

Wie Schwarze Löcher leuchten

Mithilfe eines optischen Analogsystems ist es nun gelungen, Hawking-Strahlung mit externem Licht zu stimulieren.

Friedrich König

Schwarze Löcher sind ein faszinierendes Phänomen, da sie uns an die Grenzen der bekannten Physik führen. Diese astronomischen Objekte vereinigen große Massen auf so kleinem Raum, dass die Raum-Zeit nach der Allgemeinen Relativitätstheorie extrem stark gekrümmt wird. Die Fluchtgeschwindigkeit innerhalb des Schwarzschild-Radius übersteigt die Lichtgeschwindigkeit, sodass sowohl Materie als auch Licht der Anziehung nicht mehr entkommen können und in das Zentrum des Schwarzen Lochs fallen. Inneres und Äußeres des Schwarzen Lochs befinden sich somit auf unterschiedlichen Lichtkegeln und sind durch den „Ereignishorizont“ kausal getrennt.

Stephen Hawking fand heraus, dass Schwarze Löcher aufgrund von Quantenfluktuationen trotzdem Strahlung emittieren, also nicht ganz schwarz sind [1]. In einem einfachen Bild entsteht Hawking-Strahlung, wenn spontan entstehende virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare durch den Horizont getrennt und somit zu realen Paaren werden, indem sie auf getrennte Lichtkegel geraten. Zu jedem Teilchen, das nach außen entkommt, gehört also ein Antiteilchen, welches in das Schwarze Loch hinein fällt. Die Emission endet praktisch mit der „Verdampfung“ der gesamten Teilchenmasse in Energie. Quanteneffekte spielen hier also bei durchaus hohen Energien eine wichtige Rolle.

Den Horizont kann man in folgender einfacher Analogie verstehen (**Abb. 1**): Wenn ein Fluss auf einen Wasserfall zufließt, so erhöht sich die Fließgeschwindigkeit. Dies bedeutet, dass Schallwellen, mit denen sich Fische in diesem Fluss verständigen, ab einem bestimmten Punkt mit dem Wasser in den Wasserfall (das Schwarze Loch) mitgerissen werden. Fische jenseits dieses Punktes, der dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs entspricht, können also ihren Kolle-

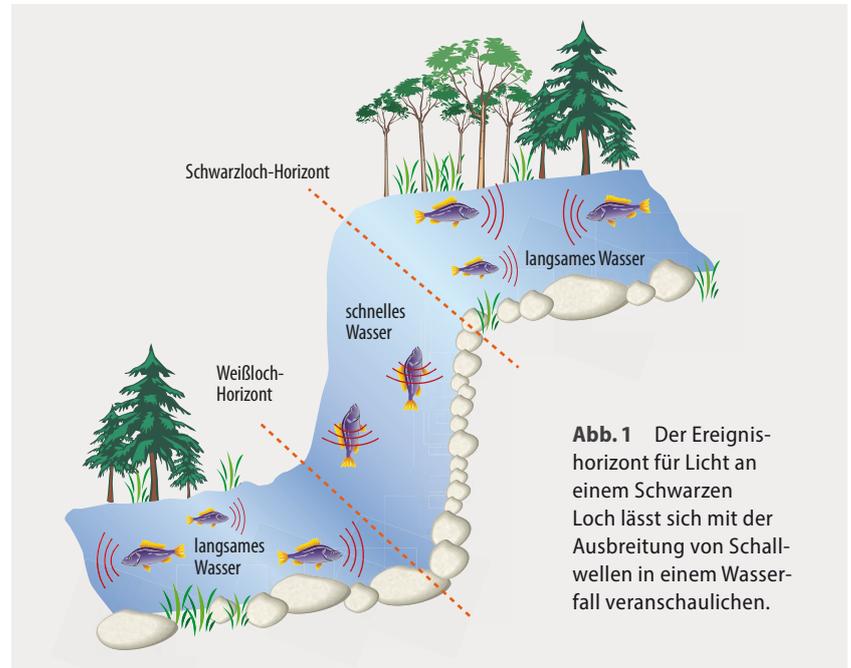


Abb. 1 Der Ereignishorizont für Licht an einem Schwarzen Loch lässt sich mit der Ausbreitung von Schallwellen in einem Wasserfall veranschaulichen.

gen flussaufwärts nichts mitteilen. Am Fuße des Wasserfalls fließt das Wasser wieder langsam, und ein „Weißloch-Horizont“ entsteht, den flussaufwärts laufende Wellen nicht überwinden können.

Die Hawking-Strahlung, die von astronomischen Schwarzen Löchern emittiert wird, ist sehr schwach. Ein Schwarzes Loch von einer Sonnenmasse emittiert thermische Strahlung mit einer Temperatur von sechs Nanokelvin. Da dies weit unterhalb der Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung liegt, gilt sie als nicht messbar. Die Analogie mit dem Wasserfall kann hier hilfreich sein, denn sie geht weiter, als man meinen könnte: Bill Unruh untersuchte diese Wellenausbreitung in Flüssigkeiten und fand, dass die Wellenfelder einer Metrik unterliegen wie die Quantenfelder in gekrümmter Raum-Zeit [2]. Das führte zur Suche nach Quantenflüssigkeiten, die auf analoge Weise Hawking-Strahlung emittieren könnten. So lässt sich ein Bose-Einstein-Kondensat als Flüssigkeit verwenden, das ähnlich wie der Was-

serfall über ein Laserfeld als Barriere fließt. Die Hawking-Strahlung besteht dann aus spontan emittierten Phononenpaaren. Hier gelang kürzlich ein vielversprechender Fortschritt bei der Erzeugung von Phononenpaaren [3].

Um jedoch die schwache Strahlung ohne thermischen Hintergrund zu messen und Paare von individuellen Teilchen zu isolieren, bieten sich besonders optische Methoden für ein Analogon an. Mit Hilfe der Quantenoptik lassen sich einzelne Photonen manipulieren und detektieren. In der Wasserfall-Analogie bedeutet dies jedoch, dass ein optisches Medium mit Lichtgeschwindigkeit am Horizont vorbeibewegt werden muss. Dieses Problem lässt sich lösen, indem man nicht das Medium, sondern die Horizonte bewegt [4] (**Abb. 2**): Ein optischer Puls propagiert dabei durch ein Medium. Durch den Kerr-Effekt erhöht sich leicht die Brechzahl unter dem Puls. Dieser fast instantane Effekt erzeugt einen Brechzahl-Puls, der mit Lichtgeschwindigkeit durch das Medium läuft. Weiteres Licht, das nur knapp schneller ist als der Puls,

aber unter den Puls gerät, „fällt“ in den Puls wie Objekte in einen Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs. Licht, das den Puls von der Rückseite erreicht, wird ebenfalls abgebremst und kann nicht in den Puls eindringen. Dies entspricht dem Horizont eines Weißen Lochs.

Die Detektion der Hawking-Strahlung ist auch in der Optik nicht einfach, weil optische Medien starke Dispersion aufweisen und die nicht-lineare Brechzahländerung klein ist. Die relativ hohe Energie der Quanten bedeutet, dass man sehr steile Horizonte benötigt, um Strahlung von messbarer Größe zu erzeugen. Die Steilheit des Horizonts, also die lokale Beschleunigung am Horizont, ist proportional zur Temperatur des Schwarzen Lochs. Für eine hohe Temperatur (~1000 K) darf der Horizont nicht länger sein als die Wellenlänge der Emission. Zunächst geht es also darum, den stimulierten Effekt der Emission zu beobachten, um die konkreten Bedingungen für die Detektion der spontanen Emission zu erforschen. Stimulierung bedeutet hier, dass Hawking-Strahlung durch Licht, das auf den Horizont eingestrahlt wird, erzeugt wird. Diese stimulierte Emission wurde zuerst 2012 gemessen [5] und beobachtet, dass die Photonen des Pulses selbst Hawking-Strahlung stimulieren können.

Kürzlich ist es einer Arbeitsgruppe am Weizmann-Institut in Rehovot

(Israel) erstmals gelungen, diese Stimulation mit unabhängigem Probenlicht über einen weiten Frequenzbereich zu erzeugen [6]. Die Forscher verwendeten im Experiment zwei photonische Kristallfasern und spalteten damit einen Laserpuls von acht Femtosekunden Länge in zwei Teile auf. Der eine Teil wurde in der ersten Faser in der Wellenlänge verschoben, mit Hilfe stimulierter Ramanstreuung an Phononen in der Faser (Selbstfrequenzverschiebung). Dieser danach etwa 50 Femtosekunden lange Puls dient als schwache stimulierende Probe, die auf einen Horizont einfällt, der von dem anderen Teil des Pulses in der zweiten Faser erzeugt wird. Je nach Frequenz der Probe nähert sie sich entweder mit größerer Geschwindigkeit von hinten dem „Weißloch-Horizont“ an oder kommt von vorne und langsamer dem „Schwarzloch-Horizont“ des Horizont-Pulses entgegen. An beiden Seiten dieses Pulses wird das Licht auf solche Weise frequenzverschoben, dass es sich von dem Puls entfernt (Blauverschiebung am Weißloch-Horizont). Neben dieser klassischen Frequenzverschiebung, die sich durch den Dopplereffekt an einem bewegten Spiegel erklären lässt, kommt es aber eben auch zur stimulierten Emission von Licht bei verschiedenen Frequenzen. Detektieren lässt sich hier die Emission im Ultravioletten am Weißloch-Horizont, was beim astronomischen

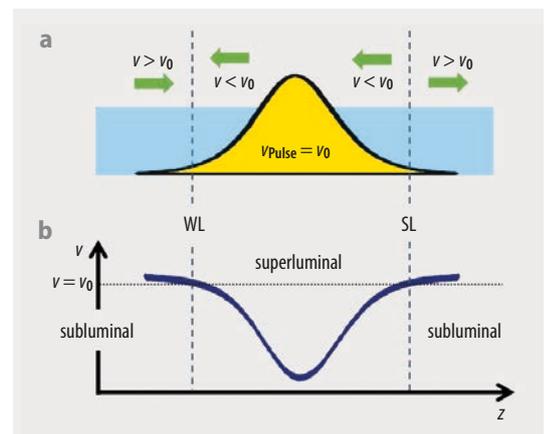


Abb. 2 Ein optischer Puls (a, gelb) bewegt sich in einem optischen Medium (blau): Der Kerr-Effekt erhöht die Brechzahl unter dem Puls, sodass anderes Licht dort eventuell unter die Pulsgeschwindigkeit v_0 verlangsamt wird (lokale Geschwindigkeit: grüne Pfeile). Der Puls bewegt sich dann superluminal im Laborsystem (b) und das Medium bewegt sich superluminal im mitbewegten System.

Schwarzen Loch den hineinfallenden Teilchen entspricht. Die detektierte Komponente ergibt sich als die Differenz von Spektren, die mit und ohne Probenlicht gemessen wurden und wurde mit immerhin 5000 Photonen pro Sekunde registriert.

Auch wenn dieses Pionierexperiment stark vom Rauschen der Probe beeinflusst war, ist es ein großer systematischer Schritt zur Erforschung der analogen optischen Horizonte. Das Ziel wird hier nicht nur die Detektion der Hawking-Strahlung selbst sein, sondern auch die Analyse der Quanteninformation am Horizont. Dank der Neuartigkeit dieses parametrischen Verstärkers könnten sich auch Anwendungen für Telekommunikation oder Photodetektion abzeichnen.

- [1] S. W. Hawking, *Nature* **248**, 30 (1974)
- [2] W. G. Unruh, *Phys. Rev. Lett.* **46**, 1351 (1981)
- [3] J. R. M. de Nova et al., arXiv:1809.00913 (2018)
- [4] T. G. Philbin et al., *Science* **319**, 1367 (2008)
- [5] E. Rubino et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 253901 (2012)
- [6] J. Drori et al., *Phys. Rev. Lett.* **122**, 010404 (2019)

Autor

Dr. Friedrich König, University of St. Andrews, North Haugh, St. Andrews KY16 9SS, Großbritannien

Die Milchstraße als Mittelschergewicht

Die Masse der Milchstraße inklusive der Dunklen Materie liegt bei rund 1,5 Billionen Sonnenmassen innerhalb eines Radius von 129 000 Lichtjahren um das galaktische Zentrum. Das ergibt sich aus neuen Messungen der Geschwindigkeiten von Kugelsternhaufen im Halo der

Milchstraße, die aus dem zweiten Daten-Release der Gaia-Mission stammen sowie aus Daten des Hubble-Weltraumteleskops. Bislang lagen die Schätzungen für die galaktische Gesamtmasse zwischen 0,5 bis 3 Billionen Sonnenmassen.

L. L. Watkins et al., *ApJ* **873**, 118 (2019)

