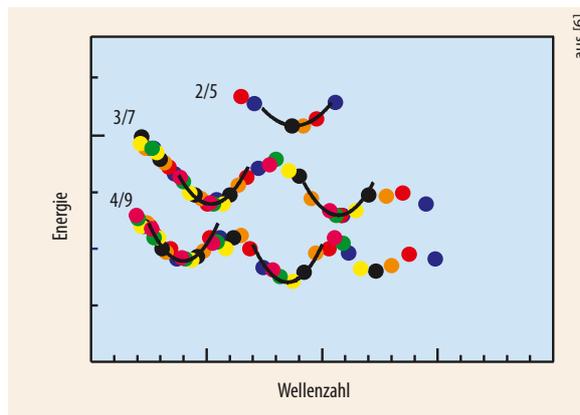


Quantenhall mit Licht und Schall

Erstmals gelang es, im Anregungsspektrum des fraktionalen Quanten-Hall-Effekts die lange vorhergesagten Magnetorotonminima direkt zu messen.

In einem zweidimensionalen Elektronengas lässt sich bei genügend tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern der Quanten-Hall-Effekt beobachten. Darunter versteht man Plateaus im Hall-Effekt, die nur durch Naturkonstanten und eine ganze Zahl gegeben sind [1]. Diese Zahl gibt die Anzahl der gefüllten Landau-Niveaus an (den quantenmechanischen Eigenzuständen im Magnetfeld) und heißt deshalb auch Füllfaktor. Kurz nach der Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes durch Klaus von Klitzing wurden auch Plateaus bei gebrochenzahligen Füllfaktoren gemessen [2]. Dieses heute fraktionale Quanten-Hall-Effekt genannte Phänomen wird darauf zurückgeführt, dass sich aufgrund der Wechselwirkung der Elektronen untereinander eine neue Quantenflüssigkeit ausbildet. Schon vor mehr als 20 Jahren wurden erste Rechnungen zu den Anregungsspektren beim fraktionalen Quanten-Hall-Effekt durchgeführt. Für den Füllfaktor $1/3$ fand man eine Energielücke im Spektrum, die ein Minimum bei Wellenvektoren im Bereich der inversen magnetischen Länge*) aufweist [3]. Für fraktionale Füllfaktoren mit Zählern, die größer als Eins sind, erwartet man in der Dispersion sogar mehrere dieser „Magnetorotonminima“.

Landau führte ein Rotonminimum im Anregungsspektrum eines Systems erstmals ein, um die erstaunlichen Eigenschaften von suprafluidem Helium-4 zu erklären. Mit dieser Anregung, die ein Minimum im Spektrum bei kleinen Wellenvektoren darstellt, und einer Schallwelle, d. h. einer Phononenmode, die linear im Wellenvektor ist, gelang es ihm, die anomale spezifische Wärme sowie die Geschwindigkeit von zweitem Schall^{†)} in suprafluidem Helium zu beschreiben. Diese Anregung stellte er sich als eine Rotation in der Flüssigkeit ähnlich eines Rauchrings vor und bezeichnete sie deshalb als Roton.



aus [6]

Die für drei fraktionale Füllfaktoren gemessenen Resonanzfrequenzen zeigen deutlich die Magnetorotonminima in einem normierten Energie-/Wellenzahl-Diagramm. Die beobachteten Minima sind mit Parabeln gefittet.

Durch die Einführung von neuen Quasiteilchen, den Composite Fermions, die aus einem Elektron und einer geraden Anzahl von magnetischen Flussquanten bestehen, war es möglich, den fraktionalen auf einen ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt dieser neuen Quasiteilchen zurückzuführen und so die meisten Phänomene in einer Art Einteilchenbild zu verstehen. Dabei stellen die Magnetorotonminima Anregungen der Composite Fermions dar, bei denen ein fraktional geladenes Teilchen und ein entsprechend geladenes Quasiloche entstehen und diese umeinander rotieren.

Minima mit Mikrowellen

Während sich für suprafluides Helium das von Landau vorhergesagte Rotonminimum bereits 1959 durch inelastische Neutronenstreuung nachweisen ließ, scheiterte dies bisher bei den Magnetorotonminima des fraktionalen Quanten-Hall-Effektes. Da die zweidimensionalen Elektronengase in Halbleiter-Heterostrukturen eingebettet sind und deshalb den 10^{10} bis 10^{11} Elektronen pro Quadratzentimeter etwa 10^{23} Atome pro Kubikzentimeter gegenüber stehen, reicht die Empfindlichkeit der Neutronenstreuung nicht aus, um die Magnetorotonminima nachzuweisen. Methoden der Oberflächenphysik scheiden ebenfalls aus, da die Elektronengase meist 100 Nanometer unter der Oberfläche des Halbleiterkristalls liegen. Hinweise auf die Existenz

der Magnetorotonminima in den Anregungsspektren bei fraktionalen Füllfaktoren lieferten jedoch optische Experimente mit inelastischer Lichtstreuung [4] sowie Experimente, die die spezifische Wärme eines zweidimensionalen Elektronengases durch die Absorption von ballistischen Phononen bestimmen [5].

Bei Experimenten in der Abteilung von Klaus von Klitzing am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart kombinierten Igor Kukushkin und Jürgen Smet nun Phononen und Photonen. Damit gelang der erste direkte Nachweis der Magnetorotonminima in den Anregungsspektren des fraktionalen Quanten-Hall-Effekts [6]. In diesem trickreichen Experiment wird die Halbleiter-Heterostruktur mit Mikrowellen bestrahlt. Damit die Photonen trotz ihres geringen Impulses an Anregungen mit Wellenvektoren im Bereich der inversen magnetischen Länge (ca. $1/10 \text{ nm}^{-1}$) koppeln können, ist eine periodische Modulation des zweidimensionalen Elektronengases notwendig. Diese Modulation wird hier durch akustische Oberflächenwellen erzeugt. Auf die Oberfläche der Halbleiterstruktur aufgebraute Interdigitalwandler geben die Periode der Modulation vor.

Wenn nun die Energie der Mikrowellenphotonen sowie der durch die Oberflächenwellen vorgegebene Wellenvektor mit einer Anregung des Elektronensystems

*) Die magnetische Länge ist definiert als $l_B = \sqrt{\hbar/eB}$, mit der Planckschen Konstante \hbar und dem Magnetfeld B .

†) Dabei handelt es sich um Temperaturwellen, deren Ausbreitung große Ähnlichkeit mit der normalen Schallausbreitung hat.

übereinstimmen, kann das System Energie absorbieren. Dadurch erwärmt sich das Elektronensystem, was die Stuttgarter Physiker mit Lumineszenzmessungen nachwiesen. Der vorgegebene Wellenvektor lässt sich durch Interdigitalwandler mit unterschiedlicher Periode sowie durch die Anregung von Oberwellen in den Wandlern variieren.

Durch die zusätzliche Variation der Ladungsträgerkonzentration des zweidimensionalen Elektronengases änderte sich auch die magnetische Länge, bei der sich ein fraktionaler Füllfaktor beobachten ließ. Damit war es der Stuttgarter Gruppe möglich, eine genügende Zahl verschiedener Messungen durchzuführen und so die Minima in der Dispersion klar zu identifizieren (Abb.).

Diese Messungen bilden somit den ersten direkten Nachweis der lange vorhergesagten Magneto-

rotonminima. Da die Periode der Interdigitalwandler beschränkt ist, war es leider nicht möglich, alle für einen fraktionalen Füllfaktor erwarteten Minima zu detektieren. So konnten die Physiker für den Füllfaktor $2/5$ statt der zwei erwarteten Magnetorotonminima nur ein Minimum messen. Bei $3/7$ identifizierten sie nur zwei der drei Minima. Sicherlich sollte es nach dem ersten Erfolg in zukünftigen Experimenten gelingen, die Spektren zu komplettieren.

Dieses einzigartige Experiment stellt den Höhepunkt in einer äußerst erfolgreichen Zusammenarbeit der Arbeitsgruppe von Klaus von Klitzing mit Igor Kukushkin vom ISSP in Chernogolovka, Russland, dar. Seit mehr als 20 Jahren verbringt Igor Kukushkin fast jedes Jahr einige Monate in Stuttgart, um mittels optischer Experimente insbesondere den fraktionalen

Quanten-Hall-Effekt zu untersuchen. Unter der Vielzahl der dabei erzielten Resultate ist dieser erstmalige direkte Nachweis der Magnetorotonminima jedoch sicherlich das bedeutendste Ergebnis.

Rolf Haug

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda und M. Pepper, Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)
- [2] D. C. Tsui, H. L. Störmer und A. C. Gosard, Phys. Rev. Lett. **48**, 1559 (1982)
- [3] C. Kallin und B. I. Halperin, Phys. Rev. B **30**, 5655 (1984); F. D. M. Haldane und E. H. Rezayi, Phys. Rev. Lett. **54**, 237 (1985); S. M. Girvin, A. H. MacDonald und P. M. Platzman, Phys. Rev. Lett. **54**, 581 (1985)
- [4] A. Pinczuk, B. Denis, L. N. Pfeiffer und K. West, Phys. Rev. Lett. **70**, 3983 (1993); J. Groshaus et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 046804 (2008)
- [5] U. Zeitler et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 5333 (1999)
- [6] I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. W. Scarola, V. Umansky und K. von Klitzing, Science **324**, 1044 (2009)

Prof. Dr. Rolf Haug,
Institut für Festkörperphysik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 2, 30167 Hannover

■ Magie im Doppelpack

Mit dem Sauerstoffkern ^{24}O hat die Klasse der doppelt magischen Atomkerne Zuwachs erhalten.

In keinem Lehrbuch über Kernphysik dürfen die Zahlen 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126 fehlen. Diese „magischen“ Zahlen, zu denen mit Einschränkungen auch 40 und 64 zählen, markieren Protonen- und Neutronenzahlen, die zu besonders stabilen Atomkernen führen. Analog zur Konfiguration der Elektronen in Edelgasen stabilisieren große Energielücken zwischen Einteilchenorbitalen die magischen Atomkerne zusätzlich. Allerdings ergeben sich die Schalenabschlüsse in der Kernphysik nicht wie in der Atomphysik aus der regulären Sequenz der Orbitale. Stattdessen verschiebt die Spin-Bahn-Kopplung die Niveaus stark und sorgt für deren irreguläre Abfolge. Einziges und entscheidendes Kriterium für einen Schalenabschluss ist daher die Energielücke zwischen gefüllten Niveaus.

Besonders stabil sind doppelt magische Atomkerne, bei denen sowohl die Protonen- als auch die Neutronenzahl magisch ist. Sie sind

sehr wichtig, da sie sich meist als inerte Rumpfbetrachten lassen und so, analog zur Klassifikation der chemischen Elemente im Periodensystem von Mendelejew, die Anzahl der Valenznukleonen bestimmen. Diese legen wiederum die Kernstruktur fest. Anders als bei den chemischen Elementen und den Elektronen existieren im Atomkern mit Protonen und Neutronen zwei Teilchensorten und somit zwei Valenzzahlen. Sind beide klein, so entspricht die Struktur des Atomkerns stark dem Einteilchencharakter des Schalenmodells mit Restwechselwirkungen zwischen allen Valenznukleonen. Ist eine Valenzzahl klein und die andere groß, zeigen die Atomkerne eher kollektive Eigenschaften, die sich z. B. sehr gut als Schwingungen eines sphärischen Tröpfchens aus Quantenflüssigkeit beschreiben lassen. Sind beide Valenzzahlen groß, ändert sich die Struktur wieder, da der Atomkern eine Quadrupol-Deformation besitzt. Kollektive Schwin-

gungen und die Rotation des gesamten Atomkerns beschreiben dann die Kernstruktur. Innerhalb der Vielfalt an Isotopen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften sind die doppelt magischen Kerne die Leuchttürme der Kernphysik.

Da alle stabilen Atomkerne jenseits von ^{40}Ca mehr Neutronen als Protonen enthalten, gibt es nur fünf doppelt magische stabile Isotope: ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{48}Ca und ^{208}Pb . Hin-

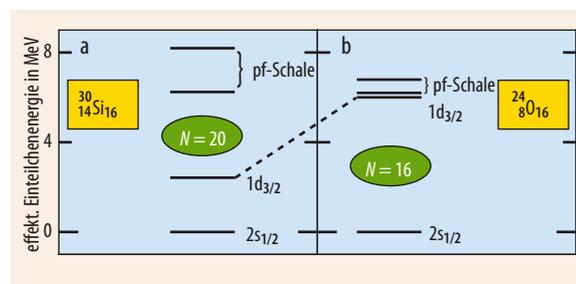


Abb. 1 Während sich bei dem Kern ^{30}Si erwartungsgemäß eine Energielücke oberhalb des $1d_{3/2}$ -Neutronenorbitals auftut und daher der Schalenabschluss bei 20 Neutronen auftritt (a), ist die Energie dieses Orbitals bei ^{24}O deutlich größer, sodass die Energielücke darunter und der Schalenabschluss bei $N = 16$ liegt (b). Daher ist bei gleicher Neutronenzahl (16) ^{24}O magisch, ^{30}Si aber nicht [4].