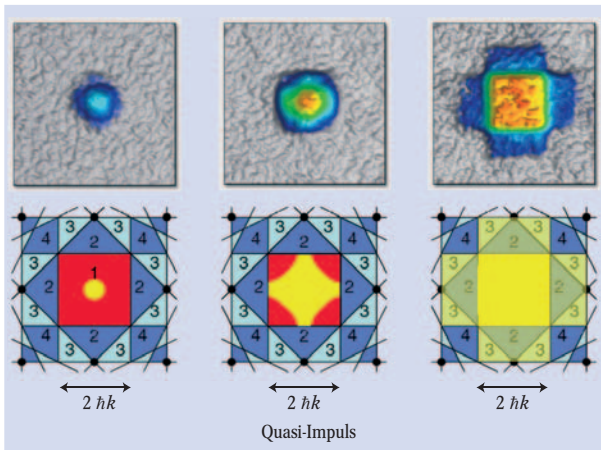


Ultrakalte Fermionen im Gitter

Fermionische Quantengase in optischen Gittern eröffnen faszinierende Forschungsmöglichkeiten und vielfältige Parallelen zur Festkörperphysik.

Die Physik mit atomaren Quantengasen hat sich seit der Realisierung der Bose-Einstein-Kondensation (BEC) im Jahre 1995 zu einem umfangreichen Forschungsgebiet entwickelt. Besonders attraktiv sind diese ultrakalten Quantengase



Werden die untersten Bloch-Bänder eines optischen Gitters zunehmend mit fermionischen Atomen besetzt, so gibt die beobachtete Quasi-Impulsverteilung (oben) direkt die Verformung der Fermi-Oberfläche entsprechend der Füllung der ersten Brillouin-Zonen (unten) wieder (Quelle: ETH Zürich, PRL 87, 160405 (2001)).

aufgrund ihrer „Reinheit“ sowie der extrem geringen thermischen Anregungen bei den erreichten Temperaturen von einigen 100 nK. Die inneren atomaren Freiheitsgrade ermöglichen es zudem, die rund 100 μm großen Ensembles präzise zu präparieren und zu analysieren. Transferiert man diese Gase in ein sog. optisches Gitter, so eröffnen sich zudem faszinierende Perspektiven zur kontrollierten Untersuchung von Festkörpermodellen.

Im Festkörper bewegen sich die Elektronen im periodischen Potential der Rumpfionen auf dem Kristallgitter. Analog dazu kann man aus überlagerten Laserstrahlen stehende Wellen in allen Raumdimensionen erzeugen, die eine periodische Lichtkraft auf Atome ausüben. Ein solches „optisches Gitter“ entspricht dem Kristallgitter und die Atome übernehmen die Rolle der Elektronen. Im Gegensatz zu realen Festkörpern ist diese Gitterstruktur praktisch frei von Störstellen und Gitterschwingungen und somit hervorragend geeignet, um grundlegende Phänomene zu untersuchen. Zusätzlich eröffnen sich neuartige, im Festkörper undenkbar Möglichkeiten, da sich die Laser-Intensitäten

und somit die Gittertiefe vom Regime stark gebundener Zustände bis hin zum freien Gas kontinuierlich variieren lassen. Mit Bose-Einstein-Kondensaten in optischen Gittern ist es bereits gelungen, Phänomene wie beispielsweise Bloch-Oszillationen, Josephson-Tunneln und den Übergang vom Superfluid zum Mott-Isolator direkt zu beobachten. Die Verwendung von Bosonen statt Fermionen in diesen Experimenten schränkt allerdings die Analogie zum Festkörper stark ein.

Deshalb besteht ein großes Interesse daran, mit ultrakalten fermionischen Quantengasen zu experimentieren. Diese Experimente sind jedoch wesentlich aufwändiger als diejenigen mit Bosonen, da das Pauli-Prinzip bei sehr niedrigen Temperaturen die für die Kühlung wichtigen Stöße zwischen identischen Fermionen unterdrückt. Daher gelang es erst 1999, ein quantenentartetes atomares Fermi-Gas zu realisieren [1], und bis heute haben weniger als zehn Gruppen weltweit diese Systeme erzeugt. Spektakuläre Erfolge wurden insbesondere bereits bei der Untersuchung des Übergangs zwischen BEC und dem BCS-Zustand der Supraleitung erzielt [2–5]. Die Experimente mit ultrakalten Fermionen versprechen neue Einsichten in Probleme der Viel-Teilchen-Quantenphysik, wobei die Hoch-Temperatur-Supraleitung eine herausragende Motivation darstellt. Ein „Quanten-Simulator“ mit kalten Quantengasen, mit dem sich theoretische Modelle experimentell nachbilden und untersuchen lassen, bietet ebenfalls faszinierende Perspektiven.

Der Gruppe von Tilman Esslinger an der ETH Zürich ist es nun erstmals gelungen, ein entartetes Gas fermionischer Atome in ein dreidimensionales optisches Gitter zu transferieren und den Übergang von einem Leiter zu einem Band-Isolator zu beobachten [6]. Für diesen Meilenstein auf dem Gebiet fermionischer Quantengase und ihrer möglichen Anwendung als „Quanten-Simulator“ luden die Forscher ein entartetes Fermi-Gas aus rund 100000 ^{40}K -Atomen bei ca. 20 % der Fermi-Temperatur in ein kubisches optisches Gitter. Die zwischenatomare Wechselwirkung ließ sich in dem Experiment mithilfe einer speziellen Mischung der Spinzustände ($F=9/2$, $m_F=-9/2$) und ($F=9/2$, $m_F=-7/2$) und einer sog. Feshbach-Resonanz ausgehend von einem re-

pulsiven Anfangswert „abschalten“, sodass ein wechselwirkungsfreies Gas für Untersuchungen zu einem „idealen“ Gitter-Energieband realisiert wurde.

Die Forscher konnten in einem ersten Experiment direkt beobachten, wie sich die Fermi-Oberfläche bei Füllung des ersten Energiebands von einem kreisförmigen Leitungszustand bis zur komplett gefüllten Brillouin-Zone eines Band-Isolators und darüber hinaus verändert (Abb.). Bei konstanter Atomzahl verringerten sie dazu langsam das Gitterpotential und nutzten aus, dass die Atome dabei adiabatisch im niedrigsten Energieband bleiben. Wird dies bis zum Verschwinden des Gitterpotentials durchgeführt, so geht der näherungsweise erhaltene Quasiimpuls in den „realen“ Impuls der freien Atome über, der sich nach einer freien Evolutionszeit (sog. Flugzeit-Methode) und starker Ausdehnung der ursprünglichen Wolke direkt aus einer Absorptionsabbildung des Dichteprofiles ergibt. Die Abbildung ist ein schönes Beispiel dafür, wie sich mit Quantengasen gut bekannte physikalische Strukturen (wie Brillouin-Zonen) direkt „sichtbar“ machen lassen.

Ein weiterer spannender Zugang zur Physik der „Leitungs-Fermionen“ ergibt sich, wenn das Gitterpotential instantan abgeschaltet wird. Im Flugzeitbild treten nun Interferenzmuster für über mehrere Gitterplätze delokalisierte Atome auf, wobei die Breite der Interferenzmaxima ein Maß für die entsprechende Kohärenzlänge der Fermionen ist. Die Forscher haben damit in einer weiteren Versuchsserie erstmals die Umordnung der Fermionen beim Übergang von einem Isolator zu einem Leiter untersucht. Nach Präparation eines Band-Isolators mit verschwindender Kohärenzlänge erniedrigten sie die Gittertiefe in einer variablen Zeit bis zu einem festen Endwert, bei dem das System leitend wird, d. h. sich eine endliche Kohärenzlänge einstellt. Es zeigte sich, dass die Zeit der Gittervariation zur Erzielung der vollen Kohärenz im Leiter mindestens 10-mal so lang sein muss, wie die Dauer von Tunnelprozessen zwischen den Gitterplätzen. Dies ist deutlich länger als in einem vergleichbaren bosonischen System, offenbar weil das Pauli-Prinzip Umordnungsprozesse erschwert.

Zusammenfassend haben diese Experimente ein neues Tor zur spannenden Physik mit ultrakalten

Fermi-Gasen aufgestoßen. Ein zentraler Aspekt in diesem aufstrebenden Forschungsgebiet wird in den nächsten Jahren sicherlich das detaillierte Studium fermionischer Supraleitung sein. Hierbei ist insbesondere auch die derzeit verfolgte Erweiterung zu Fermi-Bose-Mischsystemen zu nennen, die nicht nur Perspektiven zu Bosonen-induzierter Supraleitung, sondern als neuartiges System mit gemischter Statistik gleich eine ganze Fülle neuartiger Phasen verspricht [7].

KAI BONGS UND
KLAUS SENGSTOCK

- [1] B. DeMarco und D. S. Jin, *Science* **285**, 1703 (1999)
- [2] M. Greiner, C. A. Regal und D. S. Jin, *Nature* **426**, 537 (2003)
- [3] M. W. Zwierlein et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 250401 (2003)
- [4] S. Jochim et al., *Science* **302**, 2101 (2003)
- [5] T. Bourdel et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 050401 (2004)
- [6] M. Köhl, H. Moritz, T. Stöferle, K. Günter und T. Esslinger, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 080403 (2005)
- [7] M. Lewenstein et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 050401 (2004)

Nachweis durch Abwesenheit

Hinter der unscheinbaren Bezeichnung HD209458b verbirgt sich ein „Star“ unter den extrasolaren Planeten: Sechs Jahre nach seiner indirekten Entdeckung 1999, als noch kaum ein Dutzend Planeten-Kandidaten bekannt waren [1, 2], ist es Astronomen kürzlich gelungen, Infrarot-Strahlung dieses Exoplaneten zu detektieren und damit zum ersten Mal Licht eines Planeten außerhalb des Sonnensystems direkt nachzuweisen [3].

Der Mutterstern HD209458 ist etwa 150 Lichtjahre von der Sonne entfernt, der er mit einer Oberflächentemperatur von 6000 Kelvin ähnelt. Die kurze Umlaufperiode des Planeten (3,52 Tage) und der damit verbundene sehr kleine Abstand zum Mutterstern (nur 0,045 Erdbahnradien) reihen ihn ein in die Kategorie der „Hot Jupiters“.^{#)} Aufgrund der sehr starken Bestrahlung durch den Mutterstern muss die dem Stern zugewandte Hemisphäre dieser „extremen“ Planeten sehr heiß sein, sodass die Atmosphäre vermutlich teilweise „abge-

dampft“ wird. Aus der Analyse der periodischen Doppler-Bewegung des Muttersterns ergibt sich für die Planetenmasse $M_{\text{PL}} = (0,69 \pm 0,05) / \sin i$ Jupitermassen, wobei der Sinus der Bahnneigung i in diesem Falle nahezu 1 ist.

Berühmt wurde HD209458b als erster „Transit“-Planet: zufällig liegt die Bahnebene so, dass wir das Planetensystem ziemlich genau „von der Seite“ sehen. Daher zieht der Planet von uns aus gesehen periodisch vor der „Scheibe“ des Muttersterns vorbei, dessen Licht dabei leicht abgeschwächt wird – eine „Finsternis“ analog zum Venus-Transit vor der Sonne im vergangenen Jahr. Die quantitative Analyse des Lichtabfalls während eines Transits erlaubt es, direkt den Radius des Planeten in Einheiten des Sternradius zu bestimmen (den wir durch Kombination von Spektraltyp und Sternentwicklungs-Rechnungen kennen): Mit 1,32 Jupiterradien ist er etwas größer als man von einem Planeten dieser Masse erwartet hätte. Schließlich gelang es bei HD209458b auch erstmals, eine ausgedehnte Kometenschweif-artige Planetenatmosphäre mit den Be-

^{#)} Zum Vergleich: Merkur, der sonnennächste Planet, ist etwa neunmal so weit von der Sonne entfernt und hat eine Periode von 88 Tagen.

Dr. Kai Bongs, Prof. Dr. Klaus Sengstock, Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg