

■ Spins an der Kette

Das 80 Jahre alte Modell einer Quantenspin-Kette wurde experimentell sehr präzise verifiziert.

Niedrigdimensionale Unterstrukturen prägen häufig in entscheidender Weise die elektronischen und strukturellen Eigenschaften von Festkörpern und bilden die Grundlage überraschender Phänomene. So besitzen Hochtemperatur-Supraleiter Kupferoxid-Ebenen mit starken Korrelationen der Elektronen, die wesentlich sind für die Supraleitung. Magnetische Systeme mit eindimensionalen Unterstrukturen können elektronische Isolatoren sein, aber gleichzeitig hervorragende Wärmeleiter. In anderen Systemen mit starken magnetischen Wechselwirkungen entlang von Ketten treten Phasenübergänge mit Änderungen der Kristallstruktur auf, die ihre Ursache in starken Quantenfluktuationen bzw. Korrelationen der lokalen magnetischen Spins haben. Das fundamentale Modell, um diese Systeme zu beschreiben, ist die 80 Jahre alte Heisenbergsche Quantenspin-Kette. Kürzlich ist es gelungen, dieses Modell an Kupfersulfat nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ mit hoher Präzision zu überprüfen [1].

Bereits in den frühen Jahren der Quantenmechanik wurde erkannt, dass der quantenmechanische Spin einer der Träger magnetischer Eigenschaften der Materie ist und dass die Heisenbergsche Austauschwechselwirkung $J \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j$ lokalisierter Spins \mathbf{S}_i verantwortlich ist für die Existenz unterschiedlicher magnetischer Phasen. Je nach Vorzeichen

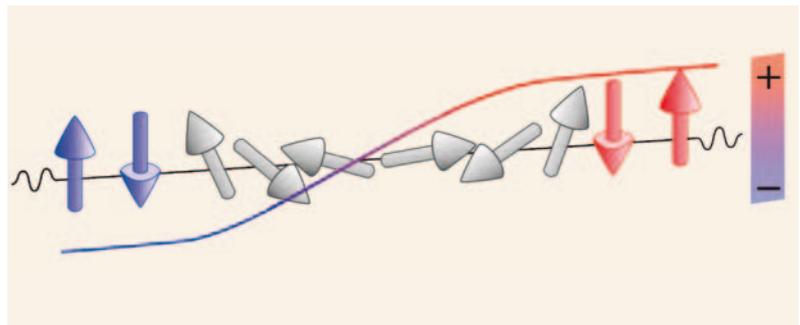


Abb. 1 Aufgrund der Isotropie der Wechselwirkungen delokalisiert die Grenze zwischen den zwei fundamentalen antiferromagnetischen Domänen (blau bzw. rot). Die ebene Welle einer derartigen Domänengrenze (grau) ist eine elemen-

tare Anregung, die Impuls, Energie und Spin 1/2 trägt und Spinon genannt wird. Die vollständige Wellenfunktion ist von quantenmechanischer Natur und eine Überlagerung vieler Konfigurationen, von denen nur eine gezeigt ist.

der Austauschkonstante J sind parallele oder antiparallele Spinkonfigurationen energetisch bevorzugt, sodass sich bei hinreichend tiefen Temperaturen ferromagnetische bzw. antiferromagnetische Ordnung ausbilden kann. Während der Grundzustand eines ferromagnetischen Systems langreichweitig geordnet ist mit parallel ausgerichteten, „statischen“ Spins, ist der Grundzustand eines Antiferromagneten nicht durch alternierende antiparallele Spins gegeben. Ein derartiger Néel-Zustand ist nicht einmal Eigenzustand des Hamilton-Operators.

Während beim Néel-Zustand die Spins auch über große Entfernungen miteinander korreliert sind, verschwinden Korrelationen $\langle \mathbf{S}_0 \cdot \mathbf{S}_r \rangle$ bei der Heisenbergschen Quantenspin-Kette umgekehrt proportional

zum Abstand r . Angesichts dieses langsamen Abfalls ist manchmal von quasi-langreichweitiger Ordnung oder von einer antiferromagnetischen „Spin-Flüssigkeit“ die Rede. Ursache hierfür sind starke Quantenfluktuationen, die beispielsweise auch für die eingangs genannten strukturellen Phasenübergänge verantwortlich sind.

Die theoretische Untersuchung der Quantenspin-Kette begann mit einer Arbeit von Hans Bethe zu den exakten Eigenzuständen [2] und der anschließenden Berechnung der exakten Grundzustandsenergie im thermodynamischen Limes bei antiferromagnetischem Austausch [3]. Die niedrigliegenden elementaren Anregungen wurden auf der Basis des Bethe-Ansatzes berechnet [4] und als sog. Spinonen bzw. Kinks gedeutet [5]. Die ther-

KURZGEFASST

■ Anomalie in kosmischer Strahlung

Das internationale Satellitenexperiment PAMELA hat 2009 einen Überschuss an hochenergetischen Positronen in der kosmischen Strahlung gefunden, der mit bisherigen astrophysikalischen Modellen nicht in Einklang steht. Eine neue PAMELA-Analyse von 24 500 Positronen mit Energien bis zu 300 GeV, die neben dem absoluten Positronenfluss auch deren Anteil im Verhältnis zu den Elektronen ergibt, hat nun den unerwarteten Überschuss bestätigt.

O. Adriani et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 081102 (2013)

■ Element 115 bestätigt

Nachdem Forscher das „Ununpentium“ bereits vor zehn Jahren in Russland beobachtet hatten, bestätigten nun Messungen am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung seine Existenz. Dazu beschloss ein internationales Team einen Americium-Film mit einem Kalzium-Strahl und detektierte 30 Alpha-Zerfallsketten, die sie dem Element 115 zuordnen konnten. Diese unabhängigen Bestätigung dürfte den Weg für die Elementtaufe frei machen.

D. Rudolph et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 112502 (2013)

■ Uhrenvergleich per Datenautobahn

Forschern des MPI für Quantenoptik und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ist es gelungen, ein optisches Signal in unterirdischen Glasfaserkabeln zwischen beiden Instituten mit hoher Frequenzstabilität über eine Entfernung von 1840 Kilometern zu übertragen. Das Verfahren erreicht eine Genauigkeit von 19 Dezimalstellen. Damit könnten sich künftig optische Atomuhren über große Distanzen miteinander vergleichen lassen.

S. Droste et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 110801 (2013)

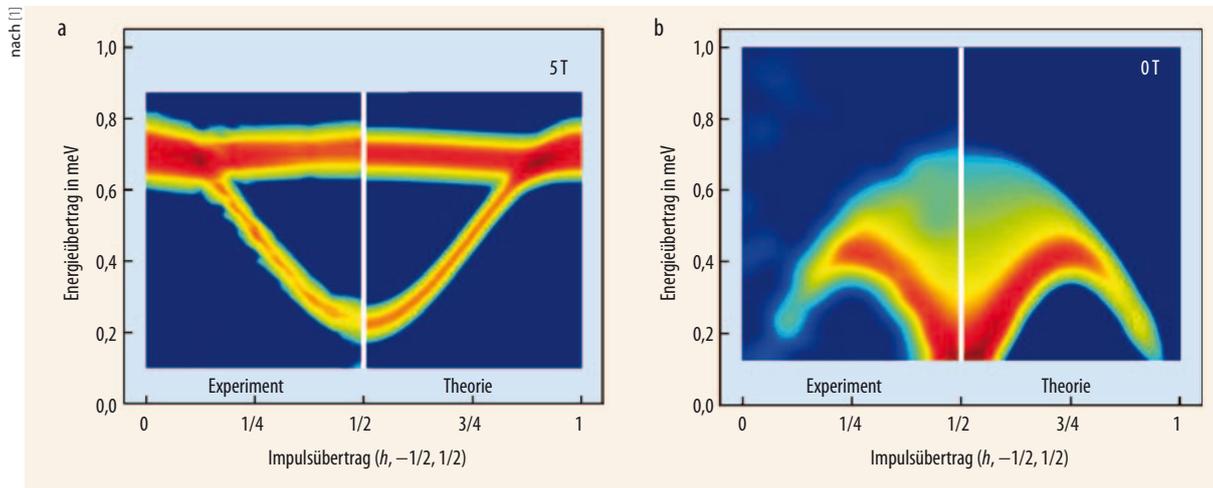


Abb. 2 Der Intensitätsplot der Neutronenstreuung (farblich kodiert ist der Strukturfaktor) an $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{D}_2\text{O}$ in der vollpolarisierten Phase zeigt einen deutlich dispersiven Zweig (a). Diese Ein-

gnon-Anregung erlaubt eine genaue Eichung der experimentellen Daten. Bei verschwindendem Magnetfeld zeigen die Streudaten zu festem Impuls ein breites Energiekontinuum, das im We-

sentlichen aus Zwei- und Vier-Spinon-Anregungen besteht (b). In beiden Fällen stimmen Experiment und Theorie hervorragend überein.

modynamischen Eigenschaften, die bekanntlich allein durch das Spektrum bestimmt sind, waren bis Mitte der 90er-Jahre verstanden und experimentell bestätigt. Mit der Synthese neuer Substanzen mit eindimensionalen magnetischen Unterstrukturen und der gleichzeitig fortschreitenden Verbesserung des auf der exakten Lösung beruhenden theoretischen Verständnisses wurden Vergleiche zwischen Theorie und Experiment seither immer präziser.

Eine besondere Faszination übten die niedrigliegenden Anregungen, die Spinonen aus, die paarweise auftreten und untereinander wechselwirken. Ein einzelnes Spinon ist eine delokalisierte Wand zwischen zwei gegeneinander versetzten antiferromagnetischen Domänen (Abb. 1). Spinonen tragen selbst den Spin-1/2 und müssen paarweise auftreten. Da jedes einzelne Spinon sowohl Energie als auch Impuls trägt, ist für ein Paar bei festem Gesamtimpuls ein Kontinuum an Energien einer gewissen Breite möglich. Dieses Bild unterscheidet sich grundsätzlich von dem eines hypothetischen, einzelnen Spin-1-Teilchens mit scharfer Energie zu scharfem Impuls.

Energie-Impuls-Anregungen lassen sich mit höchster Präzision mithilfe der Neutronen-Streuung vermessen, denn sie erlaubt eine wesentlich differenziertere Un-

tersuchung als die summarischen Messungen von spezifischer Wärme und magnetischer Suszeptibilität. Unglücklicherweise – für die Theorie – erhält man mit der Neutronen-Streuung nicht das reine Energie-Impuls-Spektrum, sondern die Spektraldichte gewichtet mit den Matrixelementen des „messenden lokalen Spinoperators“ zwischen Grundzustand und angeregten Zustand des Spinsystems. Die resultierende gemessene Größe ist der sog. Strukturfaktor $S(\mathbf{Q}, \omega)$, der von Impuls- und Energie-Übertrag \mathbf{Q} bzw. ω des Neutrons an das Spinsystem abhängt.

Obwohl die exakten Eigenzustände der Quantenspin-Kette seit 1931 bekannt sind, war es lange Zeit aufgrund der Komplexität der Bethe-Zustände nicht möglich, die gewünschten Matrixelemente im thermodynamischen Limes auszuwerten. Diese Situation änderte sich erst 1995, als es erstmals gelang, exakte Beiträge der elementaren Anregungen zum Strukturfaktor im thermodynamischen Limes anzugeben [6].

Erschwerend kam noch hinzu, dass der lokale Spinoperator den Grundzustand nicht nur an Paare, sondern an alle Anregungen mit gerader Anzahl von Spinonen koppelt. Die niedrigsten Beiträge ließen sich jedoch exakt berechnen [7, 8]: Demnach sind Anregungen mit zwei Spinonen für 71 Prozent

des Gesamtergebnisses verantwortlich, nimmt man Vier-Spinon-Anregungen hinzu, erhöht sich der Beitrag auf 98 Prozent. Mit diesen Ergebnissen ist der Präzisionsvergleich von Theorie und Experiment im Wesentlichen eine experimentelle Herausforderung. Die absolute Messung des Strukturfaktors leidet dabei üblicherweise unter verschiedenen Unsicherheiten, insbesondere bezüglich der Normierung der Neutronen-Streuintensität.

In einer aktuellen Arbeit an $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{D}_2\text{O}$ umgehen die Autoren die üblichen Schwierigkeiten, indem sie die Streudaten mithilfe eines trickreichen Umwegs eichen [1]. Da Kupfersulfat quasi-eindimensionale Unterstrukturen mit relativ kleiner Austauschkopplung besitzt, reicht ein moderates Magnetfeld von 5 T aus, um bei Temperaturen von rund 100 mK alle Spins gegen die antiferromagnetische Wechselwirkung parallel auszurichten. Dann dominieren einfache und theoretisch vollständig verstandene Einteilchen-Anregungen (Magnonen) die Neutronen-Streuung und erlauben eine einfache Eichung von Energie- und Intensitätsskala. Mit dieser Eichung stimmen bei verschwindendem Magnetfeld Theorie und Experiment praktisch vollständig überein [1] und haben eine um mindestens eine Größenordnung höhere Genauigkeit als bisherige Arbeiten

+) Der wesentliche Beitrag von vier Spinonen ähnelt qualitativ demjenigen von zwei Spinonen (da zwei der vier Spinonen praktisch verschwindende Energien und Impulse tragen), ist aber quantitativ nicht zu vernachlässigen.

Prof. Dr. Andreas Klümper, Fachbereich C – Fachgruppe Physik, Bergische Universität Wuppertal, 42097 Wuppertal

(Abb. 2) [9]. So wurden die Bandbreiten der Spinonenanregungen sowie die Gewichte der Zwei- und Vier-Spinon-Kontinua bestätigt.^{†)}

Dieser Vergleich von experimentellen und theoretischen Arbeiten zum Spin-Strukturfaktor der Heisenbergschen Quantenspin-Kette ist von einer derartigen Güte, dass er sicher in alle Lehrbücher der Festkörperphysik eingehen würde, wenn nur die theoretische Behandlung weniger aufwändig wäre. Die

Ergebnisse lassen aber hoffen, dass nicht weitere Jahrzehnte vergehen bis zum Präzisionsvergleich zwischen Theorie und Experiment bei anderen integrierbaren Quanten-Vielteilchensystemen, etwa des Hubbard-Modells in einer Raumdimension.

Andreas Klümper

[1] M. Mourigal et al., Nature Phys. 9, 435 (2013)

[2] H. Bethe, Z. Phys. A 71, 205 (1931)

[3] L. Hulthén, Arkiv f. Mat. Astr. o. Fysik 26A, 1 (1938)

[4] J. Des Cloizeaux und J. J. Pearson, Phys. Rev. 128, 2131 (1962)

[5] L. D. Faddeev, L. A. Takhtajan, Phys. Lett. A 85, 375 (1981)

[6] M. Jimbo, T. Miwa, Algebraic Analysis of Solvable Lattice Models Vol. 85, CBMS Regional Conf. Ser. in Math., Amer. Math. Soc. (1995)

[7] M. Karbach et al., Phys. Rev. B 55, 12510 (1997)

[8] J.-S. Caux und R. Hagemans, J. Stat. Mech.: Theor. Exp., P12013 (2006)

[9] A. C. Walters et al., Nature Phys. 5, 867 (2009)

■ Beamen in der Koaxialleitung

In einem integrierten Schaltkreis aus supraleitenden Bauelementen ist die Quanten-Teleportation gelungen.

Quanten-Teleportation – klingt das nicht nach Raumschiff Enterprise? Tatsächlich verbirgt sich dahinter etwas Subtileres, aber nicht minder Spektakuläres. Quanten-Teleportation erlaubt das Transferieren eines Quantenzustands zwischen zwei Parteien (meist Alice und Bob genannt), ohne dass Ausgangs- und Endsystem jemals in direktem Kontakt stehen. Einer Gruppe an der ETH Zürich ist es jetzt erstmals gelungen, Quanten-Teleportation auf einem integrierten Schaltkreis aus supraleitenden Bauelementen durchzuführen.

Dieses verblüffende Phänomen beruht auf der quantenmechanischen Verschränkung. Quantenzustände heißen verschränkt, wenn sie sich nicht als Produkt von Zuständen der Untersysteme schreiben lassen. Speziell betrachtet man bei der Teleportation meist Qu(anten)bits, also zwei-Niveausysteme mit der Basis $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Hier spielen die ungeraden und geraden Bell-Zustände,

$$|\Psi^\pm\rangle = 1/\sqrt{2}(|0\rangle|1\rangle \pm |1\rangle|0\rangle) \text{ bzw.} \\ |\Phi^\pm\rangle = 1/\sqrt{2}(|0\rangle|0\rangle \pm |1\rangle|1\rangle)$$

eine besondere Rolle. Zum einen legt in einem Bell-Zustand das Ergebnis einer Messung am ersten System den Zustand des zweiten Systems eindeutig fest – aufgrund dieser Eindeutigkeit sind die Bell-Zustände sogar maximal verschränkt. Zum anderen sind sie wechselseitig orthogonal und

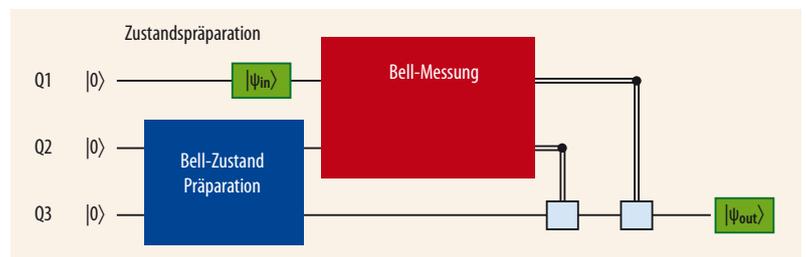


Abb. 1 Bei der Quanten-Teleportation wird der Zustand von Alices System Q1 mithilfe eines Hilfsystems Q2 auf Bobs System Q3 übertragen.

bilden eine Basis des Raums aller Zwei-Qubit-Zustände. Eine Messung in der Bell-Basis bedeutet, dass man sowohl die Parität (gerade oder ungerade) als auch die Phase (+ oder -) misst.

Wie lässt sich nun Verschränkung zur Teleportation nutzen? Der Clou ist, dass Alice Zugriff auf ein zweites Quantensystem hat, das sich mit Bobs System in einem Bell-Zustand befindet. Danach misst Alice ihre beiden Systeme – das Hilfsystem und das zu teleportierende – in der Basis der Bell-Zustände und teilt das Ergebnis Bob mit. Abhängig von diesen Messergebnissen wendet Bob Korrekturoperationen an – entweder werden die beiden Wahrscheinlichkeitsamplituden des Zustands vertauscht oder eine der Amplituden erhält einen Phasenfaktor, oder beides. Danach befindet sich Bobs System im Ausgangszustand von Alice (Abb. 1).

Auch wenn der Eindruck entstehen könnte, die Teleportation verletzt kein bewährtes physikalisches Prinzip:

■ Quantenzustände lassen sich nicht kopieren [1]. Teleportation zerstört bei Alices Messung den Ausgangszustand – der Zustand wird also nicht kopiert, sondern transferiert. Auch bleibt der Quantenzustand trotz Teleportation unbekannt.

■ Die Spezielle Relativitätstheorie: Aufgrund der Nichtlokalität von Quantenzuständen bewirkt die Messung zwar im Prinzip einen instantanen Zustandskollaps. Damit wird aber keine Information übertragen! Zur Übertragung des Zustandes muss Alice noch Bob ihre Messergebnisse mitteilen. Diese klassische Kommunikation ist selbstverständlich der speziellen Relativitätstheorie unterworfen.

■ Die Erzeugung von Bell-Zuständen am Start bzw. die Messung in der Bell-Basis erfordert in den meisten Fällen entweder eine Wechselwirkung oder die Benutzung eines Interferometers. Damit steht das Hilfsystem sowohl mit Bobs als auch mit Alices Quantensystem in geeigneter Weise in Kon-