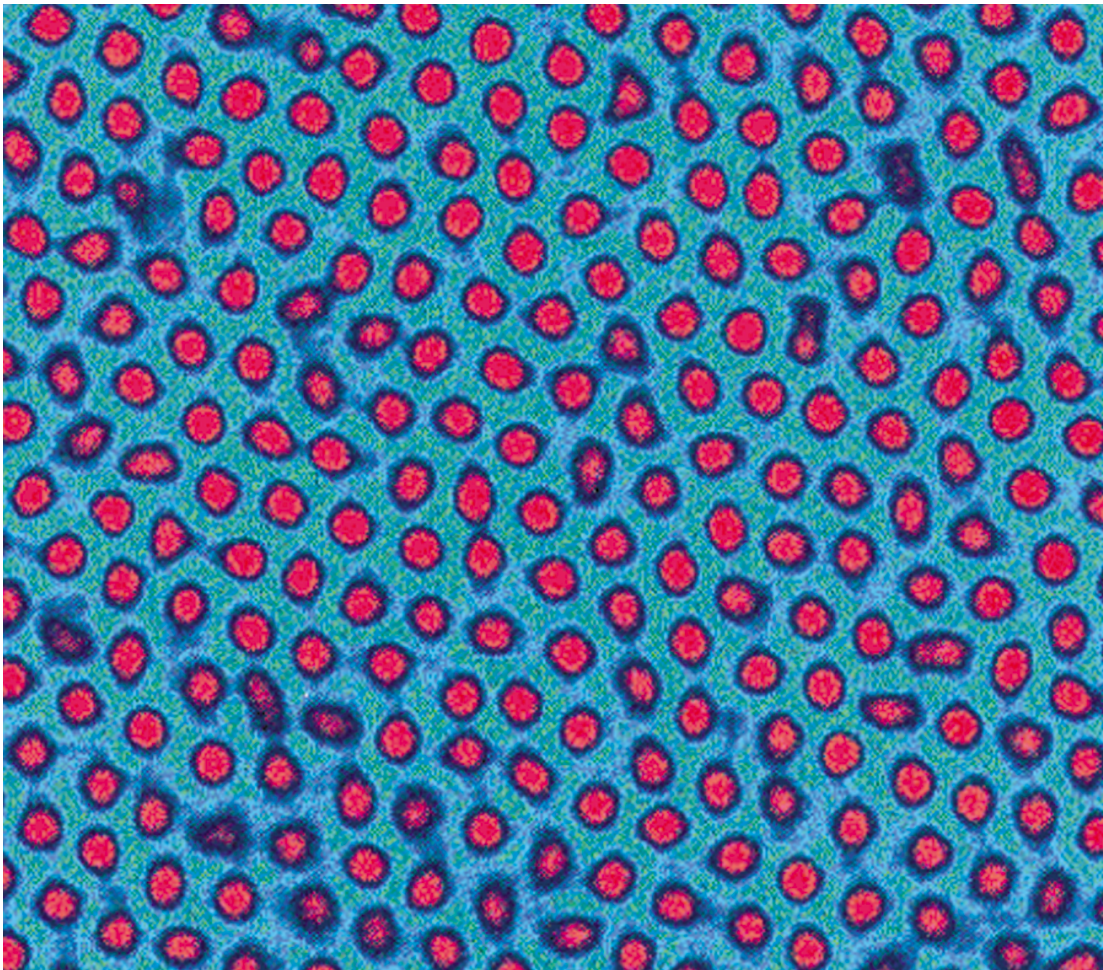


SUPRALEITUNG UND SUPRAFLUIDITÄT

Zum Nobelpreis 2003

DIE KÖNIGLICH SCHWEDISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN BESCHLOSS, DEN NOBELPREIS DES JAHRES 2003 IN PHYSIK „FÜR BAHNBRECHENDE ARBEITEN IN DER THEORIE DER SUPRALEITER UND SUPRAFLÜSSIGKEITEN“ GEMEINSAM ZU VERLEIHEN. HIER ERFAHREN SIE, WORUM ES BEI DER SUPRALEITUNG UND DER SUPRAFLUIDITÄT EIGENTLICH GEHT



Abrikosov-Flussliniengitter in einem Typ-2-Supraleiter

VON DIETRICH EINZEL

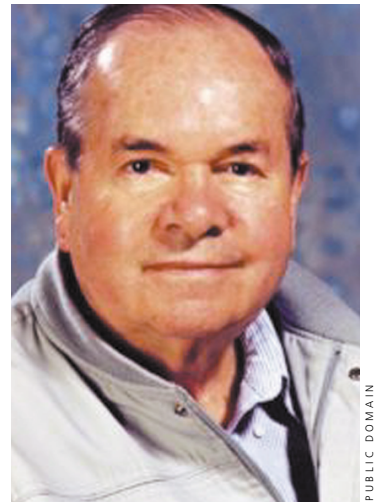
Als ich noch ein ganz junger Physik-Student war, sagte John Wilkins, ein berühmter Theoretiker an der Cornell-Universität zu mir „Hey, Dietrich, if you want to get famous one day,

you've got to predict something!“ Die augenzwinkernde Botschaft war klar: richtig berühmt ist ein Physiker erst dann, wenn ein von ihm vorhergesagter Effekt später seinen Namen trägt. Die geniale Gabe, etwas vorherzusagen, was sich dann in unzähligen Experimenten als richtig erweist, vereint die drei Theoretiker, welche sich den diesjährigen Physik-Nobelpreis teilen. Die Königliche Schwedische Akademie der Wissenschaften, Stockholm, verlieh den mit umgerechnet 1,13 Millionen Euro dotierten Preis an die russischen Physiker Alexei A. Abrikosov (geb. 1928, tätig am Argonne National Laboratory) und Vitalii L. Ginzburg (geb. 1916, tätig am P. N. Lebedev Physical Institute, Moskau) und den Engländer Anthony J. Leggett (geb. 1938, tätig an der University of Illinois at Urbana-Champaign) für ihr Lebenswerk im Dienste der Erforschung der Supraleitung und der Suprafluidität.

Der Bitte um einige Anmerkungen zum diesjährigen Physik-Nobelpreis bin ich besonders gern gefolgt. Zum einen, weil das Arbeitsgebiet der Nobelpreisträger identisch ist mit einer der wichtigen und traditionellen Forschungsausrichtungen des Walther-Meißner-Instituts – schließlich war Walther Meißner (Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften von 1946 bis 1950) ein Mentor der Tieftemperatur- und Supraleitungsphysik in Deutschland. Zum anderen, weil im Jahre 1978 am Walther-Meißner-Institut – in der sog. Bayerischen Millimühle – die ersten Experimente zur Suprafluidität von flüssigem ^3He (bei weniger als zwei Tausendstel Grad oberhalb des absoluten Temperatur-Nullpunkts) in Deutschland durchgeführt, und u. a. mit der Theorie von Tony Leggett interpretiert wurden. Zum Dritten, weil Prof. V. L. Ginzburg, der im Jahre 2000 zum ersten Mal das Walther-Meißner-Institut

besuchte, auf Initiative desselben mit dem Humboldt-Forschungspreis des Jahres 2000 ausgezeichnet wurde. Und nicht zuletzt einfach deshalb, weil die drei Laureaten für mich persönlich schon immer Lehrer und Vorbilder waren. Genug Motivation also, um einen Erklärungsversuch zu unternehmen, worum es bei der Supraleitung und der Suprafluidität eigentlich geht.

Die Entdeckung der Supraleitung in Metallen (Heike Kamerlingh-Onnes, 1911) und Suprafluidität von flüssigem Helium (^4He : Allen, Misener und Kapitza, 1938, ^3He : Lee, Osheroff und Richardson, 1971) konfrontierte die Fachwelt mit zwei Phänomenen, deren Gemeinsamkeiten man auf den ersten Blick nicht ohne Weiteres erkennen konnte. Bedeutet Supraleitung doch, dass Metall-Elektronen unterhalb einer bestimmten, meist sehr tiefen (Sprung-) Temperatur T_c ihren elektrischen Widerstand völlig verlieren, Suprafluidität dagegen, dass eine Flüssigkeit, gebildet aus elektrisch neutralen Atomen der Helium-Isotope ^4He oder ^3He , ihre Fähigkeit verliert, sich an den Wänden der Strömungskanäle mittels ihrer Zähigkeit (Viskosität) zu reiben. Es ist im Übrigen bemerkenswert genug, dass sich Helium beim Abkühlen nicht, wie fast alle anderen Substanzen, verfestigt, sondern bis zum absoluten Temperaturnullpunkt flüssig bleibt. Da dieser Umstand durch die Gesetze der Quantenphysik begründet ist, bezeichnet man Helium bei tiefsten Temperaturen auch als Quantenflüssigkeit.



Prof. Alexei A. Abrikosov

Sowohl bei der Supraleitung als auch bei der Suprafluidität hat man es mit der verlustfreien Strömung der jeweiligen Teilchensorte unterhalb der Temperatur T_c zu tun. Es zeigte sich erst im Laufe der Jahrzehnte, dass das Phänomen mit den Methoden der in den 1930er Jahren entwickelten Quantenphysik gedeutet werden konnte. Normalerweise



Prof. Vitalii L. Ginzburg

treten quantenphysikalische Phänomene bei mikroskopischen Objekten wie Atomen und Molekülen auf. Das Faszinierende an der Supraleitung und der Suprafluidität als quantenphysikalisches Phänomen ist ihr Auftreten auf makroskopischer Skala, d. h. 10^{23} Teilchen verhalten sich wie ein einziges Atom oder Molekül. Dies ist die wesentliche Aussage der ersten phänomenologischen Theorie der Supraleitung, formuliert von Fritz und Heinz London (1935) und Max von Laue (1938). Der Unterschied zwischen Supraleitung und Suprafluidität liegt somit nur in der Teilchensorte (geladen, ungeladen) und dem damit verknüpften (Widerstands- oder Reibungs-) Verhalten oberhalb von T_c .

Da Elektronen von Magnetfeldern auf kreisförmige Bahnen gezwungen werden, und umgekehrt Elektronen auf kreisförmigen Bahnen Magnetfelder erzeugen, kann man sich gut vorstellen, dass supraleitende Elektronen ein von außen angelegtes Magnetfeld mit einem Gegenfeld kompensieren, und somit dasselbe abschirmen oder sogar verdrängen. Es war Walther Meißner, der zusammen mit Robert Ochsenfeld diesen Magnetfeld-Verdrängungs-Effekt im Jahre 1933 in Berlin entdeckte. Er ist – den Entdeckern zu Ehren – unter dem Namen Meißner-Ochsenfeld-Effekt bekannt. Wir wissen heute, dass Supraleiter je nach ihrer Art der Feldverdrängung in zwei Klassen eingeteilt werden können: eine erste (Typ 1), in dem der Meißner-Ochsenfeld Effekt wirkt, d. h. in der das Innere des Supraleiters (bis auf eine kleine Randschicht) feldfrei ist, und eine zweite (Typ 2), in der das Feld in den Supraleiter oberhalb eines gewissen unteren Schwellenwertes eindringen kann und zwar in Form von sehr dünnen sogenannten Fluss-Fäden oder Fluss-Schläuchen. Die Dichte dieser Flussfäden wächst mit der



Prof. Anthony J. Leggett

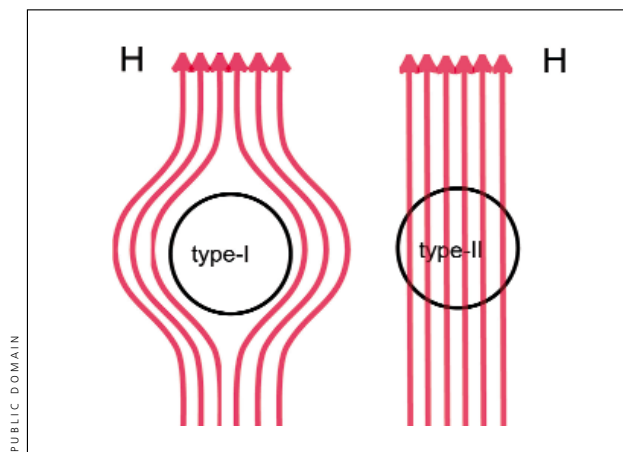
PUBLIC DOMAIN

Magnetfeldstärke an und oberhalb einer kritischen Feldstärke bricht die Supraleitung zusammen, nämlich genau dann, wenn die Flussfäden überlappen und somit keine supraleitenden Bereiche mehr übrigbleiben.

Ein prinzipielles theoretisches Verständnis all dieser Phänomene wurde durch eine zweite phänomenologische Theorie der Supraleitung von V. L. Ginzburg und L. D. Landau aus dem Jahr 1950 ermöglicht. In dieser Zeit galten Untersuchungen fast ausschließlich Supraleitern vom Typ 1. Die Ginzburg-Landau-Theorie vereinigt thermodynamische und elektrodynamische Aspekte der theoreti-

schen Beschreibung in so allgemeiner Form, dass sie heute noch bei der Analyse neu entdeckter Supraleiter, aber auch anderer Phasenübergänge angewendet wird und auf diese Weise im Lauf der Jahrzehnte Tausende von Zitierungen erfahren hat. Im Jahr 1956 gelang A. A. Abrikosov die Pioniertat, für Typ-2-Supraleiter die Existenz von Flusslinien sowie deren Anordnung in einem regelmäßigen (Dreiecks-) Gitter mit Hilfe der Ginzburg-Landau-Theorie vorherzusagen. Da diese Supraleiter Magnetfelder im Inneren tolerieren, können die kritischen Feldstärken unter Umständen sehr hoch sein. Abrikosovs Name ist somit auch mit einer Klasse von Supraleitern verknüpft, die für die technische Anwendung bis heute von enormer Bedeutung sind. Ihm zu Ehren werden die Flusslinien heute auch als Abrikosov-Vortices und deren regelmäßige Anordnung als Abrikosov-Gitter bezeichnet.

Eine wichtige Gemeinsamkeit zwischen Elektronen und ^3He -Atomen besteht darin, dass beide Teilchen die Hälfte des elementaren Eigendrehimpulses, den sogenannten Spin, aufweisen, der z. B. dem Isotop ^4He fehlt. Zur besseren Unterscheidung nennt man die Spin- $1/2$ -Teilchen (oder allgemeiner Teilchen mit halbzahligem Spin) Fermionen und die Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen. Während Bosonen in beliebiger großer Zahl einen Quantenzustand gegebener Energie besetzen können, ist das für Fermionen nicht möglich. Dies wird durch das Paulische Ausschlussprinzip verhindert, welches besagt, dass nur jeweils ein einziges Fermion einen durch Energie und Spin charakterisierten Quantenzustand besetzen kann. Entsprechend versteht man heute die Kondensation einer makroskopischen Zahl von ^4He -Atomen bei tiefen Temperaturen in den Zustand niedrigster Energie (die sog. Bose-Einstein-



Zur Magnetfeldverdrängung in Typ-1 und Typ-2-Supraleitern

Kondensation) als physikalische Ursache für die Suprafluidität von ^4He , weil sich diese makroskopische Zahl von Atomen wie ein einziges quantenmechanisches Molekül verhält. Eine solche Kondensation ist für Fermionen wegen des Pauliprinzip von Vorneherein ausgeschlossen.

Die tiefere Einsicht in den zur Bose-Einstein-Kondensation alternativen Mechanismus, der zur Supraleitung führt, ließ deshalb nach der Entdeckung durch Kamerlingh-Onnes mehr als 50 Jahre auf sich warten. Sie wurde schließlich in der legendären Arbeit von Barden, Cooper und Schrieffer (BCS) im Jahre 1957 formuliert. Die geniale Idee von BCS lag in der Annahme, dass sich die Elektronen zu

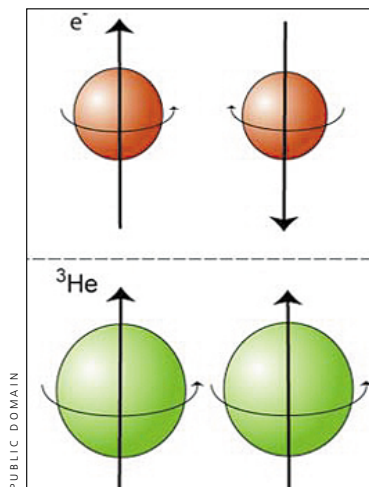
Paaren, den sogenannten Cooper-Paaren verbinden, und auf diese Weise, gewissermaßen als Pseudo-Bosonen unter Umgehung des Pauliprinzipis kondensieren können. Dies hängt damit zusammen, dass sich die Spins der Paar-Partner im einfachsten Fall zum Gesamtspin $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$ kombinieren können – man spricht dann von Spin-Singulett-Paarung. (Es sei vorsichtshalber darauf hingewiesen, dass die zur Supraleitung führende Paarformation keine wirkliche Bose-Einstein-Kondensation ist). Die Arbeit von BCS wurde im Jahre 1972 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Ein moderner Zugang zu den Phänomenen Supraleitung und (fermionischer) Suprafluidität sollte nicht nur die Cooper-Paarung von Elektronen und neutralen Fermionen auf einer einheitlichen Stufe behandeln, sondern auch die Möglichkeit zur Paarung der Fermionen zum Gesamtspin $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ einschließen, die sogenannte Spin-Triplett-Paarung. In den 1960er Jahren publizierte Tony Leggett eine Theorie paarkorrelierter Fermisysteme, welche die Möglichkeit der Triplett-Paarung explizit einschloss. Es war zu dem Zeitpunkt noch nicht klar, dass die experimentelle Verifizierung des Phänomens trotz großer Fortschritte in der Kühltchnik noch etliche Jahre auf sich warten lassen würde. Im Jahr 1971 war es dann soweit: die Suprafluidität von ^3He wurde von Lee, Osheroff und Richardson an der Cornell-Universität entdeckt (Nobelpreis 1996). Kurz danach erwiesen sich die Vorhersagen von Leggett als goldrichtig – er konnte auf Grund seiner sorgfältigen Vorarbeit in wenigen Monaten die ganze Fülle von experimentellen Beobachtungen erklären.

Die in der Literatur der folgenden Jahre zelebrierte Leggett-Theorie hatte aber noch andere Auswirkungen. Sie war die erste Theorie für

etwas, was die Theoretiker heute als unkonventionelle Supraleitung bezeichnen würden, d. h. metallische supraleitende Systeme, in denen Cooperpaare Strukturmerkmale der Paarung im superfluiden ^3He haben. Inzwischen sind nämlich viele neue Supraleiter entdeckt worden die man als unkonventionell einordnet. Darunter sind unter anderem Supraleiter mit Elektronen, deren scheinbare Masse das Tausendfache der normalen Elektronenmasse beträgt (ein Paradoxon, dass solch schwere und somit besonders langsame Elektronen supraleitend werden können!), weiterhin insbesondere die im Jahre 1986 von Georg Bednorz und Karl-Alex Müller entdeckten Hoch- T_c -Supraleiter (Nobelpreis 1987), ferner organische Supraleiter und einige mehr. All diese Systeme bilden im Magnetfeld Abrikosov-Vortices aus (nicht immer auf einem Dreiecks-, sondern manchmal auf einem Quadrat-Gitter) und sie werden in der Sprache der Ginzburg-Landau- und der Leggett-Theorie beschrieben.

Man erkennt somit, was die drei Laureaten verbindet: ihre Theorien beschränken sich nicht nur auf ein einziges System – Metall oder Quantenflüssigkeit – sondern lassen sich, gewissermaßen systemübergreifend, auf eine größere Klasse von supraleitenden und superfluiden Substanzen anwenden. In diesem Sinne hat das Nobel-Komitee mit der Wahl der Professoren Abrikosov, Ginzburg und Leggett eine geniale Entscheidung getroffen, die unserem nicht immer einfach zu vermittelnden aber faszinierenden Arbeitsgebiet sicher enormen Auftrieb verschaffen wird. Es bleibt zu wünschen, dass dies auch eine gewisse katalysierende Wirkung für unseren wissenschaftlichen Nachwuchs bei der Themawahl für zukünftige Diplom- und Doktorarbeiten hat.



Zur Spin-Singulett- und -Triplett-Paarung