

Kiesel und seinen Mitautoren vom Institut für Angewandte Physik an der Universität Tübingen die beeindruckende Leistung, bei einem Hanbury Brown-Twiss-Experiment Antikorrelationen in einem Strahl freier Elektronen zu beobachten [5]. Ihr Versuchsaufbau entspricht Abb. b mit einer kalten Wolfram-Feldemissionskathode als Quelle. Weil die Entartung der freien Elektronen sehr niedrig, d. h. ihre Dichte im Phasenraum sehr gering ist, ist auch die gemessene Antikorrelation sehr klein. C ist im Tübinger Experiment von der Größenordnung $\sim 10^{-3}$. Doch auch wenn der beobachtete Effekt sehr klein ist, fällt er deutlich aus und ist ganz klar negativ. Das jetzige Experiment ist eine großartige Leistung und es erfordert außergewöhnliche Fähigkeiten, diese Herausforderung zu meistern.

Nun, da das Hanbury Brown-Twiss-Experiment sowohl Bunching als auch Antibunching demonstriert hat – und zwar für Bosonen und Fermionen – wäre es an der Zeit, dass wir dies unseren Studienanfängern auch beibringen. HBT ist ebenso wundervoll wie das Youngsche Doppelspalt-Interferometer. Es hat eine große Bedeutung für die Physik, da es gewissermaßen das Saatkorn darstellt, aus dem das faszinierende Gebiet der Quantenoptik erwachsen ist.

CHRISTIAN SCHÖNENBERGER

- [1] R. Hanbury-Brown, R. Q. Twiss, *Nature* **177**, 27 (1956)
- [2] R. Hanbury-Brown, R. Q. Twiss, *Phil. Mag.* **45**, 663 (1954)
- [3] Siehe dazu etwa M. P. Silverman, *Phys. Lett. A* **120**, 442 (1987)
- [4] M. Henny et al. und W. D. Oliver et al., *Science* **284**, 296 und 299 (1998)
- [5] H. Kiesel et al., *Nature* **418**, 392 (2002)

Exzitonenkondensation in Halbleitern?

Die Bose-Einstein-Kondensation ultrakalter atomarer Gase hat seit ihrer ersten Beobachtung im Jahr 1995 zu vielen spektakulären Experimenten mit der kohärenten makroskopischen Wellenfunktion des Kondensates geführt. Dagegen gelang es bis heute nicht, die schon vor etlichen Jahrzehnten vorgeschlagene Bose-Einstein-Kondensation von Exzitonen in Halbleitern

eindeutig nachzuweisen. Zwei neue experimentelle Arbeiten an kalten Exzitonen in Halbleiter-Quantenfilmen, die direkt nacheinander in *Nature* veröffentlicht wurden, beleben erneut die Diskussion um die Eigenschaften quantenstatistisch entarteter Exzitonen-systeme [1, 2].

Regt man einen Halbleiter durch ein schwaches Lichtfeld variabler Energie an, so tastet das Lichtfeld die möglichen Übergänge des Systems ab, d. h. die Anregung eines Elektrons aus dem gefüllten Valenzband in das leere Leitungsband. Das fehlende Elektron im Valenzband, das „Loch“, verhält sich wie ein Quasiteilchen, das durch eine positive elektrische Ladung $+e$ und die effektive Masse des Valenzbandes charakterisiert ist. Die attraktive Coulomb-Wechselwirkung zwischen Valenzband-Loch und Leitungsband-Elektron lässt sich in direkter Analogie zum Wasserstoffproblem verstehen; die gebundenen Zustände werden in der Halbleiterphysik als „Exzitonen“ bezeichnet und durch eine Bindungsenergie und einen Bohrschen Radius charakterisiert. Bei den relativ geringen effektiven Elektronenmassen, die für die meisten Halbleitersysteme typisch sind, und aufgrund der hohen statischen Dielektrizitätskonstanten in der Größenordnung von 10 beträgt die Exzitonenbindungsenergie etwa ein Promille und der Bohrsche Radius etwa das Fünfhundertfache der des Wasserstoffwertes. Solche „Wannier-Exzitonen“ sind also relativ ausgedehnte Objekte, deren Energiezustände unterhalb der Übergänge von Band zu Band liegen und die, speziell bei tiefen Temperaturen und hochqualitativen Halbleiterstrukturen, die optische Absorption und Reflexion dominieren.

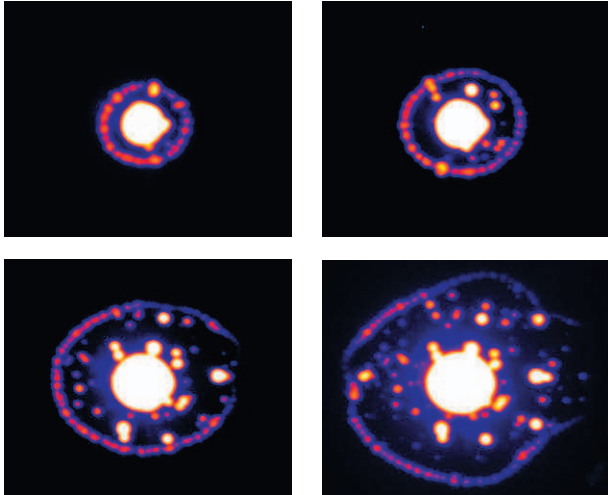
Als Quasiteilchen, die sich aus zwei Fermionen mit antiparallelem Spin aufbauen, können Exzitonen in gewissen Grenzfällen bosonisches Verhalten zeigen. Über die genauen Bedingungen, unter denen man die fermionische Substruktur der Exzitonen vernachlässigen darf, wird unter Halbleiterexperten aber noch kontrovers diskutiert. Einigkeit herrscht jedoch darüber, dass der Bereich sehr tiefer Temperaturen und niedriger bis mittlerer Anregungsdichten wissenschaftlich sehr interessant ist.

Ein weiterer Unterschied zwischen Atomgasen und Exzitonen-systemen besteht darin, dass Exzi-

tonen eine endliche Lebensdauer haben und ein makroskopisch kohärenter Zustand daher immer nur ein sehr flüchtiges Phänomen sein kann. In Halbleitern mit direkter Bandlücke liegt die Lebensdauer von Elektron-Loch-Paaranregungen typischerweise im Nanosekundenbereich. Dadurch lassen sich die üblichen Argumente der Gleichgewichtsthermodynamik und -statistik nicht anwenden, und man muss das System der elektronischen Anregungen als echtes Nichtgleichgewichtssystem mit gepulster optischer Anregung, anschließender Relaxation und Zerfall beschreiben. Aufgrund des großen Bohr-Radius und der relativ kleinen Bindungsenergie muss man zudem die langreichweitige Coulomb-Wechselwirkung zwischen Exzitonen, Elektronen und Löchern berücksichtigen und oftmals auch noch die Kopplung an das Phononensystem des Festkörpers und an das elektromagnetische Feld. Da dieses Vielteilchenproblem nicht exakt behandelbar ist, ist man auf Näherungen angewiesen, in deren Rahmen es bisher noch nicht gelungen ist, allgemein akzeptierte Vorhersagen für die Exzitonenkondensation zu machen. Einigkeit besteht allerdings darin, dass eine kurze Lebensdauer die Kondensation wesentlich erschwert. Deshalb hat man sich in frühen Experimenten fast ausschließlich auf den Halbleiter Cu_2O konzentriert, dessen energetisch tiefster Exzitonenzustand aufgrund von Bandstrukturbesonderheiten dipolverboten ist und daher eine ungewöhnlich lange Lebensdauer hat. Obwohl in einer Vielzahl von Experimenten an Cu_2O Signaturen eines quantenstatistisch entarteten Bosonengases und Änderungen des Transportverhaltens berichtet wurden, bleibt die Interpretation der Ergebnisse bis heute umstritten, und eine abschließende Klärung ist noch nicht in Sicht.

Vor diesem Hintergrund ist es bemerkenswert und erfreulich, dass kürzlich ein weiteres Halbleitersystem mit günstigen Bedingungen für die Bildung eines entarteten Exzitonen-gases gefunden wurde. Hierbei handelt es sich um Doppel-Quantenfilme auf GaAs-Basis, bei denen durch Anlegen eines elektrischen Feldes senkrecht zur Schichtstruktur die Elektronen in den einen, die Löcher in den anderen Quantenfilm verschoben werden können. Die Wellenfunktionen der beiden Qua-

siteilchensorten überlappen in dieser räumlich indirekten Situation nur wenig. Damit wird die Wahrscheinlichkeit für Elektron-Loch-Rekombination gegenüber der direkten Konfiguration ohne Feld deutlich verringert. Dennoch können sich Exzitonen bilden; ihre Bewegung ist allerdings auf die Grenzfläche zwischen den Quantenfilmen beschränkt. Ein weiterer großer Vorteil dieser Anordnung mit parallelen Dipolmomenten ist die resultierende abstoßende Wechselwirkung, sodass sich keine Exzitonmoleküle bilden können.



Regt man spezielle Halbleiter-Heterostrukturen bei tiefen Temperaturen mit einem Laser an (heller Fleck), so können um den Anregungsfleck ringförmige Strukturen entstehen, die leuchten und bei starker Anregung in Substrukturen aufbrechen – ein Hinweis auf Bose-Einstein-Kondensation von Exzitonen? (aus [1])

Da reale Halbleiter-Heterostrukturen nie perfekt aufwachsen, können u. a. Wachstumsinseln entstehen, d. h. Regionen mit einer gegenüber dem Durchschnitt erhöhten bzw. erniedrigten Atomlagenzahl oder geänderter lokaler Konzentration der einzelnen Atomsorten. Diese Inseln bilden lokale Bereiche abgesenkter Energie und wirken als Potentialmulden mit entsprechend erhöhter Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektron-Loch-Paare. Daher können sie die Exzitonenkondensation durchaus unterstützen. Durch räumlich aufgelöste Messungen der Photolumineszenz in einer GaAs/AlGaAs-Quantenfilmstruktur haben Butov und Mitarbeiter nachgewiesen, dass sich eine hohe Dichte indirekter Exzitonen mit sehr niedriger kinetischer Energie in den Potentialmulden ansammelt [3]. Die Autoren interpretieren ihre Beobachtungen als Bildung eines statistisch hochentarteten Bose-Gases, allerdings fehlt ein Beweis der Quantenkohärenz

einer eventuellen Bose-Einstein-Kondensation.

In weiterführenden Untersuchungen an diesen räumlich indirekten Doppelquantenfilmsystemen berichten Butov et al. nun über die Ausbildung ausgedehnter räumlicher Ringstrukturen, die um den Anregungsort herum zentriert sind [1]. Die Ringe können dabei durchaus makroskopische Dimensionen mit Radien im Bereich von 100 Mikrometern annehmen (Abb.). Für höhere Anregungsdichten kommt es dann zu einem Aufbrechen der Ringe in punktförmige Substrukturen, die über eine Länge bis zu einem Millimeter periodisch angeordnet sind. Die Ringstruktur und der zu ihrer Ausbildung offensichtlich notwendige langreichweitige räumliche Transport der Anregungsenergie wurden unabhängig auch von Snoke et al. in einem InGaAs/GaAs-Doppelquantenfilmssystem beobachtet.

Diese spektakulären Resultate sind momentan noch weitgehend unverstanden. Snoke et al. diskutieren die Möglichkeit des kohärenten Transports von Exzitonen, die in „dunklen“, d. h. dipolverbotenen Zuständen kondensiert sein könnten und erst dann leuchten, sich also als Photolumineszenz bemerkbar machen, nachdem sie in den „normalen“ Zustand zurückkonvertiert sind.

Butov et al. interpretieren die beobachtete Ringstruktur als radiale Bewegung der Exzitonen mit Überschallgeschwindigkeit weg vom Anregungsort. Aufgrund ihres großen Impulses könnten die Exzitonen dann nicht strahlend rekombinieren, denn spontane Emission ist wegen des kleinen Photonenimpulses nur für langsame bzw. stationäre Exzitonen möglich. Die Ausbildung der Ringstruktur setzt

demnach eine Relaxation des Exzitonimpulses voraus. Als Szenario für das Aufbrechen des Rings in eine periodische Anordnung heller Punkte wird die Ausbildung von Wirbeln vorgeschlagen, die auch in atomaren Bose-Einstein-Kondensaten beobachtet wurden. Die Möglichkeit nichtlinearer Strukturbildung, wie sie von thermodynamisch offenen Systemen her bekannt ist, wird auch nicht ausgeschlossen.

Insgesamt gesehen mag man den verschiedenen Interpretationsversuchen dieser aufsehenerregenden Beobachtungen durchaus skeptisch gegenüberstehen, denn ein zweifelsfreier, definitiver Nachweis der Bose-Einstein-Kondensation von Exzitonen steht bislang aus und erfordert unbedingt den Nachweis der quantenmechanischen Kohärenz in den beobachteten Strukturen. Auch aus Sicht der Theorie ist noch nicht klar, wie sich die Kohärenz eines kondensierten Exzitonensystems zeitlich entwickeln würde; ob und wie sich die Nichtgleichgewichtseigenschaften der elektronischen Anregungen, die verschiedenen Wechselwirkungen im Kristall und nicht zuletzt die fermionische Natur der konstituierenden Elektronen und Löcher auswirken würde. Die Physik der optischen und elektronischen Eigenschaften von Halbleitern und Halbleiter-Heterostrukturen bleibt daher nach wie vor spannend.

STEPHAN W. KOCH UND
HARTMUT HAUG

- [1] L. V. Butov, A. C. Gossard und D. S. Chemla, *Nature* **418**, 751 (2002)
- [2] D. Snoke et al., *Nature* **418**, 754 (2002)
- [3] L. V. Butov et al., *Nature* **417**, 47 (2002)

Prof. Dr. Stephan W. Koch, Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg, 35032 Marburg; Prof. Dr. Hartmut Haug, Institut für Theoretische Physik, Universität Frankfurt, 60054 Frankfurt

KURZGEFASST...

■ Physik jenseits des Standard-Modells?

Am Brookhaven National Laboratory wurde die bislang genaueste Messung des anomalen magnetischen Moments des Myon durchgeführt¹⁾, das die Abweichung des gyromagnetischen Moments von der Vorhersage der Dirac-Gleichung angibt. Der nun gemessene Wert beträgt $a_\mu = 11659204(7)(5) \cdot 10^{-10}$ (0,7 ppm). Die Physiker von der „Muon (g-2) Collaboration“²⁾ vermuten, dass dieser Wert auf Effekte jenseits des Standard-Modells der Teilchenphysik hindeutet, betonen jedoch, dass noch weitere Auswertungen und Messungen nötig seien.

■ Hassium in Gruppe VIII

Nur sieben Atome genügten einem internationalen Forscherteam um Christoph Düllmann vom Schweizer Paul-Scherrer-Institut, um die chemischen Eigenschaften des Elements 108, Hassium (lat. für Hessen), zu bestimmen.³⁾ Die Wissenschaftler konnten zeigen, dass Hassium mit Sauerstoff ein stark flüchtiges Gas bildet – Hassiumtetraoxid. Damit ähnelt es den leichteren Elementen Osmium und Ruthenium, die zur achten Gruppe im Periodensystem gehören.

- 1) G. W. Bennett et al., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 101804-1 (2002); vgl. *Phys. Bl.*, April 2001, S. 18
- 2) <http://phyppro1.phy.bnl.gov/g2muon/index.shtml>
- 3) Ch. E. Düllmann et al., *Nature* **418**, 859 (2002)