
TOPOLOGIE

Weyl sie exotisch sind

In den letzten Jahren wurden viele neue topologische Materialien mit ungewöhnlichen Eigenschaften entdeckt, darunter auch Weyl-Halbmatalle.

Johannes Gooth, Jürgen Kübler und Claudia Felser

Weyl-Halbmatalle sind topologische Materialien, die durch die Quantenzustände ihrer Elektronen an Kreuzungspunkten in ihrer Bandstruktur neuartige exotische Eigenschaften zeigen. An diesen Kreuzungspunkten verhalten sich die Leitungselektronen wie relativistische chirale Teilchen – sogenannte Weyl-Fermionen. Zuerst wurden diese in der Teilchenphysik vermutet, nun aber in Festkörpern gefunden.

Elektronische Eigenschaften von Festkörpern sind in unserem Leben allgegenwärtig. Sie bestimmen unter anderem die Farbe von Materialien und deren Festigkeit und werden in elektrischen Bauelementen nutzbar

gemacht. Sie sind auch Grundlage zahlreicher Physik-Nobelpreise; prominente Beispiele sind die Hochtemperatur-Supraleitung (1987), der Riesenmagnetowiderstand (2007) oder Graphen (2010). Die elektronischen Eigenschaften von Festkörpern ergeben sich aus der Wechselwirkung von Elektronen mit den Atomen, aus denen der Festkörperkristall aufgebaut ist. Die Elektronen in einem Festkörper spüren die umliegenden Ionenrümpfe und können dadurch andere Eigenschaften besitzen als Elektronen im freien Raum.

Die Dispersionsrelation der Elektronen in einem Festkörperkristall, also die Relation der Energie mit dem Impuls, lässt sich durch das Bändermodell beschreiben, das

in Bandstrukturdiagrammen darstellbar ist. Aus solchen Diagrammen sind unter anderem die Gesamtmasse der Elektronen und deren Geschwindigkeit im Festkörper abzulesen. Die einzelnen Bänder können mit Elektronen gefüllt bzw. besetzt (in den Abbildungen in diesem Artikel farblich dargestellt) oder leer bzw. unbesetzt sein. Die Fermi-Energie, welche die besetzten von den unbesetzten Zuständen trennt, bestimmt den „Füllstand“ der Elektronen in einem Festkörper. In geordneten Phasen, wie sie in Kristallen und Magneten vorliegen, legen vor allem Symmetrien die Form der Bandstruktur fest. Denn in einem Kristall sind die Ionen aufgrund ihrer elektrostatischen Wechselwirkungen periodisch angeordnet, wodurch die kontinuierliche Symmetrie des Raums unter Rotationen und Translationen gebrochen wird. Bei typischen Magneten ist zusätzlich ein Teil der Rotationssymmetrie zusammen mit der Zeitumkehrsymmetrie gebrochen. Ändert sich die Symmetrie des Festkörperkristalls, ändern sich folglich auch die Bandstruktur und damit die elektrischen und optischen Eigenschaften des Materials.

Festkörper topologisch klassifiziert

Historisch werden Festkörper anhand grundlegender Bandstrukturtypen und den daraus folgenden elektrischen und optischen Eigenschaften in Isolatoren, Halbleiter und Metalle oder Halbmetalle eingeteilt. Isolatoren und Halbleiter weisen an der Fermi-Energie einen Bereich ohne Elektronenzustände auf, also eine Bandlücke, welche die besetzten Bänder (Valenzband) von den unbesetzten (Leitungsband) trennt. Metalle und Halbmetalle weisen keine Bandlücke auf, wobei sich Valenz- und Leitungsband in Halbmetallen nur an einem Punkt berühren.

Lange Zeit wurde angenommen, dass Festkörper durch diese Bandstrukturtypen vollständig beschrieben sind. Dies änderte sich durch die Entdeckung des Quanten-Hall-Effekts in den 1980er-Jahren. Elektronen, die auf zwei Dimensionen beschränkt und einem starken Magnetfeld ausgesetzt sind, können völlig neue elektrische Eigenschaften zeigen, ohne weitere Symmetrien außer der Zeitumkehrsymmetrie zu brechen. Aufgrund der Quantisierung elektronischer Zustände im Magnetfeld hat ein solches System eine Energielücke an der Fermi-Energie. Trotz dieser Lücke ist dieser Zustand aber kein herkömmlicher Isolator, sondern hat metallische Ränder und eine quantisierte Hall-Leitfähigkeit. Für die erste Beobachtung eines solchen Systems bekam Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis. Dies war der Beginn der topologischen Klassifizierung von Festkörpern.

Die Topologie ist ein Zweig der Mathematik und befasst sich mit Deformationen von Objekten. Objekte, die sich kontinuierlich ineinander umformen lassen, zählen zu einer bestimmten topologischen Klasse. Im Gegensatz dazu gehören Objekte, die nur durch Zerschneiden oder Brechen ineinander umzuformen sind, zu verschiedenen topologischen Klassen. Ein Beispiel für eine topologische Klassifizierung ist diejenige nach der Anzahl von Löchern in einem Gegenstand. So gehören eine Tasse und ein Donut zur selben topologischen Klasse (beide ein Loch), ein Teller (Null Löcher) aber zu einer anderen.

Hierbei kann es sich auch um quantenmechanische Objekte handeln. Beispielsweise sind Elektronenzustände anhand einer Eigenschaft topologisch zu klassifizieren, welche die Summe der Berry-Krümmung entlang eines geschlossenen Weges im Impulsraum ist. Zugegebenermaßen ist dies eine sehr abstrakte Größe. Die Berry-Krümmung ist eine quantenmechanische Eigenschaft, die eng mit der Phase der Elektronenwellenfunktion verknüpft ist, die ein Elektron nach Durchlaufen eines geschlossenen Weges aufnimmt, wenn es wieder zum Ursprung zurückgekehrt ist [1]. Es mag etwas kontraintuitiv klingen, dass sich die Eigenschaft eines Objektes ändert, wenn es nach Durchlaufen eines geschlossenen Weges zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt, aber Systeme mit solchen Eigenschaften gibt es auch in der klassischen Welt. Ein bekanntes Beispiel ist das Foucault-Pendel, dessen Schwingungsrichtung nach einem Tag vom Wert des Vortags abweicht. Analog verhält es sich mit der Phase der Elektronen in einem Festkörper. So gehören zwei Festkörperkristalle zur selben topologischen Klasse, wenn die Summe der Berry-Krümmung ihrer Elektronen entlang eines geschlossenen Weges im Impulsraum dieselbe ganze Zahl ergibt (also für beide 1 oder für beide 2 usw.). Festkörperkristalle, für die diese Summe unterschiedliche ganze Zahlen ergibt (also z. B. 1 und 2 oder 4 und 3), gehören zu verschiedenen topologischen Klassen.

Unterschiedliche topologische Klassen von Festkörperkristallen haben trotz ihrer Abstraktheit unterschiedliche elektrische Eigenschaften, die tatsächlich im Experiment zu beobachten sind. Somit können elektronische Zustände verschiedener topologischer Klassen durch „Brechen“ der Bandstruktur mittels eines Magnetfeldes ineinander übergehen, ohne eine weitere Symmetrie im Festkörpersystem zu brechen. In anderen Worten stellt die quantisierte Hall-Leitfähigkeit in einem zweidimensionalen Elektronensystem, das einem starken Magnetfeld ausgesetzt ist, direkt die topologische Klasse des Systems in Einheiten des Leitfähigkeitsquants dar. Eine der wichtigsten Entdeckungen der letzten Jahre ist, dass die topologische Ordnung auch in einigen dreidimensionalen Materialien auftritt. In diesen Materialien übernimmt die Spin-Bahn-Kopplung, eine intrinsische Eigenschaft aller Feststoffe, die Rolle des Magnetfeldes.

Trivial oder topologisch?

Aus den oben besprochenen Bandstrukturdiagrammen lassen sich triviale und topologische Materialien allerdings nicht einfach unterscheiden. Dazu ist es nötig zu wissen, aus welchen Atomorbitalen die einzelnen Bänder stammen. In trivialen isolierenden und halbleitenden Materialien bilden meist die s -Elektronen das Leitungsband und die p -Elektronen das Valenzband (**Abb. 1a**). Wenn die Materialien aus schweren Elementen mit einer Kernladungszahl $Z > 32$ bestehen, können die Bänder der äußeren s -Elektronen allerdings unterhalb oder gerade an der Fermi-Energie erscheinen. Dies kann dazu führen, dass sich das Minimum der s -Bänder unterhalb des Maximums der p -Bänder befindet und s - und p -Bänder sich an Kreuzungspunkten (**Abb. 1b**) schneiden. Dies ist als Bandinversion bekannt.

Aufgrund starker Spin-Bahn-Kopplung können solche Kreuzungspunkte aber verboten sein und aufspalten. Es entsteht wieder eine Energielücke (Abb. 1c), wobei Teile der *s*-Elektronen nun das Leitungsband bilden, während Teile der *p*-Elektronen das Valenzband bilden. In Bezug auf die Bandlücken von normalen Isolatoren spricht man in diesem Fall von einer negativen bzw. invertierten Bandlücke. Materialien, die solche invertierten Bandlücken aufweisen, heißen topologische Isolatoren.

Tatsächlich finden sich auch bei topologischen Isolatoren, analog zu Quanten-Hall-Systemen, metallische Zustände an den Probengrenzen. Solche Zustände treten immer an der räumlichen Schnittstelle zwischen Regionen auf, die verschiedene topologische Klassifizierungen haben. Dies ist am einfachsten zu erkennen, wenn man sich eine Grenze zwischen einem normalen (positive Bandlücke) und einem topologischen Isolator (negative Bandlücke) vorstellt, an der die Bandstruktur der beiden Materialien kontinuierlich ineinander übergeht. Irgendwo auf dem Weg muss die Energielücke verschwinden, um von positiv zu negativ zu wechseln. Die Oberfläche eines topologischen Materials oder auch des Quanten-Hall-Systems ohne Grenzfläche zu einem anderen Material kann als Grenzfläche zum Vakuum gelten, das wie ein herkömmlicher Isolator zur trivialen topologischen Klasse gehört. Im Jahr 2016 wurde die Entdeckung der topologischen Isolatoren mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Halbmetalle mit exotischen Eigenschaften

Bisher haben wir unsere Diskussion auf topologische Isolatoren beschränkt. Die elektronische Struktur eines Festkörpers kann aber auch stabile Kreuzungen invertierter Bänder aufweisen, wenn diese aus Symmetriegründen geschützt bzw. nicht verboten sind. Solche Materialsysteme sind topologische Halbmetalle, in denen sich exotische topologische Eigenschaften aus den Kreuzungspunkten der Elektronenbänder ableiten. Gewöhnliche Halbmetalle haben meist eine gekrümmte, in der Regel parabelförmige, Dispersion, die nichtrelativistische Elektronen mit endlicher Ruhemasse beschreibt. Im Gegensatz dazu hängen bei topologischen Halbmetallen in der Nähe ihrer Kreuzungspunkte Energie und Impuls oft linear zusammen. Eine lineare Dispersion beschreibt relativistische Elektronen ohne Ruhemasse, die sich mit etwa einem Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit bewegen – wie Elementarteilchen in der Hochenergiephysik. Topologische Halbmetalle mit vierdimensionaler Symmetrie sind als Dirac-Halbmetalle bekannt. Graphen, eine Schicht von Kohlenstoffatomen des Graphits, ist das prominenteste Beispiel für solch ein Material.

Seit rund fünf Jahren ist eine neue Klasse von Materialien bekannt: Weyl-Halbmetalle (Abb. 2a), benannt nach dem Physiker Hermann Weyl. Auf den ersten Blick ähnelt ihre elektronische Struktur der eines Dirac-Halbmetalls. Allerdings unterscheiden sich beide Halbmetalle in ihrer Symmetrie und daher auch in ihren Eigenschaften. Ein Dirac-Halbmetall ist zentrosymmetrisch, während ein Weyl-Halbmetall eine niedrigere Symmetrie aufweist. Es besitzt kein Inversionszentrum in der Kristallstruktur –

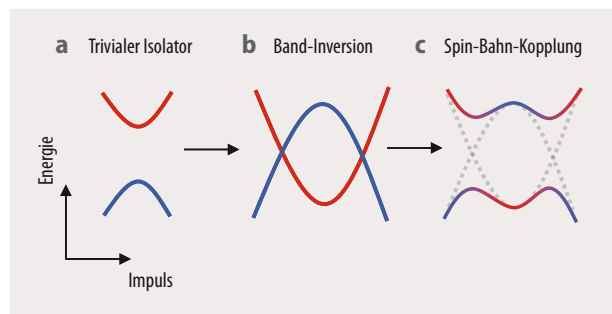


Abb. 1 Ein trivialer Isolator besitzt eine Bandlücke zwischen Leitungs- und Valenzband (a). Die Zustände der *s*-Elektronen sind rot gefärbt, die der *p*-Elektronen blau. Bei schweren Ionen tritt eine Bandinversion auf (b) – hierbei sind *s*- und *p*-Bänder der Elektronen invertiert. Starke Spin-Bahn-Kopplung kann zur Aufspaltung der Bänder führen (c). Die so entstehende Bandlücke ist invertiert und stellt einen topologischen Isolator dar.

was die Inversionskristallsymmetrie bricht, oder es besitzt eine ferromagnetische Ordnung, welche die Zeitumkehrsymmetrie bricht. Weyl-Halbmetalle besitzen im Gegensatz zu Dirac-Halbmetallen immer Paare von Bandkreuzungen. Die Elektronen an diesen Kreuzungspunkten verhalten sich wie Weyl-Fermionen [4, 5], deren Eigendrehimpuls bzw. Spin mit ihrem linearen Impuls, der Bewegungsrichtung des Elektrons, unauflöslich verknüpft ist.

Die Händigkeit des Spins der Elektronen relativ zu ihrer Bewegungsrichtung wird Chiralität χ genannt (Abb. 2). Rechtshändige Elektronen haben eine Chiralität von $\chi = -1$, für linkshändige gilt $\chi = +1$. Das Besondere von Weyl-Materialien ist, dass in jedem Paar ihrer Kreuzungspunkte jeweils ein Kreuzungspunkt mit linkshändigen Elektronen existiert und einer mit rechtshändigen. Aus den chiralen Volumeneigenschaften ergeben sich besondere topologische Oberflächenzustände des Weyl-Kristalls, sog. Fermi-Bögen, welche die Weyl-Punkte verbinden (Abb. 2b) und zu exotischen elektronischen Eigenschaften führen.

Anhand einiger Beispiele aus unserer Forschung wollen wir die Eigenschaften von Weyl-Halbmetallen diskutieren. Ein erstes Beispiel ist NbP, das durch Brechung der Inversionssymmetrie gekennzeichnet ist. In NbP-Einkristallen haben wir sowohl die Kreuzungspunktpaare im Inneren des Materials als auch die Fermi-Bögen an der Oberfläche gefunden. Mittels winkelaufgelöster Photoemission (ARPES)

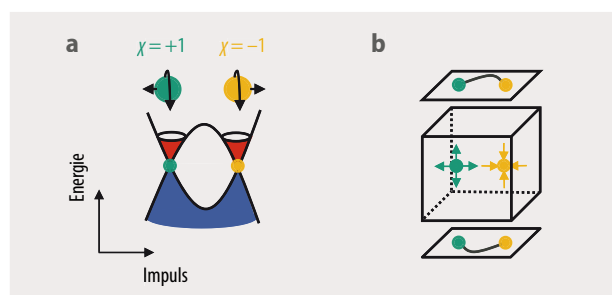


Abb. 2 Die Bandstruktur eines Weyl-Halbmetalls (a) besteht aus Paaren von linearen Kreuzungspunkten mit Chiralität $\chi = +1$ bzw. -1 . Fermi-Bögen, also topologische Zustände an der Oberfläche, verbinden die Weyl-Kreuzungspunkte (b).

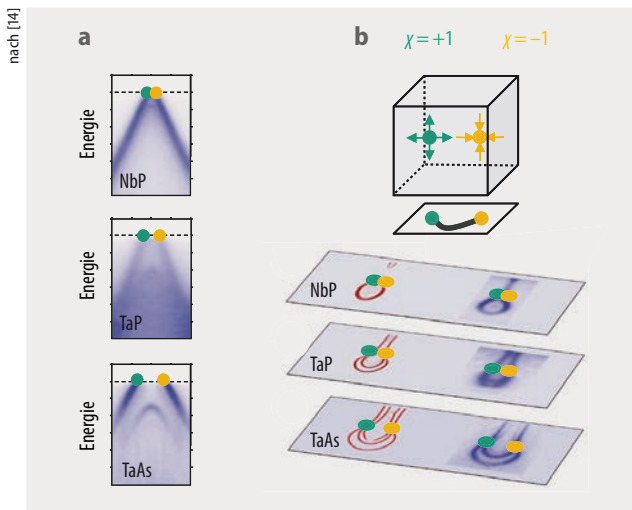


Abb. 3 Die Bilder der winkelaufgelösten Elektronen-Emissionsspektroskopie vom Inneren der Materialien NbP, TaP und TaAs zeigen deutlich die Zunahme der Bandaufspaltung von oben nach unten (a). Die gelben und grünen Punkte symbolisieren Weyl-Punkte unterschiedlicher Chiralität. Die theoretische Vorhersage der Größe der Fermi-Bögen (b, linke Seite) stimmt hervorragend mit der experimentell gemessenen Bandstruktur (rechte Seite) überein.

lässt sich die elektronische Struktur und damit der gesuchte Fermi-Bogen fotografieren. Für eine Serie von Einkristallen von NbP, TaP, NbAs und TaAs konnten wir die elektronische Struktur damit experimentell bestimmen und mit Ab-initio-Bandstrukturrechnungen vergleichen (**Abb. 3**). Je schwerer die Atome, umso höher die Aufspaltung der Bänder aufgrund der Spin-Bahn-Kopplung (**Abb. 3a**). Die theoretische Vorhersage der Fermi-Bögen stimmt perfekt mit der gemessenen Bandstruktur überein (**Abb. 3b**). Einige Elektronen verhalten sich, als seien sie nahezu masselos, was zu extrem hoher Mobilität führt. Im Experiment steigt der elektrische Widerstand von NbP in einem Magnetfeld von 62 T und bei 1,5 K um 8 100 000 Prozent des Widerstandes im Nullfeld an.

Chirale und axial-gravitative Anomalie

Klassisch ist die Chiralität von Weyl-Fermionen eine streng erhaltene physikalische Größe – ähnlich wie der Drehim-

puls, die Energie oder elektrische Ladung. Somit können nicht einfach mehr Teilchen einer Chiralität entstehen als von der anderen. Ein Beschleunigerexperiment in den 1970er-Jahren zeigte allerdings, dass der Erhaltungssatz der Chiralität in parallelen elektrischen und magnetischen Feldern gebrochen ist [6, 7], wenn man zu einer quantenmechanischen Beschreibung übergeht. Darüber hinaus sollte eine zugrundeliegende gekrümmte Raumzeit einen deutlichen Beitrag zum chiralen Ungleichgewicht liefern. Dieser Effekt ist als axial-gravitative Anomalie bekannt. Da die Gravitationsfelder auf unserer Erde relativ schwach sind, könnte man annehmen, dass die axial-gravitative Anomalie nicht direkt zu beobachten ist. Tatsächlich kann sie in Wärmeexperimenten aber eine entscheidende Rolle spielen, da Temperaturgradienten in relativistischen Systemen analog zu Gravitationsfeldern wirken.

In Weyl-Halbleitern führt der Erhaltungssatz der Chiralität zu einer Unterdrückung des elektrischen Stroms, wie anhand einer einfachen Weyl-Bandstruktur zu verstehen ist (**Abb. 4a**): Ohne Magnetfeld gibt es ein Paar von Weyl-Kreuzungspunkten. Am linken bewegen sich die Elektronen nach links (Chiralität $\chi = +1$), am rechten bewegen sie sich nach rechts (Chiralität $\chi = -1$). Im thermischen Gleichgewicht, also wenn kein elektrischer Strom durch das Weyl-Halbleitend fließt, ist die Fermi-Energie in beiden Weyl-Kegeln gleich. Dann gibt es genauso viele Elektronen, die sich nach rechts bewegen wie nach links, und somit keinen Ladungstransport. Dies bedeutet genauso viele rechtshändige wie linkshändige Weyl-Fermionen und eine Chiralität des Gesamtsystems von Null.

Liegt an einem normalen Metall ein elektrisches Feld bzw. ein Temperaturgradient an (z. B. von links nach rechts), fließt ein elektrischer Strom von links nach rechts, weil sich mehr Elektronen nach rechts bewegen. Aber in einem Weyl-Halbleitend sieht es anders aus: Ein Stromfluss von links nach rechts würde einen höheren Füllstand im rechten Weyl-Kegel bedeuten als im linken (**Abb. 4b**). Entsprechend gäbe es mehr rechtshändige Weyl-Fermionen im Halbleitend als linkshändige. Dies ist aber laut Erhaltungssatz verboten. Ein zusätzliches Magnetfeld parallel zum elektrischen Feld bzw. Temperaturgradienten kann die Elektronenzustände quantisieren, wenn es hoch genug ist. Dies führt analog zur Hochenergiephysik zur Brechung

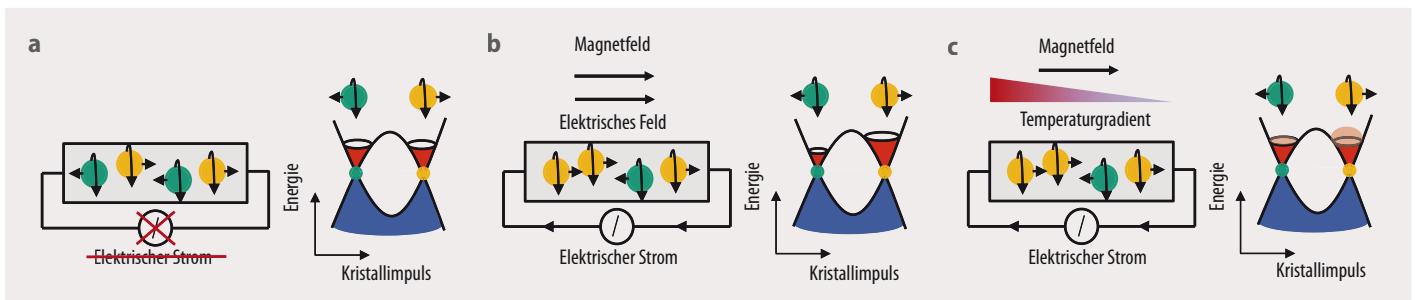


Abb. 4 Das Bandstrukturdiagramm eines Weyl-Halbleiters ohne Magnetfeld (a, rechts) zeigt ein Paar von Weyl-Kreuzungspunkten. Der linke (grün) stellt Elektronen dar, die sich nach links bewegen, der rechte Kreuzungspunkt (gelb) sich nach rechts bewegende Elektronen. Liegen elektrisches und magnetisches Feld parallel an

(b), besitzt der rechte Weyl-Kegel einen höheren Füllstand als der linke. Wenn zusätzlich zum Temperaturgradienten ein Magnetfeld anliegt (c), werden Elektronen stetig vom linken Kegel in den rechten umverteilt.

des Erhaltungssatzes der Chiralität und ermöglicht es, Elektronen zwischen den linken und rechten Weyl-Kegeln stetig umzuverteilen (Abb. 4c). Dieses induzierte Aufbrechen der chiralen Symmetrie ist eine makroskopische Form der chiralen bzw. axial-gravitativen Anomalie und führt in Weyl-Halbmatalen zu einem positiven longitudinalen Magnetfeld-abhängigen elektrischen Strom.

Diese Zusammenhänge konnten wir nutzen, um 2017 die chirale und axial-gravitativ Anomalie in NbP durch Messungen des elektrischen bzw. thermoelektrischen Stroms im Magnetfeld nachzuweisen (Abb. 5). Entscheidend dabei ist die relative Orientierung des elektrischen Feldes bzw. des Temperaturgradienten zum magnetischen Feld. Die chirale und auch die axial-gravitativ Anomalie spiegeln sich in einem mit dem Magnetfeld ansteigenden Strom wider. Dies ist nur der Fall, wenn magnetisches und elektrisches Feld parallel zueinander sind, sonst sinken der elektrische und thermoelektrische Strom mit steigendem Magnetfeld.

Magnetische Weyl-Halbmatalle

Die ersten vorhergesagten Weyl-Halbmatalle – $\text{Y}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ und HgCr_2Se_4 – waren magnetisch. Rückblickend ist das nachvollziehbar, da magnetische Weyl-Matalle nahe Verwandte von Quanten-Hall-Systemen sind. Solche Systeme beinhalten im Experiment immer von außen angelegte Magnetfelder und treten damit nicht als natürlicher Festkörper auf. Eine der ersten Ideen für einen topologischen Festkörper ohne externes Magnetfeld waren zweidimensionale Kristalle, die eine ähnliche Bandstruktur wie Quanten-Hall-Systeme ohne Magnetfeld aufweisen, aber zugleich Ferromagnete sind. In solchen Materialien übernimmt die intrinsische Magnetisierung die Rolle des externen Magnetfeldes (Abb. 6a). Auch hier lässt sich die topologische Klassifizierung direkt als Quanten-Anomaler-Hall-Effekt messen – anomal wegen des fehlenden externen Magnetfeldes.

Verbinden sich solche zweidimensionalen Quanten-Anomalen-Hall-Systeme zu einem dreidimensionalen Festkörperkristall, entsteht ein Weyl-Halbmatal. Von einem geschichteten System einzelner zweidimensionaler Quanten-Anomaler-Hall-Systeme ausgehend schließt sich mit stärker werdender Kopplung der zweidimensionalen Schichten die invertierte Bandlücke in Kopplungsrichtung

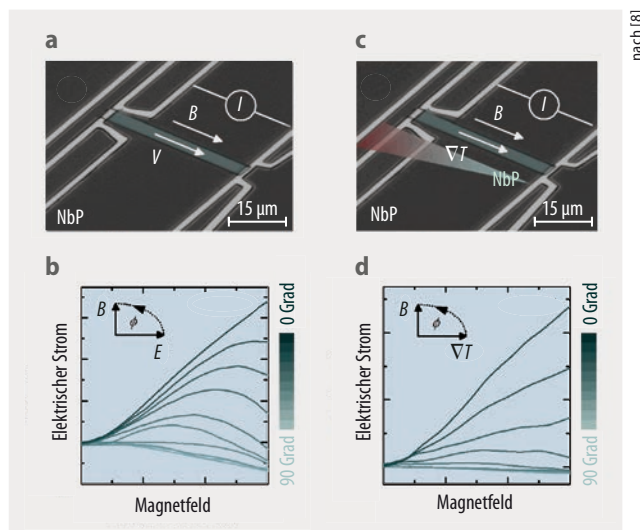


Abb. 5 Bei den Experimenten an NbP wurde der elektrische Strom I als Antwort auf das elektrische und das magnetische Feld (V bzw. B) gemessen (a). Der elektrische Strom hängt für verschiedene Winkel zwischen V und B (Farblegende) vom Magnetfeld ab (b). In einem weiteren Experiment wurde der elektrische Strom I als Antwort auf den Temperaturgradienten (∇T) und das magnetische Feld (B) gemessen (c). Das rote und das grüne Ende des Farbverlaufs stellen die heiße bzw. kalte Seite des NbP-Kristalls dar. Hier hängt der elektrische Strom für verschiedene Winkel zwischen ∇T und B vom Magnetfeld ab. Die chirale und die axial-gravitativ Anomalie zeigen sich in dem Magnetfeld, das mit dem Strom ansteigt.

und erzeugt Weyl-Kreuzungspunkte am Rand der Bandstruktur, die immer weiter in deren Mitte wandern. Jeder Kreuzungspunkt von elektronischen Bändern in ferromagnetischen Materialien ist ein Weyl-Punkt.

2018 haben wir mit $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ erstmals ein intrinsisches magnetisches Weyl-Halbmatal mit Weyl-Kreuzungspunkten nahe der Fermi-Energie realisiert (Abb. 6b) [9]. ARPES-Messungen belegen die Existenz von magnetischen Weyl-Fermionen und sehr langen Fermi-Bögen [9], und Magnetfeld-abhängige elektrische Transportmessungen weisen auf die chirale Anomalie [8]. $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ besitzt zudem einen riesigen anomalen Hall-Effekt (Abb. 6c). Wenn man den gemessenen Anomalen-Hall-Effekt durch die Dicke des Kristalls teilt, resultiert ein Wert, der etwa vom Quanten-Anomalen-Hall-Effekt pro Atomebene zu erwarten ist.

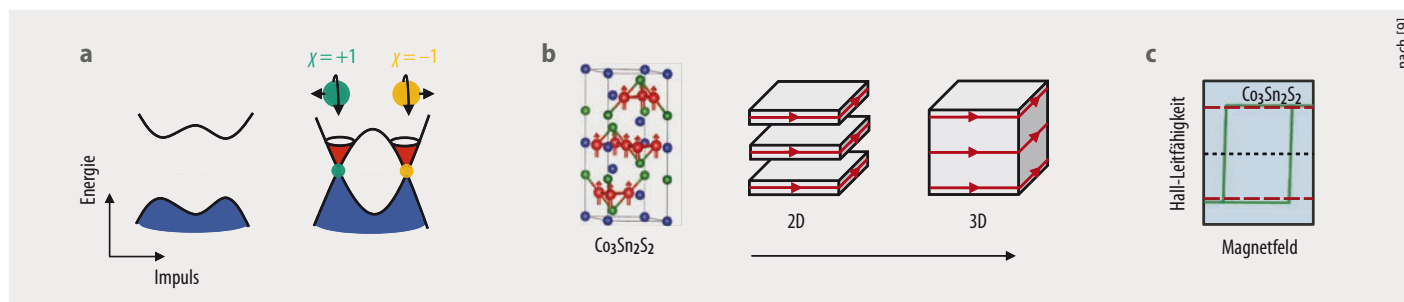


Abb. 6 Aus zweidimensionalen Quanten-Anomalen-Hall-Isolatoren (a, links) lässt sich ein dreidimensionales Weyl-Halbmatal konstruieren (a, rechts). $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ist ein intrinsisches magnetisches Weyl-Halbmatal (b). Die Co-Atome sind hier rot, Sn-Atome blau und S-Atome grün dargestellt. Die Hall-Leitfähigkeit

von $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ist eine Funktion des Magnetfeldes und lässt sich aus einem Übergang von einem geschichteten zweidimensionalen (2D) zu einem dreidimensionalen (3D) Quanten-Anomalen-Hall-Effekt verstehen (c). Die rot gestrichelte Linie markiert den erwarteten Wert des Quanten-Anomalen-Hall-Effekts für eine Co-Schicht.

Mithilfe der Rastertunnelmikroskopie zeigten sich an den Kanten des Materials metallische Ränder.

Diese Ergebnisse deuten auf ein Weyl-Halbmetail hin, das sehr nahe am geschichteten Quanten-Anomalen-Hall-System ist. Die Kopplung der Atomebenen in $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ist somit schwach. Der Kristall hat dadurch eine fast zweidimensionale magnetische und elektronische Struktur. Die tatsächliche Beobachtung des Quanten-Anomalen-Hall-Effekts in einem dreidimensionalen Festkörperkristall, vielleicht sogar bei Raumtemperatur, würde neuartige Computertechnologien und Quantencomputer ermöglichen. Um das zu realisieren, besteht unsere künftige Strategie darin, nach quasi-zweidimensionalen magnetischen Materialien mit topologischen Bandstrukturen zu suchen und diese als Monoschichten oder sehr dünne Filme zu synthetisieren [11, 12]. Bisher sind jedoch keine magnetischen Materialien mit solchen Eigenschaften bekannt.

Wenn Elektronen stark wechselwirken

Während Weyl-Systeme mit freien Elektronen heute experimentell gut untersucht sind, sind Materialien mit stark wechselwirkenden Elektronen weitgehend unerforscht. Durch Einschalten starker Wechselwirkungen zwischen Elektronen mit Gitterschwingungen des Kristallgitters, sogenannte Phononen, kann eine Ladungsdichtewelle in Weyl-Halbmetailen entstehen, welche die beiden Weyl-Kreuzungspunkte verbindet und eine Bandlücke an ihnen öffnet. Der so entstandene Festkörper ist ein Axion-Isolator (Abb. 7). Eine Ladungsdichtewelle ist der energetisch bevorzugte Zustand eines stark gekoppelten Elektron-Phonon-Systems, der – ähnlich einem Supraleiter – durch eine Bandlücke in der Dispersion der freien Elektronen und durch einen kollektiven elektrischen Stromfluss an der Fermi-Energie gekennzeichnet ist.

Das Analogon zum Cooper-Paar im Supraleiter ist das Phason der Ladungsdichtewelle. In einem Weyl-Metail

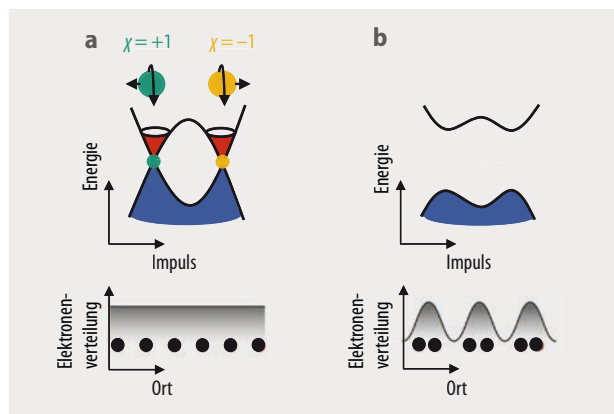


Abb. 7 Bei einem Weyl-Halbmetail (Bandstruktur der freien Elektronen oben in a) sind die Elektronen im realen Raum gleichverteilt (unten). Durch starke Elektron-Phonon-Wechselwirkung im realen Raum entstehen periodische Modulationen der Elektronenverteilung (Ladungsträgerdichtewelle), die wiederum eine Bandlücke an den Weyl-Kreuzungspunkten erzeugen (b). Auch das Kristallgitter wird moduliert. Das Phason einer solchen Ladungsträgerdichtewelle ist ein Axion.

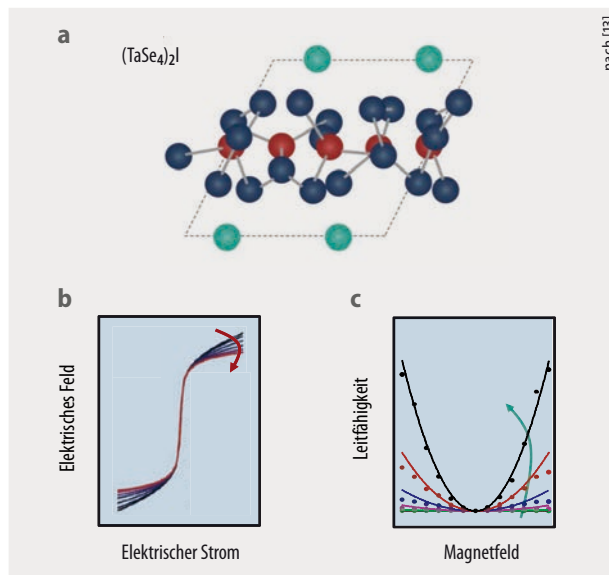


Abb. 8 $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ ist ein quasi-eindimensionales Weyl-Halbmetail (a). Rote Kugeln zeigen Ta-Atome, blaue Kugeln Se-Atome und türkise Kugeln I-Atome. Bei hohen elektrischen Feldern, wo das Phason den elektrischen Stromfluss dominiert, steigt der Strom durch ein parallel zum elektrischen Feld angelegtes Magnetfeld (b). Die Magnetfeldabhängigkeit der longitudinalen Leitfähigkeit (Punkte) stimmt mit dem anomalen Transport einer „axionischen“ Ladungsdichtewelle (Linien) überein (c).

stellt das Phason eine Festkörperversion des Axions dar, das als Elementarteilchen als möglicher Kandidat für Dunkle Materie gilt. Das aus dem Phason resultierende Leitungsverhalten des Festkörpers ist stark nichtlinear – wie bei einer Diode. Die Signatur eines „axionischen“ Phasons ist entsprechend der chiralen Anomalie in einem Weyl-Halbmetail mit freien Elektronen eine positive longitudinale Magnetfeld-abhängige elektrische Leitfähigkeit. Diese axionische Ladungsdichtewelle wurde erst kürzlich experimentell nachgewiesen.

2019 ist es uns gelungen, einen großen positiven Beitrag zur Magnetfeld-abhängigen elektrischen Leitfähigkeit eines Phasons in der Ladungsträgerdichtewelle des Weyl-Halbmetails $(\text{TaSe}_4)_2\text{I}$ zu messen (Abb. 8) [13]. Wir konnten zeigen, dass sich dieser positive Beitrag aus dem anomalen axionischen Beitrag der chiralen Anomalie zum elektrischen Strom des Phasons ergibt und dass dieser an die parallele Ausrichtung der elektrischen und magnetischen Felder gebunden ist (Abb. 8b, c). Das Drehen des Magnetfelds zeigt, dass die Winkelabhängigkeit der Leitfähigkeit mit dem anomalen Transport eines Axions übereinstimmt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich experimentelle Beweise für Axionen in stark korrelierten topologischen Systemen kondensierter Materie finden lassen, die bisher in keinem anderen Kontext zu finden waren.

Ausblick

Bisher kennen wir nur die Spitze des Eisbergs. Immer wieder erscheinen neue theoretische Konzepte über topologische Eigenschaften und Materialien. Auch wenn auf den ersten Blick alle anorganischen Materialien in triviale und

topologische Verbindungen katalogisiert sind, galt dies meist unter Annahme nicht-wechselwirkender Elektronen. Magnetische und korrelierte Materialien fallen nicht in diese Kategorie. So ist zu erwarten, dass ihre genauere Untersuchung weitere neuartige topologische Phasen aufdeckt, die in Festkörpern mit freien Elektronen nicht vorstellbar sind. Dazu gehören unter anderem Kondo-Weyl-Systeme, Weyl-Supraleiter oder dreidimensionale Quanten-Anomale-Hall-Systeme. Nach den bisherigen vielversprechenden Ergebnissen aus Untersuchungen topologischer Halbmetalle bleibt die Frage offen, ob es auch messbare topologische Effekte in Metallen gibt.

Literatur

- [1] M. V. Berry, Proc. R. Soc. London A **392**, 45 (1984)
- [2] M. G. Vergniory et al., Nature **566**, 480 (2019)
- [3] G. E. Volovik, The Universe in a Helium Droplet, Oxford University Press, New York (2003)
- [4] B. Yan und C. Felser, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **8**, 337 (2017)
- [5] H. Weyl, Z. Phys. **56**, 330 (1929)
- [6] S. L. Adler, Phys. Rev. **177**, 5 (1969)
- [7] J. S. Bell und R. Jackiw, Nuovo Cim. **A60** (1969)
- [8] J. Gooth et al., Nature **547**, 324 (2017)
- [9] E. Liu et al., Nat. Phys. **14**, 1125 (2018)
- [10] D. F. Liu et al., Science **365**, 1282 (2019)
- [11] K. Manna et al., Nat. Rev. Mat. **3**, 24 (2018)
- [12] I. Belopolski et al., Science **365**, 1278 (2019)
- [13] J. Gooth et al., Nature **575**, 315 (2019)
- [14] Z. K. Liu et al., Nat. Mat. **15**, 27 (2016)

Die Autoren



Johannes Gooth studierte Physik an der Universität Hamburg und Lund und promovierte 2014 in Physik in Hamburg. Nach Postdoc-Aufenthalten bei IBM Research in Zürich und an der Harvard Universität ist er seit 2018

Juniorgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden.

Jürgen Kübler (FV Tiefe Temperaturen) ist Prof. emer. für theoretische Physik an der TU Darmstadt und lebt heute in Konstanz.

Claudia Felser (FV Magnetismus, FV



Tiefe Temperaturen und AK Chancengleichheit) studierte Chemie und Physik an der Universität Köln, wo sie 1994 ihre Promotion in chemischer Physik abschloss. Seit 2011 ist sie Direktorin am Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden.



Dr. Johannes Gooth, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Nöthnitzer Str. 40, 01187 Dresden, **Prof. Dr. Jürgen Kübler**, TU Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt, **Prof. Dr. Claudia Felser**, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Nöthnitzer Str. 40, 01187 Dresden

Immer für Sie aktiv

Special Qualitätssicherung

Preise und Margen der Lebensmittelindustrie sind unter Druck. Neben der Marktmacht des Handels steigen Energie-, Wasser-, Rohstoff- und Personalkosten. LVT LEBENSMITTEL Industrie berichtet über gangbare Lösungswege in Specials wie Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Qualitätssicherung.

WILEY

Dr. Jürgen Kreuzig
Chefredaktion
Tel.: +49 (0) 6201 606 729
juergen.kreuzig@wiley.com

Stefan Schwartze
Mediaberatung
Tel.: +49 (0) 6201 606 491
stefan.schwartze@wiley.com

Marion Schulz
Mediaberatung
Tel.: +49 (0) 6201 606 565
marion.schulz@wiley.com

Lisa Colavito
Assistenz
Tel.: +49 (0) 6201 606 316
lisa.colavito@wiley.com

Beate Zimmermann
Assistenz
Tel.: +49 (0) 6201 606 316
beate.zimmermann@wiley.com