

## ■ Spirale Spinflüssigkeiten

Streuexperimente mit Neutronen erlauben es, eine theoretisch vorhergesagte Spinflüssigkeit in geometrisch frustrierten Spinell-Materialien nachzuweisen.

Manchmal sind es die kleinen Dinge, die eine große Wirkung entfalten. In der Festkörperphysik lernt man besonders viel, wenn die mikroskopischen Wechselwirkungen so miteinander konspirieren, dass sie „zufällig“ eine große Zahl energetisch fast entarteter Zustände erzeugen. Dann sind es die kleinen, oft vernachlässigten Effekte, die das kollektive makroskopische Verhalten entscheidend beeinflussen können. Dieses Motiv wiederholt sich in der modernen Festkörperphysik immer wieder. Paradebeispiele sind die Kuprate, deren Phasendiagramm durch kleine Variationen von Temperatur und Druck neben vielen miteinander wettstreitenden Phasen auch die Hochtemperatur-Supraleitung umfasst. Oder die Quanten-Hall-Flüssigkeiten in zweidimensionalen Elektronengasen, die aus teilweise gefüllten und daher massiv entarteten Landau-Niveaus entstehen.

Magnetische Isolatoren stellen eine weitere Materialklasse dar, bei der dieses Motiv zu einer Vielzahl von ungewöhnlichen Phänomenen führt. Aus dem Wettstreit verschie-

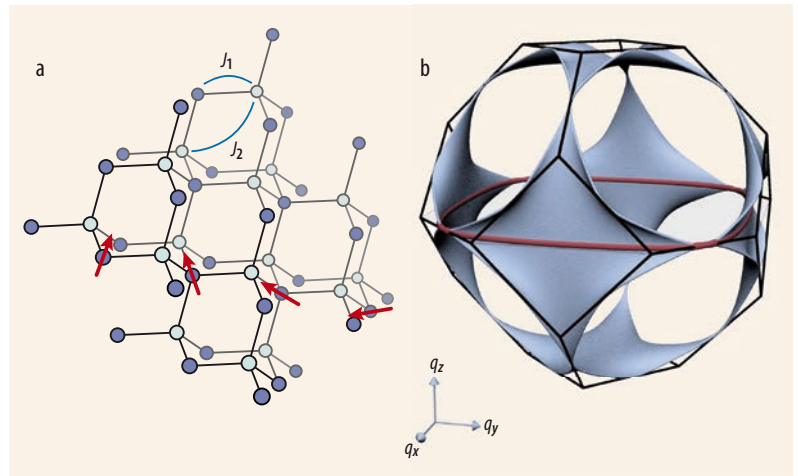


Abb. 1 Konkurrierende Wechselwirkungen nächster ( $J_1$ ) und übernächster ( $J_2$ ) Nachbarn im Diamant-Gitter führen zur Formation von Spin-Spiralen, die sich durch einen  $q$ -Vektor im reziproken Raum beschreiben lassen (a). Die Man-

nigfaltigkeit der entarteten  $q$ -Vektoren bildet eine Spiralfäche im reziproken Raum (b). Die Reduktion der Spin-Fluktuationen auf diese zweidimensionale Fläche führt zur Bildung einer spiralen Spinflüssigkeit.

dener mikroskopischer Wechselwirkungen zwischen den elementaren magnetischen Momenten, den Spins, entsteht eine magnetische Frustration [1]. Diese Frustration manifestiert sich in einer makroskopischen energetischen Entartung einer Vielzahl von Spinzuständen, denen es allen ähnlich gut bzw.

schlecht gelingt, diese Wechselwirkungen zu minimieren. Kleine zusätzliche Kopplungen – manchmal nur thermische Fluktuationen – können diese massive Entartung aufheben und einige wenige Zustände herausheben. Deren freie Energie liegt dann noch ein wenig tiefer – ein Prozess, der auch als „Ordnung aus Unordnung“ bezeichnet wird.

Magnetische Frustration tritt besonders oft in Antiferromagneten auf, deren Austauschwechselwirkungen eine antiparallele Orientierung der Spins bevorzugen. Frustration stellt sich ein, wenn die zugrundeliegende Gitterstruktur genau diese antiparallele Orientierung verhindert – etwa wenn das Gitter aus elementaren Dreiecken besteht. Hier spricht man von geometrischer Frustration [1].

Aus dieser Sicht erscheinen Spinell-Materialien wie  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$ ,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  oder  $\text{FeSc}_2\text{S}_4$  eher unverdächtig. Der Magnetismus wird in diesen Materialien der verallgemeinerten chemischen Zusammensetzung  $\text{AB}_2\text{X}_4$  von den A-Ionen getragen, die für sich genommen eine Diamant-Gitterstruktur bilden (Abb. 1). Dieses gehört zu den „bipartiten“ Gittern: Sie können genau

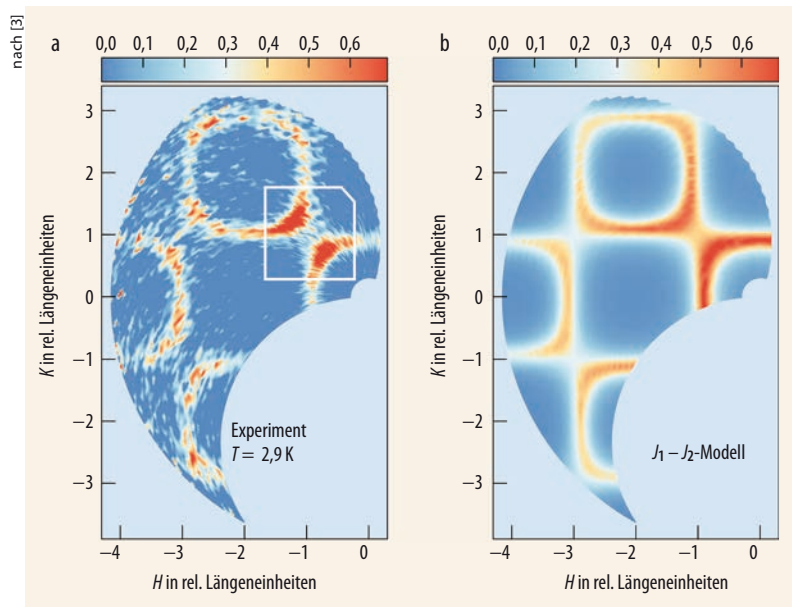


Abb. 2 Die spirale Spinflüssigkeit im Spinell-Material  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$  zeigt sich in Neutronenstreuexperimenten. In der  $HK$ -Ebene (roter Ring in Abb. 1) stimmen die

diffusen Streuintensitäten bei einer Temperatur von 2,9 K (a) sehr gut mit der theoretischen Vorhersage überein (b).

den vom Antiferromagneten bevorzugten Néel-Zustand mit antiparalleler Spin-Ausrichtung beherbergen. Betrachtet man jedoch auch magnetische Wechselwirkungen, die über jene des nächsten Nachbarn hinausgehen, verändert sich das Bild: Die übernächsten Nachbarn innerhalb des Diamant-Gitters bilden zwei unabhängige kubisch flächenzentrierte Gitter, die einzeln geometrisch frustriert sind.

In Anbetracht dieser konkurrierenden Wechselwirkungen verringern die magnetischen Momente die Frustration, indem sie eine langreichweitige magnetische Ordnung formen – so genannte Spin-Spiralen. Die langsame koplanare Rotation der magnetischen Momente in einer solchen Spin-Spirale lässt sich durch einen  $q$ -Vektor im reziproken Raum eindeutig charakterisieren. Das Besondere an den frustrierten Diamant-Gittern ist die große Zahl an unterschiedlichen Spin-Spiralen, die energetisch entartet sind. Die Gesamtheit der zugehörigen  $q$ -Vektoren im reziproken Raum spannt eine Fläche auf, die den bekannten Fermi-Flächen in metallischen Systemen ähnelt [2]. Für einen magnetischen Isolator ist dies jedoch ein hochgradig ungewöhnlicher Zustand, weil die Spinfluktuationen in einem zweidimensionalen Unterraum eingeschränkt sind. Diese kooperativen Fluktuationen verhindern über einen weiten Temperaturbereich, dass sich die angestrebte langreichweitige Spiralordnung ausbildet. Außerdem machen sie das System hochgradig sensitiv bezüglich der angesprochenen kleinen Effekte, die hier in Form von dipolaren Wechselwirkungen auftreten. Dadurch manifestiert sich ein mehrstufiger Ordnungsprozess.

Dieser Zustand, der vor knapp zehn Jahren als spirale Spinflüssigkeit theoretisch vorhergesagt wurde [2], ist nun erstmals in dem Spinell-Material  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$  zweifelsfrei experimentell nachgewiesen worden [3]. Dazu hat die Gruppe um Christian Rüegg am Paul-Scherrer-Institut in Villigen Neutronenstreuexperimente an Einkristallen durchgeführt, welche die Gruppe von Alois

Loidl in Augsburg hergestellt hat. Zuvor hatten geeignete  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$ -Einkristalle gefehlt. Die Neutronenstreuexperimente wurden ebenfalls weiterentwickelt, um eine ausreichend hohe Auflösung und gute Statistik zu erreichen. Die experimentellen Ergebnisse visualisieren in direkter Weise die oben beschriebene Spiral-Fläche im reziproken Raum (Abb. 2) und stimmen beeindruckend mit den theoretischen Vorhersagen überein [2].

Während die hier nachgewiesene spirale Spinflüssigkeit einen neuartigen Zustand beschreibt, ist das Zusammenspiel von magnetischer Frustration und Formation von Spin-Spiralen durchaus bekannt. Tatsächlich bilden Spin-Spiralen die elementaren Zutaten für eine ganze Reihe von magnetischen Phänomenen, die in den letzten Jahren in vielerlei Materialien untersucht wurden. Besonders hervorzuheben sind Skyrmion-Kristalle [4], die durch eine Überlagerung von drei Spin-Spiralen entstehen, deren reziproke  $q$ -Vektoren sich zum Nullvektor aufsummieren. Genau diese Physik findet sich auch in  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$ . Ein Magnetfeld in [111]-Richtung

hebt die Entartung der Spin-Spiralen in der Spinflüssigkeit auf. Dann bildet sich eine Überlagerung von nur noch drei verbleibenden, energetisch entarteten Spin-Spiralen, wie die Rüegg-Gruppe eindrucksvoll zeigte. Dieser „Triple- $q$ -Zustand“ verursacht ein Vortex-Gitter, wie es erst kürzlich theoretisch beschrieben wurde [5]. Im Gegensatz zu den Skyrmion-Kristallen sind Vortex-Anregungen in  $\text{MnSc}_2\text{S}_4$  nahezu punktförmig, was sie leichter manipulierbar und für Anwendungen interessant macht.

Die beeindruckenden Experimente fordern das Lager der Theoretiker heraus, sich in Zukunft über weitere Aspekte der spiralen Spinflüssigkeiten und der Formation von Multi- $q$ -Zuständen Gedanken zu machen.

Simon Trebst

- [1] K. P. Schmidt und S. Trebst, *Physik Journal*, April 2015, S. 39
- [2] D. Bergmann et al., *Nat. Phys.* **3**, 487 (2007)
- [3] S. Gao et al., *Nat. Phys.*, doi:10.1038/nphys3914 (2016)
- [4] C. Pfleiderer, *Physik Journal*, August/September 2016, S. 47
- [5] Z. Wang et al., *Phys. Rev. Lett.* **115**, 107201 (2015)

## DUNKLER MATERIE AUF DER SPUR

Seit fünf Jahren umkreist das Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS) an Bord der Internationalen Raumstation die Erde und hat seither 90 Milliarden Partikel aus der kosmischen Strahlung nachgewiesen. An Aufnahme und Auswertung der Daten sind Gruppen der RWTH Aachen, des KIT und des Forschungszentrums Jülich beteiligt. Ein wichtiges Ergebnis der bisherigen Messungen: Die unerwartet hohen Intensitäten von Antiteilchen wie Posi-

tronen und Antiprotonen mit hohen Energien lassen sich erklären, wenn die Antiteilchen mit Dunkler Materie in der Galaxie wechselwirken. Der Nachweis von Antihelium gelang trotz der Detektion von 3,7 Milliarden Heliumkernen aber nicht: Eine räumliche Trennung von Materie und Antimaterie nach dem Urknall scheint demnach nicht passiert zu sein. (KS)  
Vgl. u. a. M. Aguilar et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 091013 und 231102 (2016)

