

■ Mit Kanonen auf Tröpfchen

Erstmals ist es gelungen, Suprafluidität in ultrakalten Helium-Tröpfchen anhand von Quantenwirbeln nachzuweisen.

Helium-Tröpfchen dienen seit den Neunzigerjahren dazu, Spektroskopie an Atomen, Molekülen oder Clustern zu betreiben, die in den Tröpfchen eingelagert sind [1]. Die Bedingungen für die Spektroskopie sind exzellent, da eingebettete Teilchen die Temperatur des suprafluiden He-Tröpfchens von nur 0,37 K annehmen. Suprafluides Helium zeichnet sich zudem durch ungewöhnliche Eigenschaften wie das Verschwinden der Viskosität aus [2]. Dies ermöglicht eine nahezu ungestörte Rotation des eingebetteten Teilchens, sodass selbst bei dieser tiefen Temperatur hochaufgelöste Rotationsspektren beobachtet werden [3].

Versetzt man das Suprafluid in Rotation, folgt es nicht wie eine normale Flüssigkeit der Drehung, sondern es bilden sich mikroskopische Wirbel aus. Diese Vortices ordnen sich in regelmäßigen Abrikosov-Gittern an. Durch die Beobachtung solcher Vortex-Felder ließ sich Suprafluidität u. a. in ultrakalten Bose-Einstein-Kondensaten eindeutig nachweisen [4]. Bislang war es jedoch nicht möglich, Vortices oder Abrikosov-Gitter in einem Helium-Tröpfchen direkt zu beobachten und somit den unumstößlichen Nachweis der Suprafluidität der Tröpfchen zu erbringen. Genau dies ist einem internationalen Team um Christoph Bostedt, Oliver Gessner und Andrey Vilesov nun gelungen. Die Wissenschaftler nutzten die Linac Coherent Light Source (LCLS) am SLAC National Accelerator Laboratory in Kalifornien, um mikroskopisch kleine Tröpfchen aus suprafluidem Helium zu untersuchen [5].

Die LCLS war der erste Freie-Elektronen-Laser (FEL) im Bereich harter Röntgenstrahlung (Wellenlänge < 1 nm). Mit FELs lässt sich prinzipiell Laserstrahlung jeder Wellenlänge erzeugen. Insbesondere die seit einigen Jahren existierenden Röntgen-FEL haben in kurzer Zeit ein erstaunlich weites

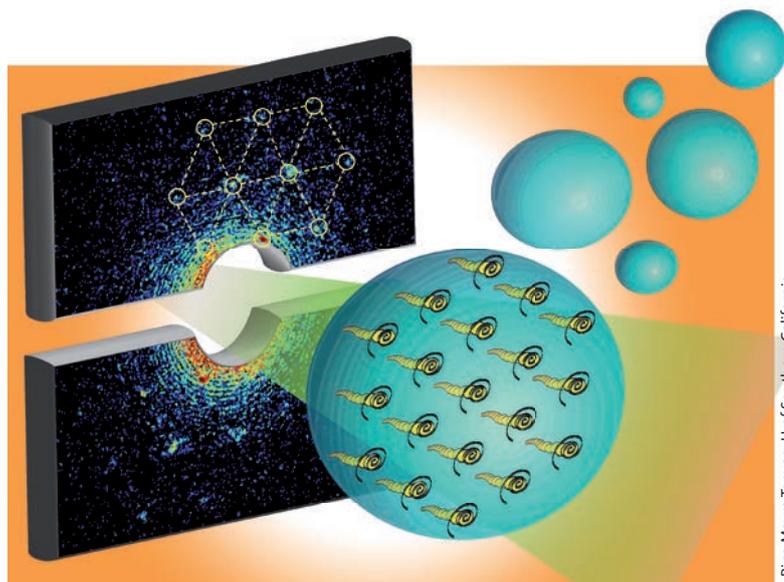


Abb. 1 In einem suprafluiden Helium-Tröpfchen können Dutzende von Wirbeln vorhanden sein, die sich in einem regelmäßigen Abrikosov-Gitter anord-

nen. Mithilfe ultrakurzer Röntgenpulse des Freie-Elektronen-Lasers LCLS ließen sich nun komplette Beugungsbilder einzelner Tröpfchen aufnehmen.

Feld wissenschaftlicher Aktivitäten eröffnet. In einem FEL wird mit einem Beschleuniger ein meist gepulster Strahl von relativistischen Elektronen erzeugt und durch die starken Magnetfelder eines Undulators gelenkt. Die Magnetfeldrichtung alterniert periodisch, daher zwingt die Lorentz-Kraft die Elektronen auf eine Slalombahn. Als Folge davon geben die Elektronen Synchrotronstrahlung ab, deren Wellenlänge von ihrer Energie, der Magnetfeldstärke und der Periode des Undulators abhängt. In einem FEL wechselwirkt der erzeugte Strahlungspuls so lange mit dem Elektronenpuls, bis die Elektronen in Mikropulse strukturiert sind, deren Abstand einer Wellenlänge der erzeugten Strahlung entspricht. Beim weiteren Durchlaufen des Undulators emittieren diese Mikropulse phasenkohärent, wodurch der Strahlungspuls enorm verstärkt wird. Die Brillanz der Strahlungspulse einer solchen „Röntgen-Kanone“ liegt viele Größenordnungen über den Werten von Speicherring-Strahlungsquellen.

Im Experiment fokussierten die Wissenschaftler die mit einer Wiederholrate von 120 Hz erzeugten

Röntgenpulse auf einen in die Vakuumkammer injizierten Strahl von Helium-Tröpfchen. Deren Dichte im Fokus war dabei so gering, dass nur etwa jeder tausendste Röntgenpuls an einem Tröpfchen gestreut wurde und es praktisch nie zur Streuung eines Pulses an zwei Tröpfchen kam. Für das Gelingen des Experiments ausschlaggebend waren die Eigenschaften der Röntgenpulse: enorm viele Photonen pro Puls (10^{12}), kurze Wellenlänge (0,83 nm) und sehr kurze Pulsdauer (≤ 100 fs) [6]. Die hohe Photonenzahl ermöglichte es, das komplette Beugungsbild eines Tröpfchens durch die Streuung eines einzelnen Röntgenpulses zu beobachten. Die kleine Wellenlänge war Voraussetzung dafür, die Beugungserscheinungen ausreichend auflösen zu können. Und die kurze Pulsdauer sorgte dafür, dass die Wechselwirkung zwischen Röntgenpuls und Tröpfchen bereits vorüber war, bevor das Tröpfchen, durch die energiereichen Photonen vielfach ionisiert, in einer Coulomb-Explosion zerplatzte.

In einer ersten Messreihe wurden reine, aus 10^8 bis 10^{11} He-Atomen bestehende Tröpfchen

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-