

## ■ Doppelspalt in HD

Durch Streuung von Helium-Atomen an einem Molekül lässt sich ein Gedankenexperiment von Einstein realisieren und die Frage nach dem Weg eines Teilchens durch einen Doppelspalt neu stellen.

Wann zeigt ein Quantenobjekt seine Teilchen- und wann seine Welleneigenschaften? Diese Frage, über die sich trefflich anhand des klassischen Doppelspalt-Experiments diskutieren lässt [1], beschäftigt Physiker seit der Formulierung der Quantenmechanik. Heute berufen wir uns auf das Prinzip der Komplementarität [2], wonach sich die aus der Dualität von Teilchen- und Wellencharakter ergebenden komplementären Eigenschaften von Quantenobjekten nicht gleichzeitig in einem Experiment beobachten lassen: Das Interferenzmuster (also der Wellencharakter) geht verloren, sobald prinzipiell eine Information darüber zugänglich ist, welchen Weg das gestreute Objekt durch den Doppelspalt genommen hat (entsprechend dem Teilchencharakter).

Einstein und Bohr diskutierten anhand einer Reihe von Gedankenexperimenten, ob man mit Hilfe der Energie- und Impulserhaltung nicht doch eine Welcher-Weg-Information erhalten kann, ohne dabei die Interferenz zu zerstören [3]. So schlug Einstein vor, den Impulsübertrag auf den Doppelspalt zu messen, um daraus indirekt abzuleiten, welchen der beiden

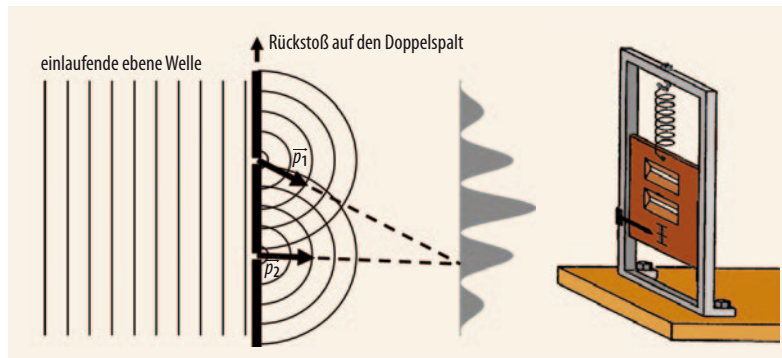


Abb. 1 Beim Gedankenexperiment, das Bohr und Einstein diskutierten, ergibt sich Information, welchen Weg ein Teil-

chen genommen hat, aus der Messung des Impulsübertrags auf den Doppelspalt mit einem geeigneten Apparat (rechts).

möglichen Wege das Teilchen genommen hat (Abb. 1). Wie Bohr jedoch herausstellte, muss auch der Doppelspalt selbst als Quantenobjekt behandelt werden. Bestimmt man seinen Impuls ausreichend genau, so führt dies gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation zu einer Unsicherheit in den Spaltpositionen, und das Interferenzmuster verschwindet. Hier ist die Komplementarität also aufgrund der Unschärfe erfüllt, im Allgemeinen gilt sie aber auch bei Systemen, in denen diese eine untergeordnete Rolle spielt [4].

Das Forscherteam um Lothar Schmidt und Reinhard Dörner von der Universität Frankfurt hat nun

ein Doppelspalt-Experiment durchgeführt, das dem Einsteinschen Gedankenexperiment sehr nahe kommt [5]. Dabei ist das gestreute Teilchen ein Heliumatom und der Doppelspalt ein Wasserstoff-Molekülion ( $\text{HD}^+$ ). Mit Hilfe einer bildgebenden Technik, mit der sich die Bewegungen von Elektronen und Kernen in Atom- und Molekülreaktionen sichtbar machen lassen (COLTRIMS [6]), ist es ihnen gelungen, die Energie- und Impulsbilanz für jeden einzelnen Streuprozess dieses mikroskopischen Doppelspalt-Experiments mit enormer Genauigkeit zu vermessen [7].

Das Experiment wurde in inverser Kinematik durchgeführt, d. h. im Laborsystem ist das Heliumatom in Ruhe und die in einer Ionenquelle erzeugten und auf 30 keV beschleunigten  $\text{HD}^+$ -Molekülionen bilden einen bewegten Strahl von Doppelspalten. Im Stoß streuen die He-Atome entweder am H- oder am D-Atom des Molekülions. Gleichzeitig fängt das positiv geladene  $\text{HD}^+$  ein Elektron aus dem Heliumatom ein. Die Tatsache, dass die beiden Streuzentren nicht identisch sind, führt dabei nicht zu einem Verlust der Interferenz. Ein schwaches elektrisches Feld lenkt das ionisierte Heliumatom nach der Streuung auf einen Detektor, wodurch sich seine Flugbahn und sein Impuls rekonstruieren lassen. Da die Molekülachsen im  $\text{HD}^+$ -Strahl völlig zufällig verteilt sind,

### KURZGEFASST

#### ■ Unabhängige Strukturkonstante

Die Feinstrukturkonstante auf der Erde bei hoher lokaler Dichte stimmt mit einer Genauigkeit von  $(0,3 \pm 1,1) \times 10^{-7}$  mit dem Wert im interstellaren Medium bei extrem geringer Dichte überein. Das hat ein internationales Team gezeigt, indem es im Labor die Frequenzen von Mikrowellenübergängen eines gepulsten Strahls ultrakalter CH-Radikale gemessen und mit den in der Milchstraße beobachteten CH-Frequenzen verglichen hat. S. Truppe et al., Nat. Commun. DOI:10.1038/ncomms3600 (2013)

#### ■ Gravitationslinse in größter Distanz

Forscher des MPI für Astronomie haben mit Kollegen aus Italien und den USA die bislang am weitesten entfernte Gravitationslinse aufgespürt.

Daten des Large Binocular Telescope in Arizona und des Weltraumteleskops Hubble zeigen, dass die Linse rund 9,4 Milliarden Lichtjahre entfernt ist. A. v. d. Wel et al., arXiv: 1309.2826 (2013), erscheint in Astrophys. J. Lett.

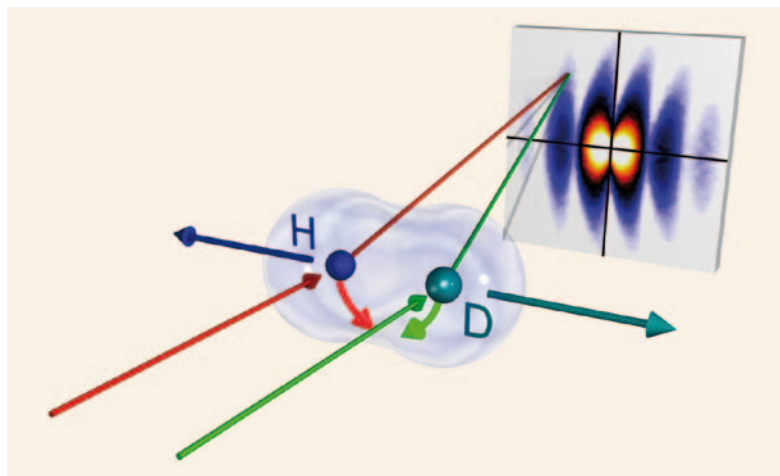
#### ■ Schwache Ladung vom Proton

Eine internationale Kollaboration am Thomas-Jefferson-Labor hat erstmals die schwache Ladung des Protons gemessen. Sie nutzte dazu die Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung bei der Streuung von spinpolarisierten Elektronen an Protonen. Der ermittelte dimensionslose Wert von  $0,064 \pm 0,012$  ist im Einklang mit der Vorhersage des Standardmodells von  $0,07010 \pm 0,0007$ . D. Androic et al. ( $Q_{\text{weak}}$  Collaboration), Phys. Rev. Lett. **III**, 141803 (2013)

gilt es nun noch, die Orientierung des molekularen Doppelspaltes zum Zeitpunkt der Streuung zu bestimmen. Hier verwenden die Experimentatoren einen Trick: Das durch Elektronen-Einfang neutralisierte HD-Molekül dissoziiert, d. h. die beiden Kerne stoßen sich nach dem Streuprozess ab, wobei die Emissionsrichtung der Fragmente nahezu der Molekülorientierung während des Stoßes entspricht. Selektiert man nun nachträglich solche Ereignisse, bei denen die Moleküle senkrecht zum Projektstrahl orientiert waren, so zeigt die Streuwinkelverteilung der Heliumatome ein Interferenzmuster, das der Beugung an einem Doppelspalt sehr stark ähnelt (Abb. 2). Dabei ist bemerkenswert, dass eine Delokalisierung des Doppelspaltes, die in dem diskutierten Gedankenexperiment die Interferenz verschmiert, hier keine Rolle spielt, da lediglich Spaltabstand und Orientierung das Beugungsmuster bestimmen und diese – begrenzt durch die Vibration und Rotation des Moleküls – hinreichend genau festgelegt sind.

Aber lässt sich in diesem Experiment herausfinden, welcher Weg genommen wurde? Dies ist denkbar, wenn die Wechselwirkung zwischen dem Heliumatom und dem Molekül so stark lokalisiert ist, dass nur auf eines der beiden molekularen Zentren ein Impuls übertragen und das Molekül in Rotation versetzt wird. Der übertragene Drehimpuls hängt davon ab, auf welches der beiden Streuzentren, also das leichtere H oder das schwerere D, der Impuls übergeht. Da die Drehbewegung des dissoziierenden Moleküls zu einer Abweichung zwischen der gemessenen und der tatsächlichen Molekülorientierung während der Streuung führt, sind die beobachteten Interferenzstreifen gekrümmt (Abb. 2).

Diese Krümmung wurde anhand zweier Modelle näher untersucht. Eine semiklassische Rechnung geht davon aus, dass zwar das Heliumatom als quantenmechanische Welle beide molekularen Zentren kohärent ausleuchtet, dass aber die Dynamik des Doppelspaltes – wie von Einstein angenommen – klassisch



**Abb. 2** In Analogie zum bekannten Doppelspalt-Experiment erhält man bei der Streuung von He-Atomen an ausgerichtetem HD<sup>+</sup>-Molekülonen ein ausgeprägtes Interferenzmuster. Das Experi-

ment zeigt, dass es nicht eindeutig möglich ist, aus einer Messung des auf das Molekül übertragenen Drehimpulses eine Welcher-Weg-Information zu gewinnen. Experiment ist die Wellenlänge etwa tausendmal kleiner als der Spaltabstand), ist diese Kohärenzbedingung nicht in jedem Fall erfüllt und kann, vor allem bei sehr schweren und schnellen Projektilen, deutlich verletzt sein. Aus dieser teilweisen Inkohärenz ergeben sich Effekte, die erst seit kurzem untersucht werden. Erste Hinweise eines Einflusses auf die Streudynamik in Ion-Molekül- [8] und in Ion-Atom-Stößen [9] zeigen, dass es nicht nur im Zusammenhang mit grundlegenden Gedankenexperimenten auch heute noch interessant ist zu fragen, wann ein Quantenobjekt seine Teilchen- und wann seine Welleneigenschaften offenbart.

abläuft. Mit anderen Worten, und wie gerade diskutiert, wird immer nur auf eines der beiden Streuzentren ein Impuls übertragen. Ein zweites, vollständig quantenmechanische Modell berücksichtigt nicht nur eine kohärente Überlagerung der beiden Streupfade des Heliumatoms, sondern auch die kohärente Überlagerung aller möglichen Kombinationen von Impuls- beziehungsweise Drehimpulsüberträgen zwischen den beteiligten Teilchen. Der Vergleich mit dem Experiment zeigt, dass nur die vollständige quantenmechanische Beschreibung das Interferenzmuster korrekt wiedergeben kann. Entscheidend ist also, auch den Doppelspalt als Quantenobjekt zu behandeln. Das von Einstein erhoffte Ergebnis einer Interferenz bei gleichzeitiger „Welcher-Weg“-Information durch Messung des Impulsübertrags ist also auch hier nicht geglückt, und der Komplementarität ist Genüge getan.

Dass überhaupt eine Interferenz beobachtet wird, ist allerdings alles andere als selbstverständlich. Dies setzt nämlich voraus, dass die Materiewelle den Doppelspalt kohärent beleuchtet, d. h. die einlaufende Welle muss weitgehend parallele Wellenfronten aufweisen, sodass die Phasendifferenz dieser Welle zwischen den beiden Streuzentren festgelegt ist. Da die de-Broglie-Wellenlänge von schnellen Ionen oder Atomen vergleichsweise gering ist (in dem Frankfurter Ex-

periment ist die Wellenlänge etwa tausendmal kleiner als der Spaltabstand), ist diese Kohärenzbedingung nicht in jedem Fall erfüllt und kann, vor allem bei sehr schweren und schnellen Projektilen, deutlich verletzt sein. Aus dieser teilweisen Inkohärenz ergeben sich Effekte, die erst seit kurzem untersucht werden. Erste Hinweise eines Einflusses auf die Streudynamik in Ion-Molekül- [8] und in Ion-Atom-Stößen [9] zeigen, dass es nicht nur im Zusammenhang mit grundlegenden Gedankenexperimenten auch heute noch interessant ist zu fragen, wann ein Quantenobjekt seine Teilchen- und wann seine Welleneigenschaften offenbart.

**Daniel Fischer und  
Robert Moshhammer**

- [1] R. P. Feynman, R. B. Leighton und M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Band III, Addison Wesley, Reading (1965)
- [2] N. Bohr, *Naturwissenschaften* **16**, 245 (1928)
- [3] N. Bohr in: P. A. Schilpp (Hrsg.) *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, Cambridge University Press, Cambridge, (1949), S. 201
- [4] M. O. Scully, B.-G. Englert und H. Walther, *Nature* **351**, 111 (1991)
- [5] L. Ph. H. Schmidt et al., *Phys. Rev. Lett.* **111**, 103201 (2013)
- [6] H. Schmidt-Böcking, *Physik Journal*, August/September 2010, S. 39
- [7] L. Ph. H. Schmidt et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 073202 (2012)
- [8] K. N. Egoapatiya et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 153202 (2011)
- [9] X. Wang et al., *J. Phys.* **B 45**, 211001 (2012)

**Dr. Daniel Fischer  
und Priv.-Doz. Dr.  
Robert Moshhammer,**  
Max-Planck-Institut  
für Kernphysik  
Saupfercheckweg 1,  
69117 Heidelberg