

■ Neue Horizonte für Laser

Ein faszinierendes Experiment mit ultrakalten Atomen zeigt den Laser-Effekt von Ereignishorizonten.

Nichts, nicht einmal Licht, kann dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs entkommen oder in den Horizont eines Weißen Lochs eindringen. Doch wenn man ein Schwarzes mit einem Weißen Loch verbindet, erhält man einen Laser. Jeff Steinhauer vom Technion in Israel hat einen solchen unglaublichen Laser gebaut [1], natürlich mit Objekten, die sich analog zu den genannten Ereignishorizonten verhalten. Die Analogien beruhen auf einfachen Ideen aus der Physik von Wellen in bewegten Medien [2].

Man stelle sich einen Fluss vor, der immer schneller auf einen Wasserfall zuströmt (Abb. 1). Auf der Oberfläche breiten sich die Wellen relativ zum Wasser mit konstanter Geschwindigkeit aus. Ab einer bestimmten Stelle wird die Strömung so stark, dass sie schneller als die Wellen wird. Jenseits davon können sich Wellen nicht mehr flussaufwärts bewegen und werden mitgerissen. Diese Stelle verhält sich wie der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs – flussabwärts passieren die Wellen ungehindert, flussaufwärts sind sie hinter dem Horizont gefangen. Ersetzt man gedanklich die Wasser- durch Lichtwellen und den Fluss durch die Raumzeitgeometrie eines Schwarzen Lochs, so resultieren dieselben Wellengleichungen. Die Wellen im Fluss sind also nicht nur ein qualitatives Bild, sondern eine mathematisch exakte, quantitative Analogie zur Physik am Ereignishorizont.

Ganz präzise wird die Analogie, wenn das Medium ein ideales Fluidum ist, frei von Reibung und Turbulenz. Bose-Einstein-Kondensate von Alkaliatomen sind solche idealen Medien, in denen Schallwellen die Rolle der Wasserwellen übernehmen. Steinhauer greift in seinem Experiment [1] einen Vorschlag von Garay und Kollegen [3] auf und erzeugt Horizonte in bewegten Kondensaten, welche langgestreckt, zigarrenförmig und quasi-eindimensional sind. Licht bringt sie zum Fließen: Fokussiert

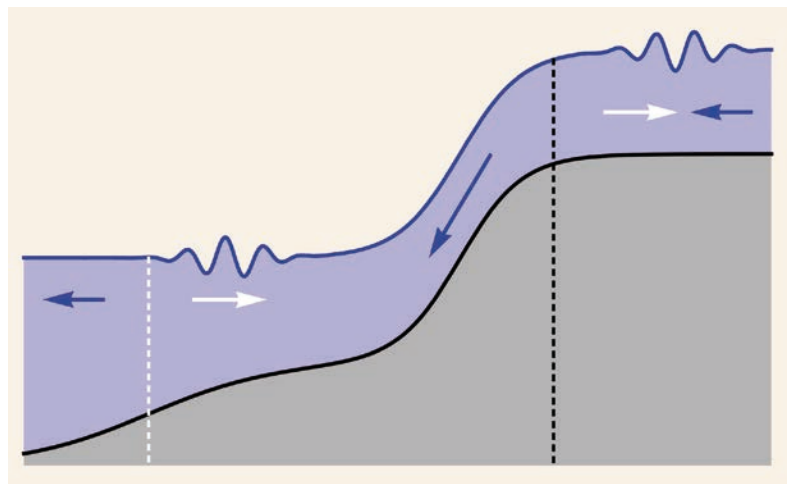


Abb. 1 Ereignishorizonte für Wellen in strömendem Wasser: Wenn die Flussgeschwindigkeit (blaue Pfeile) die Wellengeschwindigkeit (weiße Pfeile) erreicht, können sich Wellen nicht mehr stromaufwärts ausbreiten und sind hinter einem Horizont gefangen. Am Schwarzen Horizont (schwarz gepunktet) übersteigt die Flussgeschwindigkeit die Wel-

lengeschwindigkeit in Flussrichtung, am Weißen Horizont (weiß gepunktet) sinkt sie darunter. Den Schwarzen Horizont können Wellen nicht verlassen, in den Weißen nicht eindringen, dazwischen sind sie gefangen – falls sie anomal-dispersiv sind, was für Wasserwellen zwar nicht gilt, wohl aber für Schallwellen in Bose-Einstein-Kondensaten.

man einen Lichtfleck mit scharfer Kontrastkante auf das Kondensat, so entsteht eine Potentialschwelle. Das Kondensat wird vom Licht angezogen und strömt über die Schwelle wie der Fluss über den Wasserfall. Auf der anderen Seite des Lichtfleckes nimmt die Intensität allmählich ab, sodass das Kondensat dort potential-aufwärts fließt und immer langsamer wird. Steinhauer hat die Parameter in seinem Experiment so gewählt, dass das Kondensat direkt am Wasserfall die Schallmauer durchbricht und dann allmählich wieder unter die Schallgeschwindigkeit fällt. Es entstehen zwei Horizonte, am Wasserfall der eines extremen Schwarzen Lochs und auf der Potentialflanke der eines Weißen Lochs.¹⁾

Außerdem bewegte Steinhauer den Lichtfleck entgegen der Strömungsrichtung. Im mitbewegten Bezugssystem scheint das Kondensat von ganz allein zu fließen, das Licht sorgt nur für die Feinabstimmung. Der Trick hat den Vorteil, dass das Verhalten der beiden Horizonte weniger von der Eigen-dynamik des Kondensats abhängt

und hauptsächlich vom Licht dominiert wird.

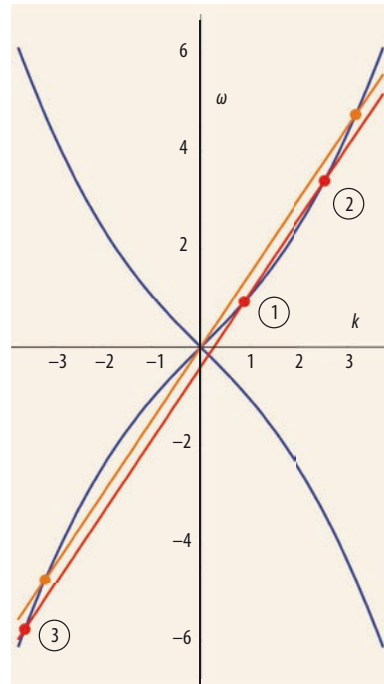
Was sagt die Theorie? 1999 analysierten Corley und Jacobson Paare von Weißen und Schwarzen Löchern und zeigten, dass die Horizonte eine Doppelrolle spielen, als Spiegel und als verstärkendes Medium eines Lasers [4]. Das lässt sich verstehen, wenn man sich ein Wellenpaket zwischen beiden Horizonten vorstellt, das versucht, sich flussaufwärts zu bewegen. Zwischen den Horizonten übersteigt allerdings die Fluss- die Wellengeschwindigkeit, sodass das Paket auf den Weißen Horizont zudriftet. Hier wird es immer langsamer, bis es an genau der Stelle zum Stillstand kommt, an welcher der Fluss wieder langsamer als die Wellen wird, d. h. am Weißen Horizont. Dort oszilliert die Welle auf immer engeren Raum, die Wellenlänge sinkt dramatisch, die Wellenzahl wächst exponentiell. Nun steigt aber für Bose-Einstein-Kondensate die Schallgeschwindigkeit mit wachsender Wellenzahl. Das gestauchte Wellenpaket wird schneller, kann entkommen und sich in

1) Schwarze und Weiße Löcher unterscheiden sich dadurch, ob am Horizont die Flussgeschwindigkeit zu- oder abnimmt.

Richtung Schwarzer Horizont auf den Weg machen. Dort passiert genau das Gegenteil: Die Welle dehnt sich wieder auf ihre ursprüngliche Wellenlänge aus, wird daher langsamer und fällt zurück. Das Wellenpaket ist zwischen den Horizonten gefangen – wie Licht zwischen den Spiegeln eines Lasers.

Zwei Horizonte ergeben einen Resonator. Wie aber entsteht daraus ein Laser? Die Dispersionsrelation der Wellen macht ersichtlich, dass zu jeder zwischen den Horizonten gefangenen Welle potenziell eine Partnerwelle gehört, mit genau gleicher Frequenz, aber negativer Wellenzahl (Abb. 2). Die Gruppengeschwindigkeit dieser Welle übersteigt die Flussgeschwindigkeit, ein solches Wellenpaket kann also den Horizonten enttrinnen. Das Wellenmuster, das Auf und Ab auf dem Wellenpaket, läuft dabei allerdings in die Gegenrichtung. Darin tritt die negative Wellenzahl in Erscheinung. Wir hatten Wasserwellen mit negativer Wellenzahl erstmals 2008 direkt beobachtet [5] und später auch indirekt Lichtwellen mit negativer Wellenzahl nachgewiesen [6]. Am bisher klarsten haben Weinfurter und Kollegen diese merkwürdigen Wellen gesehen [7]. Das Besondere an ihnen ist nicht ihre negative Wellenzahl, sondern eine fundamentale, klassische Eigenschaft von Wellen, die erstaunlich wenig bekannt ist.

Neben der Energie gibt es für Wellen nämlich eine weitere Erhaltungsgröße, ihre Norm. Im Welle-Teilchen-Dualismus gibt sie an, wie viele Teilchen zu einem Wellenpaket gehören. In bewegten Medien haben Wellen mit positiver Wellenzahl auch eine positive Norm, solche mit negativer Wellenzahl eine negative Norm, als ob sie zu Antiteilchen gehörten. Das zwischen den Horizonten gefangene Wellenpaket mit positiver Norm hat gleiche Frequenz und Energie wie eine Partnerwelle mit negativer Norm. Daher kann ein Teil des Wellenpakets in die Partnerwelle konvertieren. Dieser stark nichtadiabatische Prozess wird am stärksten an den Stellen, an denen sich die Wellenzahl am dramatischsten



ändert, d. h. an den Horizonten. In Steinhauers Experiment ist das besonders stark am Wasserfall – daher wurde der Schwarze Horizont dorthin verlegt. Angenommen, ein Teil des Pakets mit positiver Norm wird dort in eine Welle mit negativer Norm konvertiert. Wegen der Normerhaltung muss das reflektierte Wellenpaket intensiver werden. Die Horizonte agieren daher auch als Verstärker. Die dazu notwendige Energie entnehmen sie dem bewegten Kondensat.

Dieser Verstärkungsmechanismus ist die klassische Grundlage der Hawking-Strahlung [8]. Diese hypothetische Strahlung Schwarzer Löcher entspricht schlicht dem Verstärkerrauschen, wobei das Rauschen von den Vakuumfluktuationen am Horizont ausgelöst wird. In Steinhauers Experiment können die Fluktuationen im quantenmechanischen Grundzustand des Kondensats den Laser in Gang setzen. Aus winzigen Fluktuationen wächst ein Wellenpaket, das mit jeder Runde zwischen den Horizonten stärker wird – solange der Vorrat, d. h. das Kondensat, reicht. Steinhauer hat das Wachsen der Welle zwischen den Horizonten mit einem Phasenkontrastmikroskop in Echtzeit aufgezeichnet. Es ist allerdings nicht vollkommen klar, ob die Welle tatsächlich aus Vakuumfluktuationen stammt.

Abb. 2 Da für Bose-Einstein-Kondensate die Schallgeschwindigkeit c mit der Wellenzahl k steigt, ist die Dispersionsrelation von Schallwellen, $+ck$ bzw. $-ck$, keine Gerade (blau). Die Gruppengeschwindigkeit v entspricht dem Anstieg $d(ck)/dk$. In einem Kondensat mit lokaler Geschwindigkeit u können Wellen existieren, wenn ck gleich der dopplerverschobenen Frequenz $\omega - uk$ ist. Die rote Linie zeigt $\omega - uk$ für eine negative Frequenz ω zwischen den Horizonten, wo $-u$ die Schallgeschwindigkeit übersteigt (u ist negativ, da das Kondensat von rechts nach links fließt). Es gibt hier drei mögliche Wellen (rote Schnittpunkte): eine mit $k > 0$ und $v < |u|$ – diese Welle (1) drifftet auf den Weißen Horizont zu, wo sie in die zweite Welle mit $k > 0$ und $v > |u|$ konvertiert wird, die auf den Schwarzen Horizont zuläuft (2). Dort wird sie zum Teil in eine Welle mit $k < 0$ umgewandelt (3) und verstärkt. In Steinhauers Experiment ist $\omega = 0$ (orange Linie). Diese Welle entspricht einer stationären Undulation $\exp(ikx) + \exp(-ikx)$ mit positiven und negativen Wellenzahlen (orange Punkte).

Der entscheidende Nachweis für den Quantenursprung der Hawking-Strahlung und verwandter Phänomene sind Quantenkorrelationen. Steinhauer hat Dichtekorrelationen durch Mittelung aus seinen Phasenkontrastbildern erhalten. Sie zeigen, dass die Amplitude der Welle an einem Ort mit der an einem anderen korreliert ist, auf ein „Ab“ folgt stets ein „Auf“ usw. Das ist aber normal für Wellen und hat absolut nichts mit Teilchenkorrelationen zu tun. Die Dichtekorrelationen zeigen nur, dass zwischen den Horizonten eine kohärente Welle entsteht, der Laser ist tatsächlich ein Laser. Steinhauer ist ein faszinierendes Experiment gelungen, das eine Reihe interessanter Wellenprozesse zeigt. Ob es aber tatsächlich mit der Strahlung Schwarzer Löcher zu tun hat, bleibt zu klären.

Ulf Leonhardt

- [1] J. Steinhauer, Nat. Phys. **10**, 864 (2014)
- [2] W. G. Unruh, Phys. Rev. Lett. **46**, 1351 (1981)
- [3] L. J. Garay, J. Anglin, J. I. Cirac und P. Zoller, Phys. Rev. Lett. **85**, 4643 (2000)
- [4] S. Corley und T. Jacobson, Phys. Rev. D **59**, 124011 (1999)
- [5] G. Rousseaux et al., New J. Phys. **10**, 053015 (2008)
- [6] E. Rubino et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 253901 (2012)
- [7] S. Weinfurter et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 021302 (2011)
- [8] S. W. Hawking, Nature **248**, 30 (1974)

Prof. Dr. Ulf Leonhardt, Weizmann Institute of Science, 76100 Rehovot, Israel