Durchbruch folgte ein Goldrausch aus theoretischen Arbeiten über Metallhydride mit immer höheren Wasserstoffanteilen. In den letzten Jahren konvergieren theoretische Vorhersagen auf eine exotische Untergruppe dieser Materialklasse, den Superhydriden. Diese wasserstoffreichen Systeme zeigen einige faszinierende Eigenschaften, nicht unähnlich denen von elementarem, metallischem Wasserstoff: stark verkürzte

ABB. 1 METALLHYDRIDE



Theoretische Modelle sagen für viele Hochdruckmodifikationen der Metallhydride Supraleitung oberhalb der Temperatur von flüssigem Stickstoff vorher. Yttrium-Superhydrid YH_{10} ließ sich bislang nicht herstellen.

atomare Abstände – also starke Elektron-Phonon-Wechselwirkung – und metallische Leitfähigkeit. Anfang dieses Jahres gelang es zwei Forschergruppen beinahe gleichzeitig, eine Probe eines Lanthan-Superhydrids, LaH_{10} , zu synthetisieren und Supraleitung bei Temperaturen von 250 bis 260 K nachzuweisen [2, 3].

Diese bahnbrechenden Experimente haben jedoch alle den Nachteil, dass die supraleitenden Metallhydride sich nur bei extrem hohen Drücken oberhalb von 1 Million bar und mehr als 1500 K synthetisieren lassen. Außerdem stellt sich in Experimenten heraus, dass diese vielversprechenden Systeme nur unter diesen hohen Drücken stabil sind. Eine Rückgewinnung auf Normaldruck scheint im Augenblick nicht möglich.

Eine andere Hürde muss ebenfalls noch genommen werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Handwerkzeug der Hochdruckforschung größtenteils auf zwei experimentelle Methoden begrenzt: Röntgenbeugung, die eine Untersuchung des Schwerionen-Metallgitters zulassen, sowie Messungen des makroskopischen elektrischen Widerstands der gesamten Probe. Eine Methode zur detaillierten

Untersuchung der elektronischen Eigenschaften von Wasserstoffatomen in Metallhydriden ist weitestgehend nicht verfügbar. Lokale spektroskopische Methoden befinden sich im Augenblick noch im Entwicklungsstadium.

Ein vielversprechendes Messverfahren ist beispielweise die kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR), die es erlaubt, insbesondere Wasserstoffatome zu untersuchen. In NMR-Experimenten werden Änderungen in der Resonanzfrequenz der Atomkerne gemessen, hervorgerufen durch die Zeeman-Aufspaltung in externen starken Magnetfeldern. Mit dieser Methode können mikroskopische Änderungen der elektronischen Umgebung von Wasserstoffkernen untersucht werden.

In den letzten Jahren ist es unserer Gruppe am BGI gelungen, diese Methode bei Drücken von bis zu 200 GPa zu entwickeln. Erste Experimente in Richtung supraleitende Metallhydride konnten erstmalig die Bildung des für die Supraleitung essenziellen metallischen Wasserstoffgitters in Eisenhydrid unter Drücken von 100 GPa nachweisen [4].

Zukünftige Erkenntnisse werden hoffentlich auf Systeme hindeuten, die sich bei weitaus niedrigeren Drücken und in höheren Mengen synthetisieren lassen und die bei Normaldruck stabil sind.

Literatur

- [1] A. P. Drozdov et al., *Nature* **2015**, 525, 73.
- [2] A. P. Drozdov et al., *Nature* **2019**, 569, 528.
- [3] M. Somayazulu et al., *Phys. Rev. Lett.* **2019**, 122, 027001.
- [4] T. Meier et al., *Phys. Rev. X* **2019**, 9, 031008.

Thomas Meier, BGI, Uni Bayreuth

ASTROPHYSIK

Sternenstaub in der Antarktis

Jedes Jahr rieseln einige Zehntausend Tonnen kosmischen Staubs auf die Erde. Die meisten dieser Teilchen stammen von Asteroiden und Kometen unseres Sonnensystems. Ein kleiner Teil kommt jedoch von fernen Sternen zu uns. Besonders interessant ist das darin befindliche Eisen-Isotop ^{60}Fe . Natürliche irdische Quellen gibt es nicht. Explodierende Sterne, sogenannte Supernovae, schleudern dagegen große Mengen dieses Isotops aus. Forscher der Technischen Universität München (TUM) haben kürzlich in Kooperation mit Kolleginnen und Kollegen von zwei Helmholtz-Zentren erstmals ^{60}Fe in antarktischen Schnee entdeckt.

Astronomen haben herausgefunden, dass sich unser Sonnensystem in einer Ansammlung von heißen Gaswolken, der Local Interstellar Cloud, befindet. Diese könnte durch Supernovae geschaffen worden sein. Vor etwa 40 000 Jahren ist unser Sonnensystem in eine dieser Wolken eingetreten und wird sie in einigen tausend Jahren wieder verlassen. Die ursächlichen Supernovae sind möglicherweise die Quellen des antarktischen ^{60}Fe .

D. Koll et al., *Phys. Rev. Lett.* **2019**, 123, 072701.