

Ins Schwarze gesehen

Erstmals ist es gelungen, den Schatten eines Schwarzen Lochs abzubilden.

Astrid Eichhorn

Schwarze Löcher galten aufgrund ihrer extremen Kompaktheit lange als mathematische Kuriosität, bis zur Beobachtung ähnlich kompakter Objekte, nämlich Neutronensterne, durch Jocelyn Bell-Burnell. Die erste entsprechende Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) fand Karl Schwarzschild bereits 1916. Ein experimenteller Hinweis auf ein Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße ergab sich aus der Messung der Bahnen nahgelegener Sterne [1]. Die 2015 erstmals detektierten Gravitationswellen [2] erwiesen sich als kompatibel mit dem aus der ART vorhergesagten Signal für das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher. Nun liefert das Event Horizon Telescope (EHT) einen weiteren Durchbruch: Aus den im April 2017 im Radiofrequenzbereich durchgeführten Beobachtungen ließ sich bis April dieses Jahres das erste „Bild“ eines Schwarzen Lochs rekonstruieren [3].

Genauer gesagt zeigt das Bild den Schatten des riesigen Schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxie M87 (im Folgenden M87* genannt, **Abb. 1**). M87* selbst kann kein Licht emittieren, weil dieses nicht aus dem Inneren des Ereignishorizonts nach außen gelangt. Das Schwarze Loch ist von einer Akkretionsscheibe einfallenden, leuchtenden Gases umgeben. Das Gas heizt sich durch dissipative Effekte auf und emittiert Synchrotronstrahlung. Da das Schwarze Loch als extreme Gravitationslinse wirkt, winden sich die Nullgeodäten des Lichts in der Nähe des Ereignishorizonts mehrfach um das Schwarze Loch, bevor das Licht entkommen kann. Im Fall eines sehr strahlungsdurchlässigen, also optisch dünnen, Plasmas entweicht nahezu die gesamte Strahlung und erzeugt einen charakteristischen hellen Ring um den Schatten von M87* ([3], L5). Weil das Plasma in der Akkretionsscheibe relativistisch ist, ergibt sich die asym-

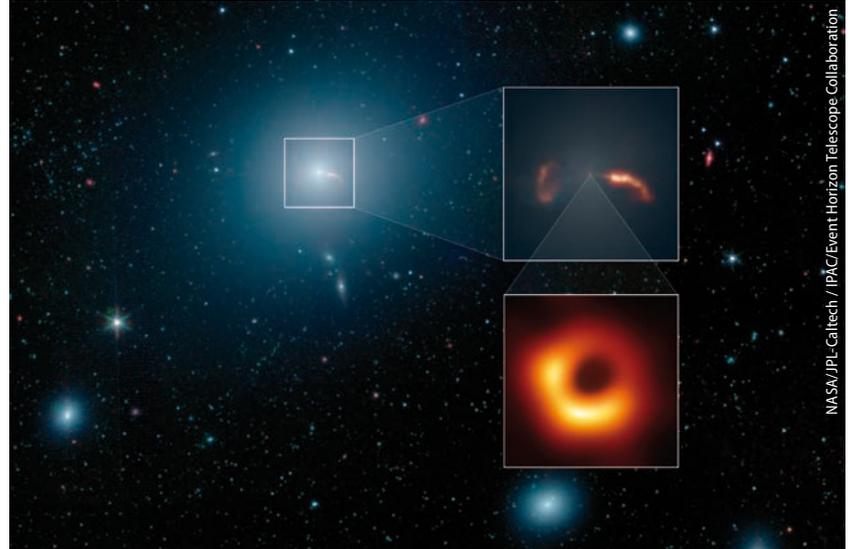


Abb. 1 Das supermassive Schwarze Loch im Zentrum der fast 54 Millionen Lichtjahre entfernten elliptischen Riesengalaxie ließ sich erstmals abbilden (Inset rechts unten). Bislang war nur der Jet des Schwarzen Lochs zu beobachten (Inset rechts oben).

metrische Helligkeit des Rings unter der Annahme, dass der Drehimpulsvektor der Akkretionsscheibe eine nichtverschwindende Inklination besitzt. Durch den relativistischen Beaming-Effekt erscheint die untere Seite des Rings, auf der das Gas Richtung Erde strömt, heller als die obere Seite, auf der es sich von der Erde entfernt.

Die Akkretionsscheibe speist einen Jet, der weit aus der inneren Region der Galaxie herausragt. Auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigte Teilchen im Jet emittieren Strahlung, die für M87 bereits 1918 beobachtet wurde. Das EHT ermöglichte nun einen ersten Blick direkt in die Entstehungsregion eines solchen Jets. Für dessen Emission gibt es mehrere Modelle, die in Simulationen im Rahmen der allgemeinen relativistischen Magnetohydrodynamik (GRMHD) einfließen. Die Energie des Jets stammt entweder aus der Rotationsenergie des Akkretionsflusses oder aus der Rotationsenergie des Schwarzen Lochs, also aus der Raumzeit selbst. Die Rotationsenergie wird in kinetische Energie der Teilchen umgewandelt, die stark

beschleunigen, während das Schwarze Loch sehr langsam an Spin verliert (Blandford-Znajek-Prozess) [4].

Von der Erde aus gesehen beträgt der Radius des Ereignishorizonts von M87* nur 40 Millionstel Bogensekunden. Um dies im Wellenlängenbereich von 1,3 mm nachzuweisen, braucht es ein mindestens erdgroßes Teleskop. Das lässt sich mit möglichst vielen, weit auf der Erde verteilten Teleskopen erreichen, die interferometrisch zusammenwirken (Very Long Baseline Interferometry). Sie stellen einen Ausschnitt des effektiv erdgroßen Teleskops dar. Die Korrelation zwischen dem gemessenen Signal an zwei verschiedenen Orten entspricht einer Mode der Fourier-Transformierten der einkommenden Intensitätsverteilung. Um diese Korrelation auswerten zu können, finden an jedem Teleskop sehr exakte Zeitmessungen mit Atomuhren statt ([3], L2).

Dank der Erdrotation werden im Verlauf einer Beobachtungsnacht verschiedene Ausschnitte abgedeckt durch verschiedene effektive Abstände der Teleskope und somit

Fourier-Moden. Daraus ergibt sich beträchtlich mehr Information über die Fourier-Transformierte des gesamten Bildes. Trotzdem weist dieses effektive Teleskop im Fourier-Raum große Lücken auf, sodass nur komplexe Algorithmen das Bild aus den Petabyte von Daten rekonstruieren können ([3], L4). Vier Teams der EHT-Kollaboration haben dazu unabhängig voneinander Algorithmen entwickelt, getestet und genutzt. Da die verschiedenen Bilder sehr gut übereinstimmen, lässt sich mit sehr hoher Sicherheit ausschließen, dass es sich bei den Merkmalen des Bilds, wie Schatten oder Ring, um Artefakte der Rekonstruktion handelt.

Aus einem solchen Bild lassen sich die beiden Parameter extrahieren, die ein Schwarzes Loch im Rahmen der ART charakterisieren: seine Masse und sein Spinparameter. Die Masse nimmt mit der linearen Größe des Schattens zu, während der Spin für eine Abweichung von einem symmetrischen Schatten sorgt. Aufgrund des Frame-Dragging-Effekts bei rotierenden Schwarzen Löchern ist der Schatten an der zum Beobachter hin rotierenden (prograden) Seite etwas abgeplattet, da der Spin des Schwarzen Lochs die auf der entsprechenden Bildseite ankommenden Nullgeodäten etwas weiter „mitreißt“.

Der Vergleich mit simulierten Bildern bei unterschiedlichen Massen und Spinparametern sowie verschiedenen Parametern der Akkretionsscheibe, wie dem magnetischen Fluss, zeigt in einer statistischen Analyse, welche Parameter mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ein Bild wie das tatsächlich aufgenommene erzeugen (Abb. 2). Für M87* ergibt sich aus der Größe des Schattens eine Masse von $(6,5 \pm 0,9) \times 10^9$ Sonnenmassen ([3], L6), was mit unabhängigen indirekten Messungen übereinstimmt. Der Gravitationsradius GM/c^2 mit der Gravitationskonstanten G und der Lichtgeschwindigkeit c beträgt knapp 10^{13} Meter und ist damit etwas größer als der Bahnradius von Pluto. Damit ist M87* selbst für supermassive Schwarze Löcher ein Schwergewicht.

Für die Beobachtungen ist das entscheidend. Zwar ist die scheinbare Größe von M87* am Himmel ver-

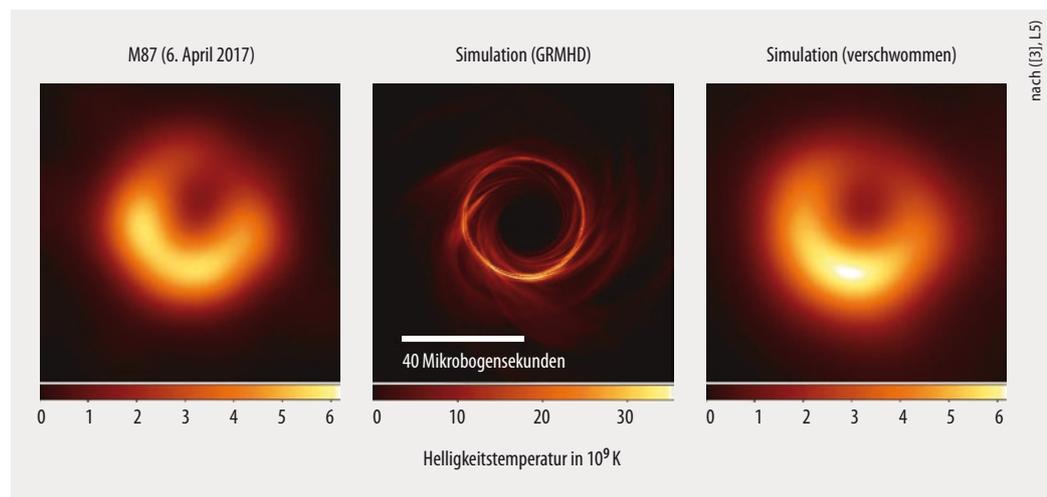


Abb. 2 Der mit dem Event Horizon Telescope beobachtete Schatten des Schwarzen Lochs (links) im Zentrum von M87 entspricht sehr gut den Simulationen (Mitte), wenn die erwartete Auflösung des Teleskops berücksichtigt ist (rechts).

gleichbar mit Sgr A*, dem viel näher gelegenen kompakten Objekt im Zentrum unserer Milchstraße. Wegen seiner deutlich größeren Masse ist aber die typische dynamische Zeitskala von M87* deutlich größer, insbesondere variiert die Akkretionsscheibe weniger als bei Sgr A*. Das macht die Rekonstruktion des Bilds von M87* einfacher als für Sgr A*.

Den Spin von M87* zu extrahieren, ist deutlich schwieriger und allein aus der Form des Schattens bis jetzt noch nicht möglich. In der ART muss der Spinparameter maximal $c/(GM^2)$ betragen, um eine „nackte Singularität“ zu vermeiden, die nicht hinter einem Ereignishorizont liegt. Die Formänderung des Schattens ist jedoch selbst in einem maximal schnell rotierenden Schwarzen Loch nur ein Effekt von 13 Prozent gegenüber dem nichtrotierenden Fall – zu klein für die zur Zeit erreichbare Bildqualität. Im Falle von M87* hat man allerdings den Jet beobachtet. GRMHD-Simulationen mit einem verschwindenden Spinparameter produzieren nicht genügend Energie für einen Jet und sind damit inkonsistent mit den Beobachtungen ([3], L5). Aus der Asymmetrie des Bildes lässt sich außerdem auf eine Rotation im Uhrzeigersinn schließen, also auf einen von der Erde weg gerichteten Spinvektor.

Eine höhere Auflösung lässt sich in Zukunft durch Hinzunahme weiterer Teleskope zum EHT, beispielsweise dem geplanten African Millimetre

Telescope in Namibia, erreichen. Weitere Beobachtungen könnten Aufschlüsse über die Polarisation der emittierten Strahlung liefern und damit über Magnetfeldstrukturen im Inneren der Akkretionsscheibe [5].

Dank der visionären Ideen für das EHT und der rund 200 beteiligten Forscherinnen und Forscher sind Schwarze Löcher vermessbar geworden. Die Daten werden Astrophysiker und Gravitationstheoretiker noch lange beschäftigen. Da sie das Starkfeld-Regime der Gravitation zugänglich machen, versprechen sie einen neuen starken Test für unser grundlegendes Verständnis der Gravitation [6].

- [1] S. Gillessen et al., *Astrophys. J.* **692**, 1075 (2009)
- [2] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientific and Virgo Collaborations], *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016)
- [3] K. Akiyama et al. [EHT Collaboration], *Astrophys. J.* **875**, L1 – L6 (2019), iopscience.iop.org/issue/2041-8205/875/1
- [4] R. D. Blandford und R. L. Znajek, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **179**, 433 (1977)
- [5] M. D. Johnson et al., *Science* **350**, 1242 (2015)
- [6] A. E. Broderick et al., *Astrophys. J.* **784**, 7 (2014); V. Cardoso und L. Gualtieri, *Class. Quant. Grav.* **33**, 174001 (2016)

Autorin

Dr. Astrid Eichhorn, CP3-Origins, University of Southern Denmark, Odense, Dänemark und Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, 69120 Heidelberg