

## ■ Kalt unter die Kante

Mit zwei Experimenten zur Anderson-Lokalisierung von ultrakalten Fermionen und Bosonen ist es in 3D-Laserspeckle erstmals gelungen, Materiewellen unterhalb der Mobilitätskante zu beobachten.

Ordnung ist das halbe Leben – woraus zu schließen ist, dass Unordnung die interessantere andere Hälfte ausmacht. Die Physik kondensierter Materie wird stets unter idealisierten Bedingungen betrachtet. Dazu gehört in der Regel, räumliche Homogenität oder perfekte Periodizität eines Kristallgitters vorauszusetzen. Allerdings lassen sich Transporteigenschaften von Materialien, wie sie im Labor oder in der Technik zum Einsatz kommen, fast nie allein aus den Charakteristiken der homogenen Phase erklären. Oft ist der Übergang von einem guten zu einem schlechten Leiter und von dort zu einem Isolator vor allem dadurch bestimmt, wie stark die räumliche Symmetrie gebrochen ist.

Philip W. Anderson leistete 1958 mit einem berühmten Artikel Pionierarbeit für ein ganzes Gebiet der Physik, das sich mit phasenkohärentem Transport in ungeordneten Strukturen befasst [1]. Er zeigte, dass die Eigenzustände eines ungeordneten Quantensystems räumlich lokalisiert sein können, wenn die Unordnung nur stark genug ist. Als Faustregel gilt hierbei, dass in ein und zwei Dimensionen alle Eigenzustände lokalisiert sind – und zwar im Wesentlichen allein aufgrund der hohen Wahrscheinlichkeit eines klassischen Zufallsmarsches, an seinen Ausgangspunkt zurückzukehren. Dieses mathematische Argument ist in mannigfacher Weise experimentell bestätigt worden, zuletzt 2008 besonders anschaulich durch die 1D-Anderson-Lokalisierung von ultrakalter Materie am Institut d'Optique [2, 3].

Interessanter sind drei Dimensionen, wo es zum Anderson-Übergang zwischen ausgedehnten Zuständen mit hoher Wellenzahl und lokalisierten Zuständen mit niedriger Wellenzahl kommt. Die kritische Übergangsenergie ist als Mobilitätskante bekannt. Einen mathematisch rigorosen Beweis



Brian Stauffer

In dieser sehr plakativen Illustration der Anderson-Lokalisierung repräsentieren die Luftballons ungeordnete Hinder-

nisse, die den Schall der Trompete so reflektieren, dass er sich nicht ausbreitet.

für diesen Übergang gibt es nicht, und numerische Simulationen sind überaus ressourcenaufwändig. Experimentell besteht die Herausforderung darin, lokalisierte Zustände unterhalb der Mobilitätskante nachzuweisen, und zwar ohne den störenden Einfluss von Wechselwirkung, Teilchenverlusten oder Dephasierungsprozessen, wie sie in vielen physikalischen Systemen leider unvermeidlich auftreten.

Nun ist es in zwei Experimenten mit ultrakalten Gasen erstmals gelungen, direkt den räumlichen 3D-Anderson-Übergang von Materiewellen für Fermionen [4] sowie für Bosonen [5] zu realisieren. Beide Gruppen beobachteten die Expansion einer ultrakalten Atomwolke in einem 3D-Laserspeckle-Potential, ermutigt durch detaillierte theoretische Vorhersagen [6], nach denen sich die Mobilitätskante für ultrakalte Atome in Laserspeckle-Potentialen erreichen lassen sollte.

Laserspeckle entsteht bei der kohärenten Interferenz von Laserlicht nach Streuung an einem ungeordneten Medium – wie es der interessierte Leser durch Reflexion eines Laserpointers an einem weißen Blatt Papier leicht selbst erzeugen kann. In den genannten Experimenten erzeugt ein weiter Laserstrahl, der mittels einer kon-

vexen Linse sehr großer Apertur durch eine Milchglasplatte hindurch fokussiert wird, ein besonders feinkörniges Interferenzmuster. In der Fokalebene entsteht durch die kohärente Überlagerung zahlloser Streuamplituden mit zufällig verteilten Phasen eine Intensitätsverteilung, deren statistische Signaturen sehr gut bekannt sind. Ist das Laserlicht blau gegen eine atomare optische Resonanz verstimmt, sehen die Schwerpunktsfreiheitsgrade der Atome eine Landschaft aus zufällig verteilten Potentialbergen, die sich zur Anderson-Lokalisierung eignen.

Brian DeMarco und Kollegen von der University of Illinois in Urbana-Champaign verwenden fermionische  $^{40}\text{K}$ -Atome, deren Wechselwirkung durch Spinpolarisierung aufgrund des Pauli-Prinzips unterdrückt ist [4]. Nach Abschalten der Falle, in der die Wolke auf eine Temperatur um die Fermi-Temperatur abgekühlt wird, breiten sich die Atome in einem Laserspeckle-Potential aus (Abb. 1). Ein Magnetfeldgradient kompensiert dabei die Schwerkraft. Die expandierende Wolke enthält Atome mit einem breiten Energiespektrum, welches sich über die Mobilitätskante erstreckt. Die Teilchendichte zerfällt daher in zwei Komponenten – einen mobilen Anteil, der

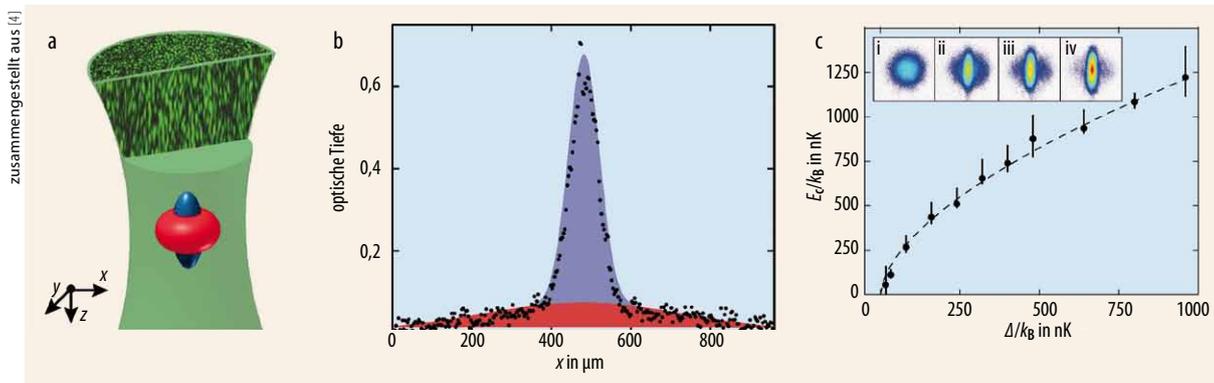


Abb. 1 Bei einer expandierenden Atomwolke in einem anisotropen 3D-Laserspeckle-Potential (a) lassen sich ein dif-

fusiver (rot) und ein lokalisierter Anteil (blau) unterscheiden, wie im Dichteprofil entlang der x-Achse (b). Je stärker die

Unordnung, desto größer der lokalisierte Anteil (i–iv in c), d. h. die Mobilitätskante  $E_c$  wächst mit der Unordnungsstärke  $\Delta$ .

sich diffusiv ausbreitet, sowie einen lokalisierten Anteil, der stationär bleibt. Der lokalisierte Anteil wächst mit der Unordnungsstärke, die durch die eingestrahlte Laserintensität durchstimbar ist. Aus dem relativen Gewicht beider Anteile können die Experimentatoren rekonstruieren, wie die Mobilitätskante von der Unordnungsstärke abhängt (Abb. 1c). Dieser Zusammenhang folgt nicht der einfachsten störungstheoretischen Vorhersage [6], sodass hier interessante Fragen auftreten, deren Beantwortung uns helfen wird, die spannende Physik der Nichtgleichgewichtsdynamik in stark ungeordneten Systemen besser zu verstehen.

Nur wenig später hat das Team von Philippe Bouyer und Alain Aspect am Institut d'Optique in Palaiseau sein Erfolgsrezept von 2008 nun auch in 3D angewandt [5]. Jendrzejewski et al. benutzen ein Bose-Einstein-Kondensat aus einigen Zehntausend  $^{87}\text{Rb}$ -Atomen mit einer sehr tiefen Ausgangstemperatur von einem Nanokelvin. Nach freier Expansion bis zu einer so geringen Dichte, dass die Stoßwechselwirkung keine Rolle mehr spielt, setzen sie das Kondensat plötzlich einem aus zwei Richtungen gekreuzten Laserspeckle-Potential aus, dessen räumliche Korrelationslänge bei nur rund  $0,13\ \mu\text{m}$  liegt. Dafür ist eine Optik mit hervorragenden Abbildungseigenschaften notwendig. Auch in diesem Experiment enthält die expandierende Atomwolke ein breites Energiespektrum, welches Zustände ober- und unterhalb der Mobilitätskante besetzt, sodass das

Gas in einen diffusiven und lokalisierten Anteil zerfällt. Nur bei winziger Specklekorngroße nahe der optischen Abbildungsgrenze und sehr niedriger kinetischer Energie der Atome dominiert der lokalisierte Anteil. Noch nicht völlig verstanden sind dabei die genaue Energieverteilung der Atome im Specklepotential sowie die Abhängigkeit der Mobilitätskante von den mikroskopischen Parametern.

Diese Klasse von Experimenten leitet eine neue Ära bei der Erforschung der Transportdynamik am Anderson-Übergang ein, in der wir den Materiewellen direkt dabei zuschauen, wie sie lokalisieren – und auch unmittelbar untersuchen können, wodurch sie delokalisieren. In nächster Zukunft geht es darum, Phasenkohärenz nachzuweisen, was beispielsweise durch kohärente Rückstreuung möglich ist [7]. Auf längere Sicht gilt es zu verstehen,

welche Rolle Vielteilcheneffekte spielen. Dabei sind wir nun nicht mehr darauf angewiesen, bei der Untersuchung der Anderson-Lokalisierung zur „Würdelosigkeit numerischer Simulationen Zuflucht zu nehmen, um selbst die einfachsten Fragen zu klären“ [1]. Stattdessen werden wir in Zukunft die fast unbegrenzten Möglichkeiten nutzen können, die uns kalte Gase bieten, um ungeordnete Quantensysteme effizient zu simulieren.

Cord A. Müller

- [1] P. W. Anderson, Phys. Rev. **109**, 1492 (1958); Rev. Mod. Phys. **50**, 191 (1978)
- [2] J. Billy et al., Nature **453**, 891 (2008)
- [3] P. Schlagheck und K. Richter, Physik Journal, August/September 2008, S. 24
- [4] S. S. Kondov et al., Science **334**, 66 (2011)
- [5] F. Jendrzejewski et al., arXiv:1108.0137
- [6] R. Kuhn et al., New J. Phys. **9**, 161 (2007)
- [7] M. Hartung et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 020603 (2008); N. Cherroret et al., arXiv:1108.1282

## KURZGEFASST

### ■ Nasser Staub

Mithilfe des ESA-Weltraumteleskops Herschel haben Astronomen aus den Niederlanden und den USA in der protoplanetaren Staubscheibe um den jungen Stern TW Hydrae Hinweise auf ein großes Wasserreservoir entdeckt. Sie wiesen eine Wassermenge von 0,5 Prozent der irdischen Ozeane nach. Das gefundene Wasser befindet sich in einem 115 Astronomische Einheiten großen Bereich, rund 60 Prozent der protoplanetaren Scheibe. Insgesamt könnte sich in der Scheibe die Masse mehrerer tausend Erdozeane in Form von Eis und Dampf verbergen. M. Hogerheijde et al., Science **334**, 1208931 (2011)

### ■ Von virtuell zu real

Schwedischen Physikern ist es gelungen zu beobachten, wie aus virtuellen Photonen, die aufgrund von Quantenfluktuationen im Vakuum entstehen, reale Lichtteilchen werden. Möglich macht dies der 1970 vorhergesagte „dynamische Casimir-Effekt“. Dabei können sich virtuelle Photonen in reale wandeln, wenn sie an einem Spiegel reflektiert werden, der sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegt. Im Experiment bestand der „Spiegel“ aus einem supraleitenden Quanteninterferenzdetektor (SQUID), den extrem schnelle Magnetfeldänderungen in Vibration versetzten. C. M. Wilson et al., Nature **479**, 376 (2011)