Schwarze Löcher

GRUNDFRAGEN DER PHYSIK · GRAVITATION UND QUANTEN

Im Dezember 1915 diente Karl Schwarzschild als Artillerieoffizier an der Ostfront, und zwischen den Einsätzen rechnete er. Albert Einstein hatte gerade seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht, und Schwarzschild fand als Erster eine exakte Lösung der neuen Gleichungen: das Schwerefeld einer einzelnen, kugelförmigen Masse [1]. In dieser Lösung steckte eine Merkwürdigkeit. Bei einem bestimmten Abstand vom Zentrum schienen die Gleichungen verrückt zu spielen. Schwarzschild starb wenige Monate später an einer Hautkrankheit, die er sich an der Front zugezogen hatte. Was diese Grenze bedeutet, hat er nicht mehr erfahren.

Heute wissen wir es. Sie ist die Oberfläche eines Schwarzen Lochs.

Wo selbst Licht nicht mehr entkommt

Werfen Sie einen Ball nach oben, fällt er zurück. Werfen Sie ihn schneller, steigt er höher. Ab rund elf Kilometern pro Sekunde würde er der Erde ganz entkommen, das ist die Fluchtgeschwindigkeit. Drückt man dieselbe Masse auf einen kleineren Raum zusammen, wächst die Fluchtgeschwindigkeit an ihrer Oberfläche. Bei einem ganz bestimmten Radius erreicht sie die Lichtgeschwindigkeit, und dann kommt nichts mehr heraus, auch kein Licht. Diesen Radius nennt man nach seinem Entdecker Schwarzschild-Radius:

$$r_S = \frac{2GM}{c^2} \tag{1}$$

mit der Gravitationskonstante G, der Masse M und der Lichtgeschwindigkeit c [2]. Die Kugelfläche mit diesem Radius heißt Ereignishorizont. Was einmal hinein ist, kommt nach der allgemeinen Relativitätstheorie nie wieder heraus, nicht einmal eine Nachricht darüber, was drinnen passiert. Wie klein dieser Radius ist, zeigt die Tabelle. Die ganze Erde müsste auf die Größe einer Murmel zusammengepresst werden.

Objekt	Masse	Schwarzschild-Radius	zum Vergleich
Erde	$6 \cdot 10^{24}$ kg	knapp 9 Millimeter	eine Murmel
Sonne	$2 \cdot 10^{30}$ kg	knapp 3 Kilometer	eine Kleinstadt

Objekt	Masse	Schwarzschild-Radius	zum Vergleich
Sagittarius A*, Zentrum der Milchstraße	rund 4 Millionen Sonnenmassen	rund 12 Millionen Kilometer	ein Fünftel der Merkurbahn
M87*, Galaxie Messier 87	rund 6,5 Milliarden Sonnenmassen	rund 19 Milliarden Kilometer	gut viermal die Neptunbahn

Eigene Berechnung nach Gleichung (1); Massen der Schwarzen Löcher nach [3],[4].

Die Erde und die Sonne werden nie zu Schwarzen Löchern, dafür fehlt der Druck. Schwarze Löcher entstehen, wenn sehr massereiche Sterne am Ende ihres Lebens unter ihrem eigenen Gewicht zusammenbrechen, und in den Zentren von Galaxien wachsen sie über Milliarden Jahre zu Riesen heran. Lange war umstritten, ob die Natur so etwas überhaupt zulässt. Roger Penrose zeigte 1965 mathematisch, dass der Zusammenbruch unter recht allgemeinen Bedingungen unvermeidlich ist, und bekam dafür 2020 den halben Physik-Nobelpreis [3].

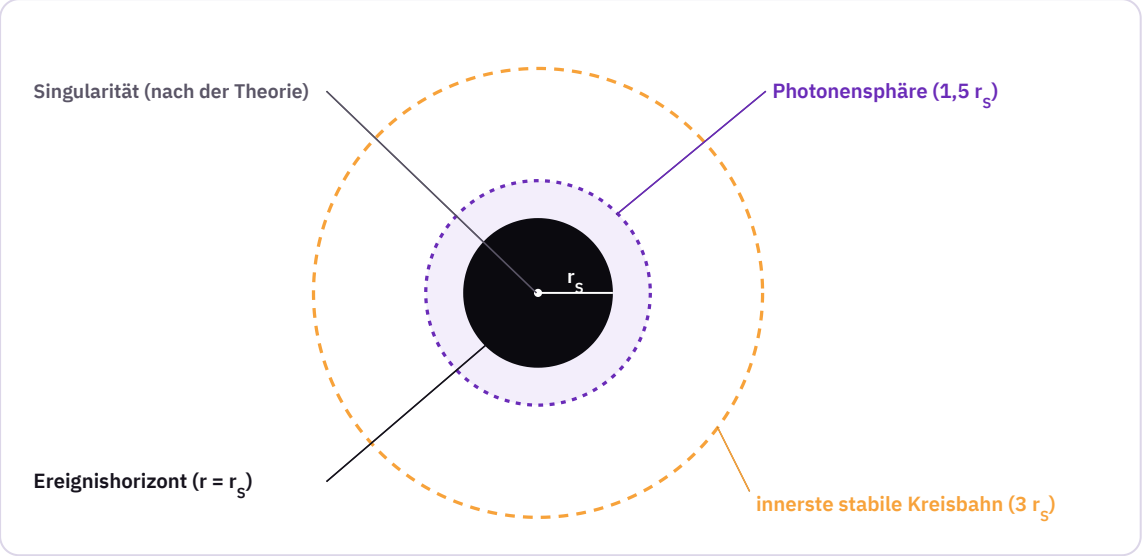


Abb. 1: Die wichtigsten Abstände um ein nicht rotierendes Schwarzes Loch, in Vielfachen des Schwarzschild-Radius. Eigene schematische Darstellung.

Wie man etwas sieht, das nichts aussendet

Ein Schwarzes Loch leuchtet nicht. Man sieht es an dem, was es mit seiner Umgebung anstellt. Reinhard Genzel und Andrea Ghez haben mit ihren Teams fast drei Jahrzehnte lang die Bahnen von Sternen im Zentrum der Milchstraße verfolgt. Die Sterne rasen dort auf engen Ellipsen um einen unsichtbaren Punkt, und aus ihren Bahnen folgt, dass in diesem Punkt rund vier Millionen Sonnenmassen stecken, auf einem Raum, der kleiner ist

als unser Sonnensystem. Die einzige vernünftige Erklärung ist ein Schwarzes Loch, heute Sagittarius A* genannt. Dafür ging die andere Hälfte des Nobelpreises 2020 an Genzel und Ghez[3].

Am 14. September 2015 registrierten die beiden LIGO-Detektoren in den USA ein winziges Zittern des Raums: Gravitationswellen von zwei Schwarzen Löchern mit rund 36 und 29 Sonnenmassen, die rund 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernt miteinander verschmolzen waren[5]. Es war der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen und zugleich der erste Beweis, dass Paare Schwarzer Löcher existieren. Bis zum Ende der vierten Messkampagne im November 2025 kamen die Detektoren auf 218 sicher bestätigte Nachweise, dazu kommen rund 170 weitere Kandidaten, die noch ausgewertet werden[6]. Das bisher stärkste Signal traf am 14. Januar 2025 ein, von zwei Schwarzen Löchern mit je etwa 32 Sonnenmassen. Es war so deutlich, dass sich damit eine Vorhersage von Stephen Hawking aus dem Jahr 1971 prüfen ließ: Die Gesamtfläche der Ereignishorizonte darf bei einer Verschmelzung nicht schrumpfen. Die Messung bestätigte das[7].

Und dann das Bild. Am 10. April 2019 veröffentlichte das Event Horizon Telescope, ein Verbund von Radioteleskopen rund um die Erde, die erste Aufnahme eines Schwarzen Lochs, des Riesen im Zentrum der Galaxie M87[4]. Zu sehen ist ein heller, auf einer Seite stärker leuchtender Ring aus heißem Gas, das das Loch umkreist, und in der Mitte ein dunkler Schatten. Der Schatten ist etwas größer als der Horizont selbst, weil das Schwarze Loch das Licht in seiner Nähe ablenkt, und er hatte genau die Größe, die die Relativitätstheorie für die Masse vorhersagt. 2022 folgte das Bild von Sagittarius A*[8].

Was mit einem Astronauten passieren würde

Gedankenexperimente mit unglücklichen Astronauten gehören zu jeder Erklärung Schwarzer Löcher, und sie zeigen tatsächlich etwas Wichtiges. Fällt jemand mit den Füßen voran auf ein kleines Schwarzes Loch von einigen Sonnenmassen zu, zieht die Schwerkraft an seinen Füßen deutlich stärker als an seinem Kopf. Lange bevor er den Horizont erreicht, würde er in die Länge gezogen. Physiker nennen das tatsächlich Spaghettifizierung. Bei einem Riesen wie Sagittarius A* ist dieser Unterschied am Horizont dagegen so gering, dass der Astronaut ihn gar nicht bemerken würde. Er würde einfach hindurchfallen, ohne dass sich an dieser Stelle irgendetwas Besonderes anfühlt.

Von außen sähe es ganz anders aus. Wegen der Zeitdehnung in starken Schwerefeldern scheint der fallende Astronaut für einen fernen Beobachter immer langsamer zu werden, sein Licht wird immer röter und schwächer, bis er am Horizont praktisch einfriert und verblasst. Beide Sichtweisen sind richtig, sie beschreiben dasselbe Ereignis aus verschiedenen Bezugssystemen.

Wo die Quantenphysik ins Spiel kommt

Bis hierhin ist alles allgemeine Relativitätstheorie, also klassische Physik. Interessant für eine Seite über Quanten wird es an zwei Stellen. Die erste hat Stephen Hawking 1974 gefunden: Nach der Quantentheorie sind Schwarze Löcher nicht ganz schwarz, sondern senden eine schwache Wärmestrahlung aus und verdampfen über unvorstellbar lange Zeiten. Daraus folgt das Informationsparadox, an dem Physiker seit fünfzig Jahren knobeln. Beides beschreiben wir ausführlich im Porträt von Stephen Hawking.

Die zweite Stelle ist das Zentrum. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie wird die Materie dort auf einen Punkt unendlicher Dichte zusammengedrückt, eine Singularität. Fast alle Physiker halten das für ein Zeichen, dass die Theorie dort ihre Grenze erreicht. Was im Inneren eines Schwarzen Lochs wirklich passiert, könnte nur eine Theorie beantworten, die Gravitation und Quantenphysik vereint. Die gibt es noch nicht, mehr dazu im Artikel über Quantengravitation. Ehrlich gesagt: Was hinter dem Horizont liegt, weiß niemand.

Zum Weiterlesen

Eine kurze Geschichte der Zeit

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2025 · ISBN 978-3-608-98895-6

Der Klassiker über Schwarze Löcher, Urknall und Zeit, von dem Mann, der gezeigt hat, dass Schwarze Löcher strahlen.

Bei Amazon ansehen*

Kurze Antworten auf große Fragen

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2020 · ISBN 978-3-608-98383-8

Hawkings letztes Buch, mit einem eigenen Kapitel zur Frage, was in einem Schwarzen Loch steckt.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. K. Schwarzschild: *Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie.* In: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1916, S. 189–196.
2. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002.
3. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2020.* nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary.
4. The Event Horizon Telescope Collaboration: *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole.* In: The Astrophysical Journal Letters 875 (2019), L1, doi:10.3847/2041-8213/ab0ec7.
5. B. P. Abbott u. a. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.* In: Physical Review Letters 116 (2016), 061102, doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
6. LIGO Scientific Collaboration: *LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration successfully wraps up its fourth Observing Run.* November 2025. ligo.org.
7. LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, KAGRA Collaboration: *GW250114: Testing Hawking's Area Law and the Kerr Nature of Black Holes.* In: Physical Review Letters 135 (2025), 111403, doi:10.1103/kw5g-d732.
8. The Event Horizon Telescope Collaboration: *First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way.* In: The Astrophysical Journal Letters 930 (2022), L12, doi:10.3847/2041-8213/ac6674.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Schwarze Löcher. Stand: Oktober 2026. URL:
https://quanten.de/schwarze_loecher.html (PDF:
https://quanten.de/pdf/schwarze_loecher.pdf)
```


Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Stephen Hawking · Quantengravitation · Entropie · Quantensensoren