

mit Radien zwischen 0,1 und 1 μm untersucht. Tausende Einzelpuls-Beugungsbilder zeigten, dass die He-Tröpfchen in drei Formen vorkommen: kugelförmig, oblat mit elliptischem Querschnitt oder oblat abgeflacht mit einer Gestalt ähnlich der eines Käselaiibes. Erstaunlicherweise war nur etwa die Hälfte aller Tröpfchen kugelförmig. Die restlichen erschienen oblat, wobei nicht wenige sehr stark gedehnt waren. Dies deutet auf extrem hohe Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu zwei Millionen Umdrehungen pro Sekunde hin, was jenseits der Stabilitätsgrenze eines klassisch-flüssigen Tröpfchens liegt.

Der Kontrast in diesen Messungen reichte nicht aus, um Vortices zu sehen, da der Durchmesser der Vortexkerne in reinen Helium-Tröpfchen nur etwa 0,2 nm beträgt, was weniger als der mittlere Atomabstand ($\sim 0,36$ nm) ist. Die Experimentatoren benutzten daher für eine zweite Messreihe einen Trick: Sie lagerten 0,1 Pro-

zent Xenon-Atome in die Helium-Tröpfchen ein. Dadurch bildeten sich kettenförmige Xe-Cluster, die als Kontrastmittel dienten. Die Xe-Cluster sind einige Nanometer breit und über 100 nm lang. Sie bildeten sich entlang der Vortexkerne, wo das effektive, hydrodynamische Potential ein Minimum aufweist. Da der Streuquerschnitt der verwendeten Röntgenstrahlung für Xe etwa 600-mal größer ist als für He und da ferner der Durchmesser der Xe-Cluster etwa zehnmal größer ist als der Vortexkerndurchmesser in den reinen He-Tröpfchen, führt die Röntgenstreuung an den eingebetteten Xe-Clustern zu intensiven und voll aufgelösten Bragg-Peaks, die regelmäßig entlang einer Linie oder in dreiecksförmigen Mustern in den Beugungsbildern auftreten (Abb. 1). Die Analyse dieser Bilder zeigte, dass benachbarte Vortices rund 100 nm voneinander entfernt sind, wobei über 150 Vortices pro Tröpfchen vorkommen können. Damit ist die Flächendichte der

Vortices im Tröpfchen mit einigen 10^{13} m^{-2} fünf Größenordnungen höher als der maximale Wert, der je in makroskopischen Proben suprafluiden Heliums beobachtet wurde.

Diese Beobachtung von Vortices hat den unumstößlichen Nachweis der Suprafluidität von Helium-Tröpfchen erbracht. In zukünftigen Experimenten gilt es, die Struktur und Dynamik der Quantenwirbel und auch ihre Abhängigkeit von der Tröpfchengröße und der Dotierung weiter zu erforschen.

Wieland Schöllkopf

- [1] J. P. Toennies und A. F. Vilesov, *Angew. Chem. Int. Ed.* **43**, 2622 (2004)
- [2] D. R. Tilley und J. Tilley, *Superfluidity and Superconductivity*, Institute of Physics Publishing, Bristol (1990)
- [3] S. Grebenev, J. P. Toennies und A. F. Vilesov, *Science* **279**, 2083 (1998)
- [4] J. R. Anglin und W. Ketterle, *Nature* **416**, 211 (2002)
- [5] L. F. Gomez et al., *Science* **345**, 906 (2014)
- [6] C. Bostedt et al., *J. Phys. B* **46**, 164003 (2013)

Dr. Wieland Schöllkopf, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, FHI FEL Facility & Department of Molecular Physics, Faradayweg 4 – 6, 14195 Berlin

■ Quantenkritikalität kritisch überprüft

Phasenübergänge am Temperaturnullpunkt können das Verhalten eines Systems auch bei hohen Temperaturen bestimmen.

Alltägliche Phasenübergänge wie das Schmelzen von Eis werden durch thermische Fluktuationen getrieben. Festkörperphysiker interessieren sich seit mehr als 20 Jahren für eine andere, ungewöhnliche Klasse von Phasenübergängen: Am absoluten Temperaturnullpunkt können Quantenphasenübergänge stattfinden, deren Ursache quantenmechanische Nullpunktsfluktuationen sind. Solche Phasenübergänge sind eine Herausforderung für die Theorie, da sich die statistische Beschreibung dieser Quantenfluktuationen fundamental von der klassischen Fluktuationen unterscheidet. Die resultierenden quantenkritischen Phänomene können physikalische Messgrößen in der Nähe eines Quantenphasenübergangs auch bei endlichen Temperaturen dominieren.

Auf experimenteller Seite gelang es, zahlreiche Materialien zu identifizieren, die Quantenphasenübergänge zeigen, wenn externe Parameter wie Druck, Magnetfeld oder chemische Zusammensetzung variieren. Besonders erfolgreich sind dabei intermetallische Verbindungen mit Seltenerd-Ionen (Schwere-Fermionen-Metalle) untersucht worden. Allerdings ist in vielen Fällen das theoretische Verständnis unvollständig, da die Vielzahl vorhandener Freiheitsgrade (magnetische Momente, Orbitale, Gitterverzerrungen) sowie komplexe Bandstrukturen die Modellierung erschweren. Darüber hinaus sind etliche grundlegende Aspekte von Quantenphasenübergängen in Metallen, d. h. Systemen mit einer Fermi-Fläche und damit verbundenen niederenergetischen

Teilchen-Loch-Anregungen, nach wie vor unverstanden.

Konzeptionell einfacher sind Quantenphasenübergänge in magnetischen Isolatoren. Hier existieren detaillierte theoretische Vorhersagen für das Verhalten von Messgrößen, die insbesondere für effektiv eindimensionale Systeme einen quantitativen Vergleich zwischen Theorie und Experiment ermöglichen.

Ein solcher Vergleich ist einem kanadischen Forscherteam durch Experimente an der „Spinketten-Verbindung“ CoNb_2O_6 gelungen [1]. Dabei handelt es sich um ein Material, dessen magnetische Eigenschaften durch Ketten aus Kobalt-Atomen bestimmt sind. Die Spins der Kobalt-Atome richten sich bevorzugt entlang einer der Kristallachsen aus; benachbarte Spins sind ferromagnetisch gekop-

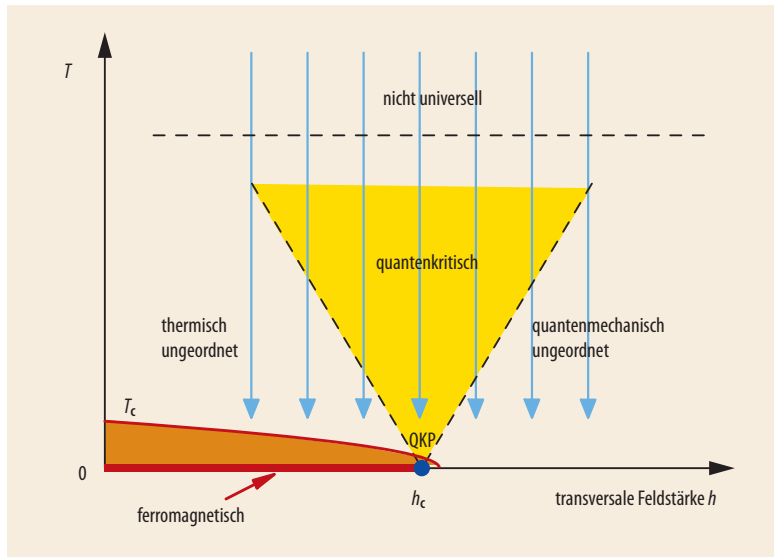


Abb. 1 Im Phasendiagramm des ein-dimensionalen Ising-Modells trennt ein quantenkritischer Punkt (QKP) bei kritischer Feldstärke h_c am Temperaturnullpunkt eine geordnete (d. h. symmetriebrochene) von einer ungeordneten Phase. Das Verhalten bei tiefen Temperaturen nahe des QKP ist universell, mit einem thermisch ungeordneten, einem quantenmechanisch ungeordneten und einem quantenkritischen Regime. Bei hohen Temperaturen werden nichtuniverselle Effekte wichtig. In CoNb_2O_6 führt

eine schwache Kopplung zwischen den Ketten zu dreidimensionaler magnetischer Ordnung unterhalb von T_c . Im aktuellen Experiment haben A. Kinross et al. die Spin-Gitter-Relaxationsrate $1/T_1$ bei jeweils festem Feld und variierender Temperatur gemessen (Pfeile) [1]. Während $1/T_1$ im quantenkritischen Regime einem Potenzgesetz folgt ($1/T_1 \propto T^{-3/4}$), verhält es sich exponentiell divergent im thermisch ungeordneten und exponentiell unterdrückt im quantenmechanisch ungeordneten Regime.

der Nähe eines quantenkritischen Punktes quantitativ bestätigt werden. Dieses Phasendiagramm weist bei tiefen Temperaturen drei charakteristische Regimes auf (Abb. 1). Dabei erzeugt das Wechselspiel von quantenmechanischen und thermischen Fluktuationen ein universelles quantenkritisches Regime, dessen Ausdehnung mit steigender Temperatur wächst. Die drei Regimes sind durch qualitativ verschiedene Temperaturabhängigkeiten der Spin-Gitter-Relaxationsrate gekennzeichnet, die in [1] experimentell nachgewiesen wurden. Insbesondere folgte die Relaxationsrate im quantenkritischen Regime, d. h. bei festem $h=h_c$, dem theoretisch vorhergesagten Potenzgesetz (einschließlich Vorfaktor)¹⁾ als Funktion der Temperatur. Insgesamt konnte die quantenkritische Theorie für eindimensionale Systeme mit Ising-Symmetrie [2] eindrucksvoll bestätigt werden.

Was das Experiment allerdings nicht zeigt, ist der bei tiefen Temperaturen erwartete „Crossover“ von ein- zu dreidimensionalem Verhal-

ten: Die Kopplung zwischen den Spinketten in CoNb_2O_6 ist zwar klein, aber nicht vernachlässigbar. Sie führt einerseits zu dreidimensionaler magnetischer Ordnung unterhalb einer kritischen Temperatur T_c , mit $T_c \sim 0,5$ K nahe des (eindimensionalen) Quantenphasenübergangs; andererseits erzeugt sie im magnetischen Anregungsspektrum eine Serie gebundener Zustände, die das für eine Raumdimension charakteristische Kontinuum ersetzt [3]. Man vermutet, dass der dimensionale Crossover in der Spin-Gitter-Relaxationsrate erst bei sehr tiefen Temperaturen, d. h. unterhalb der tiefsten Messtemperatur [1] von 2 K, sichtbar wird. Eine theoretische Modellierung dafür steht aus.

Das vielleicht wichtigste Resultat des neuen Experiments ist, dass universelles quantenkritisches Verhalten in CoNb_2O_6 bis hin zu Temperaturen $k_B T \approx 0,4$ J auftritt, bevor nichtuniverselle Einflüsse wichtig werden – dies deckt sich mit theoretischen Vorhersagen für ähnliche Modellsysteme [4]. Für andere Materialien eröffnet dies die Möglichkeit, exotische quantenkritische Phänomene auch bei Raumtemperatur zu beobachten, denn Austauschkonstanten von 1000 K oder mehr sind insbesondere in magnetischen Oxiden keine Seltenheit.

Matthias Vojta

- [1] A. W. Kinross et al., Phys. Rev. X **4**, 031008 (2014)
- [2] S. Sachdev, Quantum Phase Transitions, 2. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge (2010)
- [3] R. Coldea et al., Science **327**, 177 (2010)
- [4] A. Kopp und S. Chakravarty, Nature Phys. **1**, 53 (2005)

1) Der Wert der magnetischen Austausch-Kopplung J fließt in den Vorfaktor ein und war aus anderen Experimenten bekannt.

pelt, mit einer Austauschstärke von $J/k_B \approx 18$ K. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds senkrecht zur Vorzugsrichtung lassen sich Quantenfluktuationen induzieren, d. h. Tunnelprozesse zwischen den beiden bevorzugten Spinausrichtungen: Ein hinreichend starkes Feld zerstört so die ferromagnetische Ordnung am Temperaturnullpunkt. Das magnetische Verhalten von CoNb_2O_6 wird damit in guter Näherung durch ein Ising-Modell im transversalen Feld beschrieben, inzwischen ein Lehrbuchbeispiel für Quantenphasenübergänge [2].

Alison Kinross und Kollegen untersuchten das magnetische Verhalten von CoNb_2O_6 mittels Kernspin-Resonanz [1]. Dabei wurde die Spin-Gitter-Relaxationsrate, die ein Maß für die magnetische Suszeptibilität bei kleinen Energien ist, als Funktion von Temperatur T und Magnetfeld h gemessen und direkt mit theoretischen Vorhersagen verglichen. Die Übereinstimmung ist bemerkenswert: So konnte das generische Phasendiagramm in