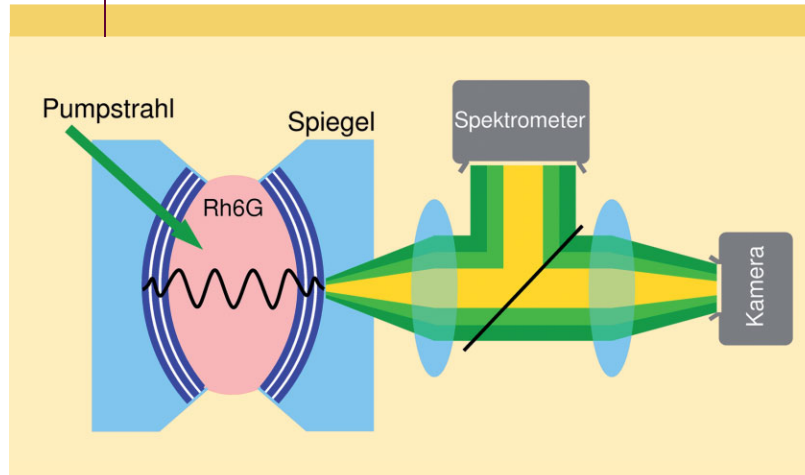


QUANTENOPTIK

Bose-Einstein-Kondensat aus Licht

Bose-Einstein-Kondensate (BEC) stellen einen Zustand von Quantengasen dar, den Satyendra Nath Bose und Albert Einstein in den 1920er Jahren für ein Gas von idealen Bosonen vorausgesagt haben [1]. In einem BEC verhalten sich die Teilchen im Grundzustand wie ein einzelnes „Superteilchen.“ Dies wurde erstmals 1995 mit atomaren Gasen realisiert, die auf Temperaturen im Nanokelvinbereich gekühlt wurden (Phys. Unserer Zeit 1996, 27 (5), 200 und 2003, 34 (4), 168). Seitdem gab es viele weitere Experimente mit verschiedenen bosonischen Teilchen, lediglich mit dem wohl bekanntesten Vertreter, dem Photon, ließ sich bislang kein BEC herstellen. Dies gelang kürzlich unserer Gruppe an der Universität Bonn [2].

ABB. 1 | EXPERIMENT



In den mit Farbstoff (Rh6G) gefüllten Raum zwischen zwei hoch reflektierenden Spiegeln werden über einen Pump Laser Photonen eingebracht, die durch Stöße mit dem Farbstoff thermalisieren. Ein Spektrometer misst das Photonenpektrum, die Kamera bildet die räumliche Verteilung der Photonen im Resonator ab.

Ein BEC entsteht bei Abkühlung eines Bosonengases in einem Phasenübergang. Dabei nimmt es einen Zustand mit makroskopischer Besetzung des Grundzustands ein. Im Energiespektrum erhält man unterhalb einer (dichteabhängigen) kritischen Temperatur eine scharfe Spitze bei der niedrigsten Energie des Systems, gefolgt von einem breiten „thermischen Schwanz.“ Im Gegensatz zu allen anderen Bosonen bildet ein Teilchenensemble von Photonen ein nahezu ideales bosonisches Gas. Dennoch lässt sich ein BEC aus Photonen nur schwer herstellen, weil die Teilchenzahl bei Abkühlung nicht erhalten ist.

Das bekannteste Beispiel eines Photonengases ist wohl die Schwarzkörperstrahlung, die im thermischen Gleichgewicht mit perfekt absorbierenden (schwarzen) Wänden steht. Diese zeigt bei Abkühlung eine Verschiebung des Spektrums in den langwelligeren (roten) Bereich, das heißt die mittlere Energie sinkt. Gleichzeitig nimmt die Teilchenzahl ab, da die Photonen bei kleinen Temperaturen an den Wänden absorbiert werden, statt zu kondensieren.

Um ein BEC zu erzeugen, muss also die Teilchenzahl der Photonen während der Thermalisierung konstant gehalten werden. In unserem

Experiment verhindern wir die Verschiebung des Spektrums zu niedrigen Energien, indem wir das Licht zwischen zwei gekrümmten Spiegeln einschließen, deren Abstand im Mikrometerbereich liegt (Abbildung 1). Licht mit einer Wellenlänge, die größer ist als der Abstand der Spiegel, darf sich nicht mehr zwischen den Spiegeln aufhalten. Nur Licht mit Wellenlängen kleiner als diese maximale Wellenlänge kann sich zwischen den Spiegeln ausbreiten. Anders gesagt: Nur Photonen mit einer Energie größer als eine Minimalenergie werden gespeichert. Damit verhindern wir, dass das Photonengas bei Abkühlung immer „röter“ wird und sorgen für eine Erhaltung der Teilchenzahl. Außerdem wirken die gekrümmten Spiegel wie eine Falle für Photonen: Energiearme (gelbe) Photonen halten sich nahe der Verbindungsachse zwischen den Spiegeln auf, energiereiche (grüne) Photonen sind auch in den Randbereichen zu finden.

Als nächste Zutat brauchen wir einen Mechanismus, der die Photonen in ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung bringt. Dazu bringen wir als Wärmebad Farbstoffmoleküle in Lösung zwischen die Spiegel. Das Photonengas tritt durch Streuung an den Farbstoffmolekülen in thermischen Kontakt mit der Lösung, und es ergibt sich eine thermische Verteilung der Photonenenergien oberhalb der Minimalenergie, deren Breite durch die Temperatur der Farbstofflösung gegeben ist. Da die Minimalenergie (etwa 2,1 eV in unserem Fall) deutlich größer als die thermische Energie ist (etwa 1/40 eV bei Raumtemperatur) tritt im Gegensatz zur Schwarzkörperstrahlung keine spontane (thermische) Erzeugung (oder Vernichtung) von Photonen auf. Die Thermalisierung, durch die das Gas der Photonen die Farbstofftemperatur annimmt, erhält folglich die Teilchenzahl [3].

Analog zu atomaren Gasen wird bei Photonen eine Bose-Einstein-

Kondensation erwartet, wenn die thermische De-Broglie-Wellenlänge der Teilchen vergleichbar mit ihrem Abstand ist.

Dies wird bei atomaren Gasen durch Abkühlen des Gases erreicht, da eine Erhöhung der Dichte zu Dreikörper-Stößen und damit zu Verlusten führen würde. Da dies bei Photonen nicht auftritt, kann in unserem Aufbau der einfacher zugängliche Weg über die Teilchendichte gewählt werden, um die Kondensation zu erreichen. Erhöht man bei gegebener Temperatur die Zahl der Photonen zwischen den Spiegeln und verringert damit ihren mittleren Abstand, so erhält man das erwartete Verhalten: Ab einer kritischen Teilchenzahl N_k von etwa 70 000 ist in Abbildung 2 neben einem breiten thermischen Schwanz ein spektral scharfer Peak zu beobachten: eine Signatur für die makroskopische Besetzung des energetisch tiefsten

Zustands. Das Bose-Einstein-Kondensat zeigt sich auch in der räumlichen Verteilung als helles Maximum auf einem breiten thermischen Untergrund.

Mit dem Photonen-BEC steht ein Modellsystem zur Untersuchung eines extrem schwach wechselwirkenden Quantengases zur Verfügung. Neben zahlreichen interessanten Aspekten für die Grundlagenforschung hat unser Verfahren auch praktische Anwendungen: Unter anderem sollte es möglich sein, neuartige kohärente Lichtquellen im kurzwelligen Ultraviolettbereich zu konstruieren.

[1] A. Einstein, Sitz.ber. Preuss. Akad. Wiss. 1925, 1, 3.

[2] J. Klaers et al., Nature 2010, 468, 545.

[3] J. Klaers et al., Nature Phys. 2010, 6, 512.

Jan Klaers, Julian Schmitt,
Frank Vewinger, Martin Weitz,
Uni Bonn

FESTKÖRPERPHYSIK

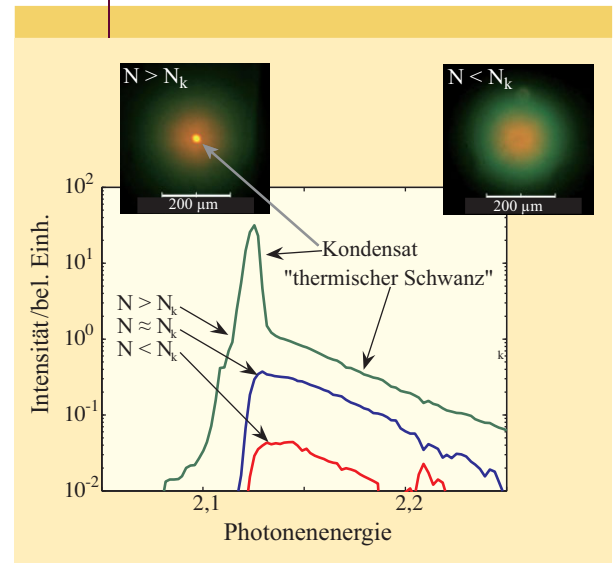
Dreidimensionale Abbildung magnetischer Domänen

Magnetische Domänen bilden die Grundlage für das Verständnis vieler magnetischer Phänomene und der Eigenschaften magnetischer Materialien. Ihre Existenz hat Pierre-Ernest Weiss bereits 1907 vorhergesagt [1], weshalb sie als Weiss-Bezirke bezeichnet werden. Mittlerweile gibt es zwar mehrere Verfahren zur Visualisierung magnetischer Domänen [1]. Sie sind jedoch alle auf die zweidimensionale Abbildung, zumeist an Oberflächen oder in dünnen Schichten, beschränkt. Am Zentrum für Materialien und Energie Berlin (HZB) hat unsere Gruppe eine Methode entwickelt, mit der sich das gesamte Netzwerk magnetischer Domänen sowie auch einzelne individuelle Domänenformen im Inneren von magnetischen Materialien dreidimensional abbilden lassen [2].

Das neue Verfahren basiert auf der Talbot-Lau-Tomographie mit Neutronen. Der Vorteil von Neutronen liegt zum einen in ihrer starken Wechselwirkung mit magnetischen Feldern und zum anderen in ihrer hohen Eindringtiefe in viele Materialien. Bei Eisen zum Beispiel beträgt sie einige Zentimeter. Der Spin der Neutronen

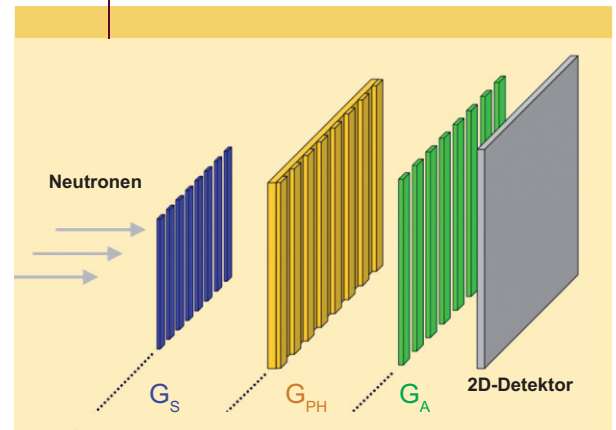
kann sich in einem Magnetfeld in zwei Vorzugsrichtungen einstellen: in Richtung des Magnetfeldes oder entgegengesetzt dazu. Die beiden möglichen Ausrichtungen führen zu leicht unterschiedlichen Brechungsindizes und damit zur Brechung des Neutronenstrahls an der Grenze zwischen zwei Domänen, wo die

ABB. 2 DAS ENERGIESPEKTRUM



Das Energiespektrum der Photonen zeigt unterschiedliches Verhalten, abhängig von der Photonenzahl im Resonator. Für kleine Photonenzahlen ergibt sich eine breite thermische Verteilung, für große Teilchenzahlen bildet sich zusätzlich ein charakteristischer Peak bei der Energie der Grundmode: das Bose-Einstein-Kondensat (links oben). Es erscheint in der räumlichen Verteilung der Photonen als helles Maximum.

ABB. 1 TALBOT-LAU-NEUTRONEN-TOMOGRAPHIE



Über ein Quellgitter G_S werden einzelne teilkohärente Strahlen definiert, von denen wiederum mit einem Phasengitter G_{PH} Beugungsbilder erzeugt werden, die sich additiv überlagern. Mit Hilfe eines Analysatorgitters und eines 2D-Detektors werden Amplitude und Phase des Beugungsbildes ortsaufgelöst bestimmt. Streuung an Domänenwänden führt dabei zu einer Verringerung der Amplitude und damit zur Erhöhung des sogenannten Dunkelfeldsignals.

Richtung des Magnetfeldes wechselt. Diese Ablenkung der Neutronen ist allerdings so klein, dass sie in einem einfachen Neutronenradiogramm praktisch nicht sichtbar ist.