

getisch entarten. Das verändert die Streueigenschaften resonant, und die Stärke der Kontaktwechselwirkung lässt sich beliebig einstellen. Durch die Drei-Körper-Verluste der Feshbach-Resonanz bleibt die Lebensdauer der phasenkohärenten Quantentröpfchen auf etwa 20 ms begrenzt.

Im Unterschied dazu nutzte das Team um Francesca Ferlaino in Innsbruck neben ^{166}Er -Atomen, die ähnliche Atomverluste wie ^{162}Dy aufweisen, auch ^{164}Dy -Atome [12]. Deren Kontaktwechselwirkung ist relativ klein, sodass ohne eine Feshbach-Resonanz langlebige phasenkohärente Quantentröpfchen mit einer Lebensdauer von 70 ms entstanden. Hierzu wurde das Bose-Einstein-Kondensat präpariert und die entsprechenden experimentellen Parameter eingestellt. Beim umgekehrten Vorgehen führt evaporatives Kühlen eines thermischen Gases direkt zu phasenkohärenten Quantentröpfchen mit noch längeren Lebensdauern.

Die drei Experimente zeigen eindrucksvoll, dass magnetisch dipolare Quantengase supersolide Eigenschaften besitzen. Aufwändig war vor allem der Nachweis der phasenkohärenten

Quantentröpfchen, da sie nur mit genau passenden Systemparametern entstehen und aufgrund der endlichen Lebensdauer metastabil sind. Ein direkter Beleg für die Superfluidität der Quantentröpfchen beispielsweise durch Transportmessungen fehlt noch. Außerdem gilt es, die phononischen und rotonischen Anregungsmoden genauer zu studieren, die bei einem Supersolid gleichzeitig auftreten sollten. Ferner muss sich zeigen, ob die Bosonen aufgrund der Phasenkohärenz zwischen den Quantentröpfchen tunneln können und damit Josephson-artige Effekte auftreten. Schließlich stellt sich die Frage, wie viele dieser langlebigen phasenkohärenten Quantentröpfchen sich herstellen lassen.

Künftige theoretische und experimentelle Arbeiten zu magnetisch dipolaren Quantengasen werden diese Fragen sicherlich beantworten und damit zu einem genaueren Verständnis der Supersolidität beitragen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse könnten auch für andere physikalische Systeme mit langreichweitigen Wechselwirkungen relevant sein, beispielsweise für dipolare Gase

aus polaren Molekülen oder aus Rydberg-Atomen.

- [1] A. J. Leggett, Phys. Rev. Lett. **25**, 1543 (1970)
- [2] M. H. W. Chan et al., J. Low Temp. Phys. **172**, 317 (2013)
- [3] D. H. J. O'Dell et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 110402 (2003)
- [4] L. Santos et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 250403 (2003)
- [5] L. Pollet, Physik Journal, Mai 2017, S. 22
- [6] M. Wenzel et al., Phys. Rev. A **96**, 053630 (2017); T. Langen und M. J. Mark, Physik Journal, Dezember 2018, S. 35
- [7] L. Chomaz et al., Nat. Phys. **14**, 442 (2018)
- [8] H. Kadau et al., Nature **530**, 194 (2016)
- [9] A. R. P. Lima und A. Pelster, Phys. Rev. A **84**, 041604 (2011); I. Ferrier-Barbut et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 215301 (2016); F. Wächtler und L. Santos, Phys. Rev. A **93**, 061603 (2016)
- [10] L. Tanzi et al., Phys. Rev. Lett. **122**, 130405 (2019)
- [11] F. Böttcher et al., Phys. Rev. X **9**, 011051 (2019)
- [12] L. Chomaz et al., Phys. Rev. X **9**, 021012 (2019)

Autor

Priv.-Doz. Dr. Axel Pelster,
Technische Universität Kaiserslautern,
Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 46,
67663 Kaiserslautern

Ein Farbstoffmolekül mit Niveau

Kürzlich ist es gelungen, ein organisches Molekül in ein nahezu ideales Quantensystem mit zwei wohldefinierten Energieniveaus zu verwandeln.

Arno Rauschenbeutel und Jürgen Volz

Der Einsatz von Technologien, die auf den Gesetzen der Quantenmechanik beruhen, könnte zu revolutionären Verbesserungen hinsichtlich Kapazität und Geschwindigkeit in der Kommunikation, Simulation und Informationsverarbeitung führen. Dienen einzelne optische Photonen als Träger der Quanteninformation, so sind für diesen Zweck quantenphotonische Schaltkreise nötig. Analog zu elektronischen Schaltkreisen werden einzelne Photonen „geroutet“ und paarweise mittels nichtlinearer Quantenoperationen in logischen Quantengattern verarbeitet. Lineare optische Schaltkreise kommen bereits in vielen

Anwendungen zum Einsatz. Integrierte nichtlineare optische Elemente auf dem Niveau einzelner Photonen sind dagegen Gegenstand der Forschung. Ein möglicher Ansatz besteht darin, quantenmechanische Emittoren in die optischen Schaltkreise zu integrieren, sodass sie stark mit den Photonen wechselwirken. Das anharmonische Energieniveau-Spektrum der Emittoren führt dabei zu einer nichtlinearen Quantendynamik, die sich dazu eignet, photonische Quantengatter zu realisieren. Dies haben verschiedene Experimente mit lasergekühlten Atomen demonstriert [1]. Jedoch sind deren Aufbauten nur schwer miniaturisier-

bar, sodass festkörperbasierte Quantenemitter besser geeignet erscheinen, um komplexere quantenphotonische Schaltkreise zu realisieren.

Festkörperbasierte Quantenemitter umfassen z. B. einzelne Farbstoffmoleküle, Farbzentren in Diamant oder Quantenpunkte [2]. Diese Emittoren finden in verschiedenen Gebieten der Quantenoptik und -sensorik Anwendung. Einzelne Farbstoffmoleküle weisen vorteilhafte Eigenschaften auf [3]: Eingebettet in ein kristallines Wirtsmaterial, besitzen sie bei kryogenen Temperaturen eine sehr stabile optische Übergangsfrequenz. Ein weiterer Vorteil solcher Moleküle in

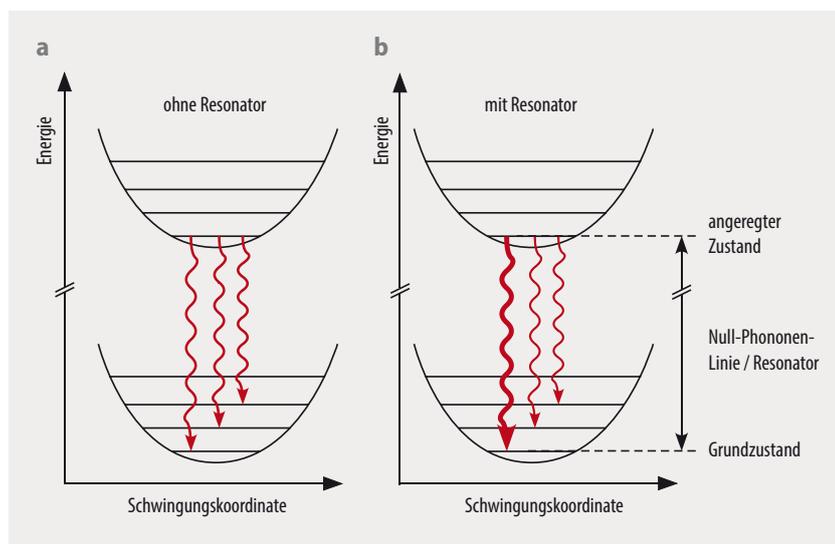


Abb. 1 Durch Kopplung an die Schwingungszustände eines Farbstoffmoleküls in einem Wirtskristall entsteht eine vibronische Substruktur des Grund- und angeregten Zustands (a). Das Fluoreszenzlicht enthält neben der kohärenten Null-Phononen-Linie auch inkohärente rotverschobene Frequenzkomponenten, bei denen das Molekül nicht in den Schwingungsgrundzustand zerfällt. Durch Kopplung des Moleküls an einen optischen Resonator (b), der mit der Null-Phononen-Linie resonant ist, lässt sich selektiv deren kohärente Emission beschleunigen. Ist der Purcell-Faktor hoch genug, tragen die Übergänge in die anderen vibronischen Zustände nicht mehr bei. Das Molekül wird zu einem effektiven Zwei-Niveau-Emitter.

Festkörpern ist die große Vielfalt an Kandidaten mit Resonanzen bei verschiedenen Frequenzen. Eine kristalline Matrix, die mit Farbstoffmolekülen dotiert ist, lässt sich als dünner Film oder in Form sehr dünner Plättchen herstellen, die dann an nanophotonische Strukturen wie dielektrische Wellenleiter auf Chipbasis oder optische Mikroresonatoren koppeln.

Ein Nachteil solcher mit Molekülen dotierten Wirtskristalle ist jedoch, dass durch die Kopplung der optischen Übergänge an die Schwingungen des Moleküls und an die Phononen im Kristall nur ein Teil des Lichts kohärent gestreut wird (**Abb. 1a**). Das verhindert eine effiziente kohärente lineare oder nichtlineare Wechselwirkung mit Photonen. Hierbei ist die Streuwahrscheinlichkeit in die kohärente „Null-Phononen-Linie“ eine wichtige Kenngröße, die für Farbstoffmoleküle meist auf einige zehn Prozent limitiert ist. Optische Mikroresonatoren können das Verhältnis von kohärenter zu inkohärenter Streuung erhöhen, indem sie den gewünschten kohärenten Übergang selektiv beschleunigen, ohne andere Übergänge zu beeinflussen (**Abb. 1b**). Dieser Purcell-Effekt ist umso stärker, je länger die Speicherzeit des Photons oder dessen räumlicher

Einschluss im Resonator ist [4]. Um den Purcell-Faktor $F \sim Q/V$ und damit die kohärente Wechselwirkung zu maximieren, sollte der Mikroresonator einen hohen Gütefaktor Q und ein kleines Modenvolumen V aufweisen.

Für eine effiziente kohärente Licht-Materie-Wechselwirkung auf Ebene einzelner Moleküle und Photonen wird in einer kürzlich veröffentlichten Arbeit ein offener Fabry-Pérot-Mikroresonator verwendet, der aus einem

Planspiegel und einem gekrümmten Mikrospiegel besteht (**Abb. 2**) [5]. Die technische Umsetzung dieser konzeptionell einfachen Idee ist herausfordernd: Der Mikrospiegel wurde mittels Ionenstrahlfräse auf das Ende einer Glasfaser aufgebracht und besitzt einen extrem kleinen Krümmungsradius von wenigen Mikrometern. Die Glasfaser und der Planspiegel wurden mit hochreflektierenden dielektrischen Spiegelschichten versehen, die zu einem Gütefaktor von rund 200 000 führen. Die starke Fokussierung der Resonatormode ermöglicht ein sehr kleines Modenvolumen von wenigen Kubik-Wellenlängen und damit einen hohen Purcell-Faktor. Um thermische Molekülschwingungen und Kristallphononen zu unterdrücken, ist der Aufbau in einem Kryostaten auf 4 K gekühlt. Die offene Bauart des Resonators und des beweglichen Mikrospiegels gestattet es, ein einzelnes Molekül in der sehr schmalen Resonatormode zu zentrieren und den Resonator auf die Übergangsfrequenz des Moleküls abzustimmen. Die hierfür erforderliche hohe mechanische Stabilität ist im Kryostaten aber nicht selbstverständlich.

Mithilfe des Resonator-Systems beobachten die Autoren eine stark erhöhte Licht-Materie-Wechselwirkung und können zeigen, dass bereits ein einzelnes Molekül die Resonatortransmission fast vollständig unterdrückt. Gleichzeitig ist die Emissi-

Kurzgefasst

Einzige Gravitationswelle

Anfang April starteten die beiden LIGO-Instrumente und der Virgo-Detektor ihren dritten Beobachtungslauf. Mit S190426 ging den Detektoren schon nach wenigen Wochen eine einzigartige Gravitationswelle ins Netz: Dabei könnte es sich um das Verschmelzen eines Schwarzen Lochs und eines Neutronensterns in bis zu 1,6 Milliarden Lichtjahren Entfernung handeln. Darüber hinaus gibt es mit S190425z einen Kandidaten für zwei verschmelzende Neutronensterne, der mit 370 bis 640 Millionen Lichtjahren mehr als dreimal soweit entfernt ist wie sein bisher einziges Pendant GW170817. Allerdings verlief bisher in beiden Fällen die Suche nach passenden elektromagnetischen Signaturen erfolglos.

Extrem langlebiges Xenon

Ein komplexes Instrument wie XENON1T im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso war nötig, um den bislang seltensten direkt gemessenen radioaktiven Zerfall nachzuweisen: Im flüssigen Xenon des Detektors ergab eine Blindanalyse nach 1,5 Jahren Messdauer 126 Signale aus dem doppelten Elektroneneinfang von ^{124}Xe . Das entspricht einer Halbwertszeit von $1,8 \cdot 10^{22}$ Jahren. Das Herausfiltern der gesuchten Ereignisse aus dem Untergrund gelang, weil eine Laufzeitanalyse die Position des Zerfalls im Detektor verriet und die Amplitude der Signale die Zerfallsenergie ergibt. Das Ergebnis hilft, Messungen zum neutrinolosen doppelten Elektroneneinfang vorzubereiten.

E. Aprile et al., Nature 568, 532 (2019)

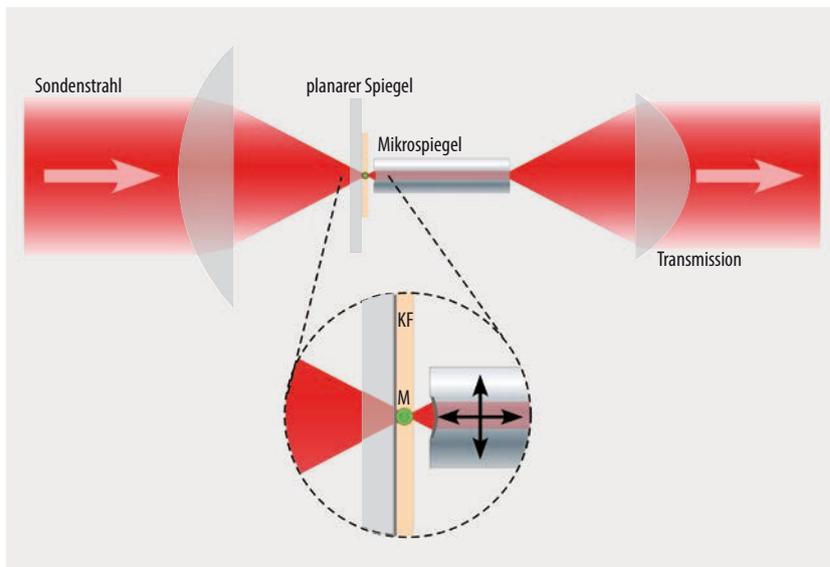


Abb. 2 Der optische Fabry-Pérot-Mikroresonator besteht aus einem planaren Spiegel und einem stark gekrümmten Mikrospiegel, der sich im Zentrum der Endfacette einer optischen Glasfaser befindet. Ein einzelnes Farbstoffmolekül (M) in einem Kristallfilm (KF) auf dem planaren Spiegel lässt sich durch Präzisionspositionierung des Mikrospiegels auswählen und an die Resonatormode koppeln. Das Molekül-Resonator-System wird mittels der Transmission eines Sondenstrahls charakterisiert.

onsrate in den Resonator gegenüber der Freiraumemission vierzigfach erhöht. Die Wahrscheinlichkeit, dass das angeregte Molekül ein Photon auf der Null-Phononen-Linie in den Resonator emittiert, erreicht 93 %.

Dieser Ansatz ermöglicht es also, ein organisches Farbstoffmolekül in einen nahezu idealen Zwei-Niveau-Emitter zu verwandeln, wobei das gekoppelte Molekül-Resonator-System sogar in den Bereich der starken Kopplung vorstößt, bei welcher der zyklische Energieaustausch zwischen Molekül und Lichtfeld im Resonator schneller erfolgt als die Dissipation der Energie. Die Autoren demonstrieren verschiedene Anwendungen, welche die starke Kopplung des Moleküls an den Resonator ausnutzen. Messungen der Phase eines am Resonator reflektierten schwachen Laserfelds zeigen Phasenverschiebungen in Rekordhöhe. Da hierbei die Photonen nicht absorbiert werden, ließe sich der Quantenzustand des Emitters zerstörungsfrei auslesen bzw. durch Messung am Molekül die Präsenz einzelner propagierender optischer Photonen zerstörungsfrei nachweisen. Das System geht bereits in die Sättigung über, wenn weniger als ein halbes Photon pro Lebensdauer des angeregten Zustands am Resonator ankommt. Diese starke Nichtlinea-

rität führt zu einer Modifikation der Photonenstatistik des transmittierten Lichts. Je nach Parameterbereich werden Photonen nur einzeln oder nur in Gruppen durch das gekoppelte Molekül-Resonator-System transmittiert.

Diese Ergebnisse ebnet den Weg zur Implementierung von Quantenoperationen, mit deren Hilfe sich Photonensortierer, Analysatoren für verschränkte Photonenzustände sowie logische Quantengatter realisieren lassen. Einen ersten Schritt in diese

Richtung geht ein Proof-of-Principle-Experiment, bei dem einzelne Photonen, die von einem „Quellmolekül“ in einem benachbarten Labor stammen, an ein im Resonator befindliches „Zielmolekül“ gekoppelt werden. Das ebnet den Weg zur Untersuchung der photonenzahlabhängigen Steuerung optischer Signale, wobei ein einzelnes Steuer-Photon die Propagationsrichtung eines Ziel-Photons kontrolliert. In Anbetracht dieser Fortschritte besteht kein Zweifel, dass bald Einzelphotonen-Pump-Probe-Experimente an einem einzelnen Molekül zu erwarten sind. Die Arbeit ist ein wichtiger Schritt in Richtung der Realisierung von Schaltkreisen, um optische Quanteninformation zu kontrollieren und zu verarbeiten [6].

- [1] A. Reiserer und G. Rempe, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 1379 (2015)
- [2] I. Aharonovich et al., *Nat. Photon.* **10**, 631 (2016)
- [3] B. Kozankiewicz und M. Orrit, *Chem. Soc. Rev.* **43**, 1029 (2014)
- [4] E. M. Purcell, *Phys. Rev.* **69**, 681 (1946)
- [5] D. Wang et al., *Nat. Phys.* **15**, 483 (2019)
- [6] J. L. O'Brien et al., *Nat. Photon.* **3**, 687 (2009)

Autoren

Prof. Dr. Arno Rauschenbeutel, HU Berlin, Unter den Linden 6, 10099 Berlin und TU Wien und **Dr. Jürgen Volz**, TU Wien, Stadionallee 2, 1020 Wien, Österreich

Frustrierte Materialien unter Hochdruck

Wenn Kristalle ihre Magnetspins nicht korrekt ausrichten können, zeigen sie Frustrationen. Ein Beispiel ist Cäsiumkupferchlorid (Cs_2CuCl_4). Forscher des HZDR nutzten nun hohen Druck, um die magnetische Kopplung innerhalb des Kristalls zu variieren und die Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften in einem extrem starken

äußeren Magnetfeld zu messen. Dabei zeigten sich Hinweise auf mindestens sechs verschiedene Phasen. Nützlich könnten die Erkenntnisse sein für langlebige Quantensysteme, in denen sich die Magnetspins kontrolliert anwenden lassen.

S. A. Zvyagin et al., *Nat. Commun.* **10** (2019), DOI: 10.1038/s41467-019-09071-7



D. Müller / HZDR