

## Quanten-Hall-Effekt 4.0

Die experimentelle Beobachtung eines quantisierten thermischen Hall-Effekts liefert den direkten Nachweis einer Spinflüssigkeit mit Majorana-Fermionen.

Als Klaus von Klitzing 1980 den ganzzahligen Quanten-Hall-Effekt in einem zweidimensionalen Elektronengas bei sehr niedrigen Temperaturen und einem starken Magnetfeld entdeckte, war das eine wissenschaftliche Revolution. Ähnlich stießen auch die Entdeckung des fraktionierten Quanten-Hall-Effekts (1982, Anregungen mit bruchzahligen Ladungen) sowie des Quanten-Spin-Hall-Effekts 2007 durch die Gruppe von Laurens Molenkamp bahnbrechende Entwicklungen an. Letzteres entspricht der Geburtsstunde topologischer Isolatoren [1].

Nun hat die Gruppe von Yuji Matsuda an der Universität Kyoto berichtet, dass sich in dem Isolator  $\text{RuCl}_3$  eine Quantisierung der Wärmeleitfähigkeit zeigt – ein thermischer Quanten-Hall-Effekt [2]. Dazu kühlten die Wissenschaftler einen  $\alpha\text{-RuCl}_3$ -Kristall auf einige Kelvin herunter und legten ein Magnetfeld von etwa fünf Tesla an. Das leichte Aufheizen einer Seite des Kristalls injiziert einen Wärmestrom. Dabei entstehen Temperaturgradienten parallel und senkrecht zum Wärmestrom. Überraschenderweise ist die gemessene

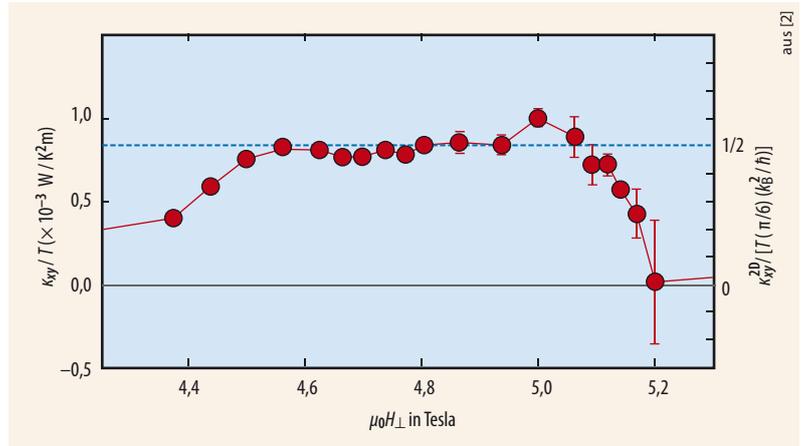


Abb. 1 Im Isolator  $\text{RuCl}_3$  weist die thermische Leitfähigkeit ein gut sichtbares Plateau auf, wenn die Stärke des um  $60^\circ$  zur Kristallebene gekippten Magnetfelds zwischen 4,5 und 5 T variiert. Normiert man die thermische Hall-Leitfähigkeit  $\kappa_{xy}$

mit Hilfe der bekannten Gitterkonstante auf eine atomare Lage des Materials, ergibt sich ein thermischer Quantenleitwert von  $1/2$ . Diese halbzahlige Quantisierung weist direkt den Wärmetransport durch Majorana-Fermionen nach.

Wärmeleitfähigkeit  $\kappa_{xy}$  quantisiert: Für magnetische Feldstärken im Intervall von gut einem halben Tesla nimmt sie einen konstanten Wert an (Abb. 1), der im Rahmen der Messgenauigkeiten weder vom genauen Wert des Winkels  $\theta$  des Magnetfeldes zur Kristallebene noch von der Temperatur  $T$  abhängt. Beim Umrechnen der dreidimensionalen Wärmeleitfähigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit einer atomaren

Schicht, ergibt sich ein Wert, der gerade der Hälfte des thermischen Quantenleitwerts entspricht. Dieser ist durch das Produkt aus elektrischem Quantenleitwert,  $e^2/(2\pi\hbar)$ , der Lorenz-Zahl,  $\pi^2 k_B^2/3e^2$ , und der Temperatur  $T$  gegeben:  $(\pi/6) (k_B^2/\hbar) T$ .

Die einfachste Erklärung dafür bieten Kanäle, die sich am Rand des Kristalls bilden und die Wärme transportieren – analog zum elektronischen Quanten-Hall-Effekt in dotierten Halbleitern (Abb. 2a). Dabei werden Elektronen, die sich im Magnetfeld auf Kreisbahnen bewegen, immer wieder am Rand reflektiert und folgen diesem. Da der  $\text{RuCl}_3$  ein Isolator ist, muss der Randkanal einen anderen Ursprung haben. Der halbzahlige Wert der Leitfähigkeit bedeutet, dass die Zahl der Freiheitsgrade des Randes genau halb so groß ist wie bei Elektronen. Deshalb lässt sich der Randkanal durch „halbe Fermionen“, so genannte Majorana-Fermionen, beschreiben. Diese hypothetischen Teilchen sind ihre eigenen Antiteilchen und wurden in der Hochenergiephysik eingeführt. In der Festkörperphysik lassen sie sich beim Beschreiben der Anregungen eines Magneten anwenden.

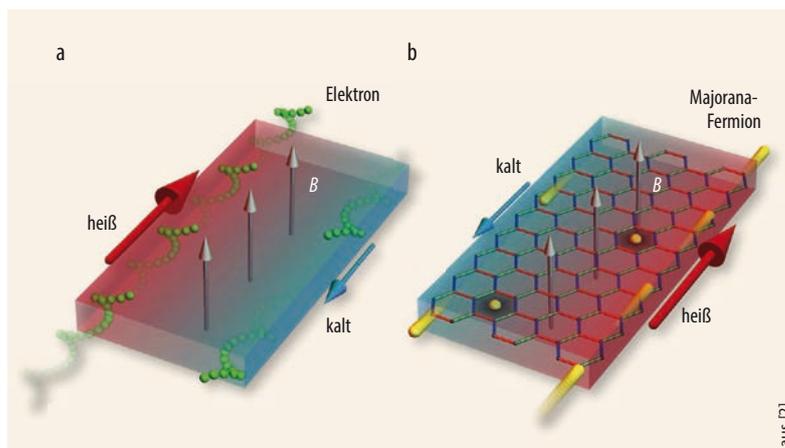


Abb. 2 In einem starken Magnetfeld  $B$  bilden sich in einem zweidimensionalen Elektronengas Randkanäle, die Energie und Ladung transportieren (a). Im thermischen Fall wird ein Randkanal heiß (rot), während die gegenüberliegende Seite kalt bleibt (blau). Majorana-Fermionen, die zusammen mit Eichfeldern die

Anregungen einer exotischen Spinflüssigkeit beschreiben, bilden im Magnetfeld einen Randkanal, der Wärme transportiert (b). Dies erklärt, warum die Hall-Wärmeleitfähigkeit gerade halb so groß ist wie für den Quanten-Hall-Effekt der Elektronen erwartet.

In  $\text{RuCl}_3$  entstehen diese exotischen Teilchen aus magnetischen Freiheitsgraden wie dem Spin der Elektronen. Diese bilden eine sogenannte Spinflüssigkeit – einen kollektiven Zustand, der sich nicht durch eine offensichtliche magnetische Ordnung, wie etwa in einem Ferromagneten, auszeichnet. Stattdessen fluktuieren die einzelnen Spins stark, und erst ein genauer Blick offenbart eine subtile Form der Ordnung. Denn die Spins fraktionalisieren: Sie zerbrechen in neue Freiheitsgrade und teilen sich auf in ein Majorana-Fermion und ein lokales Eichfeld, die zusammen die Anregungen des Systems beschreiben. Die Analyse exakt lösbarer Spinsysteme belegt dieses Verhalten, beispielsweise im vielfach untersuchten Kitaev-Modell einer Spinflüssigkeit [3]. Hier friert das Eichfeld bei tiefen Temperaturen aus – im Magnetfeld entsteht ein Isolator mit Randkanälen aus Majorana-Fermionen. Die Beobachtung des halbzahligen quantisierten Hall-Effekts in  $\text{RuCl}_3$  lässt sich als direkter Nachweis eben dieser Majorana-Randkanäle interpretieren. Damit bestätigt das Experiment, dass die magnetischen Freiheitsgrade fraktionalisieren.

Bei der Suche nach Spinflüssigkeiten gelang Gyniat Khaliullin und George Jackeli am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung bereits 2009 ein wichtiger Durchbruch [4]. Sie konnten zeigen, dass sich in magnetischen Isolatoren aus „schweren“ Elementen wie Iridium oder Ruthenium bei einer bestimmten Kristallstruktur zumindest näherungsweise Kitaev-Modelle realisieren lassen. In der Folge ist eine neue Familie von „Kitaev-Materialien“ entstanden, beispielsweise  $(\text{Na,Li})_2\text{IrO}_6$ ,  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  oder das nun verwendete  $\text{RuCl}_3$ . Diese mittlerweile experimentell synthetisierten Materialien zeichnen sich dadurch aus, dass die elementaren Spin-Bahn-gekoppelten magnetischen Momente sich in Lagen von Honigwabengittern anordnen (Abb. 2b). Bei tiefen Temperaturen liegt eine gewöhnliche magnetische Ordnung vor. Die Experimente der Gruppe

in Kyoto zeigen nun, dass ein relativ zur Kristallebene verkipptes Magnetfeld diese Ordnung zerstört. Offenbar entsteht dabei eine Spinflüssigkeit mit einem Randkanal aus Majorana-Fermionen.

Der neu entdeckte halbzahlige Quanten-Hall-Effekt in  $\text{RuCl}_3$  unterscheidet sich von den bisher bekannten Quanten-Hall-Effekten, weil er sich nicht in zwei Dimensionen, sondern in einem dreidimensionalen Material zeigt. Überraschend ist auch, dass ein quantisierter thermischer Hall-Effekt auftritt, obwohl Phononen den Großteil der Wärme transportieren. Erste theoretische Analysen zeigen jedoch, dass die Kopplung an Phononen die Beobachtung des Effekts erst ermöglicht und nur zu winzigen Korrekturen des quantisierten Hall-Effekts führt [5, 6]. Ein halbzahliger thermischer Quanten-Hall-Effekt wurde kürzlich auch am Weizmann Institut in Israel in einer zweidimensionalen Halbleiterstruktur beobachtet [7]. Auch in diesem Fall erklären Randkanäle durch Majorana-Fermionen die Ergebnisse.

Die Gruppe von Yuji Matsuda hat also nicht nur einen neuartigen Quanten-Hall-Effekt entdeckt. Auch wenn die Bestätigung durch andere Gruppen noch aussteht, ist dieses Experiment mit großer Wahrscheinlichkeit der Schlüssel, um Majorana-Anregungen in einem Quantenmagneten und die Fraktionalisierung in einer Spinflüssigkeit eindeutig experimentell nachzuweisen. In der Geschichte der Quanten-Hall-Effekte ist damit ein viertes Kapitel geschrieben worden, das auf viele weitere Einsichten hoffen lässt.

Simon Trebst und Achim Rosch

- [1] M. Stehno, H. Buhmann und L. W. Molenkamp, *Physik Journal*, August/September 2017, S. 39
- [2] Y. Kasahara et al., *Nature* **559**, 227 (2018)
- [3] K. P. Schmidt und S. Trebst, *Physik Journal*, April 2015, S. 39
- [4] G. Jackeli und G. Khaliullin, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 017205 (2009)
- [5] M. Ye et al., arXiv:1805.10532 (2018)
- [6] Y. Vinkler-Aviv und A. Rosch, *Phys. Rev. X* **8**, 031032 (2018)
- [7] M. Banerjee et al., *Nature* **559**, 205 (2018)

Prof. Dr. Simon Trebst und Prof. Dr. Achim Rosch, Institut für Theoretische Physik, Universität zu Köln, Zülpicher Str. 77, 50937 Köln

## GEBURT EINES PLANETEN



ESO / A. Müller, MPA

Mit dem SPHERE-Instrument am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Astronomie die protoplanetare Scheibe um den Stern PDS 70 untersucht. Gemeinsam mit einem internationalen Team gelang es den Heidelberger Forschern dabei, in einer Entfernung von 370 Lichtjahren die Geburt eines Planeten zu beobachten.

Der junge Exoplanet PDS 70 b, erkennbar als heller Punkt in der Aufnahme im nahen Infrarot, entpuppte sich

als Gasplanet mit mehreren Jupitermassen und einer Temperatur von 1200 K. PDS 70 b ist etwas jünger als der 5,4 Millionen Jahre alte Mutterstern und scheint bei einer Umlaufzeit von etwa 120 Jahren noch zu wachsen.

Um die Scheibe sichtbar zu machen, galt es, das direkt vom Stern kommende Licht gezielt auszublenden. Dies gelang mit Hilfe verschiedener Polarisationsfilter und einer Blende.

M. Keppler et al., *Astron. Astrophys.*, im Druck (2018) und A. Müller et al., *Astron. Astrophys.*, im Druck (2018)