

Symmetriebrechung und Quantenflüssigkeiten

Physik-Nobelpreis für Theorien zu Supraleitern und Supraflüssigkeiten

Rudolf P. Hübener, Mario Liu und Nils Schopohl

Die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften vergibt in diesem Jahr den Physik-Nobelpreis zu gleichen Teilen an Alexei A. Abrikosov (75), Vitaly L. Ginzburg (87) und Anthony J. Leggett (65) für ihre „bahnbrechenden Beiträge zur Theorie der Supraleiter und Supraflüssigkeiten“. Die von den Preisträgern aufgedeckten kollektiven Quanteneffekte in der kondensierten Materie haben die Tieftemperaturphysik in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts revolutioniert.

Bekanntlich ist in Supraleitern unterhalb einer kritischen Temperatur der elektrische Widerstand gleich null. Dieser spektakuläre Effekt zeigt sich in vielen Metallen und Legierungen. Die höchsten Werte der kritischen Temperatur wurden in oxidischen Verbindungen, den so genannten Hochtemperatur-Supraleitern, gefunden. Der heutige Rekordwert beträgt hier 164 Kelvin. Die Hochtemperatur-Supraleiter wurden von J. Georg Bednorz und Karl Alex Müller 1986 entdeckt, wofür beide schon 1987 den Physik-Nobelpreis erhielten. Neben dem Verschwinden des elektrischen Widerstands zeigen Supraleiter zusätzlich den so genannten Meissner-Effekt: Unterhalb eines kritischen Magnetfelds verdrängen sie das magnetische Feld vollständig aus ihrem Inneren.

Das Analogon zur Supraleitung der Elektronen im Festkörper ist das beim Edelgas Helium bei tiefen Temperaturen zu beobachtende Phänomen der Supraflüssigkeit, ein Zustand mit verschwindend kleinem Strömungswiderstand und fantastisch großer Wärmeleitfähigkeit. Während die Bose-Flüssigkeit ^4He etwa bei 2 Kelvin supraflüssig wird, ist dies bei der Fermi-Flüssigkeit ^3He erst bei einer noch etwa 1000mal tieferen Temperatur der Fall. Das liegt daran, dass die ^3He -Atome im supraflüssigen Zustand, ähnlich wie die Elektronen im Supraleiter, ein korreliertes System aus Cooper-Paaren bilden.

Das Verschwinden des Strö-

mungswiderstandes für den supraflüssigen Anteil im Helium hat zur Folge, dass sich eine Störung in der Temperatur „schallartig“ ausbreitet. In den beiden entdeckten supraflüssigen Phasen von ^3He , der A-Phase und der B-Phase, gibt es darüber hinaus noch eine kollektive Dynamik der Kernspins, mit vollkommen ungewohnten Signalen in der kernmagnetischen Resonanz (NMR) weit weg von der Larmor-Frequenz.

Ginzburg-Landau-Theorie

Ein wichtiger Meilenstein in der Theorie der kondensierten Materie ist die von Lew D. Landau im Jahr 1937 publizierte Idee, Gruppentheorie und Thermodynamik zu vereinen: Phasenübergänge 2. Art sind das Resultat von Symmetriebrechung. Ohne ein äußeres Feld ist der Paramagnet isotrop, wohingegen die Magnetisierung bei einem Ferromagneten eine Richtung gegenüber allen anderen auszeichnet. In der geordneten ferromagnetischen Phase ist also die Isotropie gebrochen. Und da diese Symmetrie-Brechung nicht durch ein äußeres Feld geschieht, ist sie „spontan“.

Ginzburgs revolutionäre Einsicht und sein bahnbrechender Beitrag zur Beschreibung von Supraleitern nimmt als Ausgangspunkt die Landausche Idee der Symmetriebrechung und vereinigt sie mit der früher von Fritz London vorgeschlagenen Idee einer makroskopischen quantenmechanischen Wellenfunktion für Supraleiter und Supraflüssigkeiten. Obwohl alle Systeme im Prinzip durch Wellenfunktionen beschrieben werden, gibt es bei Supraleitern und Supraflüssigkeiten eine makroskopische Wellenfunktion Ψ , die analog einer Magnetisierung die Symmetrie der „Phaseninvarianz“ spontan bricht.

Die Implementierung dieser Einsicht ist die im Jahr 1950 von Ginzburg und Landau publizierte berühmte Arbeit zur Theorie der Supraleitung. Die Autoren identifizieren die makroskopische Wellenfunktion, $\Psi = |\Psi|e^{i\phi}$, als einen skalaren aber komplexen Ordnungspa-

rameter, wobei die Phase ϕ die zu der Richtung der Magnetisierung analoge, „weiche“ Größe ist, die sich spontan einstellt. Konstruiert man nun den allgemeinsten Ausdruck für die freie Energie F – als Funktion von Ψ , der Temperatur und dem Magnetfeld \mathbf{B} – und for-



Vitaly L. Ginzburg

dert, dass F im Gleichgewicht minimal bezüglich Ψ und \mathbf{B} ist, erhält man als Stationaritätsbedingungen zwei einfache Differential-Gleichungen, die das Verhalten von Ψ und \mathbf{B} festlegen.

Die Nützlichkeit und Tragweite dieser Gleichungen stehen heute außer Frage. Während sie allgemein als Ginzburg-Landau-Theorie (GL) bekannt sind, hat Ginzburg seine Gleichungen immer nur als Ψ -Theorie bezeichnet. Wichtige Probleme, die durch die GL-Theorie erklärt werden konnten, waren die positive Grenzflächen-Energie zwischen normal-leitenden und supraleitenden Bereichen, das kritische Magnetfeld dünner supraleitender Schichten sowie die maximale kritische elektrische Stromdichte.

Vitaly L. Ginzburg ist zweifellos eine der ganz großen Persönlichkeiten in der Theorie der kondensierten Materie. Seine anderen Arbeiten zur Astrophysik, zur Quantenelektrodynamik, zur Synchrotron- und

Prof. Dr. Rudolf P. Hübener, Prof. Dr. Mario Liu und Prof. Dr. Nils Schopohl, Eberhard-Karls Universität Tübingen, Fakultät für Mathematik und Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen

Übergangsstrahlung, zur Plasma-physik und zur Elektrodynamik der Kontinua sind ebenfalls Legende. Wichtige Arbeiten wurden von Ginzburg übrigens in den frühen 1940er Jahren in Sverdlowsk (heute: Jekatarinburg) durchgeführt, nachdem seine Gruppe aus Moskau kriegsbedingt evakuiert worden war.

Magnetische Flusslinien

Als junger theoretischer Physiker am Moskauer Institut für Physikalische Probleme beschäftigte sich Alexei A. Abrikosov mit den Anwendungen der kurz zuvor publizierten GL-Theorie [1]. Insbesondere versuchte er, neue experimentelle Messergebnisse an supraleitenden dünnen Schichten von Nicolai V. Zavaritskii, seinem früheren Zim-mergenossen an der Universität, theoretisch zu erklären [2]. Zum



Alexei A. Abrikosov

ersten Mal haben die beiden Physiker die Möglichkeit ernsthaft ins Auge gefasst, dass ein dimensionsloser Parameter der Theorie, der heute als Ginzburg-Landau-Parameter bezeichnet wird, auch größere Werte annehmen kann, bei denen die oben erwähnte Grenzflächenenergie negativ wird. Vorher war dieser Fall noch als vollständig unphysikalisch eingestuft worden. Zavaritskiis Experimente haben diese Möglichkeit jedoch eindeutig bestätigt. Heute ist diese Möglichkeit als Typ-II-Supraleitung bekannt. Abrikosov und Zavaritskii sprachen damals von der „zweiten Gruppe“.

Abrikosov hat anschließend die Typ-II-Supraleiter theoretisch genauer analysiert und gefunden, dass bei ihnen im Magnetfeld ein neuartiger Zustand möglich ist, in dem der Supraleiter von einem regelmäßigen Gitter aus einzelnen so genannten magnetischen Flussquanten durchsetzt ist. Das berühmte Abrikosovsche Flussliniengitter war

entdeckt. Durch magnetische Flussquanten wird der Supraleiter von eng begrenzten, lokalen Magnetfeldern fadenartig durchsetzt, wobei die räumlich eng eingeschränkten Magnetfelder durch supraleitende Ringströme, die um die Magnetfeld-Fäden herumlaufen, wie bei einer Magnetspule erzeugt werden. Abrikosov hatte diese Arbeiten im Jahr 1953 abgeschlossen. Die vorgestellten Konzepte waren aber so neuartig, das sein Doktorvater Lew D. Landau mit einer Veröffentlichung nicht einverstanden war. Zwei Jahre später stellte sich dann aber heraus, dass ähnliche Fragen auch bei wirbelartigen Strömungen bei tiefen Temperaturen in supraflüssigem Helium auftauchen. Auch in diesem Fall unterliegt die Strömung um einen Wirbelfaden einer völlig analogen Quantenbedingung wie die zirkulierenden Supraströme bei den magnetischen Flussquanten, wie bereits Lars Onsager erkannte. Erst als Richard P. Feynman detaillierte Rechnungen über quantisierte Wirbellinien in rotierendem supraflüssigem Helium publizierte, gab Landau seine Zustimmung. So wurde Abrikosovs Arbeit erst 1957 veröffentlicht.

Auf die Frage, warum Abrikosov seine neuartigen Ergebnisse damals nicht mit größerem Nachdruck vertreten hat, gab er selbst kürzlich folgendes zur Antwort. „Der wirkliche Grund, weshalb ich damals nicht deutlicher auf meiner Theorie bestanden habe, lag darin, dass zu der Zeit all dies nicht so wichtig erschien. Die Supraleitung wurde noch als ein exotisches Phänomen angesehen, das von praktischen Anwendungen weit entfernt war. Auch war ich bereits damit beschäftigt, die Quanten-Elektrodynamik auf hohe Energien zu erweitern, was mir als viel wichtiger erschien.“

Eine überzeugende frühe experimentelle Bestätigung der Existenz des Abrikosovschen Flussliniengitters gelang im Jahr 1967 Uwe Essmann und Hermann Träuble mit Hilfe der Bitter-Dekorationsmethode. Für technologische Anwendungen spielen die Typ-II-Supraleiter, zu denen auch die Hochtemperatur-Supraleiter gehören, heute eine zentrale Rolle. Für das Verhalten des elektrischen Widerstands von Supraleitern sind die magnetischen Flussquanten ebenfalls von enormer Bedeutung. Werden die Flusslinien im Supraleiter aufgrund der so genannten Lorentz-Kraft des elektri-

schen Stroms in Bewegung versetzt, so kommt es zu elektrischen Verlusten und zur Unterbrechung der Supraleitung. Eine kleine Ursache hat somit eine große Wirkung, ähnlich wie es die Bewegung von Versetzungen im Kristallgitter bei den Festigkeitseigenschaften zeigt. Die Flusslinienbewegung muss also mit allen Mitteln verhindert werden. Hier haben die Materialwissenschaftler in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt.

Mit der Vorhersage der Typ-II-Supraleiter und des magnetischen Flussliniengitters durch Abrikosov hat die GL-Theorie einen ersten bedeutenden Erfolg erzielt. Heute ist die Physik der magnetischen Flusslinien, der so genannten Vortices, in Supraleitern ein großes Gebiet mit vielen Aktivitäten, sowohl bei den Grundlagen als auch bei den technischen Anwendungen. Wirbellösungen ähnlich dem Abrikosov-Flusswirbel spielen in der modernen Theorie der Defekte von Eichtheorien als „cosmic strings“ zunehmend eine Rolle [3]. Die mittels der GL-Theorie gefundene Wirbellösung von Abrikosov liefert so ein Beispiel für fundamentale Verknüpfungen zwischen so verschiedenen Gebieten wie der Teilchenphysik, der Kosmologie und der Kondensierten Materie.

Supraflüssige Phasen

Der Beitrag von Anthony J. Leggett zur Aufklärung und Identifizierung der supraflüssigen Phasen des ^3He ist ebenfalls in jeder Hinsicht beispielhaft schön und eindrucksvoll, obwohl er angesichts der NMR-Daten der Entdecker der supraflüssigen Phasen von ^3He – nämlich David M. Lee, Robert C. Richardson und Douglas D. Osheroff (Nobelpreis 1996) – erst ein Weilchen schier verzweifelte und nach eigener Angabe drauf und dran war, vom wahren Glauben an die Statistische Quantenphysik abzukehren. Sein Problem ähnelte in gewisser Weise demjenigen von John Bardeen, bei dem Leggett einmal Postdoc gewesen war. Bardeen wollte bekanntlich zunächst nicht an den Josephson-Effekt glauben, weil er den Überlapp der Kondensat-Wellenfunktionen zweier durch eine Tunnelbarriere getrennten Supraleiter als viel zu kleinen Effekt ansah. Was er übersah, war der Effekt der kollektiven Verstärkung des Überlapps zweier Systeme aus „phasenkohärenten“ Cooper-Paaren.

Dank Leggett besitzen wir heu-

te ein komplettes Verständnis der Struktur der supraflüssigen Phasen des ^3He [4]. Ähnlich wie der supraleitende Zustand der Metallelektronen besteht der supraflüssige Zustand des ^3He aus einem Kondensat von Cooper-Paaren. Wie von



Anthony J. Leggett

Leggett gezeigt, existieren in den supraflüssigen Phasen des ^3He aber gleich drei Typen von Kohärenzen für die korrelierten Cooper-Paare: die der Phase, der Ausrichtung der Kernspins und der Kerndrehim-

pulse, weil der Symmetriotyp der Cooper-Paare ein Triplett mit Spin $S = 1$ und Drehimpuls $L = 1$ ist. In der Normalphase ist nun die Spin-Bahn-Kopplung gegenüber der thermischen Energie vollkommen vernachlässigbar: Das NMR-Signal liefert aufgrund der Spinerhaltung nur eine Resonanz bei der Larmor-Frequenz Ω_L . In den supraflüssigen Phasen richten sich Spins und Drehimpulse kollektiv aus, sodass die Dipol-Wechselwirkung, um den riesigen Faktor der kohärenten Anzahl Cooper-Paare verstärkt, nunmehr ungleich größer als jeder Temperatur-Effekt ist. Das ist insbesondere der Grund, weshalb z. B. in der A-Phase die (transversale) Resonanz ω_t merklich von der Larmor-Frequenz abweicht und eine neue (longitudinale) Resonanz ω_l entsteht. Zusammen gehorchen sie dem „Lehrsatz von Pythagoras“

$$\omega_t^2 = \Omega_L^2 + \omega_l^2.$$

Leggett postulierte die Cooper-Paarung mit $S = 1$ und $L = 1$, erkannte neben der Bedeutung der Phasenkohärenz die Bedeutung der Orientierungskohärenz korrelier-

ter Triplett-Paare und stellte die berühmten „Leggett-Gleichungen“ auf, die in der Tat eine Verallgemeinerung des Josephson-Effektes auf die kollektiven Orientierungsfreiheitsgrade für Triplett-Cooper-Paare darstellen. Das Phänomen der longitudinalen Resonanz war dabei eine Vorhersage von Leggett, die postwendend experimentell bestätigt wurde.

Für Leggetts große geistige Bandbreite ist bezeichnend, dass er zunächst mit dem Studium alter Sprachen und alter Literatur begonnen hatte. Erst nach dem russischen Sputnik-Ereignis trat die Physik bei ihm in den Vordergrund.

Literatur

- [1] A. A. Abrikosov, in: R. P. Hübener, N. Schopohl und G. E. Volovik (Hrsg.), *Vortices in Unconventional Superconductors and Superfluids*, Springer, Berlin (2002)
- [2] Vgl. A. A. Abrikosov, Die Entdeckung der Typ-II-Supraleitung, *Phys. Bl.*, Januar 2001, S. 61
- [3] G. E. Volovik, *The Universe in a Helium Droplet*, Clarendon Press, Oxford (2003)
- [4] D. Vollhardt und P. Wölfle, *The Superfluid Phases of Helium 3*, Taylor and Francis, London (1990)