

■ Weyl es Zeit war

Erstmals wurde ein masseloses Fermion in Form eines Quasiteilchens in der kondensierten Materie entdeckt.

Der deutsche Mathematiker Hermann Weyl hat vor 86 Jahren ein neues Teilchen postuliert [1]. Bei dem so genannten Weyl-Fermion handelt es sich um ein Fermion mit Ladung aber ohne Masse, im Gegensatz zu allen anderen bekannten Fermionen. Dieses exotische Teilchen folgt als spezielle Lösung aus der Dirac-Gleichung – jener Gleichung, die Dirac zur Beschreibung von massebehafteten Elektronen nur ein Jahr zuvor eingeführt hatte [2]. Weyls Lösung erfordert neben masselosen Teilchen die Brechung der fundamentalen Paritätssymmetrie. Zu seinen Lebzeiten war man aber der Ansicht, dass eine Welt im Spiegel betrachtet identisch zu unserer Welt ist und somit die Paritätssymmetrie erfüllt ist. Als Konsequenz fand das Weyl-Fermion lange Zeit nur als theoretisches Konstrukt Beachtung.

Der erste heiße Kandidat für ein Weyl-Fermion war das Neutrino, nachdem die chinesische Physikerin Chien-Shiung Wu 1956 eine Paritätsverletzung im Experiment für diese Teilchen beobachtet hatte und somit alle grundlegenden Voraussetzungen für die masselose Lösung der Dirac-Gleichung vorlagen. Erst um die Jahrtausendwende gelang es, die Frage der Neutrinomasse durch Detektion von Neutrinooszillationen genauer experimentell zu klären. Denn diese erfordern eine endliche Masse, sodass Neutrinos als mögliche Weyl-Fermionen ausscheiden.

Interessanterweise hat das Weyl-Fermion nun doch seinen Weg von einem eleganten theoretischen Konzept in die Realität geschafft – als Quasiteilchen in der kondensierten Materie. Diese Möglichkeit wird schon seit Jahren diskutiert, aber erst in diesem Jahr gab es konkrete theoretische Vorhersagen [3, 4] für die Existenz von Weyl-Fermionen in einer Familie nicht-magnetischer Materialien (TaAs, TaP, NbP, NbAs) mit gebrochener Inversionssymmetrie (analog zur obigen Parität). Nur kurze Zeit spä-

ter gelang es, diese experimentell mittels winkelaufgelöster Photoemissionsspektroskopie (ARPES) zu bestätigen [5, 6, 8–10].

In der kondensierten Materie können Weyl-Fermionen in speziellen Halbmetallen auftauchen, wenn sich zwei elektronische Bänder genau so an einem Weyl-Knoten im Impulsraum kreuzen, dass die Energie in allen Impulsrichtungen eine lineare Funktion des Impulses ist (Abb. 1). Diese spezielle Situation wirkt auf den ersten Blick so, als könnten beliebig kleine Zusatzeffekte in einem realen Material leicht eine Bandlücke öffnen, sodass ein gewöhnlicher Bandisolator vorliegt. Interessanterweise bewegen kleine Störungen die Weyl-Knoten in drei Raumdimensionen lediglich im Impulsraum, zerstören sie aber nicht. Das System stellt demnach ein geschütztes Weyl-Halbmetail dar, in dem Weyl-Fermionen auftauchen können.

Diese Robustheit von Weyl-Halbmetailen ist leicht einzusehen: Die beiden Bänder lassen sich mathematisch durch die drei bekannten (2×2) -Pauli-Matrizen σ^α mit $\alpha \in \{x, y, z\}$ beschreiben. Wenn jeweils eine Pauli-Matrix σ^α proportional zu einer Impulsrichtung k_α ist, liegt ein System mit einem Weyl-Knoten bei Impuls

$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z) = 0$ vor. In der Tat treffen sich in diesem Fall zwei Energiebänder bei $\vec{k} = 0$, sodass die Energie-Impuls-Beziehung in allen Richtungen linear ist. Addiert man weitere kleine Störungen zu dieser Beschreibung hinzu, lassen sie sich immer durch dieselben drei Pauli-Matrizen ausdrücken, da diese zusammen mit der Einheitsmatrix eine Basis dieses Raums bilden. Als Konsequenz bewegt sich der Weyl-Knoten nur im Impulsraum.

Die Robustheit der Weyl-Knoten resultiert auch aus der topologischen Bandtheorie, in der die elektronische Berry-Phase eine zentrale Rolle spielt. Diese topologisch nicht-triviale Phase erhält die elektronische Wellenfunktion, wenn man einen Bloch-Zustand adiabatisch über die gesamte Brillouin-Zone bewegt, bis wieder der ursprüngliche Punkt im Phasenraum erreicht ist. Über die elektronische Wellenfunktion lässt sich daraus das Berry-Magnetfeld im Impulsraum ausrechnen. In diesem Magnetfeld entspricht ein Weyl-Knoten einem magnetischen Monopol. Daraus folgt entsprechend, dass Weyl-Fermionen in der kondensierten Materie immer nur als Monopol-Antimonopol-Paare vorkommen.

Schon 2011 wurde vorhergesagt, dass an der Oberfläche eines Weyl-

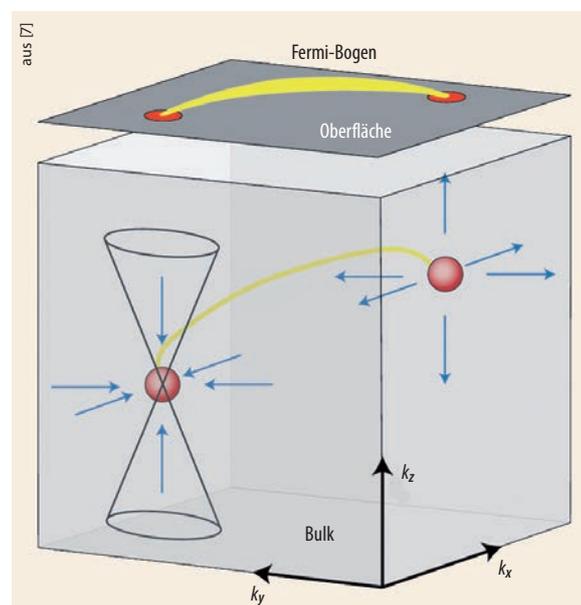


Abb. 1 Bandstruktur von Weyl-Halbmetailen im dreidimensionalen Impulsraum (k_x, k_y, k_z) . Zwei Weyl-Knoten (rote Kugeln) besitzen eine lineare Energie-Impuls-Beziehung (schwarz eingezeichnet). Die obere Ebene (dunkelgrau) illustriert die Oberfläche des Weyl-Halbmetailen mit dem Fermi-Bogen (gelb), der sich zwischen den Projektionen der Weyl-Knoten erstreckt.

Dr. Kai P. Schmidt,
Lehrstuhl für Theo-
retische Physik 1,
TU Dortmund

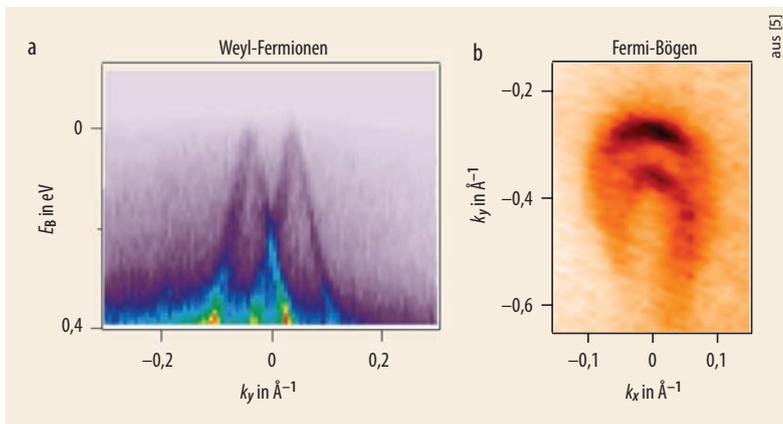


Abb. 2 Bei ARPES-Messungen am Weyl-Halbleitend TaAs zeigt die Intensität als Funktion der Energie E und des Impulses k_y deutlich die unteren Anteile von zwei

linearen Weyl-Kegeln (a). An der Oberfläche des Weyl-Halbleitend TaAs ist zudem gut der Fermi-Bogen zu sehen (b).

Halbleitend Fermi-Bögen im Impulsraum existieren [11]. Diese Eigenschaft ist entscheidend für den experimentellen Nachweis. Entlang dieser Fermi-Bögen, die sich jeweils zwischen einem Paar von Weyl-Knoten an der Oberfläche bilden, verschwindet die Bandlücke des Systems. Genau diese Bögen an der Oberfläche sowie die charakteristischen zu den Fermi-Bögen korrespondierenden Weyl-Knoten im Inneren des Weyl-Halbleitend (Abb. 1) sind experimentell mittels ARPES gut zugänglich. Für die beiden Materialien TaAs und NbAs haben das kürzlich verschiedene Gruppen erfolgreich gezeigt.

In der Tat erlauben ARPES-Messungen es durch Anpassung des einfallenden Lichts, sowohl die Oberfläche als auch das Innere eines Systems zu untersuchen. Dabei streuen Photonen mit bestimm-

ter Energie die Probe unter einem bestimmten Winkel. Die Energie und der Winkel des gestreuten Lichts werden aufgenommen.

Damit kann man erfassen, wie die elektronischen Anregungen in Materialien von Energie und Impuls abhängen. In den Experimenten zu den Weyl-Halbleitend kamen zwei verschiedene Photonenergien zum Einsatz: Photonen mit relativ niedriger Energie, um die Oberfläche der Materialien zu studieren, sowie weiche Röntgenstrahlung mit höherer Energie, um die Bandstruktur des Materials im Inneren zu untersuchen. Auf diese Weise ließen sich alle 24 theoretisch vorhergesagten Weyl-Knoten in diesen Materialien als diskrete Punkte in der Bandstruktur sowie deren lineare Energie-Impuls-Beziehung nachweisen (Abb. 2a). Gleichzeitig – und das ist entscheidend – war es möglich, die

zu den Weyl-Knoten-Paaren korrespondierenden Fermi-Bögen an der Oberfläche zu detektieren (Abb. 2b). Insgesamt liegen somit ausreichend experimentelle Funde vor, um diese Systeme als erste Weyl-Halbleitend mit masselosen Weyl-Fermionen als Quasiteilchen zu charakterisieren.

Ausgehend von diesen experimentellen Entdeckungen werden künftig viele spannende physikalische Fragestellungen in den Fokus der Forschung geraten: Lassen sich beispielsweise die exotischen Transporteigenschaften von Weyl-Fermionen experimentell bestimmen? Gelingt es, auch das einfachste Weyl-Halbleitend mit nur einem Weyl-Knotenpaar zu finden? Und: Eignen sich diese masselosen chiralen Fermionen vielleicht sogar für eine neue Art von Elektronik?

Kai P. Schmidt

- [1] H. Weyl, *Z. Phys.* **56**, 330 (1929)
- [2] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc.* **117**, 610 (1928)
- [3] H. Weng, *Phys. Rev. X* **5**, 011029 (2015)
- [4] S.-M. Huang, *Nature Commun.* **6**, 7373 (2015)
- [5] S.-Y. Xu, *Science* **349**, 613 (2015)
- [6] B. Q. Lv, *Phys. Rev. X* **5**, 031013 (2015)
- [7] B. A. Bernevig, *Nat. Phys.*, DOI: 10.1038/nphys3454 (2015)
- [8] S.-Y. Xu et al., *Nat. Phys.*, DOI: 10.1038/nphys3437 (2015)
- [9] L. X. Yang et al., *Nat. Phys.*, DOI: 10.1038/nphys3425 (2015)
- [10] B. Q. Lv et al., *Nat. Phys.*, DOI: 10.1038/nphys3426 (2015)
- [11] X. Wan, A. M. Turner, A. Vishwanath und S. Y. Savrasov, *Phys. Rev. B* **83**, 205101 (2011)

KURZGEFASST

■ Vier neue Isotope

Forscher am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung konnten vier neue Atomkerne erzeugen. Dabei handelt es sich um je ein neues Isotop der Elemente Berkelium und Neptunium sowie zwei Isotope von Americium. Für das Experiment haben die Wissenschaftler eine 300 nm dünne Folie aus Curium mit beschleunigten Calcium-Atomkernen beschossen. Die neuen Isotope enthalten weniger Neutronen und sind dadurch leichter als die bisher bekannten Isotope der jeweiligen Elemente.

H. M. Devaraja et al., *Phys. Lett. B* **748**, 199 (2015)

■ Ausgequetschtes Osmium

Ein internationales Team, darunter Wissenschaftler der Uni Bayreuth und von DESY, hat im Labor den bislang höchsten statischen Druck erzeugt. Mit einer Diamantstempelzelle untersuchten sie das Verhalten von Osmium bei einem Druck von bis zu 770 GPa, das liegt 130 GPa über dem bisherigen Rekord und zweimal höher als der Druck im Erdkern. Überraschenderweise blieb die hexagonale Grundstruktur des Osmiums während der Kompression erhalten. Erst bei 440 GPa zeigten sich Anomalien im Aufbau der kristallinen Elementarzelle, die auf unbekanntes Verhalten der Kernelektronen deuten.

L. Dubrovinsky et al., *Nature* **525**, 226 (2015)

■ Präzise gemischt

Neutrinos können sich ineinander umwandeln. Die drei Mischungswinkel beschreiben diese Neutrinooszillationen. Die Daya-Bay-Kollaboration hat nun einen um den Faktor zwei präziseren Wert für den Mischungswinkel θ_{13} angegeben. Demnach gilt $\sin^2 \theta_{13} = 0,084 \pm 0,005$. Diese Präzisionsmessungen könnten der Schlüssel zum Verständnis der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum sein.

F. P. An et al. (Daya Bay Coll.), *Phys. Refv. Lett.* **115**, 111802 (2015)