

Stephen Hawking (1942 - 2018)



Abb. 1: Der theoretische Physiker Stephen Hawking verstarb am 14.03.2018 im Alter von 76 Jahren in Cambridge.
© public domain, NASA

HAWKING befasste sich mit Kosmologie, sein Denken war also auf das ganze Universum gerichtet und bewegte sich häufig an den Grenzen einer erkennbaren Wirklichkeit. In der breiten Öffentlichkeit wurde Hawking in erster Linie durch seine populärwissenschaftlichen Werke bekannt. In diesen versuchte er seine Erkenntnisse und den jeweils aktuellen Stand der theoretischen Astro-Physik in einer leicht verständlichen Form zu vermitteln. HAWKING drang mit seiner Arbeit gedanklich tief in exotische physikalische Objekte wie Singularitäten und Ereignishorizonte ein und zeigte, dass die bekannte Physik unter diesen extremen Bedingungen versagt. Um das Wirken und die Bedeutung dieses theoretischen Physikers aufzuzeigen, ist es wohl am besten, einen kurzen (und sicher unvollständigen) Überblick über sein Schaffen zu geben.

Singularitäten

EINSTEIN'S Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beschreibt wie sich die Raumzeit unter dem Einfluß von Massen verhält. Nimmt man eine gegebene Masse und verringert ihr Volumen, verdichtet sie also, wird die Raumzeit um diese Masse herum stärker gekrümmt. Irgendwann wird dabei die Dichte unendlich groß und der Durchmesser Null. Physiker bezeichnen solche Zustände, bei denen Unendlichkeiten auftreten, als Singularität.

Bis Mitte der 1960er ging man noch davon aus, dass diese Singularitäten bedeutungslos seien und durch vereinfachende Annahmen in der Theorie eliminiert werden könnten. Man war also zuversichtlich dieses leidige Problem unrealistischer Lösungen der EINSTEIN'schen Feldgleichung irgendwie loswerden zu können.

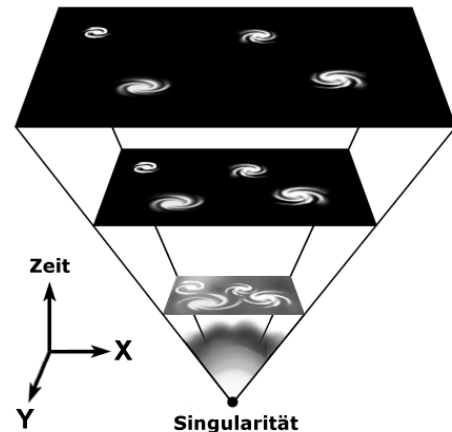


Abb. 2: Die Urknall-Singularität,
© Wikipedia, Leipnizkeks, CC-BY-SA 3.0

Doch dann veröffentlichte HAWKING 1966 eine Arbeit [1], in der er den mathematischen Beweis erbrachte, dass auch mit nur wenigen, vernünftigen Annahmen und der Tatsache, dass Gravitation immer anziehend wirkt, in der ART Singularitäten auftreten müssen und nicht eliminiert werden können. HAWKING erbrachte damit den mathematischen Beweis, dass sowohl Schwarze Löcher als auch die Urknallsingularität im Rahmen der ART real sind und nicht eliminiert werden können. Dies bedeutet jedoch auch, dass Einsteins ART in der Nähe von Singularitäten keine zuverlässigen physikalischen Aussagen mehr machen kann. Eine klassische Beschreibung von Schwarzen Löchern und dem Beginn des Universums ist also nicht möglich.

HAWKING'S wegweisende Erkenntnis war somit, dass zur Erforschung des Urknalls sowie der Schwarzen Löcher eine Theorie benötigt wird, die über die ART hinausgeht.

Thermodynamik Schwarzer Löcher

1971 veröffentlichte HAWKING eine Arbeit über kollidierende Schwarze Löcher [2]. In dieser Arbeit stellte er fest, dass kollidierende Schwarze Löcher durch Gravitationswellen Energie abgeben können. Die Fläche des Ereignishorizonts des entstehenden Schwarzen Loches ist bei diesem Prozess jedoch immer größer als die Ereignishorizontflächen der beiden kollidierenden Schwarzen Löcher. Hier erkannte HAWKING die Analogie zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik, nach dem die Entropie bei physikalischen Prozessen immer zunimmt.

$$S_{SL} = \frac{k_B c^3 A}{4\hbar G} = \frac{k_B A}{4l_P^2}$$

1972 definierte Jacob BEKENSTEIN, ein weiterer Begründer der Thermodynamik Schwarzer Löcher, die Entropie eines Schwarzen Lochs als die Fläche des Ereignishorizontes. Seitdem spricht man von der Bekenstein-Hawking-Entropie.

1973 publizierte HAWKING gemeinsam mit John BARDEEN und Brandon CARTER eine Arbeit [3], in der vier Grundaussagen über Schwarze Löcher analog zu den vier Hauptsätzen der Thermodynamik formuliert wurden.

HAWKINGs Arbeiten zur Thermodynamik Schwarzer Löcher führten in der Folge zu fruchtbaren Diskussionen über die allgemeinen Grundlagen der modernen Physik. (s. Das Entropie- oder Informationsparadoxon)

Die Hawking-Strahlung

In seinen Arbeiten zur Thermodynamik Schwarzer Löcher zeigte HAWKING, dass Schwarze Löcher nicht gegen die Gesetze der Thermodynamik verstoßen. Dann sollten sie aber auch eine Temperatur haben und Strahlung abgeben. Nun sind Schwarze Löcher aber so definiert, dass sie dies gerade nicht tun. Die Gravitation verhindert, dass weder Materie noch Information den Ereignishorizont überschreiten und dem Schwarzen Loch entkommen kann.

$$T_{Hawking} = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}$$

Diesen Widerspruch löste HAWKING in seiner wohl bedeutendsten Arbeit [4] von 1975 auf. In dieser Arbeit zeigte HAWKING, dass Schwarze Löcher "nicht ganz" schwarz sind. Zu diesem Ergebnis kam er durch Anwendung der Quantenfeldtheorie am Ereignishorizont und stellte damit eine Verbindung zwischen Quantentheorie und ART her.

Die übliche Erklärung dieser Strahlung verweist auf Quantenfluktuationen, also das spontane Entstehen von virtuellen Teilchen, am Ereignishorizont.

Virtuelle Teilchenpaare (Teilchen / Antiteilchen) entstehen im Vakuum spontan und zerstrahlen anschließend beim Wiedervereinigen. Sie existieren nur sehr kurze Zeit, so dass sie einzeln nicht nachgewiesen werden können. Dies gilt jedoch nicht für die Quantenfluktuationen insgesamt (s. Lamb-Shift, Casimir-Effekt).

Wird das Teilchenpaar getrennt, indem eines der Teilchen hinter den Horizont fällt, fehlt dem zurückbleibenden Teilchen außerhalb des Horizontes sein Partner mit dem es sich wiedervereinigen könnte.

Dieses Teilchen bleibt somit erhalten und kann dem Schwarzen Loch entkommen. Aus einem virtuellen Teilchen wurde ein reales Teilchen. Die Summe dieser Teilchen bildet die sogenannte HAWKING-Strahlung.

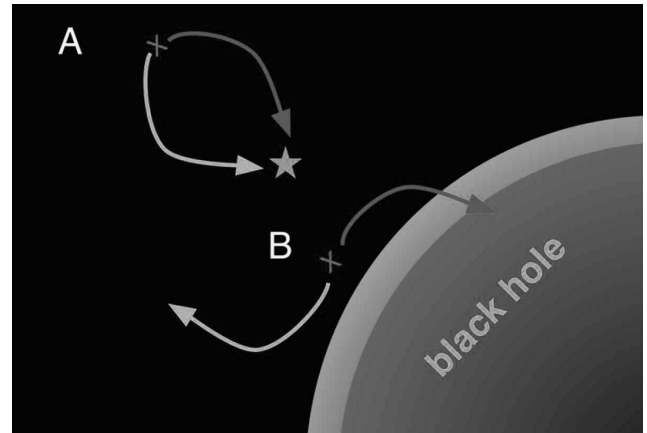


Abb. 3: Entstehung der Hawking-Strahlung, © Christoph Adami CC-BY-ND

Dies ist die häufigste, aber wohl nicht ganz richtige Erklärung der HAWKING-Strahlung. Sie gilt nur für den Fall, dass die Strahlung direkt am Ereignishorizont entsteht. Dies ist aber nicht der Fall.

Hier nun ein Versuch einer Erklärung in meinen Worten. HAWKING betrachtete Schwarze Löcher durch die Brille der Mathematik. In dieser Betrachtung entsteht die Hawking-Strahlung nicht nur direkt am Ereignishorizont, sondern auch in einem bestimmten Bereich hinter (!) dem Ereignishorizont.

In der Quantenmechanik sind Teilchen Anregungszustände eines Feldes das unter Berücksichtigung von Raum und Zeit beschrieben wird (Wellenfunktion). Führt man einem Feld Energie zu entstehen gemäß $E=mc^2$ Teilchenpaare. Dies geschieht natürlich auch im Vakuum – der Vakuumzustand ist der Zustand niedrigster Energie der Felder – und die Energie bestimmt, wie welche Art von Teilchen und wie viele Teilchen entstehen können.

Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation besagt, dass die komplementären Größen Ort und Impuls eines Teilchen nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können. Diese Aussage gilt analog auch für die Größen Energie und Zeit, d.h. kennt man die Energie eines Systems sehr genau, weiß man nichts über die Zeit, kennt man die genaue Zeit, weiß man nichts über die Energie. Raum und Zeit sind in der Relativitätstheorie zu einer Einheit, der Raumzeit, verbunden, und unsere Wahrnehmung ist von unserem Bewegungszustand abhängig. Zudem sind Beschleunigung und Gravitation äquivalent.

Berücksichtigt man beide Theorien, kommt man zu dem Schluss, dass Beobachter in verschiedenen Bezugssystemen den Vakuumzustand unterschiedlich beschreiben.

Somit kann ein Beobachter A in einem ruhenden Bezugssystem einen leeren Raum sehen während ein beschleunigter Beobachter B, der mit einem Beobachter in einem Gravitationsfeld äquivalent ist, einen mit Teilchen angefüllten Raum sieht. Es sind nun genau diese Teilchen, die als HAWKING-Strahlung bezeichnet werden.

Das Entropie- oder Informationsparadoxon

Obwohl in der Quantenmechanik – wegen der Unbestimmtheiten bzw. Unschärfen – die seltsamsten Dinge geschehen können, so ist sie doch deterministisch, d.h., aus der Wellenfunktion des Zustandes "jetzt" kann der Zustand "später" entwickelt werden. Dies gilt auch für die Zustände "jetzt" und "zuvor". Dies wiederum bedeutet, dass die Quantengesetze reversibel sind und Information nicht zerstört werden kann. Ein Beispiel: nehmen wir an, ein Esoteriker findet einen Zettel, auf dem die Weltformel notiert ist. Da diese Formel nicht in sein Weltbild passt, verbrennt er ihn. Ist die Formel damit für die Wissenschaft verloren?

Aus Sicht der Quantenmechanik: Nein! Würde man nämlich alle Teilchen und Bewegungen der Zettel-Teilchen während des Verbrennungsprozesses kennen, könnte man aus diesen Daten den Zettel und somit die Weltformel prinzipiell wieder rekonstruieren. Die Information wurde lediglich verändert aber nicht zerstört!

Was passiert aber, wenn unser Esoteriker den Zettel in ein Schwarzes Loch werfen würde? Die Information würde hinter dem Ereignishorizont verschwinden und wäre verloren, da sich dieser Prozess genau nicht umkehren lässt. Dies steht aber nun im Widerspruch zur Quantenmechanik.

1967 bewies Werner ISRAEL, dass es nur drei Parameter gibt, mit denen man Schwarze Löcher vollständig beschreiben kann. Dies sind Masse, elektrische Ladung und Drehimpuls (No-Hair-Theorem). Kollabiert z.B. ein Stern zu einem Schwarzen Loch, gehen auch dessen Informationen für immer verloren. Man kann anschließend keine Aussagen mehr über den Ursprungstern treffen. Es existiert nur noch ein Schwarzes Loch mit den oben genannten Parametern. Überlegungen, dass durch die HAWKING-Strahlung die Information über den obigen Zettel oder den Ursprungstern wieder zugänglich werden, konnten schnell widerlegt werden, da aufgrund des No-Hair-Theorems und der, wie oben beschrieben, spontanen Entstehung der Teilchen, die HAWKING -Strahlung thermischer Natur sein muss. Thermische Strahlung kann also keine Information enthalten da die Teilchen einer rein zufälligen Verteilung folgen.

Ab 1976 vertrat Hawking nunmehr den Standpunkt, dass die Reversibilität für Schwarze Löcher nicht gegeben ist und diese eine grundlegend neue Quelle der Irreversibilität in der Natur darstellt.

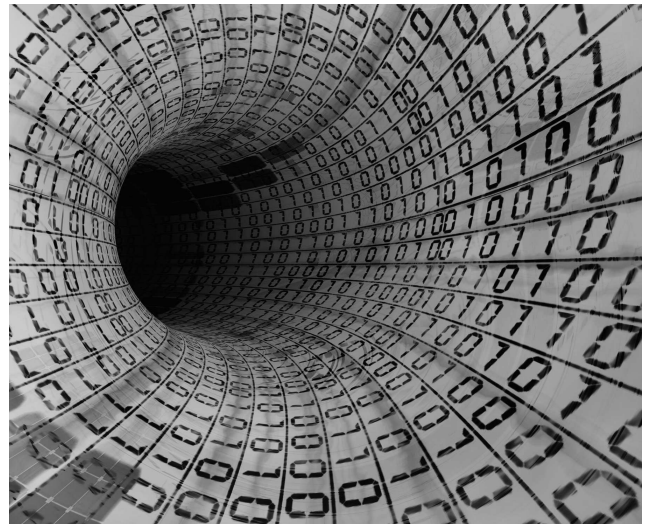


Abb. 4: Verschwindet Information im Schwarzen Loch?
© matthewafflecat, CC0 Creative Commons Pixabay

In Anlehnung an EINSTEINS Ausspruch „Gott würfelt nicht“ formulierte HAWKING: „Gott würfelt nicht nur, er wirft auch manchmal die Würfel dorthin, wo sie nicht gesehen werden können.“

Jetzt stiegen bedeutende Vertreter der Quantentheorie wie Gerard t'HOOFt und Leonard SUSSKIND in die Diskussion ein. Sie zeigten, dass die Verletzung der Informationserhaltung auch eine Verletzung des Energieerhaltungssatzes darstellt, da auch diese Erhaltungsgröße aus der Zeitsymmetrie folgt.

Ist aber der Energieerhaltungssatz verletzt, könnte Energie überall im Universum spontan entstehen. Man berechnet für diesen Fall ein Universum mit einer Temperatur von 10^{31} °K.

Das Problem des Entropie- oder Informationsparadoxons wurde bis heute nicht gelöst. Alle Lösungsvorschläge zeigten bisher nur, dass entweder die Relativitätstheorie und/oder die Quantenmechanik unvollständig ist.

2004 änderte HAWKING dann seine Meinung und vermutete, dass nunmehr mit dem No-Hair-Theorem wohl etwas nicht stimmt oder aber die Information am Ende des Schwarzen Lochs (Verdampfung durch HAWKING-Strahlung) freigesetzt werden könnte.

2014 dann veröffentlichte HAWKING ein (nur zweiseitiges) Papier [5], in dem er zusätzlich zum Ereignishorizont einen weiteren "scheinbaren" Horizont vorschlug. Dieser Gedanke wurde aber nicht weiter ausgearbeitet.

Bereits anhand der hier nur kurz dargestellten Arbeiten wird vielleicht klar: HAWKING bewegte sich am Rand des erkennbaren Universums. Seine Gedanken revolutionierten unsere Sicht auf das Universum und animierten viele junge Menschen, sich mit Kosmologie, Astrophysik und der Physik im Allgemeinen zu befassen. Seine Arbeiten sind als entscheidende Denkanstöße zur Suche nach einer Theorie der Quantengravitation zu bewerten.

Kurz vor seinem Tod veröffentlichte HAWKING noch eine Videobotschaft an die Menschheit. Lassen wir zum Schluss ihn selbst zu Wort kommen:

"Können Sie mich hören?

Es war eine großartige Zeit, am Leben zu sein und Forschung in der theoretischen Physik zu betreiben. Unser Bild des Universums hat sich in den letzten 50 Jahren stark verändert und ich bin glücklich, wenn ich dazu einen kleinen Beitrag geleistet habe.

Der Fakt, dass wir Menschen, die wir selbst nur eine Sammlung fundamentaler Partikel der Natur sind, so nahe an ein Verständnis der Gesetze gekommen sind, die uns und unser Universum bestimmen, ist ein großartiger Triumph. Ich möchte meine Freude und meinen Enthusiasmus über diese Aufgabe teilen.

Also erinnern Sie sich daran, nach oben zu den Sternen zu blicken – und nicht nach unten auf Ihre Füße. Versuchen Sie, einen Sinn zu erkennen in dem, was Sie sind, und fragen Sie sich, was das Universum existieren lässt.

Seien Sie neugierig!

Und wie schwierig das Leben auch scheinen mag, es gibt immer etwas, das Sie tun können. Es ist wichtig, dass Sie nicht einfach aufgeben.

Danke fürs Zuhören."

Biografisches

08.01.1942: Geboren in Oxford, England. Eltern: Isobel Hawking (Ökonomin) und Frank Hawking (Mediziner)

Ab 1953: Besuch der St. Albans School. Aufnahmeprüfung an der Universität Oxford, Sipiendium

1962: Bachelor an der Universität Oxford. Wechsel zur Trinity Hall, Universität Cambridge

1963: Diagnose ALS

1965: Hochzeit mit Jane Wilde

1966: Promotion an der Universität Cambridge über Astrophysik und Kosmologie

Ab 1966: Research Fellow, später Professorial Fellow am Gonville and Caius Colleg, Universität Cambridge

In den 1960er: Arbeiten zu Gravitationskollaps und Singularitäten

1966 - 1973: Kosmologische Forschung am Institute of Astronomy an der Universität Cambridge. Betreut durch Dennis Sciama

1960er/1970er: Arbeit am Singularitätsproblem mit Roger Penrose

Mitte der 1970er: Erste Arbeiten zur Quantenkosmologie

1975: Erste Veröffentlichung zur Hawking-Strahlung

1979 - 2009: Lucasischer Lehrstuhl am Department für Angewandte Mathematik und Theoretische Physik, Universität Cambridge

Arbeiten

[1] The occurrence of singularities in cosmology. T. 1–3. In: Proceedings of the Royal Society. A. Bd. 294, 1966

[2] Gravitational Radiation from Colliding Black Holes. Physical Review Letters. 26 (21), 1971

[3] Bardeen, J. M.; Carter, B.; Hawking, S. W. The four laws of black hole mechanics. Comm. Math. Phys. 31 (1973), no. 2

[4] Hawking, S. W. Particle creation by black holes. Comm. Math. Phys. 43 (1975), no. 3

[5] Information Preservation and Weather Forecasting for Black Holes, arXiv, 2014

Literatur zur Vertiefung

Stephen Hawking: Eine kurze Geschichte der Zeit / Die Suche nach der Urkraft des Universums

Kip S. Thorne: Gekrümmter Raum und verborgene Zeit / Einsteins Vermächtnis

Leonard Susskind: Der Krieg um das Schwarze Loch / Wie ich mit Stephen Hawking um die Rettung der Quantenmechanik rang

Jens Krampe 

Astro-Poesie

$$T_{\text{Hawking}} = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}$$

Legend has it, when men die
they live on in stars; so I
hold that Stephen Hawking's soul
now resides in a Black Hole,
namely in Cygnus X-1.
There, I'm sure, he's having fun
by creating a sensation:
Stephen Hawking-radiation
(thus refuting all his critics
who cry: "Not yet proven physics!")
Stupid, stubborn Stockholm guys:
Stop withholding Hawking's prize!

Bernhard Arnold (14.3.2018) 