

Quantenlego mit einzelnen Fermionen

Systeme mit nur sechs fermionischen Bausteinen zeigen Hinweise auf einen Phasenübergang zu einem Suprafluid.

Henning Moritz und Niclas Luick

Systeme vieler wechselwirkender Teilchen können qualitativ neue Phänomene zeigen, die sich nicht einfach aus den Eigenschaften der einzelnen Bausteine ableiten lassen [1]. Ein Paradebeispiel für solch emergentes Verhalten ist Suprafluidität – also reibungsfreier Transport. Sofort stellt sich die Frage, wie diese aus dem Zusammenspiel der einzelnen wechselwirkenden Teilchen hervorgeht. Forschenden in der Arbeitsgruppe von Selim Jochim und Philipp Preiss an der Universität Heidelberg ist es nun erstmals gelungen, die Emergenz von Suprafluidität mit wenigen fermionischen Atomen direkt im Experiment zu untersuchen.

Dafür griffen sie tief in die Trickkiste für die Untersuchung von Quantenphysik mit ultrakalten Atomen und präparierten durch eine geschickte Abfolge von Laser- und evaporativen Kühschritten ein Wenigteilchensystem. Dieses besteht aus je drei (oder teils auch sechs) ultrakalten Lithium-Atomen in zwei unterschiedlichen Hyperfeinspin-Zuständen. Die Atome besetzen die niedrigsten zwei Drehimpulszustän-

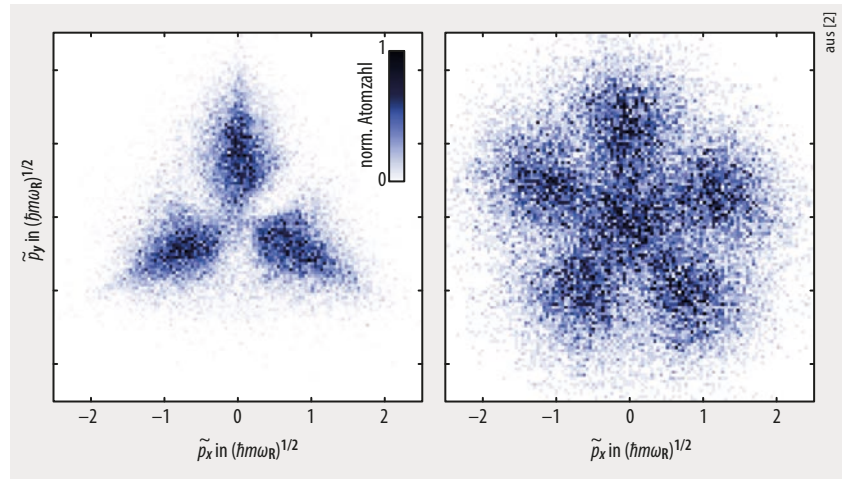


Abb. 1 Impuls-Korrelationen in einem nichtwechselwirkenden Fermi-Gas mit $N=3$ (links) bzw. 6 (rechts) Fermionen zeigen die charakteristische Struktur eines Pauli-Kristalls.

de $n=0$ bzw. $n=1$ eines isotropen zweidimensionalen harmonischen Oszillator-Potentials (**Abb. 2**). Aufgrund des viel stärkeren vertikalen Einschlusses ist die Bewegung effektiv zweidimensional. Zusätzlich erlauben es Feshbach-Resonanzen, durch Anlegen eines magnetischen Feldes die Stärke der Kontaktwechselwirkung zwischen Atomen mit unterschiedlichem Spin beliebig einzustellen.

In einem ersten Satz von Experimenten hat das Forschungsteam ein nichtwechselwirkendes System präpariert und die Impulsverteilung der drei (oder sechs) Teilchen in einem Spinzustand vermessen [2]. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Potentials gibt es keine ausgezeichnete Bewegungsrichtung. Doch das Pauli-Prinzip sorgt für eine starke Korrelation zwischen den Teilchenimpulsen (**Abb. 1**). Um diese sichtbar zu machen, wurde das Experiment häufig unter gleichen Bedingungen wiederholt. Die gemessenen Impulsverteilungen wurden jeweils so um den gemeinsamen Schwerpunktsimpuls gedreht, dass sie optimal übereinander zu liegen kommen. Die kristalline Impulsverteilung, die bei drei Atomen an ein dreiblättriges Kleeblatt erinnert, stellt die erste Beobachtung eines sogenannten Pauli-Kristalls [3] dar.

Die Motivation dafür, diese periodische Struktur der Korrelationen als Kristall zu bezeichnen, rührt von ihrer Ähnlichkeit zu geordneten Strukturen in mesoskopischen Systemen oder gar Festkörpern. In einem Pauli-Kristall ist allerdings weder eine Symmetrie gebrochen noch langreich-

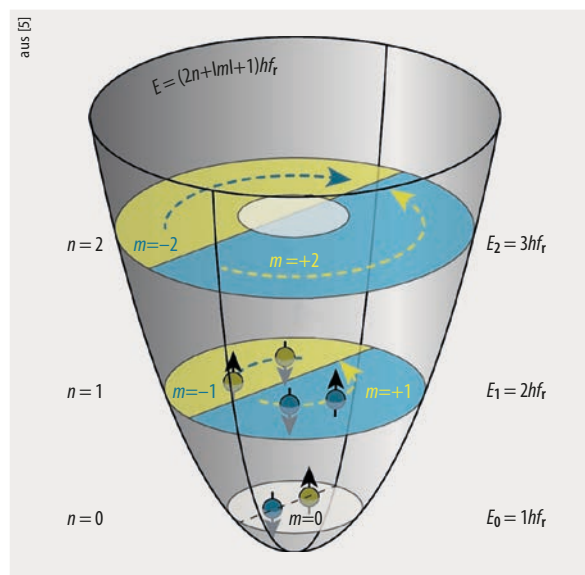
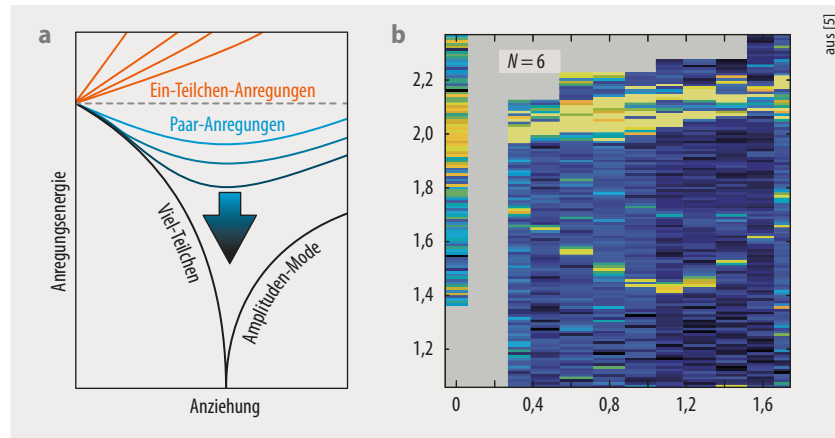


Abb. 2 In den untersten zwei Energieniveaus eines isotropen harmonischen Potentials in 2D sind sechs Fermionen gefangen. Durch die $n+1$ -fache Entartung entstehen für $N=1, 3$ und 6 Fermionen pro Spin jeweils abgeschlossene Schalen.

Abb. 3 Für attraktiv wechselwirkende Systeme verschwindet die Anregungsenergie (a, schwarze Linie) am Übergang zur suprafluiden Phase, während für wenige Teilchen (rot) weiterhin ein schwächer ausgeprägtes Minimum als Funktion der Wechselwirkung bzw. Paarbildungsenergie ϵ_b verbleibt, das sich auch experimentell beobachten ließ (b).



weitige Ordnung vorhanden. Stattdessen besteht der Grundzustand aus einer kohärenten Überlagerung aller möglichen Konfigurationen, die Rotationssymmetrie wird nur durch die oben beschriebene Messung der Impulsverteilung gebrochen. Auch ist die mikroskopische Ursache nicht eine Wechselwirkung zwischen den Teilchen, sondern das Pauli-Prinzip und die daraus resultierende Einfachbesetzung der Einteilchen-Zustände in der Falle durch die nichtwechselwirkenden Atome.

Richtig spannend wird es nun, wenn mithilfe der Feshbach-Resonanz eine attraktive Wechselwirkung zwischen den Atomen eingestellt wird. Für ein System mit sehr vielen Teilchen ist hier ein Übergang in eine suprafluide Phase zu erwarten. Mikroskopisch passiert bei diesem Phasenübergang vereinfacht Folgendes: Jeweils zwei fermionische Atome auf der Fermi-Oberfläche mit entgegengesetztem Impuls und Spinzustand bilden ein bosonisches Cooper-Paar, und diese Paare formen ein suprafluides Bose-Einstein-Kondensat. Dafür muss eine kritische attraktive Wechselwirkungsstärke für den Phasenübergang überschritten werden, zumindest wenn das oberste Fallenniveau vollständig besetzt ist (Abb. 2) und so eine abgeschlossene Schale vorliegt. Dies liegt daran, dass jeder Versuch, die notwendigen Paar-Korrelationen auszubilden, der Vielteilchen-Wellenfunktion energetisch höhere Fallenzustände beimischen muss. Je größer die attraktive Wechselwirkung und damit der Gewinn an Wechselwirkungsenergie jedoch ist, desto eher bilden sich

Paarkorrelationen aus. Der Übergang zu einer suprafluiden Phase erfolgt, wenn dieser Gewinn an Wechselwirkungsenergie die Kosten an potentieller Energie durch die Beimischung höherer Fallenniveaus übersteigt. Bei noch stärkerer attraktiver Wechselwirkung kostet es wiederum Energie, zwei Teilchen in einen höheren Fallenzustand zu bringen, da dafür Cooper-Paare aufgebrochen werden müssen. Im thermodynamischen Grenzfall vieler Teilchen erwartet man entsprechend einen Verlauf der Anregungsenergie, wie er in Abb. 3a (schwarze Linie) gezeigt wird.

Die Gruppe um Georg Bruun (Universität Aarhus, Dänemark) konnte in einer theoretischen Arbeit zeigen, dass ein Vorläufer für dieses charakteristische Verhalten am Phasenübergang zu einem Suprafluid bereits in einem System mit wenigen Fermionen zu beobachten sein sollte [4]. Den Experimentalphysikern in Heidelberg ist es nun gelungen, dieses Verhalten im Experiment in einem System von nur drei Teilchen pro Spin-Zustand zu beobachten [5]. Dafür nutzten sie wieder ihre exzellente Kontrolle über die Erzeugung und Detektion weniger Fermionen und entwickelten zudem ein geschicktes Verfahren, um durch Modulation der harmonischen Falle das Anregungsspektrum des Systems zu vermessen. Wie theoretisch erwartet (Abb. 3a) verlief die Anregungsenergie in diesen Spektren nichtmonoton. Am Phasenübergang trat ein Minimum auf, das mit zunehmender Teilchenzahl ausgeprägter wird (Abb. 3b). Interessant ist auch die Tatsache, dass die Anre-

gungsmode im „suprafluiden“ Bereich eine sehr wohldefinierte Anregungsenergie besitzt, was auf eine langlebige Anregung schließen lässt. Sie ist der Vorläufer der Amplituden-Mode, bei der Cooper-Paare periodisch gebrochen und wieder gebildet werden. Dies entspricht einer Schwingung der Amplitude des Ordnungsparameters.

Zusammenfassend demonstrieren die Ergebnisse eindrücklich, dass der Übergang von wenigen zu vielen Teilchen nun der experimentellen Quantensimulation zugänglich wird. Auch die Herausforderung, die Veränderung der Physik mit weiter zunehmender Systemgröße zu untersuchen, scheint lösbar, da zumindest in Gittersystemen schon Quantensimulationen mit über hundert Fermionen durchführbar sind [6]. Damit eröffnet sich für die Quantensimulation mit ultrakalten Atomen die einzigartige Möglichkeit, das mikroskopische Verhalten von Vielteilchensystemen mit den emergenten makroskopischen Phänomenen zu verknüpfen.

- [1] P. W. Anderson, *Science* **177**, 393 (1972)
- [2] M. Holten et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 020401 (2021)
- [3] M. Gajda et al., *Europhys. Lett.* **115**, 20012 (2016)
- [4] J. Bjerlin et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 155302 (2016)
- [5] L. Bayha et al., *Nature* **587**, 583 (2020)
- [6] C. Gross und W. S. Bakr, arXiv:2010.15407 (2020)

Die Autoren

Prof. Dr. Henning Moritz und Dr. Niclas Luick, Universität Hamburg, Institut für Laserphysik, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg