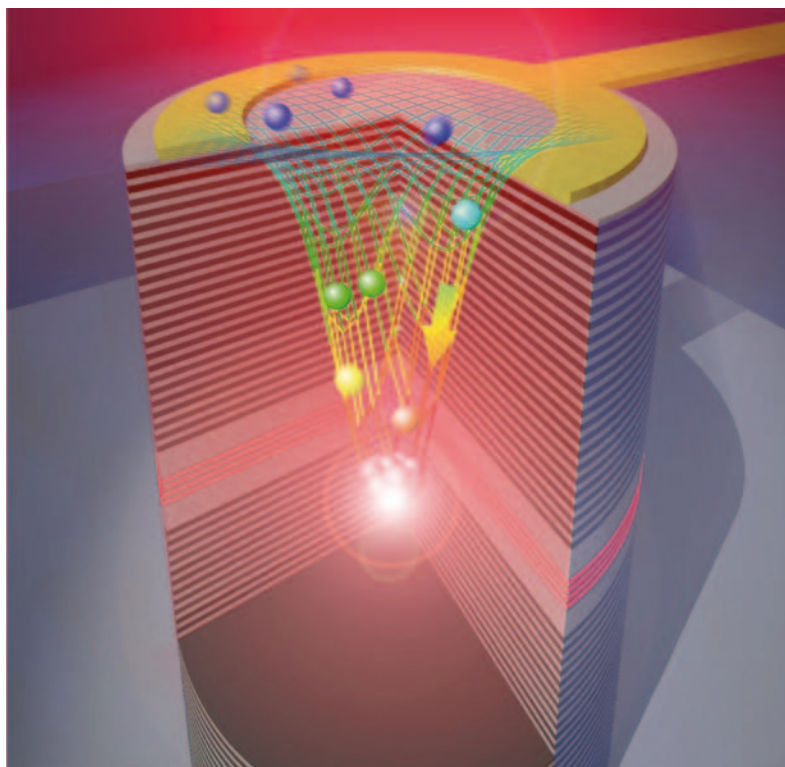


■ Kondensate auf Knopfdruck

Elektrisch gepumpte Kondensate aus Exziton-Polaritonen besitzen erhebliches Anwendungspotenzial.

Wer von Bose-Einstein-Kondensaten (BEC) hört, denkt zuerst an ultrakalte Quantengase. Erst bei Temperaturen von wenigen Nanokelvin sammeln sich bosonische atomare Gase in einem einzigen, makroskopisch besetzten Quantenzustand. Dies liegt vor allem daran, dass Atome auf der Skala der Quantenmechanik echte Schwergewichte sind: Je größer die Masse eines Teilchens ist, desto niedriger ist die maximale Temperatur, bei der sich ein BEC bilden kann. Im letzten Jahrzehnt haben Forscher daher vermehrt nach alternativen Systemen aus besonders leichten Teilchen gesucht, die ein Kondensat bei hohen Temperaturen ermöglichen. Fündig wurden sie dabei 2006 in einer Halbleitermikrokavität [1]. Einem Team aus Grenoble gelang es damit, die Kondensation von Polaritonen nachzuweisen. Diese bilden sich, wenn in einem Resonator hoher Güte ein Photon so stark mit einem Elektron-Loch-Paar, einem Exziton, wechselwirkt, dass sie zusammen ein neues Quasiteilchen bilden. Während die nötigen Exzitonen bisher optisch, also durch Anregung mit einem Laser, erzeugt wurden, gelang dies einer Gruppe von Würzburger Forschern um Sven Höfling nun auch mit einfachem elektrischen Pumpen.

Ein Polariton vereint in gewisser Weise die Vorteile von Photon und Exziton. Aufgrund des photonischen Anteils ist es einerseits etwa vier Größenordnungen leichter als ein freies Elektron und kann somit prinzipiell selbst bei Raumtemperatur noch ein Kondensat bilden [2]. Dank des exzitonischen Anteils wechselwirken Polaritonen andererseits verhältnismäßig stark miteinander und lassen sich somit auch gezielt manipulieren. Der photonische Anteil hat jedoch noch weitere Konsequenzen. Da die Spiegel der Kavität niemals perfekt sind, entkommt permanent ein kleiner Teil des Polaritonkondensats aus dem System, typischerweise auf



A. Rahimi-Iman, U Würzburg

Die zentrale Kavität des Polariton-Lasers ist lediglich 281 nm dick und enthält vier Quantenfilme als aktives Medium (rote Linien). Alternierende Schichten aus GaAs und AlAs bilden darüber und darunter effektive Spiegel hoher Qualität. Die Polaritonen (farbige Kugeln) relaxieren aus angeregten Zuständen (blau)

durch stimulierte Streuung in den makroskopisch besetzten Grundzustand (rot), das Kondensat (hohe Kugeldichte). In den gleichen Farben wie die Polaritonen ist die zugehörige Energiedispersion (Netz) dargestellt; die Energie nimmt von blau nach rot ab.

einer Pikosekundenzeitskala. Um einen „stabilen“ Zustand zu erhalten, müssen kontinuierlich Polaritonen „nachgefüllt“ werden. Dies bedeutet aber auch, dass das Kondensat nicht den Grundzustand des Systems darstellt, sodass es keinem BEC im strengen Sinne entspricht.

Was zunächst nach einem Nachteil klingt, entpuppt sich bei genauem Hinsehen als Glücksfall. Bei atomaren Kondensaten ist der Nachweis eines BEC eher schwierig – die Falle, in der die Atome sich befinden, wird abgeschaltet, das Quantengas expandiert und nach einer gewissen Flugzeit wird die Dichteverteilung der Atome anhand der Streuung eines Laserstrahls an der Atomwolke gemessen. Bei Polaritonkondensaten repräsentiert das Licht, das aus der Kavität entkommt, hingegen einen Teil der Wellenfunktion des

Kondensats, dessen Eigenschaften sich also direkt mittels optischer Spektroskopie untersuchen lassen. Verschiedenste Merkmale, die von atomaren BEC bekannt sind, konnten im Polaritonkondensat nachgewiesen werden, darunter auch die Ausbildung quantisierter Vortices [3], Superfluidität [4] und ein Bogoliubov-Anregungsspektrum [5].

Auch wenn es um Anwendungen geht, besitzt das Polariton-BEC hochinteressante Eigenschaften. Der makroskopisch besetzte Grundzustand weist langreichweitige Kohärenz auf. Das emittierte Licht ist somit ebenfalls hochgradig kohärent und somit eine echte Alternative zu Laserlicht. Neu in das System eingebrachte Polaritonen gelangen dabei mittels stimulierter Streuung in den Grundzustand: Für Bosonen sind Streuprozesse in Zustände, die bereits viele Bosonen

enthalten, besonders wahrscheinlich. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lasern ist es also nicht nötig, eine Besetzungsinversion herzustellen. Die zur Erzeugung eines Polaritonkondensats benötigten Anregungsdichten liegen daher rund ein bis zwei Größenordnungen unter der Schwelle eines Lasers mit identischem Aufbau. Polaritonkondensate bieten daher enormes Potenzial als effektive und energiesparende Halbleiterlichtquelle.

An diesem Punkt hat das Team von Wissenschaftlern um Sven Höfling angesetzt. Dass es ihnen gelang, das Polariton-Kondensat elektrisch zu pumpen, statt die Exzitonen optisch zu erzeugen, ist komplizierter, als es zunächst klingt [6]. Die Ladungsträger müssen nämlich homogen in das optisch aktive Medium injiziert werden. Während man allerdings bei herkömmlichen Lasern eher hohe Dichten und niedrige Schwellen bevorzugt, also eher nur mit einem Quantenfilm arbeiten würde, besteht das optisch aktive Medium aus vielen Quantenfilmen (Abb.). Da die Polaritonendichte dadurch verhältnismäßig niedrig bleiben kann, lässt sich vermeiden, dass die Exzitonen aufbrechen und kein Kondensat mehr entstehen kann. Über eine Ringelektrode ist die Kavität elektrisch kontaktiert. Um eine optimale Leitfähigkeit durch die Spiegelstrukturen hin zur zen-

tralen Kavität zu erreichen, ohne die optische Qualität der Spiegel zu beeinträchtigen, nimmt die Dotierung des Spiegelmaterials graduell nach innen hin ab. Die Spiegel bestehen dabei aus alternierenden Schichten aus zwei verschiedenen Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex, sodass es an jeder Oberfläche zur partiellen Reflexion kommt. Die gesamte Struktur hat einen Durchmesser von lediglich 20 Mikrometern.

Das emittierte Licht ähnelt Laserlicht sehr, weshalb das Bauelement oft auch als Polaritonlaser bezeichnet wird. Die Übereinstimmungen gehen so weit, dass sich die Frage, ob es sich tatsächlich um einen Polaritonlaser oder um sein herkömmliches Pendant handelt, ganz und gar nicht einfach beantworten lässt. Beim Polaritonlaser ist das Licht allerdings nur ein Teil der Wellenfunktion des Kondensats. Hinzu kommt der exzitonen Anteil, der materiebehaftet ist und der Coulomb-Wechselwirkung unterliegt. So kann man über externe Magnetfelder oder elektrische Felder die Energie ändern oder lokal Störungen in das Kondensat einbringen und damit eine Abweichung vom kohärenten Zustand feststellen.

Bei der Anregung durch ultrakurze Pulse ist auch die Dauer der Emission für den Nachweis geeignet. Im Fall eines Halbleiterlasers

entspricht diese der Lebensdauer der Kavität. Bei einem Polaritonlaser ist die Dauer etwa um den Faktor Zwei erhöht, denn dieser wird im Bereich der starken Kopplung betrieben. Dabei bleiben die Photonen nach einer spontanen Emission im Schnitt so lange in der Kavität, dass eine erneute Absorption recht wahrscheinlich ist und sich die Polaritonen ausbilden können. Während die Unterscheidung für optisch gepumpte Polaritonlaser damit mittlerweile zweifelsfrei möglich ist [7], sind ultraschnelle Pumpulse bei elektrischem Betrieb nicht realisierbar. Mithilfe eines angelegten Magnetfelds gelang es jedoch, zwischen gewöhnlichem Laser und Polaritonlaser zu unterscheiden: Durch ihren Materieanteil zeigen Polaritonen eine signifikante Zeeman-Aufspaltung im Magnetfeld, im Gegensatz zu einem herkömmlichen Laser.

Der Polaritonlaser bietet nicht einmal zehn Jahre nach seiner Entdeckung bereits faszinierende Einsatzmöglichkeiten. Vom Quantensimulator für komplexe Systeme [8] bis zum neuronalen optischen Schaltkreis [9] wurden kreative Anwendungen vorgeschlagen und umgesetzt. Der Würzburger Polaritonlaser arbeitet derzeit bei einer Temperatur von etwa 10 K. Elektrisch gepumpte Polaritonlaser – quasi Kondensate auf Knopfdruck – bei Raumtemperatur scheinen jedoch nur noch eine Frage der Zeit zu sein.

Marc Aßmann und Manfred Bayer

Dr. Marc Aßmann, JILA, University of Colorado, Boulder, USA; Prof. Dr. Manfred Bayer, Experimentelle Physik 2, Fakultät Physik, TU Dortmund, 44221 Dortmund

KURZGEFASST

■ Schneller Datenspeicher

Wissenschaftler aus Singapur und Kalifornien haben einen nichtflüchtigen Speicher entwickelt mit Leseraten von wenigen Nanosekunden. Der 16-Bit-Prototyp besteht aus einem Gitter von Inseln aus ferroelektrischem Bismutferrit. Über verschieden gepolte Spannungspulse kann man „0“ oder „1“ in die Polarisationszustände des BiFeO₃ einschreiben. Auslesen lassen sich die digitalen Daten mithilfe des photovoltaischen Effekts, indem man den Speicher mit sichtbarem Licht beleuchtet. Solche Speichermodule könnten bei doppelter Speicherkapazität im Vergleich zu herkömmlichen Flash-Speichern etwa tausendmal häufiger beschrieben und gelöscht werden. R. Guo et al., Nat. Commun., online 11. Juni 2013; DOI: 10.1038/ncomms2990

■ Blick in Sonnenkorona

Im Jahr 2011 näherte sich Komet C/2011 W3 (Lovejoy) der Sonnenoberfläche bis auf 140 000 Kilometer, dies entspricht nur 1,2 Sonnenradien. Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Solar Dynamics Observatory (SDO) und den beiden Sonden Stereo-A und -B der NASA offenbarten starke Schwankungen in der räumlichen Ausrichtung und in der Helligkeit des Kometenschweifs. Amerikanische Forscher nutzten diese Beobachtungen für detaillierte Berechnungen mithilfe eines magnetohydrodynamischen Modells der Korona und zeigten, wie sich prinzipiell aus den Veränderungen des Schweifs Rückschlüsse auf Inhomogenitäten im Magnetfeld der Sonne ziehen lassen. C. Downs et al., Science **340**, 1196 (2013)

- [1] J. Kasprzak et al., Nature **443**, 409 (2006)
- [2] S. Christopoulos et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 126405 (2007)
- [3] D. Sanvitto et al., Nature Physics **6**, 527 (2010)
- [4] A. Amo et al., Nature Physics **5**, 805 (2009)
- [5] M. Aßmann et al., Proc. Nat. Acad. Sciences **108**, 1804 (2011)
- [6] C. Schneider et al., Nature **497**, 348 (2013)
- [7] J.-S. Tempel et al., Phys. Rev. B **85**, 075318 (2012)
- [8] N. Y. Kim et al., New J. Phys. **15**, 035032 (2013)
- [9] T. C. H. Liew et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 016402 (2008)