

■ Geschickt geschaltet

An einem Doppelspalt aus zwei Atomen lässt sich durch Variation ihres Abstands zwischen klassischer und quantenmechanischer Interferenz umschalten.

Prof. Dr. Giovanna Morigi, Universität des Saarlandes, Theoretische Physik, Campus E26, 66041 Saarbrücken

In der klassischen Optik illustriert das Youngsche Doppelspaltexperiment in herausragender Weise das Konzept der Interferenz von Wellen. Zudem ist es ein Musterbeispiel für die Wellennatur von Photonen und Materie in der Quantenmechanik. Wird der Spalt selbst jedoch von Quantenobjekten gebildet, so erwarten uns unerwartete Effekte, die aus Interferenzprozessen am Doppelspalt entstehen und die das Interferenzmuster des gestreuten Lichtes drastisch ändern.

Bereits 1993 gelang ein Experiment, in dem zwei gefangene und mit Laserlicht bestrahlte Ionen den Doppelspalt bildeten [1]. Hierbei traten Interferenzstreifen auf, welche die Analogie zwischen zwei lichtstreuenden Ionen und den zwei Spalten des Youngschen Aufbaus bestätigten. In diesen frühen Arbeiten reduzierte allerdings unter anderem inelastisch gestreutes Licht den Kontrast. Dieser Anteil des Lichts lässt sich nicht durch klassische oszillierende Dipole beschreiben und resultiert aus der intrinsisch quantenmechanischen Natur der elektronischen Orbitale.

Ogleich inelastische Streuung üblicherweise die Sichtbarkeit von Interferenzstreifen reduziert, kann sie durchaus Interferenzeffekte quantenmechanischer Natur verstärken, wie sie beispielsweise in Messungen der Intensitätskorrelation nachweisbar sind [2, 3]. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung

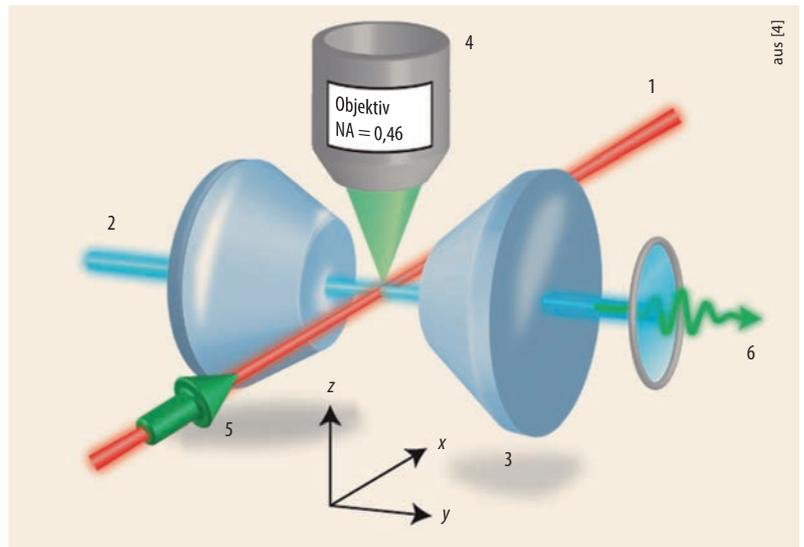


Abb. 1 Ein zweidimensionales optisches Gitter entsteht durch zurückreflektierte rot- (1) und blauverschobene (2) Laserstrahlen in einem optischen Resonator hoher Güte (3). Mittels eines Mikroskopobjektivs (4) lassen sich die Atome des

Gitters abbilden und deterministisch entfernen. Ein Atompaar wird durch einen Laser (5) angeregt. Die Transmission wird als Funktion der Atompositionen durch den Auskoppelspiegel (6) gemessen.

haben Wissenschaftler um Gerhard Rempe am MPI für Quantenoptik (MPQ) ein Experiment beschrieben, in dem sie das Zusammenspiel von klassischer und Quanteninterferenz beobachten und kontrollieren konnten [4]. Die klassische Interferenz geht dabei auf den kohärenten Anteil des Lichts zurück, die Quanteninterferenz resultiert aus der inelastischen Komponente. In dem Experiment erzeugten die Wissenschaftler ein optisches Gitter und füllten es mit Rubidiumatomen, die sie anschließend nach und nach wieder „aussortierten“, bis nur zwei übrig blieben. Diese zwei Atome platzierten sie

inmitten zweier hochreflektierender Spiegel, die einen halben Millimeter voneinander entfernt waren (Abb. 1). Die Atome waren dabei auf einen Bruchteil der Laserwellenlänge lokalisiert, und zwar mit einer Abweichung von nur rund 25 nm.

Ein Laser mit einer Wellenlänge von 780 nm regte die Atome transversal an. Der Resonator begünstigt die Lichtemission entlang der Spiegelachse und erhöht die Wechselwirkung zwischen dem gestreuten Licht und den Atomen, da er die emittierten Photonen einfängt. Der relative Abstand zwischen den Atomen innerhalb des Resonators bestimmt

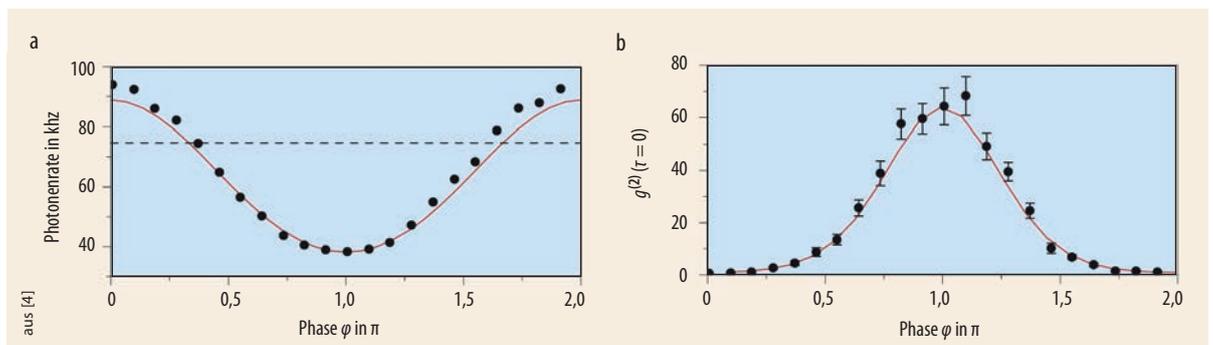


Abb. 2 Für resonante Anregung zeigt die Rate emittierter Photonen eine sinusförmige Modulation als Funktion der Phase φ (a). Der Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung

(Intensitätskorrelationsfunktion) $g^{(2)}(\tau=0)$ zeigt einen Übergang von einer nahezu Poisson-förmigen Emission zu einer stark super-Poisson-förmigen.

die relative Phase der von den Atomen gestreuten Felder und damit auch die Intensität des Lichts, das aus dem Resonator austritt. Ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment hängt die Intensität von der Distanz zwischen den Atomen ab.

Einer der überraschendsten Aspekte des Experiments ist, dass das gestreute Licht nur geringfügig von dem Abstand zwischen den Atomen abhängt – im Gegensatz zu dem Verhalten, das im freien Raum zu beobachten ist. Wenn der Abstand zwischen den Atomen gerade so groß eingestellt ist, dass die Streuung in den Resonator konstruktiv (also in Phase) ist, erfüllt dies die Bedingung für einen hellen Interferenzstreifen im Youngschen Experiment. In diesem Fall beobachteten die Wissenschaftler am MPQ allerdings eine viel geringere Intensität des emittierten Lichts, als im freien Raum zu erwarten wäre. Wählten sie den Abstand dagegen so, dass die Lichtemission in den Resonator einem dunklen Interferenzstreifen entsprechend destruktiv (also außer Phase) war, war die Intensität viel höher als im freien Raum (Abb. 2a).

Die Erklärung für diesen Unterschied beruht auf sehr unterschiedlichen Dynamiken: Die Verringerung der Intensität, wenn die Atome in Phase in die Resonatormode emittieren, beruht auf der Rückkopplung des Resonators. Das im Resonator gespeicherte Licht hat eine wohldefinierte Phasenbeziehung mit dem einfallenden Licht und neigt dazu, am Ort der Rubidiumatome destruktiv zu interferieren. Obwohl sowohl der Laser als auch das Feld des Resonators die Atome bestrahlen, ist es daher sprichwörtlich so, als würden sie im Dunkeln zurückgelassen. Paradoxiertweise kann dieser Effekt nur dann auftreten, wenn die von den Atomen ausgesandte Strahlung konstruktiv interferiert. Dieses Phänomen resultiert aus der elastischen Komponente des emittierten Lichts und wurde in [5, 6] vorhergesagt und in [7] erstmals nachgewiesen. Die Wissenschaftler am MPQ bestätigten nun durch die Messung der Intensitätskorrelation

die klassische Natur des Phänomens.

Des Weiteren konnten sie die Intensitätskorrelation des gestreuten Lichts für andere Abstände zwischen den Atomen messen (Abb. 2b) [4]. Die relativ hohe Intensität, wenn die Atome außer Phase emittierten, beruht auf einem quantenmechanischen Effekt, der kein klassisches Analogon besitzt. Denn nur der inelastisch gestreute Anteil des Lichts wird in den Resonator emittiert. Die Phase, die andernfalls die klassische Interferenz bestimmt, steuert hier die elektronische Anregung der beiden Atome. Sie regt diejenigen elektronischen Zustände an, die in den Resonator infolge einer Zwei-Photonen-Kaskadenemission streuen können. Beim Durchstimmen des Abstands zwischen den Atomen wechseln sich klassische und quantenmechanische Interferenz ab, was sich im Verhalten der Intensitätskorrelation niederschlägt.

Diese experimentellen Resultate erweitern unser Verständnis der nichtlinearen Eigenschaften von einzelnen Atomen in einem Resonator und legen den Grundstein für eine mikroskopische Umsetzung von nichtlinearen optischen Bauteilen mit quantenmechanischen Eigenschaften [8]. Sie ebnet damit den Weg zu einer kontrollierten Bildung von Quantenkorrelationen zwischen Atomen in optischen Resonatoren für den Einsatz in der Quanteninformatik.

Giovanna Morigi

- [1] U. Eichmann, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, J. M. Gilligan, W. M. Itano, D. J. Wineland und M. G. Raizen et al., *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2359 (1993)
- [2] W. Vogel und D.-G. Welsch, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 1802 (1985)
- [3] H. Habibian, S. Zippilli und G. Morigi, *Phys. Rev. A* **84**, 033829 (2011)
- [4] A. Neuzner, M. Körber, O. Morin, S. Ritter und G. Rempe, *Nature Photon.* **10**, 303 (2016)
- [5] P. M. Alsing, D. A. Cardimona und H. J. Carmichael, *Phys. Rev. A* **45**, 1793 (1992)
- [6] S. Zippilli, G. Morigi und H. Ritsch, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 123002 (2004)
- [7] R. Reimann, W. Alt, T. Kampschulte, T. Macha, L. Ratschbacher, N. Thau, S. Yoon und D. Meschede, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 023601 (2015)
- [8] S. Fernández-Vidal, S. Zippilli und G. Morigi, *Phys. Rev. A* **76**, 053829 (2007)