

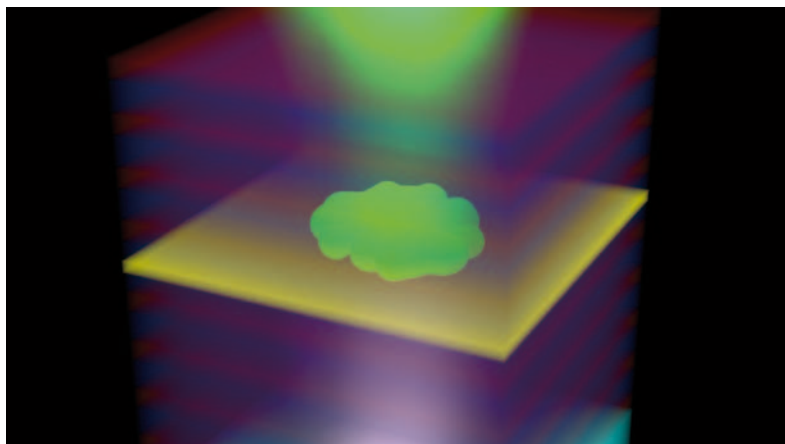
## ■ Bose-Einstein-Kondensat in Plastik

Polaritonen, die durch die starke Kopplung von organischem Material an eine Mikrokavität herrühren, rücken quantenmechanische Kondensationsphänomene in die Anwendungsnähe.

Um Bosonen in den kollektiven Gleichtakt eines Bose-Einstein-Kondensats zu zwingen, benötigt man eine ausreichend hohe Bosonen-Dichte sowie ausreichend tiefe Temperaturen. Die Dichte muss so hoch sein, dass sich die Wellenfunktionen der Bosonen hinreichend überlappen und sich somit gegenseitig „spüren“. Die kritische Temperatur, ab der die Kondensation eintritt, ist dabei im Wesentlichen umgekehrt proportional zur effektiven Masse der Bosonen.

Wissenschaftler vom IBM-Forschungslabor in Zürich und der Universität Wuppertal um Rainer Mahrt (IBM) haben sich nun so genannte Exziton-Polaritonen in organischen Halbleitern als ultraleichte Bosonen zu Nutze gemacht, um Bose-Einstein-Kondensation bei Raumtemperatur zu erzielen [1]. Diese Exziton-Polaritonen entstehen durch die starke Licht-Materie-Wechselwirkung von Photonen in einer Mikrokavität mit Exzitonen. Die Exzitonen sind hierbei durch Coulomb-Wechselwirkung gebundene Elektron-Loch-Paare. Während Elektronen und Löcher (als Defekt-Elektronen) zwar Fermionen sind, können sie durch paarweise Bindung Bosonen bilden. Die typische effektive Masse der bosonischen Exzitonen ist vier Größenordnungen kleiner als die Masse von Atomen.

Ein entscheidender Schritt ist das „Mischen“ dieser Exzitonen mit Mikrokavitäts-Photonen im Regime der starken Kopplung. Auf diese Weise lassen sich bosonische Exziton-Polaritonen bilden, deren effektive Masse typischerweise um acht Größenordnungen kleiner ist als die von Atomen [2]. Entsprechend gelang es mit diesen Quasiteilchen, Bose-Einstein-Kondensate bei Temperaturen im Kelvinbereich anstatt im Nanokelvinbereich herzustellen [2, 3]. Die höheren Kondensations-temperaturen gehen allerdings mit einem starken Nichtgleichge-



In einer organischen aktiven Schicht (gelb) entstehen Polaritonen aufgrund starker Licht-Materie-Kopplung zwischen Elektron-Loch-Paaren (Frenkel-Exzitonen) und dem Lichtfeld in einer Mikrokavität mit Bragg-Reflektoren (rot-blaue Schichten). Durch die endliche Speicherzeit der Kavität und den Zerfall

wichtscharakter der Kondensate einher. Um sie aufrecht zu erhalten, müssen ständig Polaritonen durch Pumpen nachgeliefert werden.

Doch wie lässt sich bei den organischen Halbleitern Bose-Einstein-Kondensation auch bei Raumtemperatur erreichen? Die Antwort auf diese Frage besteht in der Natur der verwendeten Exzitonen: In anorganischen Halbleitern mit hoher dielektrischer Konstante sind ausschließlich Exzitonen vom Wannier-Mott-Typ vorhanden, bei denen das Elektron und das Loch des Exzitons „Bahnen umschreiben“ die mehrere Einheitszellen des Festkörpers umspannen. Das Exziton sieht damit ein mittleres Bild des Festkörpers, und dies wird physikalisch durch die dielektrische Konstante des Festkörpermateriale beschrieben. Die räumlich stark ausgedehnten Wannier-Mott-Exzitonen sind meist so schwach gebunden, dass sie größtenteils bereits weit unterhalb der Raumtemperatur in Elektronen und Löcher aufbrechen. Dadurch geht der für die Kondensation erforderliche bosonische Charakter verloren.

Das Forscherteam verwendete jedoch organische Halbleiter, in

denen sich Exzitonen vom „Frenkel-Typ“ ausbilden, die sehr stark lokalisiert sind und sehr hohe Bindungsenergien zeigen. Daher überleben sie das Aufheizen auf Raumtemperatur und darüber. Mahrt und seine Kollegen haben ein Polymer mit hohen Exziton-Bindungsenergien, das sich im Vergleich zu Vorgängerarbeiten [4] recht einfach und skalierbar herstellen lässt, zwischen zwei dielektrische Spiegel aus  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  eingebettet (Abb.). Die starke Licht-Materie-Wechselwirkung führt zur Bildung der organischen „Exziton-Polaritonen“, mit denen sich durch optisches Pumpen Bose-Einstein-Kondensation bei Raumtemperatur erzielen ließ.

Mit der Erzeugung des Kondensats war es jedoch nicht getan, sondern die Forscher sammelten auch eine Reihe von Nachweisen dafür, dass tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat vorliegt. Ein Nachweis ist die starke nichtlineare Intensitätszunahme der Polaritonen-Besetzung im Grundzustand. Weiterhin beobachteten sie, dass der kondensierte Zustand im Vergleich zum unkondensierten blauverschoben ist. Die Blauverschiebung rührt von der über die exzitonische Kompo-

nente recht starken Wechselwirkung der vielen Exziton-Polaritonen im Kondensat her, verursacht durch die Ladungen der konstituierenden Elektronen und Löcher (Coulomb-Wechselwirkung). Da man viele Teilchen mit Elektron-Loch-Charakter in „einen Zustand zwängt“, erhöht sich die Energie des Systems: es tritt eine Blauverschiebung auf, die kleiner ausfällt als die Rabi-Aufspaltung. Dies zeigt wiederum, dass die starke Licht-Materie-Wechselwirkung noch nicht aufgebrochen war und das System durch exzitonisch induzierte Blauverschiebung polaritonisch ist (Licht- und Materie-Komponenten) – im Unterschied zu gewöhnlichen Lasern, die durch den Lichtanteil allein dominiert werden (Kavität).

Wichtige Kriterien für ein Kondensat sind die räumliche [5] und zeitliche Kohärenz [6] des polarito-

nischen Zustandes. Hier konnten die Forscher in ihrem „organischen Kondensat“ die Ausdehnung der räumlichen Kohärenz sowie das Auftreten von quantisierten Wirbeln feststellen. Diese wurden in konventionellen Atom-Kondensaten oft beobachtet und gelten als charakteristisches Merkmal für Bose-Einstein-Kondensation, wenn auch nicht als eindeutiger Beweis. Zusammen mit kürzlich erzielten Ergebnissen zur elektrischen Injektion von Polariton-Kondensaten [7] rückt somit der Traum von elektrisch angeregten Kondensaten bei Raumtemperatur deutlich in den Bereich des Machbaren.

Ist dies nur schöne Physik oder gegebenenfalls auch anwendungsrelevant? Organische Halbleiter haben durch Geräte der klassischen Elektronik und Optoelektronik wie Mobiltelefone und Fernseh-

bildschirme bereits im großem Maße Eingang in unseren Alltag gefunden. Die richtungsweisenden Arbeiten von Rainer Mahrt und seinen Kollegen zeigen nun einen Weg auf, auf welche Weise sich kollektive Quantenphänomene wie Bose-Einstein-Kondensation zukünftig auch bei Raumtemperatur nutzbar machen lassen könnten.

**Christof P. Dietrich und Sven Höfling**

- [1] J. D. Plumhof, T. Stöferle, L. Mai, U. Scherf und R. F. Mahrt, *Nature Materials*, DOI: 10.1038/NMAT3825 (2013)
- [2] J. Kasprzak et al., *Nature* **443**, 409 (2006)
- [3] H. Deng, H. Haug und Y. Yamamoto, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1489 (2010)
- [4] S. Kena-Cohen und S. R. Forrest, *Nature Photonics* **4**, 371 (2010)
- [5] G. Roumpos et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **109**, 6467 (2012)
- [6] M. Aßmann et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **108**, 1804 (2011)
- [7] C. Schneider et al., *Nature* **497**, 348 (2013)

## ■ Elemente der Stern-Explosionen

**Erste Beobachtungen von Argon und Phosphor in Supernova-Überresten sind ein Prüfstein für Computermodelle.**

**M**it der Ausnahme von Wasserstoff und Helium, die in den ersten drei Minuten unseres Universums in der primordialen Nukleosynthese entstanden sind, wurden alle Elemente in Sternen produziert. Hierbei spielen massereiche Sterne mit mehr als neun Sonnenmassen eine besonders wichtige Rolle. Diese Sterne durchlaufen mehrere hydrostatische Brennphasen, bei denen sie leichtere Kerne zu schwereren fusionieren. Diese Energiequelle versiegt, wenn im Sterninneren ein „Core“ aus Eisen mit etwa 1,5 Sonnenmassen entsteht, der unter seinem eigenen Gewicht kollabiert. Dies triggert eine Explosion, bei der der Stern seine äußere Hülle absprengt und nur ein Neutronenstern (oder ein Schwarzes Loch bei besonders massereichen Sternen) übrigbleibt (Abb. 1). Diese Supernova setzt auch die während der hydrostatischen Brennphasen produzierten Elemente in der Umgebung frei (Abb. 2).

Für die Entstehung der Elemente im Universum ist es wichtig, dass



**Abb. 1.** Dieses Multiwellenlängenbild von Cassiopeia A enthält Beobachtungen der Weltraumteleskope Hubble, Spitzer und Chandra im Sichtbaren (gelb), Infrarot (rot) und Röntgen (grün und blau). Die

Supernova-Explosion ließ einen Neutronenstern zurück (türkis, Bildmitte). Die ausgeworfene Materie konnten Astronomen jetzt genauer auf Zusammensetzung und Kinematik hin untersuchen.

es in Supernovae durch die extrem hohen Temperaturen im Sterninneren kurzzeitig zu einer explosiven Brennphase sehr schneller

Kernreaktionen kommt, die sowohl die Häufigkeiten der während des hydrostatischen Brennens entstandenen Elemente ändern, als