

Physik-Nobelpreis 2016

Ungewöhnliche Phasen im Flächenland

PASCAL GEHRING | MARKO BURGHARD

Der diesjährige Nobelpreis geht an David Thouless, Duncan Haldane und Michael Kosterlitz für ihre Modelle, die exotische Phasen in kondensierter Materie beschreiben. Diese bieten neue Perspektiven zur Entwicklung elektronischer Materialien.

Die Physik in der Welt des Zweidimensionalen unterscheidet sich zum Teil drastisch von der im Dreidimensionalen. Kommt eine große Zahl an Atomen in Form einer ultradünnen Schicht auf einer Oberfläche zusammen, so können überraschende kollektive Eigenschaften auftreten. Die gewöhnlichen Phasen von Materie sind Gas, Flüssigkeit und Festkörper – beim Abkühlen in dieser Reihenfolge. Quanteneffekte, die zusätzliche Ordnungsphänomene erzeugen, waschen in diesen drei Phasen aus, Ursache ist die zufällige Wärmebewegung der Atome oder Moleküle.

Hiervon ausgenommen sind Systeme in extremer Kälte, in der sich neuartige Phasen mit ungewöhnlichen Eigenschaften bilden können. In solchen durch die starke Abkühlung gebildeten Kondensaten wird die Wirkung mikroskopischer Quanteneffekte plötzlich sichtbar. Dies geschieht beispielsweise bei magnetischen Materialien, deren Spins sich beim Abkühlen unter die Curie-Temperatur ausrichten und somit zu einer makroskopischen Magnetisierung führen. Anfang der 1970er Jahre entwarfen David Thouless und Michael Kosterlitz ein neuartiges mathematisches Konzept, um solche Phasenübergänge im Flächenland zu beschreiben [1]. Sie entwickelten gemeinsam die Theorie des „topologischen Phasenübergangs“, heute als KT (Kosterlitz-Thouless)-Übergang bekannt [2].

Der mathematische Bereich der Topologie beschäftigt sich mit Eigenschaften, die sich sprunghaft ändern. In topologischen Phasenübergängen spielen sogenannte topologische Defekte eine entscheidende Rolle, darin unterscheiden sie sich grundlegend von klassischen Übergängen wie zwischen Eis und Wasser. Diese Defekte können von unterschiedlicher Art sein, je nach physikalischem System. Ein Beispiel sind Vortexstrukturen in zweidimensionalen Magneten oder suprafluiden Filmen. Die Vortexe liegen bei tiefen Temperaturen als eng gekoppelte Paare vor. Durch Erwärmen entkoppeln sie sich, bewegen sich unabhängig voneinander und ermöglichen so den Phasenübergang.

Der Ansatz von Kosterlitz und Thouless war revolutionär. Zuvor ging man davon aus, dass geordnete Strukturen im Zweidimensionalen selbst bei tiefsten Temperaturen nicht existieren können, weil thermische Fluktuationen dies verhindern. Die Theorie des KT-Übergangs ist nahezu universell auf niedrigdimensionale Materialsysteme anwendbar und wurde vielfach experimentell bestätigt. Sie führte zu einem völlig neuen Verständnis von Phasenübergängen und gilt zu Recht als eine der wichtigsten Entdeckungen der Physik kondensierter Materie im 20. Jahrhundert. Diese Theorie konnte viele Phänomene erfolgreich beschreiben und führte zu einem tieferen Verständnis von Suprafluiden und Supraleitern. Topologische Phasen fand man nicht nur in zweidimensionalen Grenzschichten, sondern sogar in gewöhnlichen dreidimensionalen Materialien.

Auch der 1980 von Klaus von Klitzing entdeckte Quanten-Hall-Effekt konnte seinerzeit nicht theoretisch erklärt werden. Experimente zeigten, dass die elektrische Leitfähigkeit eines zweidimensionalen Elektronensystems auf einer Halbleiteroberfläche in hohen magnetischen Feldern und bei sehr niedrigen Temperaturen nur ganz bestimmte Werte annimmt. Diese Leitfähigkeitswerte sind unabhängig von der Geometrie der Probe oder deren Verunreinigungen und können nur durch starke Variationen des magnetischen Feldes gestört werden. Reduziert man beispielsweise das Magnetfeld stetig, so wird die Leitfähigkeit schrittweise halbiert, gedrittelt, geviertelt usw.

Diesen Effekt konnte David Thouless gemeinsam mit Kollegen in den 1980er Jahren erstmals mit Methoden der Topologie erklären [3]. Im Hinblick auf den Quanten-Hall-Effekt ist es von Bedeutung, dass innerhalb einer bestimmten Topologie recht weitgehende geometrische Umfor-

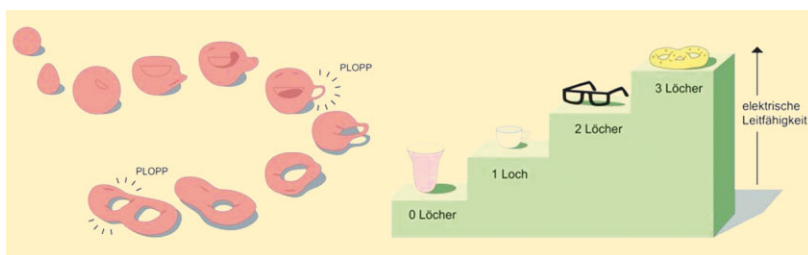


Abb. 1 Objekte unterschiedlicher Topologie können nur durch eine starke Änderung ineinander überführt werden. Die Topologie macht deutlich, warum sich die elektrische Leitfähigkeit in dünnen Schichten sprunghaft ändert (Grafik: Nobelprize.org).

mungen möglich sind, ohne dass sich die Eigenschaften des Systems grundlegend ändern.

Als anschauliche Analogie lässt sich beispielsweise ein Donut nahtlos zu einer Tasse mit Henkel umformen, denn beide haben ein Loch im Zentrum und damit dieselbe Topologie. Eine Kugel dagegen ließe sich nicht in einen Donut verformen, ohne dass man ein Loch in sie bohrt und sie zerstört. Diese Robustheit topologischer Zustände führt dazu, dass externe Parameter wie schwache Magnetfelder zwar den Quantenzustand des zweidimensionalen Elektronengases „verformen“, jedoch erst bei großen Störungen ein Übergang in einen anderen topologischen Zustand möglich ist. Dies entspricht einer globalen Restrukturierung des Systems – genauso wie das zerstörende Loch, das eine Kugel in den topologischen Zustand eines Donuts überführt (Abbildung 1).

Duncan Haldane gelang ebenfalls in den 1980er Jahren eine spektakuläre Entdeckung. Bei der theoretischen Untersuchung von Spinketten gelangte er zu dem Ergebnis, dass Ketten mit ganzzahligem – nicht halbzahligem – Spin einen Singlet-Grundzustand bilden, der durch eine Energielücke (Haldane gap) von energetisch angeregten Zuständen getrennt ist [4, 5]. Zudem stellte Haldane fest, dass derartige Ketten zwei topologisch geschützte, ungepaarte Spinzustände an ihren Enden ausbilden. Dies könnte für zukünftige Informationsspeicher höchst interessant sein.

Haldanes Vorgehensweise wurde zunächst nicht beachtet, zudem galt die Physik von Spinketten als vollständig verstanden. Heute ist dagegen klar, dass er das erste topologische Material beschrieb und so den Weg für weitere Studien dieser neuartigen Materialklasse in der Festkörperphysik ebnete.

Die Arbeit der diesjährigen Nobelpreisträger führte zu einer Vielzahl neuer Forschungsrichtungen und Entdeckungen. Einer der spektakulärsten Funde waren die zwei- und dreidimensionalen topologischen Isolatoren. Ihre Existenz beruht darauf, dass an den räumlichen Grenzen topologischer Phasen, etwa der Oberfläche oder den Kanten, exotische Zustände auftreten [6]. Das Besondere an diesen Materialien ist die Kopplung der Bewegungsrichtung der Elektronen mit der Orientierung ihres Spins, was sie auch attraktiv für zukünftige Spintronik-Bauelemente macht. Gemeinsam mit topologischen Supraleitern und topologischen Metallen könnten sie eine neue Ära der Festkörperelektronik einläuten [7].

Stichwörter

Physik-Nobelpreis 2016, Topologie, Phasenübergänge, topologische Isolatoren, David Thouless, Duncan Haldane, Michael Kosterlitz.

Literatur

- [1] J.M. Kosterlitz, D.J. Thouless, J. Phys. C: Solid State Physics **1972**, 5, L124.
- [2] J.M. Kosterlitz, D.J. Thouless, J. Phys. C: Solid State Physics **1973**, 6, 1181.
- [3] D.J. Thouless et al., Phys. Rev. Lett. **1982**, 49, 405.

DIE PREISTRÄGER

David J. Thouless, geb. 1934 in Bearsden (Schottland), promovierte 1958 an der Cornell University in Ithaca (NY), wurde nach Zwischenstationen 1980 Professor an der University of Washington (Seattle), dort seit 2003 Emeritus: <http://t1p.de/lyht> (Foto: K. Howard, Cambridge U.).



F. Duncan M. Haldane, geb. 1951 in London, promovierte 1978 an der Cambridge University (UK) und wurde nach Zwischenstationen 1987 Physikprofessor an der University of California (San Diego), 1990 an der Princeton University: <http://t1p.de/oypm> (Foto: D. Applewhite, Princeton U.).



J. Michael Kosterlitz, geb. 1942 in Aberdeen (Schottland), promovierte 1969 an der Oxford University und wurde nach Zwischenstationen 1982 Professor für Physik an der Brown University in Providence (Rhode Island, USA): <http://t1p.de/r0c0> (Foto: Brown U.).



- [4] F.D.M. Haldane, Phys. Lett. A **1983**, 93, 464.
- [5] F.D.M. Haldane, Phys. Rev. Lett. **1983**, 50, 1153.
- [6] P. Gehring, M. Burghard, Phys. Unserer Zeit **2014**, 45(6), 299.
- [7] O. Vafek, A. Vishwanath, Ann. Rev. Cond. Mat. Phys. **2014**, 5, 83.

Die Autoren



Pascal Gehring studierte Materialwissenschaften an der Universität Stuttgart und promovierte bis 2014 am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung über topologische Isolatoren. Seit 2014 ist er Postdoktorand an der University of Oxford.



Marko Burghard leitet am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart eine Arbeitsgruppe, die sich mit den elektronischen und optischen Eigenschaften neuartiger Quantenmaterialien beschäftigt.

Anschrift

PD Dr. Marko Burghard, MPI für Festkörperforschung, Heisenbergstrasse 1, D-70569 Stuttgart, Germany. M.Burghard@fkf.mpg.de, Pascal.Gehring@materials.ox.ac.uk