

SUPRALEITER

Elektronen auf der Überholspur

Normalbedingungen

Vorstoß zur Raumtemperatur

Graphen

Der magische Winkel

Cuprate

Subatomares Tempolimit



Mike Beckers
E-Mail: beckers@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
Supraleiter haben etwas Magisches. Sie sind wie ein auf sichtbare Skalen gewachsenes Stück Quantenphysik, und es wird nie langweilig, ein tiefgekühltes Exemplar über einem Magneten schweben zu sehen. Doch einige Zeit blieb es recht ruhig um die Wunderstoffe, in denen Ströme völlig ohne Widerstand fließen. Die Fortschritte hin zu immer höheren Temperaturen waren mühsam, revolutionäre theoretische Einsichten ließen auf sich warten, und radikal neue Materialklassen waren oft Zufallsfunde. Doch nun kommt neuer Schwung in die Sache. Theorie und Experiment wirken planvoller zusammen, und jüngste Entdeckungen lassen hoffen, dass es bald gelingt, die quantenmechanischen Tricks der Supraleiter zu durchschauen. Freilich ohne ihnen etwas von ihrem Zauber zu nehmen.

Hoffnungsvoll Ihr

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 30.03.2020

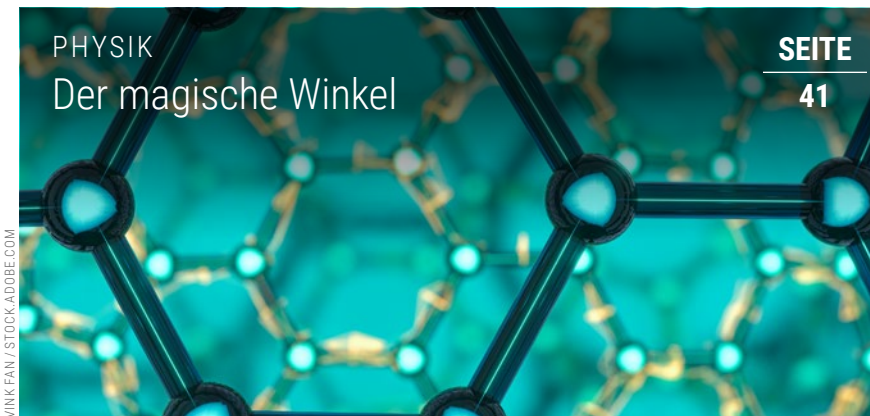
Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEUR: Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)
REDAKTIONSLEITERIN: Alina Schadwinkel
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.),
Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL: Antje Findeklee,
Dr. Michaela Maya-Mrschtik
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,
Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,
Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,
UStd-Id-Nr. DE229038528
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.),
Michaela Knappe (Digital)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser,
Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



- 04 NORMALBEDINGUNGEN
Vorstoß zur Raumtemperatur
- 16 GRUNDLAGEN
Wie Hochtemperatur-Supraleiter funktionieren
- 20 CUPRATE
Subatomares Tempolimit
- 26 PHASENÜBERGANG
Kollektive Verschränkung lässt »seltsames« Metall entstehen
- 28 WASSERSTOFF
Auf der Jagd nach dem Supermetall
- 34 MASCHINELLES LERNEN
KI entschlüsselt Hochtemperatur-Supraleiter
- 37 HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG
Forscher präsentieren neues elektrisches Wundermaterial
- 39 BESONDERER MATERIEZUSTAND
Supraleitung durch Schockfrieren
- 41 PHYSIK
Der magische Winkel
- 51 TOPOLOGISCHE ISOLATOREN
Wie Quantenphysik die Materialwissenschaft revolutioniert
- 56 MATERIALWISSENSCHAFTEN
Topologie ist überall

NORMALBEDINGUNGEN

Vorstöß zur Raumtemperatur

von Bob Henderson

Schon lange suchen Physiker nach einem Werkstoff, der seinen elektrischen Widerstand bereits bei normalen Umgebungsbedingungen verliert. Neue theoretische Ansätze und bessere Computermodelle machen Hoffnung.

Der Experimentalphysiker Maddury Somayazulu – von seinen Kollegen kurz Zulu genannt – konnte nur darauf hoffen, dass »nah dran« gut genug ist. Im Juni 2017 beugten sich er und sein Postdoc Zack Geballe am Argonne National Laboratory im US-Bundesstaat Illinois in einem mit Gerätschaften vollgestopftem Raum über ein zylindrisches Gerät: eine Diamantstempelzelle. Darin befand sich ein staubkorngroßes Stück des zu den seltenen Erden gehörenden Metalls Lanthan sowie ein wenig Wasserstoff. Theoretiker hatten vorhergesagt, dass daraus unter enormem Druck eine neuartige Substanz entstehen könnte. Der dafür nötige Wert entspricht dem

von 2,1 Millionen Atmosphären oder der Hälfte des Drucks im Zentrum der Erde und lag – und das war das Entscheidende an jenem Tag – nahe am Kapazitätslimit der Diamantstempelzelle. In dieser pressen zwei kleine Diamanten als eines der härtesten Materialien überhaupt den Inhalt zusammen. Sobald die beiden Wissenschaftler die Einstellschrauben der Zelle auf 1,7 Millionen Atmosphären drehten, spürten sie, wie diese sich festzogen. Die Diamanten waren durch den hohen Druck bereits verformt und könnten jederzeit brechen. »Wir dürfen nicht höher gehen«, entschied Somayazulu. »Lass uns hier synthetisieren und sehen, was passiert.«

Für ihr weiteres Vorgehen hatten die Wissenschaftler die Diamantstempelzelle mit Hightech-Geschützen umgeben: Zwei lange Röhren durchleuchteten die Probe mit Röntgenstrahlen, und eine An-

AUF EINEN BLICK

Der Traum vom perfekten Leiter

01 Diverse Materialien transportieren elektrischen Strom ohne Widerstand. Allerdings benötigen sie dafür extrem niedrige Temperaturen und zusätzlich häufig sehr hohen Druck.

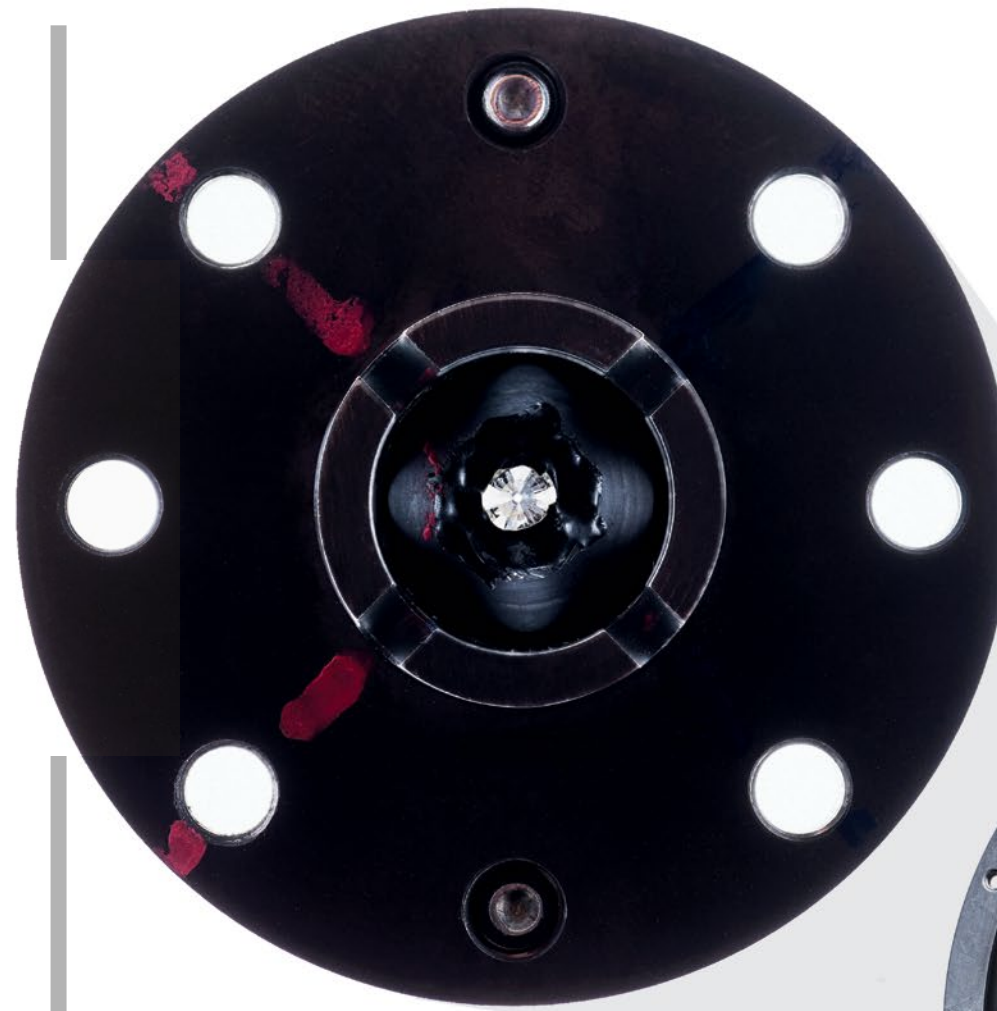
02 Supraleiter bei Normalbedingungen würden revolutionäre Anwendungen ermöglichen. Auf dem Weg dorthin mussten sich Forscher bisher vor allem auf ihre Erfahrung und Intuition verlassen.

03 Erstmals scheinen nun theoretische Methoden, experimentelles Geschick und moderne Computerverfahren planvoll zusammenzuwirken. Das hat jüngst zu Durchbrüchen geführt.

Bob Henderson hat in theoretischer Hochenergiephysik promoviert. Er lebt und arbeitet als Wissenschaftsjournalist im US-Bundesstaat New York.

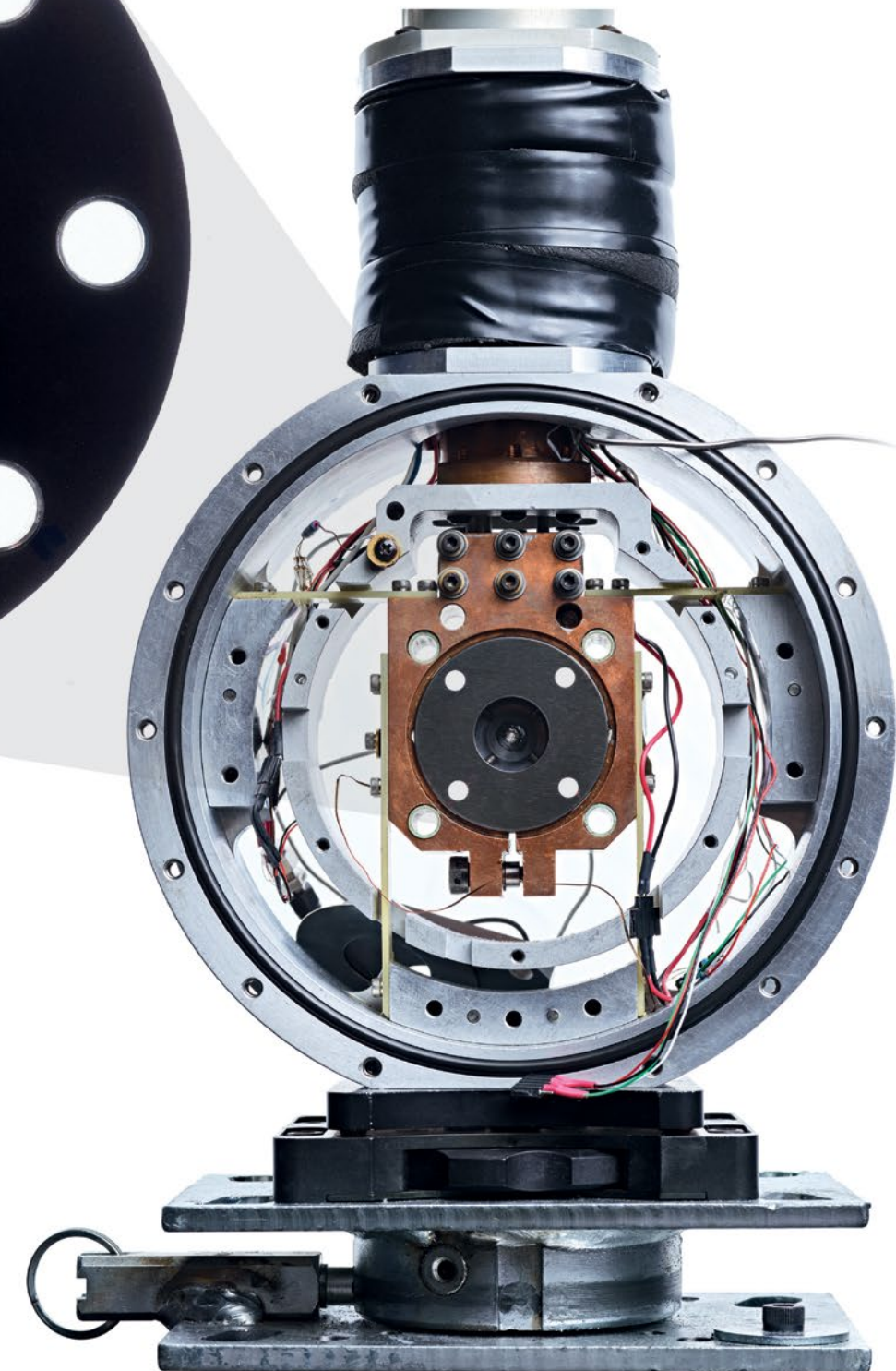
sammlung von Linsen und Spiegeln beschoss sie mit Laserlicht. Dieses sollte eine theoretisch vorhergesagte Reaktion von Lanthan und Wasserstoff in Gang setzen. Abgeschirmt außerhalb des Raums beobachteten die Physiker auf einem Computermonitor eine grafische Darstellung der mikroskopischen Struktur, erzeugt mit Hilfe der Röntgenstrahlen. Die Kurve nahm rasch die erhoffte Form an: Die Forscher hatten erfolgreich das Lanthanhydrid LaH_{10} synthetisiert! »Wir waren geradezu perplex«, erinnert sich Somayazulu, »wir mussten nicht einmal besonders viel Wärmeenergie zuführen, damit sich die Substanz bildete.« Und diese hat es in sich.

Theoretische Berechnungen und Computermodelle hatten zuvor vermuten lassen, LaH_{10} könnte ein Supraleiter sein. Solch ein Material transportiert im Gegensatz zu konventionellen Leitern elektrischen Strom völlig widerstandsfrei. Hinzu kam die Vorhersage, LaH_{10} könnte diese Eigenschaft bereits bei einer Temperatur von 280 Kelvin (etwa 7 Grad Celsius) erreichen. Das wäre ein erheblich höherer Wert als bei allen bekannten Supraleitern und nahe an normaler Raum-



Stempelzelle und Kryostat

Diamanten in einer Stempelzelle (schwarz, oben) pressen Materie extrem stark zusammen. In der Umgebung hält ein Kryostat (rechts) mit seinem metallischen Innenleben die Temperaturen niedrig.



SPENCER LOWELL; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

temperatur. Sie zu erreichen, ist das seit Langem angestrebte Ziel der Forschung an diesen Materialien. Denn für die existierenden Supraleiter sind extrem tiefe Temperaturen erforderlich. Das beschränkt ihre Anwendung auf Nischenbereiche wie Kernspintomografie und Teilchenbeschleuniger. Hier werden die Kosten der Kühlung mittels flüssigen Heliums durch die Vorteile der enorm starken Magnetfelder aufgewogen, die sich in supraleitenden Spulen produzieren lassen. Ein bei Raumtemperatur funktionierender Supraleiter wäre für viele weitere Zwecke nützlich, beispielsweise den effizienten Transport von Strom über weite Strecken, leistungsfähigere Energiespeicher sowie zahlreiche Anwendungen in der Computer- und Medizintechnik.

Zunächst entstand das Material virtuell, erst danach im Labor

Wie die Röntgenanalyse von Somayazulu und Geballe zeigte, besaß das von ihnen erzeugte LaH_{10} genau die von der Theorie vorhergesagte Struktur. »Das erschlug uns fast«, erzählt Somayazulu. Seit Mai 2019 ist er am Argonne Laboratory angestellt. Als er und seine Kollegen hier 2017

das LaH_{10} synthetisierten, war er noch für das Geophysical Laboratory der Carnegie Institution for Science in Washington tätig. Russell Hemley, sein dortiger Chef, bezeichnet LaH_{10} als »wunderschönes Beispiel für Designermaterialien«. Hemley leitete sowohl das Team, das die Substanz erschuf, als auch die Theoriegruppe, die ihre Existenz und ihre Eigenschaften vorgeschagt hatte. Er erläutert: »Wir haben das Material zunächst im Computer zusammengesetzt. Berechnungen zeigten uns dann, wo wir danach suchen sollten«, also bei welchem Druck die Forscher welche Elemente mischen mussten.

Das war das wirklich Neue an LaH_{10} . Seit einem Jahrhundert suchen Wissenschaftler nach Hochtemperatur-Supraleitern. Aber in dieser Zeit war fast jeder Durchbruch einer Mischung von Spekulation und Glück im Laboratorium zu verdanken, wo Forscher verschiedenste Ingredienzen und Prozesse ausprobierten.

Die Entdeckung neuartiger supraleitender Substanzen kam bislang stets vor der Theorie, die das Phänomen bei ihnen erklärte. Das ist seit 1911 so, als der Effekt zum ersten Mal überhaupt beobachtet wurde. Damals stellte der niederländi-

sche Physiker Heike Kamerlingh Onnes fest, dass der elektrische Widerstand von Quecksilber verschwand, als er es in flüssiges Helium mit einer Temperatur von vier Kelvin tauchte. Obwohl das Verhalten überraschend häufig auftritt und viele Materialien es unterhalb von zehn Kelvin zeigen, blieb es rätselhaft. Erst die in den 1920er Jahren entwickelte Quantenmechanik bot eine Erklärung. Diese basiert darauf, dass die für den elektrischen Strom verantwortlichen Elektronen sowohl lokalisierte Teilchen als auch ausgehende Wellen sind – wie alle subatomaren Objekte in der Quantenmechanik. Darauf aufbauend veröffentlichten John Bardeen, Leon N. Cooper und John Robert Schrieffer 1957 die nach ihren Initialen benannte BCS-Theorie, mit der sie die Physik der Supraleitung beschrieben.

Alles geht von der prinzipiellen Vorstellung der Forscher vom elektrischen Strom aus: Im Inneren eines Metalls formen positiv geladene Ionen (die Atomkerne plus einige gebundene Elektronen) ein Kristallgitter, also eine regelmäßige Struktur. Innerhalb dieser befindet sich ein See aus freien Elektronen. Bei Anlegen einer Spannung bewegen sie sich