

Ein Doppelspalt in der Zeit

Mit Hilfe von ultrakurzen Lichtpulsen wurde ein Doppelspaltexperiment für Elektronen in der Zeitdomäne durchgeführt.

„To be? To be? What does it mean to be?“ Diese an Hamlet angelehnte Antwort [1] von Niels Bohr auf die Frage seines Freundes, dem Philosophen Harald Høffding, wo denn das Elektron beim Durchgang durch den Doppelspalt (Abb. 1a) zu finden sei, fasst die Quintessenz der Kopenhagen-Interpretation der Quantenmechanik zusammen. Über den Ort des Elektrons kann nur eine Aussage gemacht werden, wenn die experimentelle Anordnung dies auch erlaubt. Das Elektron hat keinen Ort, bis man ihn misst. Der amerikanische Physiker John Archibald Wheeler spricht bei dem analo-

gen Experiment mit Licht von dem Photon als ein „smoky dragon“.

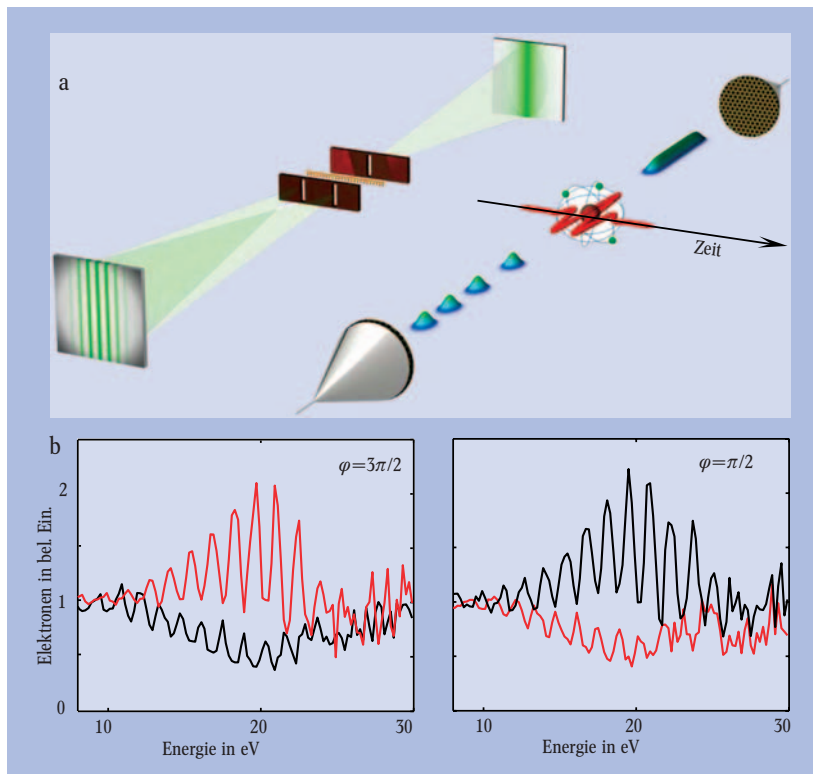
Kein anderes Phänomen der Physik hat eine so tiefe Bedeutung wie das Doppelspaltexperiment. Auf der Solvay-Tagung 1927 haben Albert Einstein und Niels Bohr anhand dieses Gedankenexperimentes die Konsequenzen der Quantenmechanik diskutiert [2]. Richard Feynman hat seinen Pfadintegralzugang zur Quantenmechanik ausgehend von dem Doppelspaltexperiment formuliert. Er selbst sagte, dass es das „einzige Rätsel“ der Quantenmechanik enthalte. Während diese Diskussionen rein auf Gedankenexperimenten beruhten, ist gerade in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung bei der experimentellen Realisierung von Doppelspaltexperimenten mit Materiewellen eingetreten. Inzwischen gibt es Doppel- und Mehrfachspaltexperimente mit Elektronen, Neutronen,

Atomen und Molekülen bis hin zu Heliumclustern und Fullerenen [3]. Darüber hinaus haben neue Techniken der Quantenoptik wie der Einatommaser auch tiefere Einsichten in das Prinzip der Komplementarität [4], d. h. Interferenz- oder Weginformation geliefert.

Kürzlich gelang einer Gruppe von internationalen Forschern [5] unter der Führung der Universitäten München und Texas A&M ein neuartiges Doppelspaltexperiment mit einzelnen Elektronen. Das Bemerkenswerte ist hierbei, dass die Interferenz in der Zeitdomäne statt im Ortsraum auftritt. Dies ist durch die Verwendung von ultrakurzen optischen Pulsen im Femtosekundenbereich möglich geworden, die nur aus wenigen optischen elektromagnetischen Schwingungen bestehen.

Diese Pulse erzeugen einzelne Elektronen durch Photoionisation von Edelgasatomen. Hierzu ist eine hohe elektrische Feldstärke notwendig. Wegen der kurzen Dauer der Pulse wird die für die Ionisation notwendige Intensität nur während einem oder zwei Zeitfenster im Attosekundenbereich erreicht. Durch Verschieben der Einhüllenden des Pulses bezüglich der Oszillation, d. h. durch Variation der Phase φ , kann man diese Zeitfenster kontrollieren und entweder einen Einfach- oder einen Doppelspalt im selben Atom erzeugen. Eine Doppelspalt-situation tritt dann ein, wenn der Laserpuls zwei enge Zeitfenster enthält, in dem das Atom ionisiert wird. Das Elektron, das den Detektor mit einem wohl definierten Impuls erreicht, kann dann durch Feldionisation entweder im ersten oder im zweiten Zeitfenster entstanden sein. Solange wir prinzipiell nicht entscheiden können, in welchem der beiden Zeitfenster das Elektron entstanden ist, wird es eine Interferenz dieser beiden Ionisationswege in der Zeit geben. Da es sich hierbei um eine Einzelionisation handelt, interferiert das Elektron mit sich selbst. Die resultierende Interferenz manifestiert sich in den Energiespektren der Elektronen, analog zu dem klassischen Doppelspalt im Raum, bei dem sich die Interferenz im Impulsspektrum zeigt. Gibt es nur ein Zeitfenster für die Ionisation, so findet keine Interferenz statt.

Die ionisierten Elektronen verlassen das Atom in entgegengesetzten Richtungen. Abb. b zeigt Photoelektronenspektren, die in diesen beiden Richtungen gemessen



► a) Doppelspaltexperiment mit Elektronen im Ort (links) und in der Zeit (rechts). Beim klassischen Versuch zeigen die Beugungsmuster im Fernfeld eines Einzel- oder Doppelspalt es entweder ein deutliches Maximum (Detektor im Hintergrund) oder Interferenzstreifen (Vordergrund). Die Elektronenquelle befindet sich dabei zwischen den Masken. In der zeitartigen Version des Doppelspalt es fungiert ein Atom als Quelle, das durch einen kurzen Puls ionisiert wird. Die rote Kurve zeigt das Vektorpotential eines 5 fs langen Einzelzyklenpulses. Anstelle der Interferenzstreifen entstehen im Fernfeld nun Elektronenpakete unterschiedlicher Energie, die mit einem Flugzeitdetektor nachgewiesen werden.

► b) Gemessene Photoelektronenspektren: Da die Spalte einen zeitlichen Abstand von etwa einer optischen Schwingungsdauer (2,5 fs) haben, beträgt der Abstand der Interferenzstreifen etwa 1,5 eV. Wenn zwei Zeitfenster zu nach links fliegenden Photoelektronen beitragen ($\varphi = 3\pi/2$, entsprechend der Situation in a), beobachtet man am linken Detektor ein Interferenzmuster als Funktion der Elektronenenergie (rote Kurve, linke Abb.). Gleichzeitig ist rechts kaum Interferenz zu sehen (schwarz), weil diese Elektronen nur ein Zeitfenster für die Ionisation zur Verfügung haben.^{*)} Wenn die Phase der Trägerwelle gegen die Einhüllende $\pi/2$ beträgt (rechte Abb.), ergibt sich der spiegelbildliche Fall.

^{*)} Da der Lichtpuls im Experiment nicht kurz genug war, um den Einfachspalt perfekt zu verwirklichen, und dadurch mit sehr geringer Amplitude auch weitere Zeitfenster beigetragen haben, sind auch beim Einfachspalt (schwarze Kurve links) schwache Oszillationen zu sehen.

werden. Der Kontrast der Interferenzstreifen hängt von der Richtung und von der relativen Lage von Einhüllenden und Oszillation ab.

Vor mehr als 200 Jahren hatte Thomas Young der Wellennatur des Lichtes durch sein Doppelspaltexperiment zum Durchbruch verholfen. Dabei ist interessant, dass schon 100 Jahre früher Francesco Maria Grimaldi die Beugung an zwei Lochblenden beobachtet hat. Seitdem hat das Doppelspaltexperiment viele revolutionäre Ideen geboren. Das neue Attosekunden-Doppelspaltexperiment eröffnet einzigartige Perspektiven auf dieser Reise in die mikroskopische Welt.

WOLFGANG P. SCHLEICH

- [1] J. A. Wheeler und K. Ford, Geons, Black Holes and Quantum Foam, Norton, New York (1998)
- [2] J. A. Wheeler und W. H. Zurek, Quantum theory and measurement, Princeton University Press, Princeton (1983)
- [3] O. Nairz, M. Arndt und A. Zeilinger, Am. J. Phys. **71** (4), 319 (2003)
- [4] M. O. Scully, B.-G. Englert und H. Walther, Nature **351**, 111 (1991)
- [5] F. Lindner et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 040401 (2005)

Quantenchaos in neuer Optik

Vertikal emittierende Laser haben Anwendungspotenzial in Datenkommunikation und Spektroskopie, sind aber auch eine Fundgrube für die Grundlagenforschung. Jetzt bringen sie auch Quantenchaos ans Licht.

Ein Billardtisch mit der Form eines Stadions ist ein typisches System, in dem klassisches Chaos auftritt. Reflexionen an der Berandung koppeln die beiden Freiheitsgrade der Billardkugel miteinander, sodass die Trajektorien irregulär werden, d. h. zunächst benachbarte Trajektorien entfernen sich exponentiell voneinander. Da der Begriff der Trajektorie in der Quantenmechanik keinen Sinn macht, stellt sich die Frage, wie sich das klassische Chaos in dem entsprechenden quantenmechanischen System manifestiert. Eine Analogie zwischen der Schrödinger-Gleichung für ein quantenmechanisches Teilchen und der Helmholtz-Gleichung für das elektrische Feld erlaubt es, dieser Frage nachzugehen, indem man die stehenden Wellen untersucht, die sich bei diskreten Werten einer zweidimensionalen

Wellenzahl k_{\parallel} in billardförmigen Mikrowellen-Resonatoren ausbilden [1]. Dieser Zusammenhang zwischen chaotischen Bahnen und Wellen ist das Thema des Quantenchaos; er kristallisiert sich heraus, wenn die effektiven Wellenlängen $\lambda_{\parallel} = 2\pi/k_{\parallel}$ klein im Vergleich zu den Abmessungen der Berandung sind.

Auch in der Laser-Optik kann man Billards realisieren, sodass sich dem Quantenchaos insbesondere in Mikrolasern neue Anwendungsbereiche eröffnen [2]. Experimentalphysiker in Darmstadt haben sich zusammen mit Theoretikern in Turin speziell den Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) zugewandt [3]. Die extreme Präzision der Halbleiter-Epitaxie wird in VCSELs voll ausgeschöpft, indem nicht nur die lichtverstärkende „aktive Region“, sondern zugleich auch die zur Rückkopplung nötigen Spiegel als dünne planare Schichten zu einem Sandwich aufgestapelt werden (Abb.). Da sich auf diese Weise Bragg-Reflektoren mit Transmission im Promille-Bereich herstellen lassen, reicht zum Überschreiten der Laserschwelle in VCSELs eine sehr geringe Pump-Leistung.

Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich, Abt. Quantenphysik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89081 Ulm