



**University of
Zurich**^{UZH}

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
Main Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2010

Materialien für die Computer von morgen. Topologische Isolatoren – die neueste Entdeckung der Festkörperphysik

Osterwalder, J

Abstract: Festkörperphysiker entdecken immer wieder Materialien mit faszinierenden elektrischen Eigenschaften. Der jüngste Coup sind topologische Isolatoren. Mit diesen Materialien lässt sich neben der Ladung auch der Spin von Elektronen kontrollieren.

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich
ZORA URL: <http://www.zora.uzh.ch/45862>

Originally published at:

Osterwalder, J. Materialien für die Computer von morgen. Topologische Isolatoren – die neueste Entdeckung der Festkörperphysik. In: Neue Zürcher Zeitung : NZZ, 154, 7 July 2010, p.57.

Materialien für die Computer von morgen

Topologische Isolatoren – die neueste Entdeckung der Festkörperphysik

Festkörperphysiker entdecken immer wieder Materialien mit faszinierenden elektrischen Eigenschaften. Der jüngste Coup sind topologische Isolatoren. Mit diesen Materialien lässt sich neben der Ladung auch der Spin von Elektronen kontrollieren.

Jürg Osterwalder

Wenn wir an Isolatoren denken, sehen wir zuerst die typischen Keramikteile vor uns, welche die Hochspannungsleitungen von den Tragmasten isolieren. Sie leiten keine elektrischen Ströme und sind deshalb auch in elektronischen Bauelementen von Bedeutung, wo es gilt, elektrische Leiterbahnen voneinander abzugrenzen. In den letzten Jahren haben Physiker eine neue Klasse von Isolatoren entdeckt, die eine viel aktivere Rolle in der Elektronik einzunehmen versprechen, die sogenannten topologischen Isolatoren. Anders als herkömmliche Isolatoren können diese Materialien nicht nur Elektronen in kontrollierte Bahnen lenken, sondern gleichzeitig auch den Eigendrehimpuls dieser Teilchen, den Spin, festlegen. Diese Kontrolle über den Spin eröffnet neue Wege bei der Informationsverarbeitung. So werden topologische Isolatoren zum Beispiel als vielversprechende Kandidaten für die Realisierung eines Quantencomputers gehandelt.

Erzwungene Leitfähigkeit

Topologische Isolatoren sind in ihrem Inneren vollständig elektrisch isolierend, besitzen jedoch an ihren Oberflächen eine ultradünne, weniger als einen Nanometer dicke Schicht, die den elektrischen Strom besonders gut leitet. Die Ursache für diese ausserordentliche Leitfähigkeit sind elektronische Oberflächenzustände. Solche Zustände gibt es bei den meisten Materialien, sie sind an sich nichts Besonderes. Das Spezielle an den topologischen Isolatoren ist, dass die leitenden Zustände der Oberfläche quasi aufgezogen werden, und zwar durch fundamentale Symmetrien im Inneren des Materials. Das macht die metallischen Oberflächenzustände quasi immun gegen Verunreinigungen oder Störungen.

Damit aber nicht genug. Dieselben Symmetrien sorgen im Verbund mit einer subtilen Wechselwirkung (der sogenannten Spin-Bahn-Kopplung) dafür, dass die Elektronen nicht zurückgestreut werden können und sich dissipationlos, also ohne Energieverlust, bewegen. Folglich produzieren sie weniger Wärme als gewöhnliche Ströme. Für Computeranwendungen ist das sehr willkommen.

Der erste topologische Isolator wurde 2006 durch die Gruppe von Shou-Cheng Zhang von der Stanford University in Kalifornien theoretisch vorausgesagt, noch bevor der eigentliche Name geprägt war. Es handelte sich dabei noch um eine quasi zweidimensionale Version, wo der Isolator aus einer zehn Nanometer dünnen Schicht aus Quecksilbertellurid (HgTe) besteht, die zwischen zwei Lagen aus Cadmiumtellurid (CdTe) eingeklemmt ist. Die diesem «Oberfläche» besteht in diesem Fall aus dem eindimensionalen Rand der Schicht.

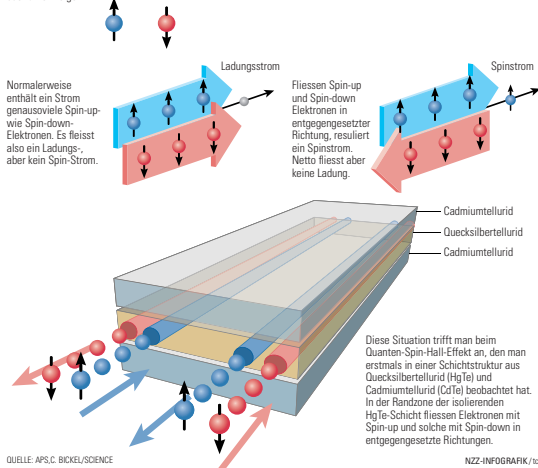
Nur ein Jahr später wurden in der Gruppe von Laurens Molenkamp an der Universität Würzburg an solchen Strukturen bei tiefen Temperaturen tatsächlich eindimensionale Ströme gemessen, die von topologischen Randzuständen herrühren. Der dabei gemessene elektrische Widerstand war immer derselbe, unabhängig von der Breite der Probe: Er war halb so gross wie der absolute Widerstands-Standard h/e^2 , wobei h die Plancksche Konstante und e die Elementarladung ist.

Erinnerungen werden wach

Diese Beobachtung erinnert stark an den sogenannten Quanten-Hall-Effekt.

Der Quanten-Spin-Hall-Effekt

Elektronen besitzen eine Eigenschaft, die man Spin nennt. Dieser Eigendrehimpuls kann bzgl. einer Richtung nach oben oder unten zeigen.



QUELLE: AFSC, BICKEL/SCHENDE

Diese Situation trifft man beim Quanten-Spin-Hall-Effekt an, den man erstmals in einer Schichtstruktur aus Quecksilbertellurid (HgTe) und Cadmiumtellurid (CdTe) beobachtet hat. In der Randzone der isolierenden HgTe-Schicht fließen Elektronen mit Spin-up und solche mit Spin-down in entgegengesetzte Richtungen.

für dessen Entdeckung Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik erhielt. Wird ein zweidimensionales Metall – zumeist realisiert an Grenzschichten zwischen Galliumarsenid und Aluminium-Galliumarsenid – bei tiefen Temperaturen einem starken Magnetfeld ausgesetzt, beginnen sich die Elektronen in Kreisbahnen zu drehen, und es kann kein Strom mehr in der metallischen Schicht fließen. Man erhält also eine Art von Isolator. An den Rändern der Grenzschicht können diese Elektronenbahnen jedoch nicht geschlossen werden. Deshalb bilden sich dort eindimensionale Randströme, aus deren Stärke bei den stärksten Magnetfeldern dem absoluten Widerstands-Standard entpricht.

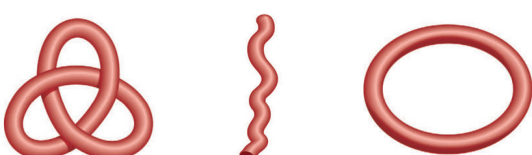
Die Analogie zwischen dem Quanten-Hall-Effekt und dem Experiment von Molenkamp ist allerdings nicht perfekt. Die Halbierung des elektrischen Widerstands von h/e^2 auf $h/2e^2$ deutet darauf hin, dass die Randströme in den topologischen Isolatoren nur halb so viele Elektronen transportieren. Der Grund hierfür ist, dass die Bewegungen der Elektronen mit der Orientierung ihres Spins gekoppelt

ist: Elektronen mit einem Spin nach «oben» können nur in die eine Richtung, solche mit einem Spin nach «unten» nur in die entgegengesetzte Richtung fließen. Darauf bezieht sich auch der Name Quanten-Spin-Hall-Effekt, der für dieses Phänomen in Anlehnung an den Quanten-Hall-Effekt gewählt wurde.

Diese Spinabhängigkeit ist der tiefere Grund dafür, dass die Randströme in den topologischen Isolatoren dissipationlos fließen. Um ein Elektron nämlich in die Gegenrichtung zu streuen, müsste gleichzeitig sein Spin umgekehrt werden, was sehr unwahrscheinlich ist. Auch für Anwendungen ist die Spinabhängigkeit der Randströme äusserst interessant. Sie erlaubt es zum Beispiel, die beiden Spin-Sorten voneinander zu trennen. Solche Spin-Weichen sind ein wichtiges Bauelement für die sogenannte Spintronik. Dieses aufstrebende Arbeitsgebiet verfolgt das Ziel, neben der elektrischen Ladung auch den Spin von Elektronen für die elektronische Informationsverarbeitung zu nutzen.

Der Schritt von 2-D nach 3-D

Topologisch geschützte Leitfähigkeit



J. Os. - Die Topologie ist ein Teilgebiet der Mathematik. Sie untersucht jene Eigenschaften von geometrischen Körpern, die sich bei einer stetigen Verformung nicht verändern. Das bekannteste Beispiel ist die topologische Äquivalenz einer Kaffeetasse und eines Torus. Die besagte Eigenschaft besteht hier darin, dass es auf den Oberflächen dieser zwei Objekte geschlossene Wege gibt, welche durch das Loch (bei der Tasse ist dies der Henkel) hindurchgehen, und solche die das nicht tun. Daran ändert sich nichts, wenn man den Torus stetig in eine Tasse verformt. «Knetet» man jedoch den Torus zu einer Kugel, dann verschwindet das Loch, und die besagten Wege durch das Loch existieren plötzlich nicht mehr auf der Oberfläche des Körpers. Torus und Kugel sind also topologisch nicht äquivalent.

In einem topologischen Isolator sind es die Symmetrie-Eigenschaften der Elektronenbahnen bezüglich der Raumpiegelung, welche die topologische Äquivalenz oder eben Nicht-Äquivalenz bestimmen. Die Rolle des «Lochs» über-

nimmt die Bandlücke, durch die das Material zum Isolator wird. Dieser verbotene Bereich von Elektronenenergien erhält durch einen relativistischen Effekt, die sogenannte Spin-Bahn-Wechselwirkung, ihre besondere topologische Eigenschaft. Bei schweren Elementen wie Bismut ist dieser Effekt besonders stark ausgeprägt.

Bringt man nun einen topologischen Isolator mit einem normalen Isolator (das kann auch Luft sein) in Kontakt, dann müssen sich an der Grenzfläche metallisch leitende Zustände ausbilden. Der Grund hierfür ist, dass die beiden Isolatoren topologisch nicht äquivalent sind: Die Brezel (sie symbolisiert den topologischen Isolator) lässt sich durch Deformationen nicht in den Ring (normaler Isolator) überführen. Deshalb kann die Grenzfläche nicht isolierend bleiben – der Strang muss aufgeschnitten werden. Die metallisch leitenden Zustände, die sich in der Grenzschicht ausbilden, können selbst durch Verunreinigungen nicht zerstört werden. Man sagt deshalb, sie seien topologisch geschützt.

Für reale Anwendungen sind die zweidimensionalen Systeme allerdings nur bedingt geeignet. Zum einen sind die Schichtstrukturen sehr aufwendig herzustellen. Zum anderen liessen sich die speziellen Effekte dieser Systeme nur bei tiefen Temperaturen beobachten. Deshalb begann man, nach einfacheren und robusteren Systemen zu suchen. Das führte rasch zu den dreidimensionalen topologischen Isolatoren, die vor drei Jahren zum ersten Mal erwähnt wurden. Damals zeigten die theoretischen Physiker Charles Kane und Eugene Mele an der University of Pennsylvania auf, welche ganz speziellen Voraussetzungen im Inneren eines Isolators vorliegen müssen, damit er topologische Zustände auf seinen Oberflächen ausbildet. Die Forscher gaben den Festkörperphysikern ein relativ einfaches Rezept, mit dem sich nach solchen Materialien suchen liess. Gleichzeitig nannten sie einen ersten Kandidaten, nämlich Legierungen des Schwermetalls Bismut mit dem leichteren Halbleitend Antimon.

Tatsächlich konnten die Gruppen von Bob Cava und Zahid Hasan von der Princeton University im Jahr 2008 erste Proben von genügender Qualität herstellen und mit spektroskopischen Methoden die charakteristische Signatur der topologischen Oberflächenzustände nachweisen. Ein Jahr später gelang denselben Forschern in Zusammenarbeit mit unserer Oberflächenphysikgruppe an der Universität Zürich und mit Hugo Dil und seinen Mitarbeitern am Paul-Scherrer-Institut der Nachweis, dass diese Zustände wirklich nur eine Spin-Sorte tragen. Wie theoretisch vorausgesagt, liegt der Spin parallel zur Bewegungsrichtung der Elektronen. Bei herkömmlichen Materialien ist das anders: Hier zeigen genauso viele Spins in die eine wie in die entgegengesetzte Richtung.

Bessere Materialien

Eine Hauptstossrichtung der Forschung liegt gegenwärtig in der Suche nach besseren topologischen Isolatoren. Je kleiner nämlich die parasitären Leckströme sind, die bei Raumtemperatur im Inneren des Materials fließen, desto deutlicher können die topologischen Randströme zutage treten. Gleichzeitig versucht man, Proben mit möglichst kleinem Querschnitt zu synthetisieren, um den relativen Oberflächenanteil zu vergrössern.

Obwohl das Gebiet der topologischen Isolatoren noch jung ist, gibt es in der Fachliteratur bereits viele Konzeptvorschläge für neuartige elektronische und spintronische Komponenten, welche die einzigartigen Eigenschaften dieser Materialien ausnützen. Bringt man etwa einen topologischen Isolator in die Nähe eines Supraleiters, so wird die metallische Oberfläche des Isolators supraleitend. Wie Kane zeigen konnte, sollten sich in der supraleitenden Grenzschicht völlig neuartige Anregungen mit teilchenartigen Eigenschaften erzeugen lassen. Diese sogenannten Majorana-Fermionen haben den gleichen Spin wie Elektronen, tragen aber keine elektrische Ladung. Gegenwärtig wird in mehreren Labors daran gearbeitet, diese Idee umzusetzen.

Inzwischen gibt es auch Vorschläge, wie sich mit Hilfe von Majorana-Fermionen Quantenbits, also die Informationseinheiten eines Quantencomputers, realisieren lassen könnten. Wegen der besonderen Eigenschaften der Majorana-Fermionen wäre ein aus solchen Quantenbits bestehender Quantencomputer topologisch vor Fehlern geschützt. Damit wäre eine der grössten Hürden auf dem Weg zu einem funktionsfähigen Quantencomputer dem Weg geräumt. Es ist deshalb kein Wunder, dass topologische Isolatoren gegenwärtig von vielen Forschern als «the hottest topic in condensed matter physics» betrachtet werden.

Der Autor leitet die Gruppe für Oberflächenphysik am Physik-Institut der Universität Zürich.

Eine Frage der Perspektive

Vielfalt von Supernovae nur Schein

Supernovae vom Typ Ia dienen Kosmologen zur Entfernungsbestimmung. Die beobachtete Vielfalt dieser Sternexplosionen hat jedoch Zweifel aufkommen lassen, wie zuverlässig dieses Distanzmass ist. Jetzt geben Astronomen Entwarnung.

Thorsten Dambeck

Supernovae überraschen Astronomen durch ihr plötzliches Aufblähen. Ein zuvor unscheinbarer Stern erhöht seine Helligkeit enorm, nach einigen Wochen schwindet der Glanz wieder. Bei allen Supernovae vom Typ Ia zeigt die Lichtkurve einen ähnlichen Verlauf. Daraus schliessen Astrophysiker, dass diese Sternexplosionen nach einem einheitlichen Muster ablaufen. Das verleiht ihnen eine besondere Bedeutung. Mit der richtigen Eichung kann aus dem Verlauf der Lichtkurve die Distanz dieser Ereignisse mit einer Ungenauigkeit von nur zehn Prozent gemessen werden. Das ist eine wichtige Grundlage, um die Expansion des Kosmos zu vermessen. Es gibt allerdings Zweifel an der Zuverlässigkeit dieses Distanzmasses. Trotz ihrem fast identischen Helligkeitsverlauf unterscheiden sich die Supernovae nämlich in ihren spektralen Eigenschaften. Eine internationale Forschergruppe hat nun herausgefunden, woher diese Vielfalt in der Einheit kommt.¹

Nach der gängigen Theorie entstehen Supernovae vom Typ Ia in Doppelsystemen. Dabei zieht ein Weisszer Zwerg (ein alter, fast ausgebrannter Stern) so lange Materie von seinem Begleiter an, bis er 1,38 Sonnenmassen erreicht. Durch den Massenzuwachs steigen Druck und Temperatur im Inneren des Weissen Zwergs. Wird die kritische Masse erreicht, zünden spontan Kernfusionsreaktionen: Sauerstoff- und Kohlenstoffatome, die hauptsächlich Bestandteile eines Weissen Zwergs, verschmelzen zu schwereren Atomen. Die Zündung geht in eine Kettenreaktion über, welche den Stern binnen weniger Sekunden zerreisst. Zurück bleibt eine Explosionswolke, die sich typischerweise mit einer Geschwindigkeit von 10 000 Kilometern pro Sekunde ausbreitet. Die radioaktiven Isotope in der Wolke – insbesondere Nickel-56 mit einer Halbwertszeit von sechs Tagen – bestimmen die zeitliche Entwicklung der Leuchterscheinung.

In den letzten Jahren haben Astronomen eine verwirrende Vielfalt bei den Supernovae vom Typ Ia festgestellt. Einige scheinen ihre Explosionswolken mit ungewöhnlichem Tempo, etwa 50 Prozent schneller als typisch, auszustossen. Mit Langzeitbeobachtungen, teilweise Monate nach dem Supernova-Ereignis, konnten Keichi Maeda von der Universität Tokio und seine Kollegen nun zeigen, dass die expandierende Wolke asymmetrisch im Weltraum verteilt ist. Daraus und aus Modellrechnungen schliessen sie, dass der Grundstein für diese Asymmetrie bereits in den dramatischen Sekunden der Explosion gelegt wurde. So deuten die Analysen darauf hin, dass die Explosion ausserhalb des Zentrums des Zwergsterns beginnt. Die unterschiedlichen spektralen Eigenschaften erweisen sich somit als weitgehend verortet – ein zufälliger Effekt, der aus den unterschiedlichen Blickwinkeln resultiert, aus denen die Supernovae beobachtet werden.

Laut Stefan Taubenberger vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, einem Co-Autor der Studie, dürfte dieses Resultat die Kosmologen beruhigen. Denn es entkräftet Bedenken, die Supernovae vom Typ Ia könnten wegen ihrer spektralen Vielfalt ungeeignete Indikatoren für kosmische Entfernungen sein. Es besteht sogar die Hoffnung, durch ein besseres Verständnis dieser Supernovae die Ausdehnung des Weltalls noch genauer vermessen zu können.

¹ Nature 466, 37/38; 82–85 (2010).