

Supersolide dipolare Quantengase

Drei Experimente zeigen, dass ultrakalte Gase aus magnetischen Atomen kristallisieren und reibungsfrei fließen können.

Axel Pelster

Klassische Materie tritt immer in einem eindeutigen Aggregatzustand wie fest, flüssig oder gasförmig auf. Bei tiefen Temperaturen spielen Quanteneffekte eine große Rolle und ermöglichen auch andere Aggregatzustände. Beispielsweise existiert ^4He unterhalb von 2,17 Kelvin als Superfluid, einer Flüssigkeit, die reibungsfrei fließt und keine Entropie besitzt. Vor 50 Jahren sagte Anthony James Leggett vorher, dass bei ausreichend tiefen Temperaturen ein Zustand mit gleichzeitig superfluiden und festen Eigenschaften auftreten sollte, ein Supersolid [1]. Dabei kondensieren Bosonen in ein Superfluid und bilden gleichzeitig spontan eine statische Dichtemodulation aus. Sie weisen also auch Eigenschaften eines kristallinen Festkörpers auf. Ursprünglich konzentrierte sich die experimentelle Suche nach einem Supersolid auf ^4He . Erste Signaturen von Superfluidität in festem ^4He hatten aber eine andere Ursache [2]. Bis heute ließen sich in ^4He keine supersoliden Eigenschaften nachweisen – es scheint entweder als superfluide Flüssigkeit oder als normaler Kristall vorzuliegen.

Aus theoretischer Sicht lässt sich das Auftreten eines Phasenübergangs von einem Superfluid zu einem Supersolid mit Hilfe des Anregungsspektrums einer superfluiden Flüssigkeit verstehen. Diese Energie-Impuls-Dispersionsrelation der Quasiteilchen charakterisiert die makroskopischen kollektiven Anregungsmoden (**Abb. 1**). Zwischen den phononischen Anregungen bei kleinen Impulsen und dem Bereich freier Teilchen bei großen Impulsen existiert bei einem endlichen Impuls ein Minimum, dessen Anregungen Rotonen heißen. Wenn eine Variation von Systemparametern dazu führt, dass am Minimum die Energie Null wird, so sind die Rotonen instabil. Der zugehörige Impuls entspricht dann gemäß der Heisenbergschen

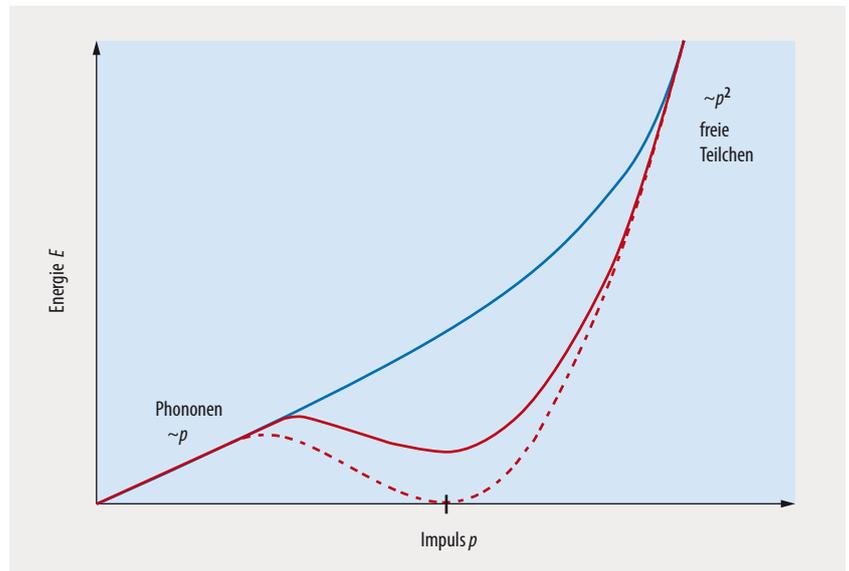


Abb. 1 Das Anregungsspektrum eines Bose-Einstein-Kondensats (blau) geht mit wachsendem Impuls von einer linearen in eine quadratische Abhängigkeit über. Bei superfluidem ^4He (rot) bildet sich ein Rotonen-Minimum aus, das sich mit Neutronenstreuung nachweisen lässt. Ein dipolares Bose-Einstein-Kondensat wird instabil, falls die Energie am Rotonen-Minimum den Wert Null annimmt (gestrichelt).

Unschärferelation der räumlichen Periode einer sich ausbildenden statischen Dichtemodulation.

Bereits 2003 wurde theoretisch untersucht, ob es zu einem solchen Rotonen-Minimum in einem Bose-Einstein-Kondensat atomarer Gase kommen könnte. Solche Kondensate existieren unterhalb von 1 μK und sind superfluid, was sich durch Transportmessungen oder die Anregung von Vortizes direkt nachweisen lässt. Aufgrund der starken Verdünnung auf ein Millionstel der Dichte von Luft liegt in der Regel nur eine schwache isotrope, kurzreichweitige Kontaktwechselwirkung vor, sodass kein Rotonen-Minimum auftritt. Gibt es aber zwischen den Atomen eine langreichweitige Wechselwirkung, kann sich ein Rotonen-Minimum ausbilden [3, 4]. Zwei Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten wiesen 2017 auf Supersolidität hin, wobei eine optische Kavität bzw. eine Raman-induzierte Spin-Bahn-Kopplung die

langreichweitige Wechselwirkung erzeugten [5]. Eine genaue Analyse zeigte aber, dass jeweils ein äußeres optisches Gitterpotential die Dichtemodulationen induziert hatte.

Untersuchungen der letzten Jahre ergaben, dass bei Quantengasen magnetischer Atome supersolide Eigenschaften aufgrund der anisotropen, langreichweitigen dipolaren Wechselwirkung auch selbstorganisiert auftreten können [6]. Beispielsweise ließ sich ein Rotonen-Minimum in einem Bose-Einstein-Kondensat aus magnetisch dipolaren Erbium-Atomen direkt nachweisen [4, 7]. Außerdem wird ein magnetisch dipolares Bose-Einstein-Kondensat aus Dysprosium-Atomen instabil und zerfällt in mehrere isolierte Tröpfchen, wenn die dipolare Wechselwirkung die Kontaktwechselwirkung übersteigt [8]. Dadurch wird das Quantengas inkompressibel und besitzt die Eigenschaften einer Flüssigkeit. Weil Quantenfluktuationen diese Tröpf-

chen stabilisieren [9], heißen sie auch Quantentröpfchen. Der Abstand dieser isolierten Quantentröpfchen war aber zu groß, um eine globale Phasenkohärenz für ein Superfluid auszubilden. Vor kurzem zeigten drei Experimente mit Erbium- und Dysprosium-Atomen, dass auch phasenkohärente Quantentröpfchen und damit ein Supersolid in einem sehr engen Parameterfenster existieren, sofern die Zahl der Atome ausreicht [10 – 12]. In den Dichteprofilen, die sich sowohl in situ als auch während einer Flugzeit durch Absorptionmessungen beobachten lassen, tritt eine globale Phasenkohärenz genau dann auf, wenn ein Hintergrund-Bose-Einstein-Kondensat die Quantentröpfchen miteinander verbindet. Das zeigt sich am Verlauf der jeweiligen Dichteprofile (**Abb. 2**).

Dabei unterscheiden sich die drei Experimente insbesondere bei der Stabilität der phasenkohärenten Quantentröpfchen. Die beiden Gruppen um Giovanni Modugno in Pisa mit theoretischer Unterstützung von Luis Santos in Hannover [10] und um

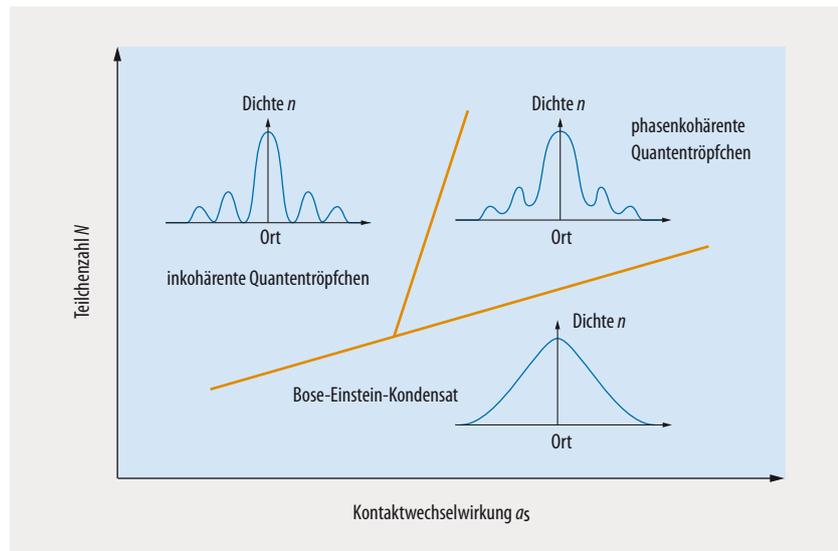


Abb. 2 Das Phasendiagramm zeigt die verschiedenen Quantengase mit ihren unterschiedlichen Dichteprofilen. Dieses entspricht für die phasenkohärenten Quantentröpfchen einer Überlagerung aus Bose-Einstein-Kondensat und inkohärenten Quantentröpfchen.

Tilman Pfau in Stuttgart [11] verwendeten ein Gas aus ^{162}Dy -Atomen. Dort überwiegt die Kontaktwechselwirkung die dipolare Wechselwirkung, sodass erstere zu reduzieren ist, um die Quantentröpfchen zu erzeugen.

Dies gelingt mit einer magnetischen Feshbach-Resonanz und dem Zeeman-Effekt. Durch Anlegen eines homogenen Magnetfeldes können ein gebundener Zustand zwischen zwei Atomen und ein Streuzustand ener-

getisch entarten. Das verändert die Streueigenschaften resonant, und die Stärke der Kontaktwechselwirkung lässt sich beliebig einstellen. Durch die Drei-Körper-Verluste der Feshbach-Resonanz bleibt die Lebensdauer der phasenkohärenten Quantentröpfchen auf etwa 20 ms begrenzt.

Im Unterschied dazu nutzte das Team um Francesca Ferlaino in Innsbruck neben ^{166}Er -Atomen, die ähnliche Atomverluste wie ^{162}Dy aufweisen, auch ^{164}Dy -Atome [12]. Deren Kontaktwechselwirkung ist relativ klein, sodass ohne eine Feshbach-Resonanz langlebige phasenkohärente Quantentröpfchen mit einer Lebensdauer von 70 ms entstanden. Hierzu wurde das Bose-Einstein-Kondensat präpariert und die entsprechenden experimentellen Parameter eingestellt. Beim umgekehrten Vorgehen führt evaporatives Kühlen eines thermischen Gases direkt zu phasenkohärenten Quantentröpfchen mit noch längeren Lebensdauern.

Die drei Experimente zeigen eindrucksvoll, dass magnetisch dipolare Quantengase supersolide Eigenschaften besitzen. Aufwändig war vor allem der Nachweis der phasenkohärenten

Quantentröpfchen, da sie nur mit genau passenden Systemparametern entstehen und aufgrund der endlichen Lebensdauer metastabil sind. Ein direkter Beleg für die Superfluidität der Quantentröpfchen beispielsweise durch Transportmessungen fehlt noch. Außerdem gilt es, die phononischen und rotonischen Anregungsmoden genauer zu studieren, die bei einem Supersolid gleichzeitig auftreten sollten. Ferner muss sich zeigen, ob die Bosonen aufgrund der Phasenkohärenz zwischen den Quantentröpfchen tunneln können und damit Josephson-artige Effekte auftreten. Schließlich stellt sich die Frage, wie viele dieser langlebigen phasenkohärenten Quantentröpfchen sich herstellen lassen.

Künftige theoretische und experimentelle Arbeiten zu magnetisch dipolaren Quantengasen werden diese Fragen sicherlich beantworten und damit zu einem genaueren Verständnis der Supersolidität beitragen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse könnten auch für andere physikalische Systeme mit langreichweitigen Wechselwirkungen relevant sein, beispielsweise für dipolare Gase

aus polaren Molekülen oder aus Rydberg-Atomen.

- [1] A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **25**, 1543 (1970)
- [2] M. H. W. Chan et al., J. Low Temp. Phys. **172**, 317 (2013)
- [3] D. H. J. O'Dell et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 110402 (2003)
- [4] L. Santos et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 250403 (2003)
- [5] L. Pollet, Physik Journal, Mai 2017, S. 22
- [6] M. Wenzel et al., Phys. Rev. A **96**, 053630 (2017); T. Langen und M. J. Mark, Physik Journal, Dezember 2018, S. 35
- [7] L. Chomaz et al., Nat. Phys. **14**, 442 (2018)
- [8] H. Kadau et al., Nature **530**, 194 (2016)
- [9] A. R. P. Lima und A. Pelster, Phys. Rev. A **84**, 041604 (2011); I. Ferrier-Barbut et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 215301 (2016); F. Wächtler und L. Santos, Phys. Rev. A **93**, 061603 (2016)
- [10] L. Tanzi et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 130405 (2019)
- [11] F. Böttcher et al., Phys. Rev. X **9**, 011051 (2019)
- [12] L. Chomaz et al., Phys. Rev. X **9**, 021012 (2019)

Autor

Priv.-Doz. Dr. Axel Pelster,
Technische Universität Kaiserslautern,
Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 46,
67663 Kaiserslautern

Ein Farbstoffmolekül mit Niveau

Kürzlich ist es gelungen, ein organisches Molekül in ein nahezu ideales Quantensystem mit zwei wohldefinierten Energieniveaus zu verwandeln.

Arno Rauschenbeutel und Jürgen Volz

Der Einsatz von Technologien, die auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruhen, könnte zu revolutionären Verbesserungen hinsichtlich Kapazität und Geschwindigkeit in der Kommunikation, Simulation und Informationsverarbeitung führen. Dienen einzelne optische Photonen als Träger der Quanteninformation, so sind für diesen Zweck quantenphotonische Schaltkreise nötig. Analog zu elektronischen Schaltkreisen werden einzelne Photonen „geroutet“ und paarweise mittels nichtlinearer Quantenoperationen in logischen Quantengattern verarbeitet. Lineare optische Schaltkreise kommen bereits in vielen

Anwendungen zum Einsatz. Integrierte nichtlineare optische Elemente auf dem Niveau einzelner Photonen sind dagegen Gegenstand der Forschung. Ein möglicher Ansatz besteht darin, quantenmechanische Emittoren in die optischen Schaltkreise zu integrieren, sodass sie stark mit den Photonen wechselwirken. Das anharmonische Energieniveau-Spektrum der Emittoren führt dabei zu einer nichtlinearen Quantendynamik, die sich dazu eignet, photonische Quantengatter zu realisieren. Dies haben verschiedene Experimente mit lasergekühlten Atomen demonstriert [1]. Jedoch sind deren Aufbauten nur schwer miniaturisier-

bar, sodass festkörperbasierte Quantenemitter besser geeignet erscheinen, um komplexere quantenphotonische Schaltkreise zu realisieren.

Festkörperbasierte Quantenemitter umfassen z. B. einzelne Farbstoffmoleküle, Farbzentren in Diamant oder Quantenpunkte [2]. Diese Emittoren finden in verschiedenen Gebieten der Quantenoptik und -sensorik Anwendung. Einzelne Farbstoffmoleküle weisen vorteilhafte Eigenschaften auf [3]: Eingebettet in ein kristallines Wirtsmaterial, besitzen sie bei kryogenen Temperaturen eine sehr stabile optische Übergangsfrequenz. Ein weiterer Vorteil solcher Moleküle in