

■ Frustriert zum Monopol

Die Suche nach magnetischen Monopolen war bislang erfolglos. Doch nun ließen sie sich als kollektive Anregungen in „Spin-Eis“ nachweisen.

Magnetische Monopole, die in Analogie zu elektrischen Ladungen Quellen des Magnetfelds sind, beschäftigen Physiker seit Langem [1]. Paul Dirac zeigte bereits 1931, dass sich aus der hypothetischen Existenz von Monopolen die Quantisierung der elektrischen Ladung ableiten lässt. Doch trotz intensiver experimenteller Suche gelang es bis heute nicht, Elementarteilchen mit magnetischer Ladung zu finden [1].

Theoretische Ideen aus der Vielteilchenphysik haben hier eine überraschende Wendung herbeigeführt. Entscheidend ist das Konzept kollektiver Anregungen von Vielteilchensystemen, die sich wie „Quasiteilchen“ verhalten. Ihre Eigenschaften können sich jedoch fundamental von denen elementarer Teilchen unterscheiden. Spektakulär sind dabei Fälle von „Fraktionalisierung“, bei der die Anregungen Quantenzahlen aufweisen, die ein Bruchteil der entsprechenden Quantenzahl elementarer Teilchen sind. Das bekannteste Beispiel hierfür ist der fraktionale Quanten-Hall-Effekt, bei dem Quasiteilchen mit elektrischer Ladung $e/3$ vorhergesagt und experimentell bestätigt wurden. Aus der Welt des Quantenmagnetismus sind Spinonen bekannt, ladungsneutrale Quasiteilchen mit Spin $1/2$ – diese sind ebenfalls fraktionalisiert, da sich aus Elektronen und Löchern im Festkörper nur ladungsneutrale Objekte mit ganzzahligem Spin konstruieren lassen.

Castelnovo, Moessner und Sondhi sagten 2008 die Existenz von magnetischen Monopolen als Elementaranregungen in „Spin-Eis“ vorher [2]. Spin-Eis gehört zur Klasse der stark frustrierten Magnete, die ein faszinierendes und extrem reichhaltiges Forschungsgebiet darstellt [3, 4]. Frustration bedeutet allgemein, dass sich nicht alle Beiträge zur Gesamtenergie gleichzeitig minimieren lassen. Dies führt häufig zu einer makroskopischen Entar-

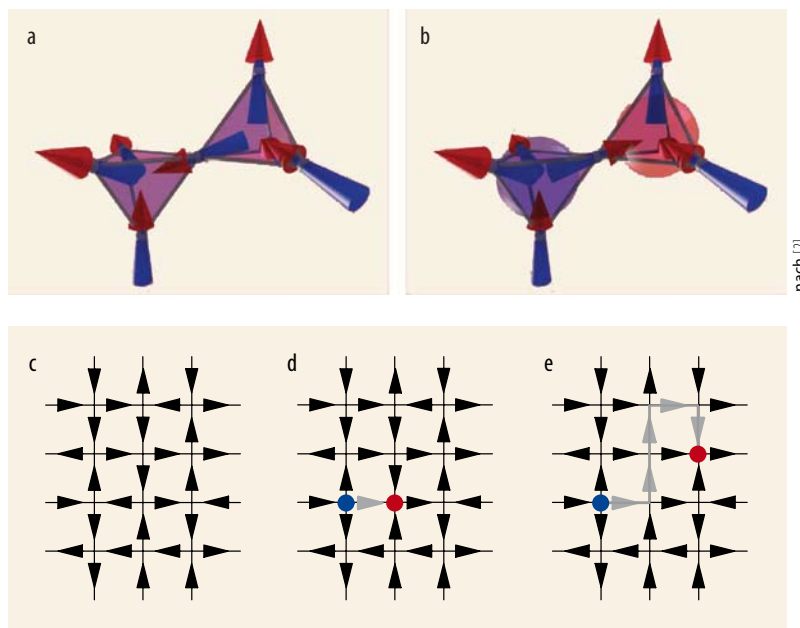


Abb. 1 Im Pyrochlor-Gitter von Spin-Eis sitzen die Spins auf jeder Tetraeder-Ecke und sind entlang der Achsen zwischen den Tetraeder-Mittelpunkten ausgerichtet. Im Grundzustand befolgen sie die Eis-Regel (zwei hinein, zwei heraus) (a). Durch Invertieren eines Spin entsteht ein Paar von Monopolen (b). Ähnliche Spinkonfigurationen lassen sich in einem zweidimensionalen Analogon

von Spin-Eis [9] beobachten, wo die Spins jeweils zwischen zwei Quadratgitter-Punkten sitzen (c). Monopol-Paare können sich auf benachbarten Plätzen befinden (d) oder weiter separieren lassen (e). Zwischen beiden verläuft eine Kette („string“) geflippter Spins (grau), deren Verlauf jedoch von der Wahl der defektfreien Referenzkonfiguration (hier c) abhängt.

tung des Grundzustandes. In Spin-Eis-Verbindungen befinden sich magnetische Ionen auf einem Kristallgitter aus Tetraedern, das dem von Eis entspricht. Starke magnetische Anisotropie führt dazu, dass sich die magnetischen Momente entlang der Achsen ausrichten, welche die Tetraeder-Mittelpunkte verbinden (Abb. 1a). Damit verhalten sich die Momente wie Ising-Spins (mit nur zwei möglichen Einstellungen), allerdings mit räumlich variierender Vorzugsachse. Die magnetische Wechselwirkung zwischen den Spins bevorzugt dabei Konfigurationen, bei denen zwei Spins eines Tetraeders in das Tetraeder hinein und zwei heraus zeigen (Abb. 1a, 1c). Diese „Eis-Regel“ ist äquivalent zum Verhalten von Wasserstoff-Brücken in Eis, wo jedes Sauerstoff-Atom mit zwei der vier umgebenden Wasserstoff-Atome starke Bindungen eingeht. Offensichtlich bestimmt die Eis-

Regel den Grundzustand nicht eindeutig; es gibt damit auch bei tiefen Temperaturen keine langreichweitig geordnete Phase in Spin-Eis [3].

Eine Anregung aus dieser Grundzustands-Mannigfaltigkeit besteht im Invertieren eines Spins (Abb. 1b, 1d). Man kann sich leicht überzeugen, dass diese dipolare Anregung in zwei Punktdefekte („Monopole“) dissoziieren kann, die durch eine Kette geflippter Spins verbunden sind (Abb. 1e). In Analogie zu Diracs Überlegungen zu elementaren Monopolen wird diese Kette „Dirac-String“ genannt, diese Bezeichnung ist jedoch leicht irreführend (vgl. unten). Entlang dieser Kette wird die Eis-Regel nicht verletzt, d. h. die Monopole lassen sich beliebig separieren. Dies ist äquivalent zur Fraktionalisierung eines magnetischen Dipols. Während die bisherigen Überlegungen zunächst für kurzreichweitige Spin-Spin-Wechselwirkungen

gelten, gelang es Castelnovo et al. [2] darüber hinaus für langreichweitige dipolare Spin-Spin-Wechselwirkungen zu zeigen, dass die effektive Wechselwirkung zwischen den Monopol-Anregungen eine coulomb-artige Form besitzt, $-\mu_0 Q^2/(4\pi r)$, wobei r den Abstand und Q die Monopol-Ladung bezeichnet. Damit verhalten sich die Punktdefekte in dipolarem Spin-Eis wie echte magnetische Ladungen!

Mehrere Experimente mit den Spin-Eis-Verbindungen $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ und $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ bestätigen nun diese bemerkenswerten theoretischen Vorhersagen [5 - 7]. Zwei der Experimente nutzen Neutronenstreuung, um statische Spinkorrelationen zu messen, allerdings mit verschiedener Zielrichtung. Morris et al. untersuchen $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ in einem Magnetfeld in [001]-Richtung, das die Entartung des Grundzustandes aufhebt [5]. Dessen Anregungen sind wiederum Paare von Monopolen, nun verbunden mit einer Kette von entgegengesetzt zum Feld orientierten Spins. Durch Variation von Temperatur, Feldstärke und Feldrichtung lassen sich die mittlere Konzentration, Länge und Richtung dieser Strings verändern. Diese Veränderungen konnten Morris et al. beobachten und mit Computersimulationen eines Spin-Eis-Modells vergleichen – mit sehr guter Übereinstimmung. Fennell et al. dagegen bestimmen die Spin-Korrelationen ohne äußeres Feld und studieren spezielle Signaturen („pinch points“ [4]), die gemäß theoretischer Vorhersagen charakteristisch für eine fraktionalisierte Spin-Eis-Phase sind [6].

Die vielleicht direkteste Beobachtung der Monopole gelang Bramwell et al., die mittels Myon-Spin-Rotation die inneren Magnetfelder in $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ gemessen haben [7]. Zur Interpretation übertrugen sie im Wesentlichen Onsagers Theorie der nichtlinearen Leitfähigkeit von Elektrolyten [8] auf den magnetischen Fall. Diese Theorie macht eine Aussage über die Dichte freier Ladungen, die sich durch feldinduzierte Dissoziation von Dipolen ergibt. Die Resultate sind konsistent mit der Existenz magnetischer

Ladungen, die durch Magnetfelder Kräfte erfahren [7].

Insgesamt liefern die experimentellen Daten [5 - 7] gute Evidenz für die Gültigkeit der theoretischen Ideen [2]. Insbesondere ist damit Spin-Eis als der erste fraktionalisierte Magnet in drei Raumdimensionen etabliert.

Um Missverständnissen vorzubeugen, sei betont, dass die Monopole in Spin-Eis nur Quellen der Magnetisierung und damit des \vec{H} -Feldes sind; die magnetische Flussdichte \vec{B} bleibt dagegen quellenfrei ($\text{div } \vec{B} = 0$) – im Gegensatz zu der von Dirac postulierten Situation elementarer Monopole. Wichtige Unterschiede gibt es auch in Bezug auf Strings und Quantisierung: Bei Diracs Monopolen sind die Strings, die entweder von einem Monopol nach unendlich verlaufen oder entgegengesetzte Monopole verbinden, nur ein mathematisches Konstrukt zur Definition eines Vektorpotentials und *nicht* beobachtbar. Monopol-artige Punktdefekte in Spin-Eis dagegen sind paarweise durch Ketten aus invertierten Dipolen verbunden, die sich beobachten lassen. Die magnetische Ladung Q dieser Monopol-Anregungen ist daher nicht quantisiert und hängt von mi-

kroskopischen Details der Spin-Eis-Verbindung ab. In $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ beträgt sie ungefähr $50 \mu_B/\text{nm}$ und lässt sich durch Druck variieren.

Die beschriebenen Entwicklungen laden zu weiteren Spekulationen ein: Lassen sich magnetische Ladungen und Ströme gezielt manipulieren, z. B. in Nanostrukturen, welche die Eis-Regeln nachbilden? Eine Variante ist hier „square ice“, das sich bereits aus ferromagnetischen Inseln herstellen ließ [9]. Können wir weitere fraktionalisierte Anregungen in dreidimensionalen Festkörpersystemen finden? Und lassen sich exotische fraktionalisierte Phasen vielleicht sogar technisch nutzen?

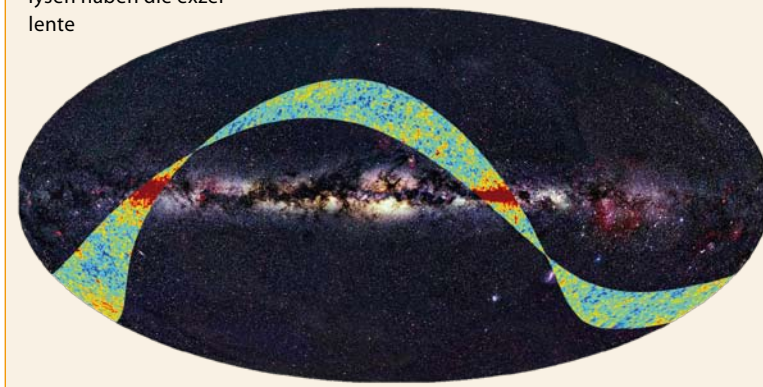
Matthias Vojta

- [1] K. A. Milton, Rep. Prog. Phys. **69**, 1637 (2006)
- [2] C. Castelnovo, R. Moessner und S. L. Sondhi, Nature **451**, 42 (2008)
- [3] S. T. Bramwell und M. J. P. Gingras, Science **294**, 1495 (2001)
- [4] R. Moessner und A. P. Ramirez, Physics Today, Februar 2006, S. 24
- [5] D. J. P. Morris et al., Science **326**, 411 (2009)
- [6] T. Fennell et al., Science **326**, 415 (2009)
- [7] S. T. Bramwell et al., Nature **461**, 956 (2009)
- [8] L. Onsager, J. Chem. Phys. **2**, 599 (1934)
- [9] R. F. Wang et al., Nature **439**, 303 (2006)

KOSMISCHE KARTIERUNG

Von der Erde aus könnte er ein Kaninchen auf dem Mond anhand der Körperwärme aufspüren. Die Rede ist vom ESA-Satelliten Planck, der bis Mitte 2011 winzige Temperaturschwankungen im kosmischen Mikrowellenhintergrund messen soll. Planck kann Signale auf-fangen, die um den Faktor 10 unter der bisherigen Nachweisgrenze liegen. Am 13. August startete die erste Datennahme, in der Planck den Himmel zwei Wochen lang durchmustert hat. Erste Analysen haben die exzellente

Datenqualität gezeigt. Ziel der Mission ist es, kosmologische Fragen zu klären und z. B. zu bestimmen, wie sich normale und Dunkle Materie bzw. Dunkle Energie im Universum verteilen. Das Bild zeigt im Hintergrund eine Him-melskarte bei sichtbaren Wellenlängen mit dem Band der Milchstraße. Dem überlagert sind die Planck-Daten. Die Farbskala gibt an, wie stark die Temperatur vom Mittelwert der kosmischen Hintergrundstrahlung abweicht.



ESA, LEJ- und HEJ-Konsortium, Hintergrund: A. Mellinger