

■ Bose-Einstein-Kondensat im neuen Licht

Auch Photonen können kondensieren und bilden sogar bei Raumtemperatur eine neuartige kohärente Lichtquelle.

Bose-Einstein-Kondensate stellen einen bizarren Zustand der Quantenmaterie dar. Kühlt man Bosonen, also Teilchen mit ganzzahligem Spin, auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt ab, so führt deren Ununterscheidbarkeit zu beeindruckenden Quanteneffekten. Insbesondere überlappen die Materiewellen einzelner Bosonen im Grundzustand und bilden eine einzige makroskopische Welle aus, die das kollektive kohärente Verhalten der Teilchen beschreibt. Dieses makroskopische Quantenphänomen der Bose-Einstein-Kondensation zeigten 1995 erstmalig Eric Cornell, Wolfgang Ketterle und Carl Wiemann experimentell mit Hilfe von bosonischen Alkaliatomen, die in magneto-optischen Fallen auf Temperaturen weniger als ein Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt wurden. Seit diesen ersten Pionierleistungen gelang es, viele weitere Bose-Einstein-Kondensate von verschiedenen Atomen, Molekülen oder Quasiteilchen in Festkörpern herzustellen. Die ultrakalten Quantengase haben sich seitdem zu einem der wichtigsten Forschungsgebiete der Physik entwickelt [1].

Bislang galt es aber als unmöglich, ein Bose-Einstein-Kondensat von Photonen, den Quanten des Lichtes, herzustellen, obwohl sie einen Spin 1 haben und daher ebenfalls von bosonischer Natur sind. Da aber Photonen keine Ruhemasse besitzen, bleibt ihre Teilchenzahl nicht erhalten. Sobald man in einem Experiment versucht, ein Photonengas abzukühlen, absorbieren die Atome der Apparatur die Lichtquanten und es kommt zu keiner makroskopischen Besetzung des Grundzustandes. Daher lässt sich in einem Hohlraum, bei dem sich die elektromagnetische Strahlung im thermischen Gleichgewicht mit den Wänden befindet, beim Abkühlen kein Phasenübergang zu einem Bose-Einstein-Kondensat beobachten.

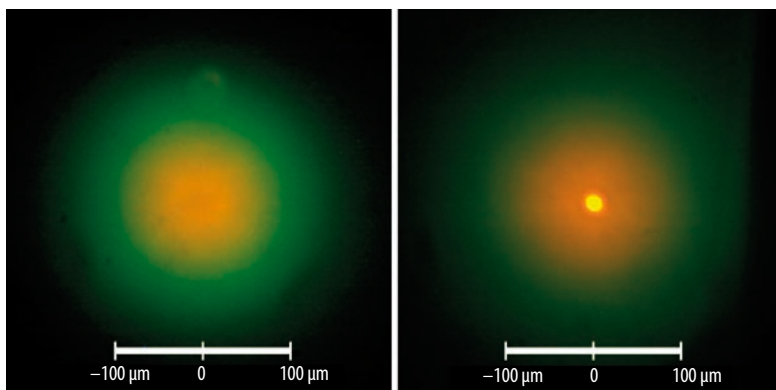


Abb. 1 Bildet sich im zweidimensionalen Photonengas (links) ein Bose-Einstein-Kondensat aus (rechts), so entsteht über

dem diffusen thermischen Strahlungshintergrund ein intensiver Lichtfleck [2].

Dem Team um Martin Weitz an der Universität Bonn ist es nun in einem aufsehenerregenden Experiment gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat aus Photonen sogar bei Raumtemperatur zu realisieren [2]. Ein Photonengas ist hierzu in einem Hohlraum zwischen zwei konkaven Spiegeln eingeschlossen. Nähern sich die beiden Spiegel auf einen Abstand im Mikrometerbereich, so haben die aufeinanderfolgenden longitudinalen Schwingungsmoden des Lichtes eine Energiedifferenz, die viel größer als die thermische Energie bei Raumtemperatur ist. Regt man nun eine der longitudinalen Moden mit einem Laser an, so ist die longitudinale Wellenzahl k_z der Photonen festgelegt, während der Wellenvektor $\mathbf{k}_r = (k_x, k_y)$ in transversaler Richtung keinerlei Einschränkungen unterliegt. Für genügend langwellige transversale Anregungen $|\mathbf{k}_r| \ll k_z$ ähnelt die dreidimensionale relativistische Dispersionsrelation masseloser Photonen $E = \hbar c (\mathbf{k}_r^2 + k_z^2)^{1/2}$ näherungsweise der eines zweidimensionalen Gases nichtrelativistischer massiver Teilchen $E \approx m_{\text{ph}} c^2 + \hbar^2 \mathbf{k}_r^2 / (2m_{\text{ph}})$. Die resultierende effektive Masse $m_{\text{ph}} = \hbar k_z / c$ mit der Lichtgeschwindigkeit c des Mediums entspricht etwa einem Billionstel der Masse eines Rubidium-Atoms.

Ist der Hohlraum zwischen den Spiegeln mit einer Farbstoff-

lösung gefüllt, regen die häufigen Stöße des Lösungsmittels mit den Farbstoffmolekülen deren interne Schwingungs- und Rotationszustände ständig an und ab. Dabei ist der Farbstoff so gewählt, dass bei diesen inkohärenten Absorptions- und Emissionsprozessen nur Photonen mit fester longitudinaler Wellenzahl k_z , aber variablem transversalen Wellenvektor \mathbf{k}_r beteiligt sind. Dadurch wirkt die Farbstofflösung wie ein Wärmebad, welches das effektiv zweidimensionale Gas der „masseartigen“ Photonen bei Raumtemperatur ins thermische Gleichgewicht bringt [3].

Ein Laser pumpt den Farbstoff kontinuierlich, um die Photonen zu ersetzen, die aus dem Hohlraum entweichen oder von den Spiegeln absorbiert werden. Erhöht man die Laserintensität und damit die Photonenzahl im Hohlraum, so bildet sich ein Bose-Einstein-Kondensat bei Raumtemperatur, falls die Phasenraumdichte $n \cdot \lambda_{\text{th}}^2$ einen Wert nahe 1 überschreitet. Hierbei bezeichnet n die Photonenzahl pro Flächeneinheit und $\lambda_{\text{th}} = \sqrt{2\pi\hbar^2 / (m_{\text{ph}} k_B T)} \approx 1,58 \mu\text{m}$ die thermische de Broglie-Wellenlänge, welche die thermische Bewegung in transversaler Richtung charakterisiert. Bei einer genaueren Analyse ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Hohlraumspiegel ein effektiv harmonisches Potential für das massive zweidimensionale Pho-

tonengas erzeugen. Bei vernachlässigter möglicher Selbstwechselwirkung der Photonen, die durch den Kerr-Effekt oder eine inhomogene Temperaturverteilung in der Farbstofflösung hervorgerufen werden könnte, ergibt sich, dass bei der kritischen Zahl von 77 000 Photonen ein Bose-Einstein-Kondensat entstehen müsste.

Einer der Spiegel ist teildurchlässig, sodass sowohl die spektrale als auch die räumliche Verteilung des Photonengases im Hohlraum quantitativ analysiert werden kann. Für eine unterkritische Photonenzahl ergibt sich ein breites Spektrum, das einer Bose-Einstein-Verteilung der transversalen Anregungen bei Raumtemperatur entspricht [3]. Bei mehr als $(6,3 \pm 2,4) \times 10^4$ Photonen im Hohlraum zeigt sich aber, dass auf dem Hintergrund dieses thermischen Spektrums ein ausgeprägtes und scharfes Maximum bei der Wellenzahl k_z entsteht. Auch an der räumlichen Intensitätsverteilung des Lichtes, das aus dem Spiegel tritt, lässt sich das Entstehen des Photonenkondensates beobachten. Bei zunehmender Intensität des Pumpasers wird ein anfangs diffuser Lichtfleck auf der Hohlraumachse immer schärfer und überstrahlt schließlich das vom ther-

mischen Photonengas herrührende Licht, wie man es von einem Kondensat bei $k_z=0$ erwartet (Abb. 1). Die experimentellen Daten für die Breite des Kondensat-Peaks bei zunehmender Photonenzahl stimmen mit der Lösung einer entsprechenden Gross-Pitaevskii-Gleichung überein [2]. Dabei handelt es sich um eine nichtlineare Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung, welche die zeitliche Entwicklung einer makroskopischen Wellenfunktion unter Berücksichtigung der Selbstwechselwirkung beschreibt.

Das Bonner Experiment liefert einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung, da es ein neues Licht auf den Welle-Teilchen-Dualismus wirft [4]. Während die bisherigen atomaren oder molekularen Bose-Einstein-Kondensate nahe dem absoluten Nullpunkt eindrucksvoll die Wellennatur massiver Teilchen demonstrierten, zeigt das nun erstmalig erzeugte photonische Bose-Einstein-Kondensat bei Raumtemperatur den Teilchencharakter von Licht an einem Vielteilchensystem. Im Unterschied zur Hohlraumstrahlung lässt sich aber hierbei die Photonenzahl konstant halten, da das Pumpen des Lasers die Resonatorverluste kontinuierlich ausgleichen kann. Außerdem

stellt das photonische Bose-Einstein-Kondensat eine neue kohärente Lichtquelle dar, die sich im Gegensatz zu einem Laser im thermischen Gleichgewicht mit einem Wärmebad befindet. Künftige Experimente sollen untersuchen, inwieweit sich dessen Photonenzahlstatistik, beispielsweise in der Temperaturabhängigkeit, von der eines Lasers unterscheidet. Mit photonischen Bose-Einstein-Kondensaten sind neuartige Lichtzustände möglich, deren Wellenlänge durch den Spiegelabstand und die Art der Farbstofflösung kontrolliert variierbar sein sollte. Interessante Anwendungspotenziale sind beispielsweise in der Solarzellenforschung oder in der Halbleitertechnologie denkbar [2, 3]. Im letzteren Falle wird die photolithografische Herstellung von Schaltkreisen in Halbleitermaterialien unter anderem von der Lichtwellenlänge begrenzt.

Axel Pelster

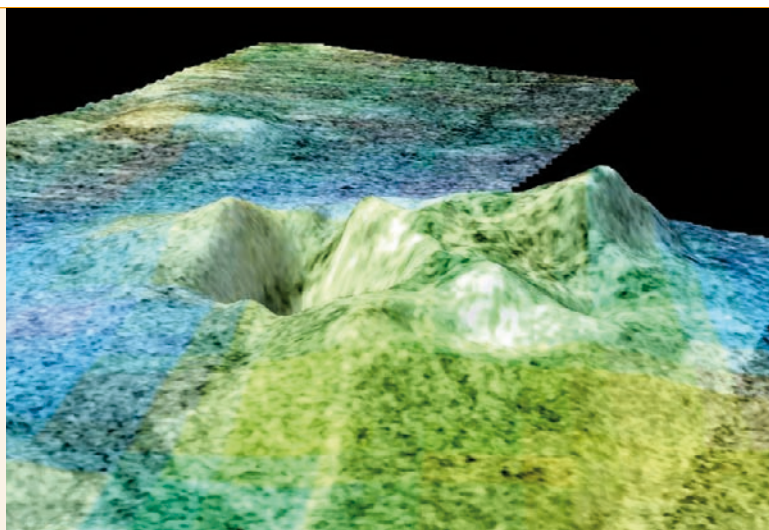
- [1] Siehe beispielsweise *L. P. Pitaevskii* und *S. Stringari*, *Bose Einstein Condensation*, Oxford University, Oxford (2003); *M. Ueda*, *Fundamentals and New Frontiers of Bose-Einstein Condensation*, World Scientific, Singapore (2010)
- [2] *J. Klärs* et al., *Nature* **468**, 545 (2010)
- [3] *J. Klärs* et al., *Nature Phys.* **6**, 512 (2010)
- [4] *J. Anglin*, *Nature* **468**, 517 (2010)

Priv.-Doz. Dr. Axel Pelster, Fachbereich Physik, Universität Duisburg-Essen, Campus Duisburg, Lotharstrasse 1, 47048 Duisburg

VULKAN AUF TITAN

Basierend auf Beobachtungen der Raumsonde Cassini haben Astrogeologen den wohl ersten Kryovulkan des äußeren Sonnensystems entdeckt, dessen Aussehen dem der feuerspeienden Berge auf der Erde oder dem Jupitermond Io gleicht. Randolph Kirk, Geophysiker beim USGS, stellte die Bilder von Titan, dem größten Saturnmond, auf der Herbsttagung der American Geophysical Union in San Francisco vor.

Als Schlüssel zum Fund erwiesen sich digitale topographische Modelle (DTMs), welche die Forscher anhand stereoskopischer Radaraufnahmen erstellten. In der Region Sotra Facula stießen sie dabei auf Gipfel, die sich mehr als einen Kilometer über die Umgebung erheben, sowie eine 1500 Meter tiefe Senke. Im Gegensatz zu anderen untersuchten Gebieten deuten Flussstrukturen in der Nähe dieses Massivs tatsächlich auf vergangene vulkanische Aktivität hin, bei der kalte, kohlenwas-



NASA/JPL-Caltech/USGS/University of Arizona

serstoffreiche Lava an die eisige Oberfläche gelangt ist.

Wissenschaftler suchen gezielt nach solchen Prozessen, denn sie könnten den Nachschub an Methan in der Atmosphäre des Mondes erklären, dessen

Menge das Sonnenlicht durch Photo-lyse ständig reduziert. Bisher beobachtete Kryovulkane, z. B. auf dem Saturnmond Enceladus, zeigten aber keine Ähnlichkeiten zu den heißen Vertretern auf der Erde. (OD)