

Prof. Dr. Alexander Lenz, Theoretische Physik, Technische Universität Dortmund, Otto-Hahn-Str. 4, 44227 Dortmund, und Institut für theoretische Physik, Universität Regensburg, Universitätsstraße 31, 93053 Regensburg

(Heavy Quark Expansion). Das Endergebnis sind verschwindend kleine Werte für die semileptonischen CP-Asymmetrien.

Mitte Mai stellte die D0-Kollaboration am Fermilab bei Chicago einen CP-verletzenden Effekt bei diesen Asymmetrien vor [3], der 42-mal größer ist als die Standardmodellvorhersage [4]. Die statistische Signifikanz dieser Abweichung beträgt 3,2 Sigma. Ab drei Sigma spricht man von einer Evidenz für ein Phänomen, die Erfahrung zeigt jedoch, dass sich auch Drei-Sigma-Effekte immer wieder in Wohlgefallen auflösen. Endgültige Klarheit darüber, ob dieser große Effekt

in der Natur wirklich vorkommt, müssen weitere Messungen am Tevatron sowie die ersten Resultate des LHCb-Experiments bringen.

Dennoch wurde bereits darüber spekuliert, ob dieser riesige Effekt möglicherweise den Ursprung der Materie erklären könnte, indem er die fehlende „Menge“ an CP-Verletzung liefert. In etlichen Theoriearbeiten, die seit dem D0-Ergebnis erschienen sind, untersuchten die Autoren verschiedene Modelle der neuen Physik als mögliche Ursache für den großen CP-verletzenden Effekt. Viele dieser Modelle enthalten zwar nennenswerte CP-verletzende Effekte, sie liegen jedoch meist

unter dem Wert der D0-Messung. Weitere theoretische Arbeiten und präzisere Messungen müssen nun zeigen, ob der bei D0 gemessene Effekt das Rätsel der Baryonenasymmetrie lösen kann.

Alexander Lenz

- [1] A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5**, 32 (1967); JETP Lett. **5** (1967) 24
- [2] M. Kobayashi und T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. **49**, 652 (1973)
- [3] V. M. Abazov et al. (D0 Collaboration), Phys. Rev. D **82**, 032001 (2010); V. M. Abazov, et al. (D0 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105**, 081801 (2010)
- [4] A. Lenz und U. Nierste, JHEP **0706**, 072 (2007)

■ Lückenschluss an der Oberfläche

Experimente an Bi_2Se_3 -Kristallen ergaben, dass sich die Zustände an der Oberfläche topologischer Isolatoren als Dirac-Fermionen beschreiben lassen.

Seit ein paar Jahren sorgt in der Festkörperphysik eine neue Materialklasse für Furore – die topologischen Isolatoren (für aktuelle Übersichtsartikel siehe [1]). Im Volumen verhalten sich diese „Zwitermaterialien“ wie gewöhnliche Isolatoren, aber am Rand wie Metalle (Abb. 1). Nach der Theorie entsprechen die metallischen Randzustände Dirac-Fermionen, also masselosen ultrarelativistischen Teilchen mit einer linearen Energie-Impuls-Relation, ganz ähnlich wie das für Elektronen in Graphen der Fall ist [2].¹⁾ Vor kurzem ist es zwei Arbeitsgruppen in China und Japan unabhängig voneinander gelungen, den spektakulären Nachweis von solchen Dirac-Fermionen an der Oberfläche eines topologischen Isolatoren zu erbringen [3, 4].

Ein den topologischen Isolatoren verwandtes Phänomen ist vom Quanten-Hall-Effekt (QHE) bekannt [5]. Aufgrund eines starken Magnetfelds, das senkrecht zu einem zweidimensionalen Elektroengas anliegt, lokalisieren darin die Volumenzustände, tragen also nicht zum Stromfluss bei, während weiterhin leitende Randzustände existieren. In topologischen Isolatoren treten solche Randzustände

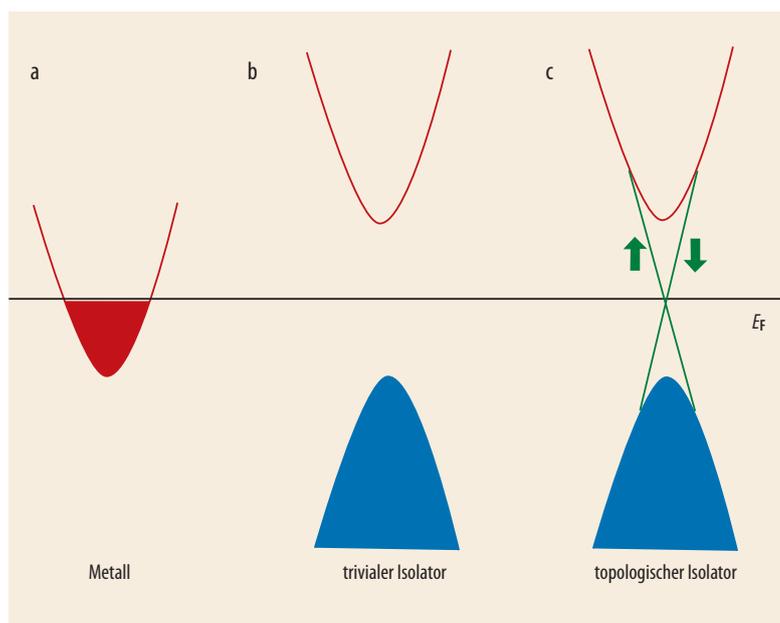


Abb. 1 Die Bandstrukturen eines Metalls (a), eines trivialen Isolatoren (b) und eines topologischen Isolatoren (c) unterscheiden sich auf charakteristische Weise. E_F bezeichnet die Fermi-Energie, unterhalb derer alle Zustände besetzt sind. Die Rand-

zustände des topologischen Isolatoren (grün) liegen in der Bandlücke zwischen Leitungs- (rot) und Valenzband (blau). Sie sind Dirac-Fermionen und beschreiben immer Paare von Zuständen mit entgegengesetztem Spin (grüne Pfeile).

auch ohne den Einfluss externer Felder auf, und zwar immer in Paaren mit entgegengesetztem Spin-Freiheitsgrad. Diese Tatsache erweist sich als besonders wichtig für die Stabilität der Randzustände gegenüber der Streuung an Störstellen.

Was ist eigentlich das Topologische an diesen Isolatoren? Mathematiker nutzen das Konzept der Topologie, um geometrische Körper unter Dehnungen oder Stauchungen (Homöomorphismen) zu klassifizieren. Beispielsweise haben eine Kugel und ein Teller

1) Allerdings existieren in Graphen noch zusätzliche Entartungen durch Valley- und Spin-Freiheitsgrade.

die gleiche Topologie, da sie sich unabhängig von allen Details global ähneln. In diesem Sinne ist auch die Klassifizierung von topologischen Isolatoren zu verstehen. In den 1980er-Jahren haben Pioniere wie R. B. Laughlin und D. J. Thouless das Konzept der topologischen Klassifizierung erstmals in der Festkörperphysik verwendet und gezeigt, dass es beim QHE eine topologische Invariante gibt, die nur vielfache Werte von e^2/h annehmen kann [6]. In topologischen Isolatoren existiert eine analoge Invariante, die diese Systeme unabhängig von materialspezifischen Details in zwei Klassen einteilt (Z_2 -Klassifizierung). Die topologisch trivialen Isolatoren haben sowohl im Volumen als auch am Rand eine Bandlücke, während bei den topologisch nicht-trivialen Isolatoren die Bandlücke am Rand verschwindet (Abb. 1).

In den Jahren 2006 bzw. 2007 haben Theoretiker sowohl zweidimensionale (2D) als auch dreidimensionale (3D) topologische

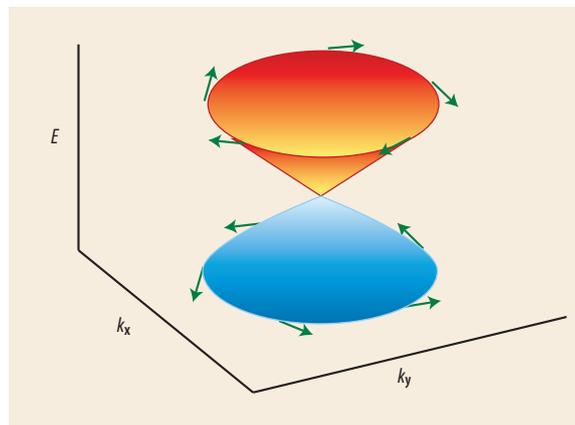


Abb. 2 Dirac-Kegel der Oberflächenzustände in Bi_2Se_3 -Kristallen: Der Spin (Pfeile) ist an die Bewegungsrichtung gekoppelt. Diese Kopplung ist im Leitungsband (rot) bzw. Valenzband (blau) entgegengesetzt orientiert.

Isolatoren vorhergesagt. Die Arbeitsgruppe von L. W. Molenkamp in Würzburg wies nur ein Jahr später erstmals 2D-topologische Isolatoren durch Transportmessungen an HgTe/CdTe -Quantentrögen nach [7]. Wenig später gelang dies der Arbeitsgruppe von M. Z. Hasan in Princeton mit winkelaufgelöster Photoelektronenspektroskopie (ARPES) an BiSb -Kristallen auch für 3D [8]. Laut Theorie sind die Randzustände von 2D- bzw. 3D-topologischen Isolatoren ein- bzw.

zweidimensionale Dirac-Fermionen. Die ARPES-Messungen haben dies für 3D bestätigt.

In den neuen Experimenten haben die Gruppen um Q.-K. Xue an der Tsinghua-Universität in Peking [3] und um T. Sasagawa am Tokyo Institute of Technology [4] Messungen mit der Rastertunnelmikroskopie (STM) bzw. -spektroskopie (STS) an Bi_2Se_3 -Kristallen in Gegenwart eines starken Magnetfelds durchgeführt. Aufgrund der linearen Dispersion hängen die

2) Mithilfe dieser Tatsache wurde der experimentelle Nachweis erbracht, dass sich Elektronen in Graphen wie Dirac-Fermionen verhalten (vgl. Infobox „Der Quanten-Hall-Effekt“ in [2].)

Eigenzustände im Magnetfeld (Landau-Niveaus) der Dirac-Fermionen anders von der Feldstärke und dem Quantisierungsindex n ab als bei Fermionen mit quadratischer Dispersion.²⁾ Die STM/STS-Messungen haben nun klar belegt, dass die beobachteten Landau-Niveaus mit der Landau-Quantisierung von Dirac-Fermionen vereinbar sind. Beispielsweise hängt das Landau-Niveau zu $n = 0$ überhaupt nicht vom Magnetfeld ab. Darüber hinaus haben die Experimente indirekt gezeigt, dass es sich bei den Oberflächenzuständen um einen einzelnen Dirac-Kegel handelt ohne eine weitere Entartung (Abb. 2). Da ARPES-Messungen im Magnetfeld nicht möglich sind, gehen diese Ergebnisse über die bisherigen Experimente hinaus und festigen das Verständnis dieser ungewöhnlichen Materialeigenschaften.

Allerdings deuten die experimentellen Daten auf noch unver-

standene Effekte hin. Beispielsweise sagt die Theorie eine Elektron-Loch-Symmetrie voraus, während sich lochartige Landau-Niveaus überhaupt nicht beobachten ließen. Die Autoren in [4] spekulieren, dass dies mit der Kopplung der Rand- an die Volumenzustände zusammenhängt. Zudem haben Transportmessungen an 2D-Dirac-Fermionen in HgTe/CdTe-Quantentrögen (ohne Bandlücke) im QHE-Regime vor kurzem gezeigt, dass quadratische Korrekturen zum linearen Dirac-Spektrum für die Interpretation der Daten wichtig sind [9]. Solche Korrekturen haben für die Experimente mit Bi₂Se₃ aus Symmetriegründen keine Rolle gespielt, allerdings könnten kubische Korrekturen auch hier einen Einfluss haben. So sind weitere experimentelle und theoretische Arbeiten nötig, um die Physik der Oberflächenzustände in topologischen Isolatoren besser zu verstehen.

Dann kommen auch interessante Anwendungen dieser Materialien ins Blickfeld, etwa in der Spintronik oder als „topologische Quantencomputer“.

Ewelina M. Hankiewicz und Björn Trauzettel

Jun. Prof. Dr. Ewelina M. Hankiewicz und Prof. Dr. Björn Trauzettel, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

[1] M. Z. Hasan und C. L. Kane, arXiv:1002.3895 (2010); X.-L. Qi und S.-C. Zhang, arXiv:1008.2026 (2010)
 [2] B. Trauzettel, Physik Journal, Juli 2007, S. 39
 [3] P. Cheng et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 076801 (2010)
 [4] T. Hanaguri et al., Phys. Rev. B **82**, 081305(R) (2010)
 [5] R. E. Prange und S. M. Girvin (Hrsg.), The Quantum Hall Effect, Springer, New York (1990)
 [6] D. J. Thouless, Topological Quantum Numbers in Nonrelativistic Physics, World Scientific, Singapur (1998)
 [7] M. König et al., Science **318**, 766 (2007)
 [8] D. Hsieh et al., Nature **452**, 970 (2008)
 [9] B. Büttner et al., arXiv:1009.2248 (2010)

DEM KONDENSAT AUF DIE ATOME GESCHAUT

Kalte Quantengase in optischen Gittern bieten sich prinzipiell für Anwendungen in zukünftigen Quantencomputern an. Die Möglichkeiten, sie auf mikroskopischer Skala zu manipulieren und zu beobachten, sind bislang jedoch noch sehr begrenzt. Einem Team um Stefan Kuhr und Immanuel Bloch vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) ist es jetzt gelungen, ein stark korreliertes System Atom für Atom und Gitterplatz für Gitterplatz sichtbar zu machen. Dabei konnten die Physiker beobachten, dass sich die Atome unter bestimmten Bedingungen in optischen Gittern mit einer festen Zahl von Atomen pro Gitterplatz anordnen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, solche Systeme als Register mit einzeln adressierbaren Quantenbits in zukünftigen Quantencomputern zu nutzen.

In ihrem Experiment erzeugten die Physiker mit einer Wolke aus einigen tausend Rubidium-Atomen ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC). Anhand der bei der Laserkühlung entstandenen Fluoreszenzphotonen, die sie mit einem speziell dafür entwickelten Mikroskop aufzeichneten, konnten die Forscher

die einzelnen Atome sichtbar machen und ihre Zahl pro Gitterplatz bestimmen.

Für das BEC zeigten sich erwartungsgemäß relativ große Schwankungen von Gitterplatz zu Gitterplatz (links), da die Teilchen auf ihren Nachbarplatz hinüber „tunneln“ können. Fixiert man jedoch die Teilchen durch hohe Lichtintensitäten des Gitters auf ihren Plätzen, ergibt sich ein sog. Mott-Isolator. Dieser legt eine fast perfekte Struktur mit einer sehr geringen Fehlerdichte an den Tag (Mitte) – ein vorhergesagtes Verhalten, das nun erstmals nachgewiesen wurde. Erhöht man nun die Teilchenzahl, müssen sich zwei Atome einen Gitterplatz teilen. Sie gewinnen dann aber durch inelastische Stöße so viel Energie, dass sie die Falle verlassen und eine „dunkle Zone“ hinterlassen (rechts).

Um Quantenbits gezielt kodieren und auslesen zu können, muss man die Atome individuell manipulieren. Die ersten Experimente hierzu führt das Forscherteam derzeit durch. (OD)

J. F. Sherson et al., Nature, 18. August 2010, DOI 10.1038/nature09378

S. Kuhr, I. Bloch, MPQ

