

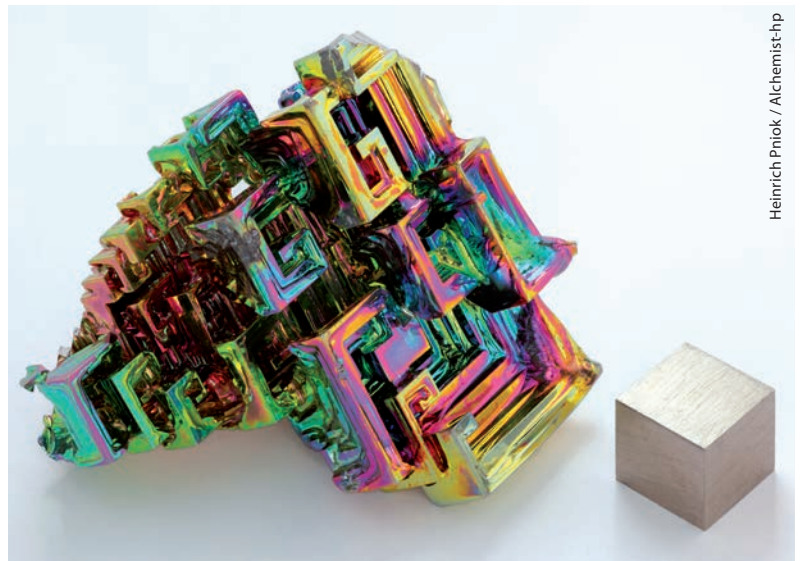
■ Supraleitung auf Diät

Der Nachweis von Supraleitung in Wismut stellt die Theorie vor neue Herausforderungen.

Vielteilchensysteme wechselwirkender Quantenteilchen neigen zu exotischen Effekten. Ein eindrucksvolles Beispiel ist die Supraleitung, bei der bestimmte Materialien unterhalb einer kritischen Temperatur T_c ihren elektrischen Widerstand verlieren. Für die ersten entdeckten supraleitenden Materialien lag T_c bei einigen Kelvin. Ihr Verhalten ließ sich durch die Bardeen-Cooper-Schrieffer-Theorie (BCS) erklären [1], die aber bei den 1986 entdeckten Hochtemperatur-Supraleitern auf Kupferoxid-Basis (T_c bis 160 K) versagte. Zwar bleibt die BCS-Theorie für konventionelle Niedrigtemperatur-Supraleiter weiterhin gültig, doch die kürzliche Entdeckung der Supraleitung in Wismut ($T_c = 0,53$ mK) stellt unser fundamentales Verständnis des Phänomens Supraleitung dennoch infrage [2]. Insbesondere ist die geringe Ladungsträgerdichte in Wismut eine ernsthafte Herausforderung für die theoretische Beschreibung.

Die BCS-Theorie erklärt, wie ein Bose-Einstein-Kondensat aus Elektronen zustande kommt, die als Fermionen normalerweise unter Beachtung des Pauli-Prinzips die niedrigsten Energiezustände besetzen. Die Fermi-Energie E_F markiert die Grenze zwischen besetzten und unbesetzten Zuständen. Wirkt nun eine schwache anziehende Kraft zwischen den Elektronen des Systems, bilden die Elektronen mit Energien nahe E_F Cooper-Paare. Diese verhalten sich effektiv wie Bosonen, sodass sich ein Bose-Einstein-Kondensat bildet.

Doch nicht nur ein geringer Teil der Elektronen bildet die Cooper-Paare, sondern alle Elektronen tragen zur Supraleitung bei. Daher stimmt die Zustandsdichte der supraleitenden Elektronen (Suprafluidität) etwa mit der Zustandsdichte aller Elektronen überein. Für viele konventionelle Supraleiter ließ sich dies experimentell bestätigen. Eine wichtige Voraussetzung der BCS-Theorie ist die anziehende



Heinrich Priok / Alchemist-hp

Wismut ist ein sprödes Metall mit weißer, silber-hellvioletter Färbung. Höhenvariationen der Oxidschicht auf der Kristalloberfläche führen dazu, dass reflektiertes Licht unterschiedlicher Wellenlänge interferiert und sich ein Regenbogen-

spektrum zeigt. Kein anderes Metall besitzt einen stärkeren natürlichen Diamagnetismus als Wismut, weil die effektive Masse der Elektronen extrem klein ist. Im supraleitenden Zustand wird Wismut zum idealen Diamagneten.

Wechselwirkung zwischen den Elektronen durch den Austausch von Phononen mit einer charakteristischen Frequenz ω_D , welche die adiabatische Retardierungsbedingung $\omega_D \ll E_F$ erfüllt. Dadurch weichen sich die Elektronen eines Cooper-Paares aus: Ein Abstand d trennt sie voneinander, der um den Faktor $E_F/\omega_D \gg 1$ größer ist als der Gitterabstand. Folglich spielt die Coulomb-Abstoßung effektiv nur eine kleine Rolle. Diese Situation liegt in beinahe allen konventionellen Supraleitern vor und scheint eine universelle Eigenschaft zu sein.

Supraleiter besitzen außerdem etwa ein leitendes Elektron pro Atom. Mehrere Jahrzehnte lang wurden supraleitende Halbleiter und Halbmetalle gesucht, die mit deutlich weniger Elektronen auskommen und die Retardierungsbedingung nicht erfüllen sollten. Für lange Zeit hielt Strontiumtitanat (SrTiO_3) den Rekord der geringsten Ladungsträgerdichte. Die freien Ladungsträger in diesem Material entstehen aus Sauerstoff-Defekten oder durch die Dotierung mit den Elementen Lanthan oder Niob. Supraleitung tritt typischer-

weise bei Temperaturen unterhalb einiger hundert Millikelvin auf [3]. Die Abhängigkeit der kritischen Temperatur von der Dichte der freien Ladungsträger hat die Form eines Doms, der erstaunlich geringe Dichten von $n_{3D} = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ einschließen kann. Die zugehörige Fermi-Energie beträgt etwa ein Millielektronenvolt [4], sodass $\omega_D \ll E_F$ nicht erfüllt ist. Im konventionellen Sinne ist die BCS-Theorie nicht anwendbar, sodass die Supraleitung in dotiertem SrTiO_3 eine andere Erklärung erfordert.

Aus Indien kommt nun eine weitere, ähnlich überraschende Entdeckung. Der Gruppe von Srinivasan Ramakrishnan vom Tata-Institut in Mumbai ist es gelungen, Supraleitung unterhalb einer kritischen Temperatur von nur 0,53 mK in rhomboedrischem Wismut nachzuweisen (Abb. 1). Dabei ist die effektive Masse der Ladungsträger mit $m_{\text{eff}} = 10^{-3} m_e$ winzig klein und die Ladungsträgerdichte des Systems mit $n_{3D} = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ extrem gering [2]. Dies entspricht einer Konzentration von nur einem Ladungsträger pro 100 000 Wismut-Atomen – ein neuer Rekord für die

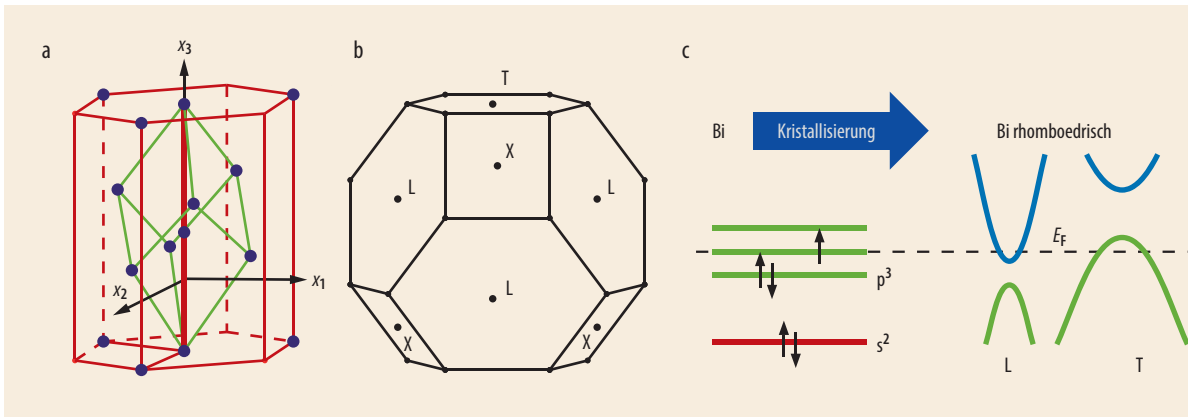


Abb. 1 Wismut kristallisiert in einer rhomboedrischen Struktur und gehört zur Raumgruppe R3m sowie zur hexagonalen Einheitszelle (a). Die Vektoren x_1 , x_2 und x_3 definieren das rhomboedrische und hexagonale Gitter, aus dem sich die erste Brillouin-Zone ergibt (b). Das Ele-

ment Wismut gehört zur Vanadium-Gruppe. In seinem Energiespektrum ist die p-Schale halb besetzt (c). Durch Dimerisierung öffnet sich eine energetisch günstige Bandlücke, die das System erst zu einem Isolator macht. Die tatsächliche Kristallstruktur und Elektronen-

struktur ergeben sich durch geringe Verzerrung des Kristallgitters, welche das Leitungs- und Valenzband hybridisiert und wodurch das System eine strukturelle Transformation durchläuft, was seine Energie weiter verringert.

geringste Ladungsträgerdichte in einem Supraleiter. Folglich bilden hier selbst extrem weit voneinander entfernte Elektronen Cooper-Paare. Weshalb dies möglich ist, gilt es zu klären.

Bei der Beschreibung von Supraleitung in dotierten Halbleitern und auch in Wismut gibt es konzeptionelle Probleme, die das Zusammenspiel der anziehenden Wechselwirkung und der Coulomb-Abstoßung betreffen. Im nicht-adiabatischen Fall $\omega_D/E_F \gg 1$, der auch auf Wismut zutrifft, spüren die Elektronen eines Cooper-Paares gleichzeitig die lokale Gitterauslenkung des Phonons und die Coulomb-Abstoßung. Daher existieren die Paare nur dann, wenn die anziehende Wechselwirkung die Abstoßung übertrifft. Wie dies genau garantiert wird und ob tatsächlich die Phononen die Elektronen zusammenhalten, ist ebenfalls offen.

Mathematisch sieht das Problem folgendermaßen aus: Die Migdal-Eliashberg-Theorie der Elektron-Phonon-Wechselwirkung rechtfertigt die Anwendung der BCS-Theorie bei konventionellen Supraleitern, in denen die adiabatische Bedingung $\omega_D/E_F \ll 1$ erfüllt ist. Die sog. „Crossing Diagrams“ lassen sich beim Betrachten der Wechselwirkung vernachlässigen [5, 6]. Im nicht-adiabatischen Fall $\omega_D/E_F \geq 1$ ist das nicht möglich. Für den Spezialfall $T_c \ll E_F$ gibt es

jedoch die logarithmische Näherung $T_c \approx E_F \exp(-1/\lambda)$, wobei λ eine dimensionslose Konstante ist [7]. Ob dieser Ansatz für Wismut möglich ist, bleibt zu prüfen.

Im Falle von Wismut bietet es sich vielleicht an, den Übergang zum supraleitenden Zustand nicht durch die BCS-Theorie zu beschreiben, sondern durch ein Bose-Einstein-Kondensat, bei dem die Paarbildung schon bei sehr viel höheren Temperaturen als T_c denkbar ist [8]. Für Oxid-Oberflächen wurden bereits Bose-Einstein-Kondensate beobachtet. Allerdings gilt dies nicht für SrTiO_3 und viele andere dotierte Halbleiter, insbesondere nicht für Supraleiter mit einer geringen Ladungsträgerdichte.

Eine weitere Herausforderung für die Theorie ist die starke Spin-Bahn-Kopplung in Wismut. Dadurch ist es schwierig, Cooper-Paare als reine Spin-Singulets beziehungsweise reine Spin-Triplets zu klassifizieren. Weil sich Wismut wie ein Halbmetall mit einem elektronenartigen und einem löcherartigen Band am Fermi-Niveau verhält, muss die BCS-Theorie für Multi-Bändersysteme benutzt werden. Dazu lassen sich die elektronischen Eigenschaften von Wismut bei niedrigen Energien durch einen effektiven Hamilton-Operator ausdrücken, der sich aus der $k \cdot p$ -Näherung der Schrödinger-Gleichung für ein System

mit starker Spin-Bahn-Kopplung herleitet [9].

Wie die Supraleitung in Systemen wie Wismut zustande kommt, bleibt also ein interessantes theoretisches Problem. Dessen Lösung würde helfen, den Ursprung der Supraleitung in dotierten Halbleitern zu erklären und das Phänomen der Supraleitung im Allgemeinen besser zu verstehen – insbesondere wie sich die kritische Temperatur beeinflussen lässt.

Felix Ahn und Ilya Eremin

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper und J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **106**, 162 (1957)
- [2] Om Prakash, Anil Kumar, A. Thamizhavel und S. Ramakrishnan, Science (2017), doi: 10.1126/science.aaf8227
- [3] C. Koonce et al., Phys. Rev. **163**, 380 (1967)
- [4] X. Lin, Z. Zhu, B. Fauque und K. Behnia, Phys. Rev. X **3**, 021002 (2013)
- [5] A. B. Migdal, Sov. Phys. JETP **7**, 996 (1958)
- [6] G. M. Eliashberg, Sov. Phys. JETP **11**, 696 (1960)
- [7] L. P. Gor'kov, PNAS **113**, 4646 (2016) und darin enthaltene Referenzen
- [8] D. M. Eagles, Phys. Rev. **186**, 456 (1969)
- [9] Y. Fuseya, M. Ogata und H. Fukuyama, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 012001 (2015)

Felix Ahn, M.Sc., und Prof. Dr. Ilya Eremin, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Theoretische Physik III, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum