

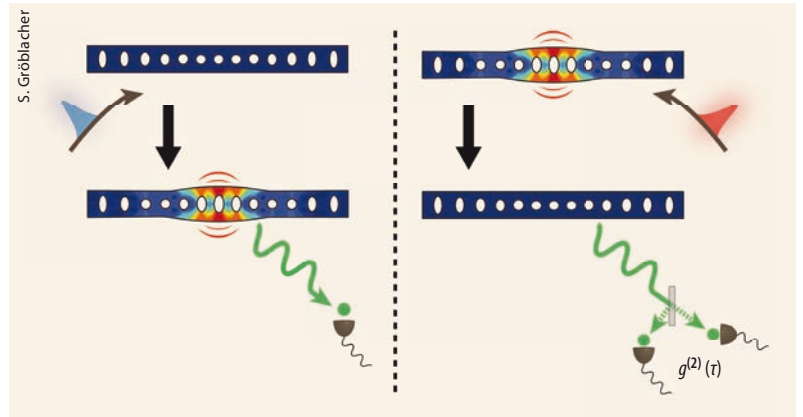
Quantisierte Schwingungen

Mit Licht lassen sich einzelne Phononen erzeugen – ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu optomechanischen Quantentechnologien.

Prof. Dr. Florian Marquardt, Institut für Theoretische Physik, Universität Erlangen, Staudtstr. 7, 91058 Erlangen und Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

Lichtkräfte spielen längst eine wichtige Rolle, etwa bei optischen Pinzetten in der Biophysik oder bei Laserkühlung und optischen Gittern für ultrakalte Atomgase. In den letzten zehn Jahren hat sich die Optomechanik, die auf der Wechselwirkung zwischen Licht und Bewegung in mikro- und nanomechanischen Strukturen beruht, rasant entwickelt [1]. Die Anwendungen reichen von hochsensitiven Messungen bis zu fundamentalen Fragen der Quantenphysik. Physiker an der TU Delft und der Uni Wien in den Gruppen von Simon Gröblacher und Markus Aspelmeyer haben nun erstmals experimentell nachgewiesen, dass Licht gezielt eine einzelne mechanische Schwingungsanregung (ein Phonon) in einer Nanostruktur erzeugen kann [2].

Eine vielversprechende Plattform für optomechanische Quantentechnologien sind „optomechanische Kristalle“. Dabei handelt es sich zunächst einmal um photonische Kristalle, d. h. periodisch strukturierte Dielektrika, in denen elektromagnetische Wellen eine Bandstruktur aufweisen. Durch ein passend gewähltes Design entsteht aber zugleich ein phononischer



Kristall, bei dem Schallwellen im GHz-Bereich sich in ähnlicher Weise verhalten. Gezielt eingebrachte geometrische Defekte, also Regionen mit veränderter Struktur, führen an ihrem Ort zu lokalisierten optischen und mechanischen Moden. Jede der optischen Moden ist im Prinzip eine kleine optische Kavität, die sich mit mehreren Photonen bevölkern lässt. Die optomechanische Kopplung entsteht dadurch, dass die Schwingungen der mechanischen Mode lokal die

umgewandelt. Die Statistik der erzeugten Photonen erlaubt den Nachweis, dass es sich um genau ein Phonon handelte, d. h. um einen nichtklassischen Zustand. In dem Fall ist die Intensitätskorrelationsfunktion $g^{(2)}(0) < 1$.

Kristall, bei dem Schallwellen im GHz-Bereich sich in ähnlicher Weise verhalten. Gezielt eingebrachte geometrische Defekte, also Regionen mit veränderter Struktur, führen an ihrem Ort zu lokalisierten optischen und mechanischen Moden. Jede der optischen Moden ist im Prinzip eine kleine optische Kavität, die sich mit mehreren Photonen bevölkern lässt. Die optomechanische Kopplung entsteht dadurch, dass die Schwingungen der mechanischen Mode lokal die

Struktur verzerren und dadurch die Frequenz der an gleicher Stelle befindlichen optischen Mode verschieben.

Die Gruppe von Oskar Painter am Caltech hat 2009 optomechanische Kristalle eingeführt [3]. Diese waren 2011 das erste System, in dem die optomechanische Laserkühlung den quantenmechanischen Grundzustand erreichte [4], zeitgleich mit Mikrowellensystemen. Seit diesen ersten Erfolgen der Laserkühlung wurde intensiv daran gearbeitet, die kohärente optomechanische Kontrolle so weit zu verbessern, dass sich routinemäßig Quantenoperationen durchführen lassen. Mikrowellensysteme waren lange Zeit den optischen leicht überlegen [5]. Das lag an ihrer etwas besseren Kontrollierbarkeit, aber auch daran, dass supraleitende Qubits direkt an solche Systeme koppeln können.

Bekanntermaßen gibt es aber eine Eigenschaft, die optische Strahlung den Mikrowellen voraus hat: Dank effizienter Detektoren lassen sich einzelne Photonen sehr viel besser nachweisen. Genau das machen sich nun die Physiker aus Wien und Delft zunutze [2]. Sie bauen dabei auf den Strukturen und Techniken der Painter-Gruppe auf [6].

+) Phys. Rev. Lett. und Astrophys. J. Lett.: siehe www.ligo.org/detections/GW170817.php, Nature: Ref. in doi:10.1038/nature24153 und Nature Astronomy: doi:10.1038/s41550-017-0285-z

VERSCHMELZENDE NEUTRONENSTERNE

Am 17. August 2017 gelang es erstmals, sowohl die elektromagnetische Strahlung als auch die Gravitationswellen zweier verschmelzender Neutronensterne in einer Galaxie rund 130 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt zu detektieren. Nähern sich zwei Neutronensterne immer schneller einander an, senden sie Gravitationswellen aus.

Bei ihrer Kollision entsteht ein Lichtblitz in Form von Gammastrahlung, in den Tagen und Wochen danach folgt weitere elektromagnetische Strahlung. All diese Signale wurden nun mithilfe der LIGO- und VIRGO-Detektoren sowie von 70 astronomischen Observatorien auf der Erde und im Weltall nachgewiesen. Die Veröffentlichungen sind

in Phys. Rev. Lett., Astrophys. J. Lett, Nature und Nature Astronomy erschienen.^{†)} Ein ausführlicher Artikel folgt in der Dezemberausgabe des Physik Journal.

Num.-relativ. Simulation: T. Dietrich (MPI für Gravitationsphysik) und BAM-Kollaboration; Wiss. Visual.: T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno (MPI für Gravitationsphysik)



Das Grundprinzip des neuen Experiments ist recht einfach zu verstehen, sobald man zwei elementare Quantenoperationen kennt, die inzwischen zur Werkzeugkiste optomechanischer Systeme gehören. In der ersten Operation wird die optische Kavität „rotverstimmt getrieben“, d. h. die Laserfrequenz liegt unterhalb der Resonanz, und zwar in den meisten Anwendungen gerade um die mechanische Frequenz verschoben. Dann kann ein Raman-Streuprozess auftreten, bei dem ein niederenergetisches Photon aus dem Laser sowie ein Phonon aus der mechanischen Mode zusammen ein höherenergetisches Photon in der Kavität ergeben. Betrachtet man nur die Kavität, sieht es so aus, als hätte sich ein Phonon in ein Photon umgewandelt. Mathematisch hat das denselben Effekt wie ein Strahlteiler in der Quantenoptik, bei dem sich Photonen einer Flugrichtung teilweise in Photonen einer anderen Richtung umwandeln. Die zweite Operation setzt einen „blauverstimmt“ Laser voraus, bei dem ein Laserphoton gleichzeitig ein Photon in der Kavität sowie ein Phonon generieren kann. Der analoge Prozess in der Quantenoptik wäre eine parametrische Konversion, die zwei Photonen generiert.

Die Idee des Experiments ist es, beide Operationen nacheinander einzusetzen (Abb.): Zuerst wird mit einem kurzen Puls „blauverstimmt“ getrieben, wobei mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit ein Photon-Phonon-Paar entsteht. Das Photon entweicht aus der Kavität. Seine Detektion lässt darauf schließen, dass die mechanische Mode ein Phonon enthält. Würde man weiter abwarten, würde irgendwann das Phonon durch Dissipation vernichtet. Im Experiment aber wird zuvor ein zweiter, „rotverstimmt“ Puls eingestrahlt. Dieser wandelt das Phonon in ein Photon um, das nun seinerseits die Kavität verlässt und sich detektieren lässt. Damit ist klar, dass im ersten Schritt tatsächlich ein Phonon entstanden ist.

Eine erste Version dieses Experiments führte die Delft/Wien-Kollaboration im vergangenen

Jahr durch [7]. Damals konnten die Forscher trotz der signifikanten experimentellen Schwierigkeiten bereits nachweisen, dass das erste Photon und das generierte Phonon (indirekt angezeigt durch das zweite Photon) miteinander korreliert auftreten. Die neue Arbeit zeigt erstmals erfolgreich, dass es sich vorwiegend um genau ein Phonon handelt, wie das idealerweise der Fall sein sollte [2]. Dazu war es nötig nachzuweisen, dass im zweiten Schritt typischerweise nur genau ein Photon detektiert wird. Dies geschah mit Hilfe der in der Quantenoptik weit verbreiteten Hanbury-Brown-Twiss-Korrelation. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit gemessen, kurz nach der Detektion eines Photons mit einer gewissen Zeitverzögerung noch ein weiteres zu messen. Ist diese Wahrscheinlichkeit stark unterdrückt, spricht man von „Antibunching“, d. h. die Photonen vermeiden sich. Solch ein Verhalten gilt als klarer Hinweis auf nichtklassische quantenmechanische Zustände.

Das Experiment demonstriert überzeugend das Potenzial für optomechanische Quantentechnologien und die Kontrolle einzelner Phononen. Allerdings gilt es dafür, Hürden zu überwinden wie das Aufheizen der Nanostruktur durch die Laserpulse. Bessere Designs sind gefragt und werden zurzeit bereits entwickelt. Optomechanische Systeme werden künftig sicher ihren Platz in der Werkzeugkiste der Quantentechnologien finden, beispielsweise für die kohärente Konversion von Mikrowellenphotonen in optische Photonen oder für die hochsensitive Detektion einzelner Quantensysteme.

Florian Marquardt

- [1] *M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg und F. Marquardt*, Rev. Mod. Phys. **86**, 1391 (2014)
- [2] *S. Hong et al.*, Science 10.1126/science.aan7939 (2017)
- [3] *M. Eichenfield, et al.*, Nature **462**, 78 (2009)
- [4] *J. Chan, et al.*, Nature **478**, 89 (2011)
- [5] *T. A. Palomaki et al.*, Science **342**, 710 (2013)
- [6] *J. D. Cohen et al.*, Nature **520**, 522 (2015)
- [7] *R. Riedinger et al.*, Nature **530**, 313 (2016)