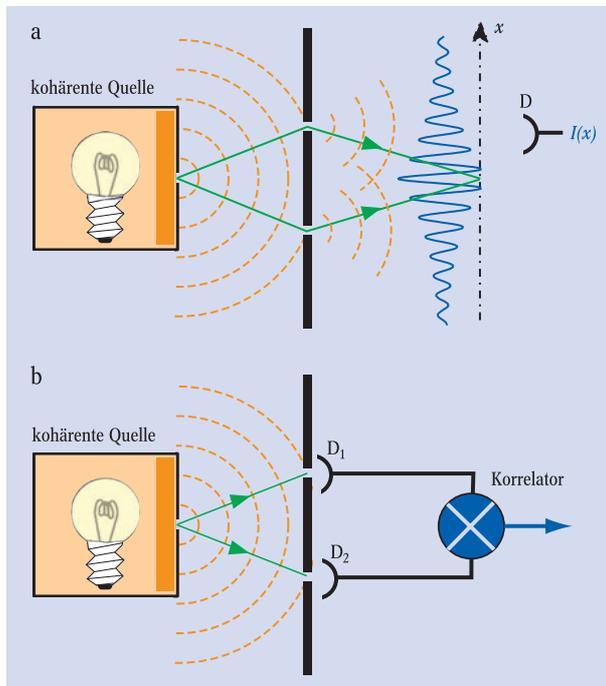


Elektronen bleiben auf Distanz

Erstmals ist ein Hanbury Brown-Twiss-Experiment mit freien Fermionen gelungen

Jede (kohärente) Welle ist in der Lage, periodische Intensitätsschwankungen zu erzeugen, wenn man sie in zwei Teilwellen (oder „-strahlen“) aufteilt und mithilfe von Spiegeln wieder überlagert. Das ist das altbekannte Prinzip der Interferometrie. Die Anzahl der beobachteten Interferenzstreifen dient als Maß für die Kohärenz der ursprünglichen Welle. Eine einfallende Kugelwelle, die von einem geo-



- a) Im Youngschen Doppelspaltexperiment wird das Interferenzmuster mit einem Detektor auf dem Schirm beobachtet.
- b) Im Hanbury-Brown-Twiss-Experiment zeigt sich die Kohärenz der Lichtquelle in den Korrelationen von zwei Detektoren an die Spalten.

metrischen Punkt mit einer gegebenen festen Frequenz ausgeht, hätte eine unendlich große Kohärenz. Doch in Wirklichkeit sind Wellen niemals perfekt kohärent, weil Lichtquellen stets eine endliche Ausdehnung haben und innerhalb eines endlichen Frequenzbereichs emittieren, etwa eine Glühlampe im Bereich vom roten zum blauen Licht.

Der Prototyp eines Interferometers ist der Youngsche Doppelspalt-Apparat, wie er in Abbildung a skizziert ist. Wenn eine kleine Lichtquelle, die innerhalb eines engen Frequenzbereichs Δf emittiert, vor den Spalten positioniert wird,

dann lässt sich ein Interferenzmuster auf dem Schirm hinter der Apparatur beobachten, d. h. die Intensität schwankt periodisch in Abhängigkeit vom Ort x zwischen hohen Werten (konstruktive Interferenz) und niedrigen (destruktive Interferenz).

All das ist altbekannt und in jedem Physik-Lehrbuch nachzulesen. Leider ist viel weniger bekannt, dass sich Kohärenz auch dadurch untersuchen lässt, dass man einfach zwei Detektoren direkt hinter die Öffnungen des Youngschen Interferometers positioniert und das zeitaufgelöste Intensitätsmuster aufzeichnet (Abb. b). Dies funktioniert, obwohl es keinen (offensichtlichen) Interferenzbereich gibt, also Bereiche, in denen sich die Wellen überlagern.

Was auf Abbildung b zu sehen ist, ist eine Variante der Versuchsanordnung, die vor knapp fünfzig Jahren von R. Hanbury-Brown und R. Q. Twiss (HBT) entwickelt wurde [1]. Die beiden britischen Forscher benutzten das Verfahren ursprünglich, um den Durchmesser des Sterns Sirius aus der Kohärenz seines Lichtes zu bestimmen, das in zwei räumlich entfernte Teleskope fällt [2]. Das HBT-Experiment ist eines der Schlüsselexperimente der Physik. Nicht, weil es das herkömmliche Interferometer ersetzt, sondern weil das Ergebnis des Experiments völlig anders ausfiel als erwartet.

Bei einer Lichtquelle stellt man sich vor, dass sie einzelne Photonen aussendet und ein Detektor auf einzelne Photonen mit einem „Klick“ reagiert. Was im HBT-Experiment jedoch gemessen wird, ist die Rate der Koinzidenzen r_C , d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass beide Detektoren gleichzeitig klicken – normiert mit dem Produkt der zwei Wahrscheinlichkeiten, Photonen in Detektor 1 bzw. 2 zu registrieren. Da Photonen Elementarteilchen sind, die sich nicht in zwei teilen lassen, erwartete man für r_C den Wert null. Aus Gründen der Bequemlichkeit definiert man einen Korrelations-Parameter C durch $C = r_C - 1$. Zur großen Überraschung fanden HBT einen positiven Wert für C ! Um dies würdigen zu können, muss man sich vergegenwärtigen, dass im Falle der völligen Unkorreliertheit, das heißt, wenn die zwei Detektoren rein zufällig „klicken“, der Wert $C=0$ zu erwarten ist. Ein positives C bedeutet so-

mit folgendes: Registriert man ein Photon etwa mit Detektor 1, ist die Wahrscheinlichkeit, gleichzeitig ein Photon mit Detektor 2 zu registrieren, größer als es die durchschnittliche Wahrscheinlichkeit für die Detektion eines Photons (nach der Poisson-Statistik) erwarten ließe. Diese auf dem ersten Blick seltsamen Korrelationen müssen in der Photonenquelle entstehen. Das erfordert offensichtlich die gleichzeitige Aussendung von mindestens zwei Photonen. Dass eine Lichtquelle viele Photonen in praktisch denselben Augenblick emittieren kann, ist nicht überraschend. Aber nur Photonen, die aus demselben kohärenten Raumbereich stammen, können diese Korrelationen zeigen.

Photonen sind ununterscheidbare Teilchen (wenn wir der Einfachheit halber davon ausgehen, dass sie dieselbe Polarisation besitzen) und müssen demnach den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen. Weil Photonen Bosonen sind, ist es quantenmechanisch erlaubt, dass viele Photonen denselben Zustand besetzen können, und dies führt zu den beobachteten positiven Korrelationen. Bei einer Photonenquelle, die in einem HBT-Experiment positive Korrelationen mit $C > 0$ verursacht, spricht man davon, dass sie „bunching“ (von engl. für „bündeln“) zeigt. Es ist, als ob das Licht in „Photonenbündeln“ emittiert wird. Bunching lässt sich bei thermischen Lichtquellen beobachten, deren Lichtfeld der Bose-Einstein-Statistik gehorcht, aber nicht bei Lasern, deren Feld durch die Poisson-Statistik bestimmt ist.

Im Falle von Fermionen (etwa Elektronen) erwartet man nach der Quantenstatistik bei einem HBT-Experiment ein negatives C . Das Pauli-Prinzip verbietet dabei den ununterscheidbaren Fermionen, gleiche Zustände zu besetzen. Das führt zur „Antikorrelation“ oder zum „Antibunching“-Verhalten. Ein solches Experiment durchzuführen, erwies sich allerdings als sehr schwierig, obwohl es bereits seit Jahrzehnten diskutiert wird [3]. Der Grund liegt darin, dass freie Elektronenstrahlen äußerst „verdünnt“ sind – und verglichen mit modernen Lichtquellen alles andere als kohärent. Vor drei Jahre gelang es erstmals, Antibunching in Halbleiter-Nanostrukturen zu beobachten, in denen ein Strahl hoch entarteter Fermionen erzeugt werden konnte [4]. Nun gelang Harald

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-