

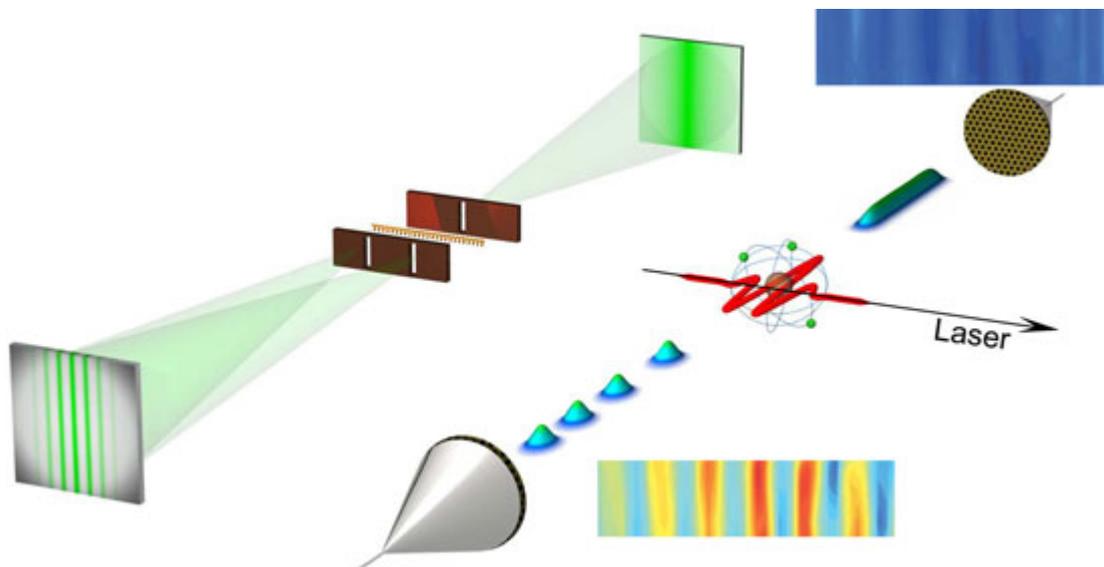
Garching, den 10. August 2005

Der Doppelspalt unter neuem Blickwinkel

Mit einer neuen Variante des berühmten Doppelspalt-Experiments lässt sich Zeit im Attosekundenbereich extrem genau interferometrisch messen

Das Doppelspalt-Experiment ist ein Klassiker. Seit 200 Jahren beschäftigt der Versuch Physiker immer wieder aufs Neue: Das Experiment, bei dem ursprünglich nur ein Lichtstrahl in zwei miteinander wechselwirkende Strahlen aufgeteilt wurde, war für die Lichtwellentheorie des 19. Jahrhunderts ebenso wichtig wie für die Gedankenexperimente Einsteins oder die Philosophie und Grundlagen der Quantenmechanik. Nun hat ein Team von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik den Versuch von einst modernisiert, indem es mit Hilfe eines Laserpulses die zwei Spalte durch extrem schmale Zeitfenster ersetzt hat. So kann man Zeitmessungen im Attosekundenbereich in Interferenz-Messungen überführen, das heißt: Die Zeit wird mit einem der genauesten Messverfahren überhaupt gemessen (Physical Review Letters, 22. Juli 2005).

Interferenzphänomene und -experimente haben in der Physik schon immer eine große Rolle gespielt. Das Prinzip ist stets ähnlich; in der Regel erreichen Wellen oder Teilchen einen Detektor auf zwei verschiedenen Wegen. Durch Überlagerung der beiden Möglichkeiten entsteht im Detektor ein Interferenzmuster, das heißt ein Muster, in dem einige Stellen ausgelöscht sind und andere besonders stark ausgeprägt sind. Interferenzexperimente sind heute zum Beispiel im Zusammenhang mit optischen Präzisionsmessungen wichtig. Die Interferenz von Licht- oder Materie-Wellen spielte aber auch für die Grundlagen der Quantenphysik eine große Rolle, besonders bei der Demonstration des Teilchen-Welle-Dualismus.



Doppelspalt-Experiment mit Elektronen im Ort (links) und in der Zeit (rechts). Die Beugungsmuster im Fernfeld eines konventionellen Einzel- oder Doppelspalts zeigen entweder keine Struktur (Fotoplatte im Hintergrund links) oder Interferenzstreifen (Fotoplatte im Vordergrund links). Die Beleuchtung der Spalte erfolgt durch eine Elektronenquelle zwischen den beiden Masken. In der neuen Version des Doppelspalts (bild rechts) wird die Elektronenquelle durch ein Atom ersetzt, das durch einen extrem kurzen Lichtpuls mit linearer Polarisation angeregt wird, und die fotografischen Platten durch Elektronendetektoren. Die Photoelektronenspektren, gemessen durch die beiden Detektoren, zeigen nur dann Oszillationen, wenn zwei Zeitfenster zur Verfügung stehen (in der rechten Abbildung nach vorn links).

Bild: Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Erstmals wurde das Doppelspalt-Experiment zur Interferenz von Licht um 1805 von Thomas Young durchgeführt; damals lieferte es einen entscheidenden Beweis für die Wellennatur des Lichtes. Im 20. Jahrhundert wurde dann gezeigt, dass auch atomare Teilchen und einzelne Photonen miteinander interferieren können, und die Demonstration der Interferenz einzelner Elektronen im Youngschen Doppelspaltexperiment durch Claus Jönsson wurde in den 1960er Jahren ein spektakulärer Erfolg. Inzwischen hat man das Doppelspaltexperiment auch mit anderen Teilchen, wie Atomen, Neutronen und sogar großen Molekülen, durchgeführt.

Nach der Quantenphysik ist es die Überlagerung der beiden Wege, die ein Photon oder ein anderes Teilchen nehmen kann, die zur Interferenz führt. Daher kann auch ein einzelnes Photon, das im Prinzip jeden der beiden Wege nehmen kann, mit sich selbst interferieren. So spielte das Doppelspalt-Experiment in den 1920er Jahren in den berühmten Diskussionen von Albert Einstein mit Niels Bohr über die Grundlagen der Quantenmechanik eine wichtige Rolle. Später formulierte Richard Feynman anhand dieses Experiments mit Hilfe der Pfadintegrale seinen Zugang zur Quantenphysik. Er hielt das Doppelspalt-Experiment und dessen Deutung für das "einzige Rätsel" der Quantenphysik.

Jetzt wurde ein besonderes originelles Interferenzexperiment nach Art des Doppelspaltexperiments am Max-Planck-Institut für Quantenoptik verwirklicht. Eine Schlitzblende gibt es bei diesem Experiment nicht, denn hier werden die beiden Wege für die Teilchen - in diesem Falle: Elektronen - durch die Schwingungen eines extrem kurzen Lichtpulses geschaffen. Der verwendete Lichtpuls besteht nur aus wenigen elektromagnetischen Schwingungen; die einzelnen Wellenberge der Lichtwelle öffnen zeitlich hintereinander mehrere "Schlitze" für das Elektron.

Der kurze Lichtpuls wird auf ein Argon-Atom gesandt. Bei zwei Schwingungen kann das Licht ein Elektron in dem Atom im Prinzip zweimal veranlassen, das Atom zu verlassen: Das Licht öffnet sozusagen zwei Fenster und es tritt Interferenz auf. Bei einer einzelnen Schwingung wird nur ein Fenster geöffnet und es tritt keine Interferenz auf.

Ein kurzer Lichtpuls, der in einer Ebene schwingt, kann sogar beide Situationen gleichzeitig liefern, wenn die Einhüllende seiner Schwingungen geeignet liegt. Dann wird nach der einen Seite ein einzelnes Schwingungsmaximum beobachtet, während nach der anderen Seite zwei Maxima vorhanden sind. Ein Elektron, das der Richtung der beiden Maxima unter dem Einfluss des Lichtfeldes das Atom verlässt, führt zur Interferenz, während eine Abtrennung des Elektrons in die entgegengesetzte Richtung kein Interferenzsignal erzeugt.

Damit das Experiment funktioniert, ist es notwendig, den Zeitverlauf des Lichtpulses genau zu kontrollieren. Man muss also die relative Lage bzw. Phase der Trägerwelle zur Einhüllenden des Lichtpulses sehr genau einstellen - und das gelang der Forschern im Bereich von Attosekunden (10^{-18} Sekunden, also einer Trillionstel Sekunde).

Beim klassischen Doppelspalt-Experiment hängt die beobachtete Interferenzstruktur von der Breite der beiden Spalte und von deren Abstand ab. So kann man über die Messung der Interferenz hochpräzise kleinste Abstände vermessen. Bei dem neuen Experiment wird die Spalt-Struktur im klassischen Experiment durch die Zeitstruktur der Elektronendynamik ersetzt. Entsprechend ist man nunmehr in der Lage, mit den Methoden und der Genauigkeit der Interferometrie eine extrem genaue Zeitmessung auf der Zeitskala im Attosekundenbereich vorzunehmen.

Originalveröffentlichung:

F. Lindner, M.G. Schätzel, H. Walther, A Baltuška, E. Goulielmakis, F. Krausz, D.B. Milošević, D. Bauer, W. Becker, and G.G. Paulus

Attosecond Double-Slit Experiment

Phys. Rev. Lett. **95**, 040401 (2005)

Weitere Informationen erhalten Sie von:

Prof. Dr. Herbert Walther

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching

Tel.: 089 32905-704

Fax: 089 32905-314

E-Mail: Herbert.Walther@mpq.mpg.de