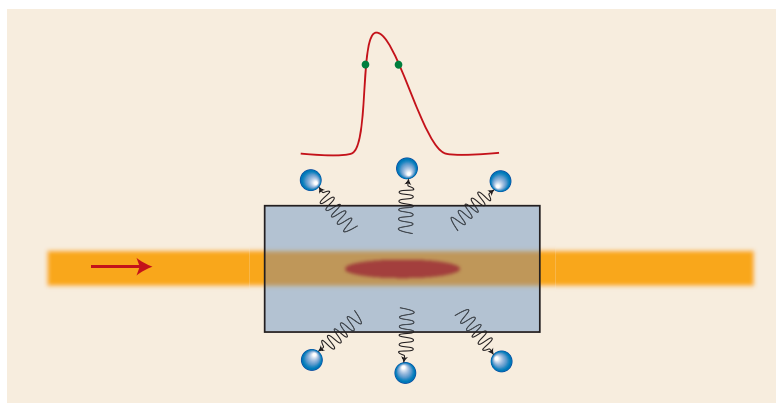


Strahlung hinterm Horizont

Vor über 30 Jahren vorhergesagt, ist es kürzlich gelungen, Hawking-Strahlung in einem optischen Laborexperiment nachzuweisen.

Im Jahr 1974 veröffentlichte Stephen Hawking in *Nature* eine erstaunliche Arbeit [1]: Er zeigte theoretisch, dass Schwarze Löcher nicht vollkommen schwarz sind, sondern Wärmestrahlung aussenden, als ob ein Schwarzes Loch ein Schwarzer Körper sei, dessen Temperatur von der Masse des Lochs abhängt. Hawking gab in *Scientific American* eine einfache Erklärung für diese Emission: Laut Quantentheorie ist der leere Raum nicht vollkommen leer, sondern von virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paaren erfüllt, die ständig entstehen und vergehen. Der Horizont eines Schwarzen Lochs kann einige Paare trennen, sodass ein Teilchen auf der äußeren und sein Partner auf der inneren Seite des Horizonts entsteht. Da das Teilchen seinen Partner nicht finden kann, muss es sich notgedrungen dauerhaft materialisieren. Diese Soloteilchen bilden die Hawking-Strahlung.

Dieses Phänomen verbindet mit Gravitation, Quantenphysik und Thermodynamik drei sehr unterschiedliche Gebiete der Physik. Es gilt daher als ein Prüfstein für Quantentheorien der Gravitation. Nur ist Hawkings Erklärung viel zu einfach und sollte nicht allzu wörtlich genommen werden – sie erklärt zum Beispiel nicht, warum sich Hawking-Strahlung wie Wärmestrahlung verhält. Seine Rechnungen sind alles andere als einfach und in ihnen stecken Annahmen, die physikalisch zweifelhaft sind – zum Beispiel die, dass die Frequenzverschiebung am Horizont unendlich sei. Ob Hawking-Strahlung tatsächlich existiert und sich so verhält, wie es die Theoretiker gerne glauben, ist ein klarer Fall für das Experiment. Setzt man allerdings Zahlen in Hawkings Formel ein, so zeigt sich, dass die Strahlung realistischer Schwarzer Löcher als Endstadium massereicher Sterne viel zu kalt und vollkommen vom kosmischen Hintergrund überdeckt wäre. Ein direkter Nachweis in der



Ein starker infraroter Lichtpuls erzeugt in Glas eine Veränderung des Brechungsindex, die sich mit dem Puls bewegt (rot). In den Flanken des Pulses können

Horizonte entstehen (Punkte oben), die virtuelle Photonenteile trennen, sodass sich reelle Hawking-Strahlung nachweisen lässt.

Astrophysik scheint daher ausgeschlossen.

Kürzlich ist es einem italienischen Team um Daniele Faccio gelungen, in einem optischen Versuch künstliche Hawking-Strahlung zu erzeugen [2]. Die von uns seit 2004 in St. Andrews entwickelte Idee dazu ist von einer Analogie inspiriert, die sich William Unruh von der University of British Columbia 1972 ausgedacht hatte: Das Gravitationsfeld um ein Schwarzes Loch verhält sich demnach wie ein Fluss, der auf einen Wasserfall, die Singularität, zufließt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird immer höher und erreicht irgendwann die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserwellen. Jenseits von diesem Punkt, dem Horizont, kann sich also keine Wasserwelle mehr flussaufwärts über den Horizont hinaus ausbreiten. Es stellt sich heraus, dass die Temperatur der Hawking-Strahlung proportional zum Gradienten der Geschwindigkeit am Horizont ist (und diese ist proportional zur Masse des Schwarzen Lochs). Ich hatte mir überlegt, wie man Unruhs Strömung mit einfachen Mitteln in der Optik realisieren kann, und dazu Lichtpulse in Glasfasern betrachtet. Aufgrund des elektrooptischen Kerr-Effekts beeinflusst das elektrische Feld eines starken Lichtpulses den Brechungsindex in der Faser so, dass die Lichtge-

schwindigkeit an der Stelle, an der sich der Puls gerade befindet, abnimmt. Dies ist als flöge ein zusätzliches Stück Glas mit dem Puls durch die Faser. Angenommen wir setzen uns, wie in einem der Gedankenexperimente von Einstein, auf eine Lichtwelle, die in der Faser propagiert und deren Geschwindigkeit aufgrund der normalen Dispersion von der Wellenlänge abhängt. In diesem mitbewegten System würde uns das Glas entgegenrasen, ganz wie Unruhs Strömung. Am Puls nimmt durch das langsamere Licht die Relativgeschwindigkeit zu – das Glasstück scheint schneller zu strömen. An zwei Stellen, in der Vorder- und Hinterflanke, erreicht es die Geschwindigkeit der Welle und bildet den Horizont eines Schwarzen Lochs vorne und den eines Weißen Lochs hinten (Abb.). (Ein Weißes Loch ist ein zeitumgekehrtes Schwarzes Loch, also eine Singularität, aus der Energie und Materie herausströmt.) Diese Horizonte sind aufgrund der Quantenphysik auch dann vorhanden, wenn außer dem Puls gar keine andere Lichtwelle vorhanden ist. Die Vakuumfluktuationen des Lichts nehmen sie trotzdem wahr und können sich zum Teil in Hawking-Photonen verwandeln. Die Steilheit des Pulses an den Horizonten bestimmt die Intensität der Hawking-Strahlung sowie die Hawking-Temperatur,

ähnlich wie der Geschwindigkeitsgradient in Unruhs Analogie. Die Strahlung wird sich nur dann nachweisen lassen, wenn die Pulse sehr kurz sind oder scharfe Flanken herausbilden. Wir hatten 2008 die Idee und erste experimentelle Ergebnisse veröffentlicht [3].

Faccio, der seit Herbst an der Heriot Watt University in Edinburgh arbeitet, benutzte in einer weiteren Vereinfachung einen soliden Glasstab anstelle einer Faser [2]. Im Glas wirkt der Kerr-Effekt auch auf den Puls selbst: Dank der Erhöhung der Brechzahl erzeugt der Puls ein Brechzahlprofil, das ihn wie eine Faser führt. Je intensiver das verwendete infrarote Licht (Wellenlänge: 1055 nm), desto langsamer wird es. Der intensivste Teil des Pulses fällt daher zurück, sodass die Hinterflanke immer steiler wird, bis sie wie eine Welle am Meeresufer bricht und eine scharfe Stoßfront bildet. An diesem Horizont (eines Weißen Lochs) entsteht dann Hawking-Strahlung, die aufgrund der Linsenwirkung des Pulses seitlich abgelenkt wird und sich mit einer CCD-Kamera nachweisen lässt. Im Experiment hängt die Strahlung nicht von der Polarisation des Pulses ab, was auf einen spontanen Quanteneffekt deutet. Das Strahlungsspektrum liegt „korrekt“ bei Wellenlängen um 850 nm, bei denen die Lichtgeschwindigkeit im Glas die Pulsgeschwindigkeit erreicht. (Die Geschwindigkeit des Pulses lässt sich durch ein laterales Pulsprofil verändern.) Faccios experimentelle Ergebnisse stimmen

mit einigen wichtigen Kriterien für Hawking-Strahlung überein. Ein direkter Nachweis der Quantennatur der Strahlung steht allerdings noch aus. Da die Hawking-Strahlung immer paarweise emittiert wird, sollte man die Korrelationen der Photonen messen. Im Glasstab ist das schwierig, weil die Photonen durch das Brechzahlprofil des Pulses abgelenkt werden und dabei durcheinander geraten. In Fasern ist die Hawking-Strahlung aber ausgerichtet, sodass hier der ultimative Test möglich scheint.

Faccios Experiment bestätigt, dass Hawking-Strahlung existiert – selbst in optischen Analogien und nicht nur in realen Schwarzen Löchern. Entscheidend hierfür ist allein die Existenz eines Horizonts, der virtuelle Teilchenpaare trennt. Das Experiment zeigt aber auch noch unverstandene quantitative Unterschiede zu Hawkings Theorie. Zum Beispiel ist das gemessene Spektrum kein thermisches Planck-Spektrum. Wie häufig, wenn Experiment und Theorie zum ersten Mal aufeinandertreffen, gibt es Überraschungen. Grau ist alle Theorie, selbst die Schwarzer und Weißer Löcher. Experimente erfüllen sie mit Farbe und Leben.

Ulf Leonhardt

- [1] S. W. Hawking, *Nature* **248**, 30 (1974)
 [2] F. Belgiorno, S.L. Cacciatori, M. Clerici, V. Gorini, G. Ortensi, L. Rizzi, E. Rubino, V.G. Sala und D. Faccio, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 203901 (2010)
 [3] T. G. Philbin, C. Kulewicz, S. Robertson, S. Hill, F. König und U. Leonhardt, *Science* **319**, 1367 (2008)

KURZGEFASST

■ Ins Innere eines Moleküls geschaut

Mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich gelang es kalifornischen Forschern, einzelne Orbitale eines Magnesium-Porphyrin-Moleküls zu kartieren. Dazu regten sie mit den Elektronen eines Rastertunnelmikroskops Strahlungsübergänge an einzelnen Stellen des Moleküls an. Dabei zeigten sich spektrale Unterschiede der Fluoreszenz zwischen benachbarten Pyrrolringen des Porphyrins, verursacht durch die Adsorption auf dem verwendeten Substrat.

Ch. Chen et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 217402 (2010)

■ Positronium streut wie Elektronen

Streuversuche am University College London ergaben, dass Positronium (Ps) entgegen den Erwartungen den gleichen Wirkungsquerschnitt aufweist wie ein einzelnes Elektron. Dabei ist das Ps, ein „Atom“ aus einem Elektron und seinem Antiteilchen, elektrisch neutral und hat die doppelte Masse. Bei der Berechnung der Wirkungsquerschnitte ist offenbar eine Zweikörpernäherung zu ungenau. Das Ergebnis betrifft auch Prozesse in der Astrophysik und der Medizin, an denen Ps beteiligt ist.

S. J. Brawley et al., *Science* **330**, 789 (2010)