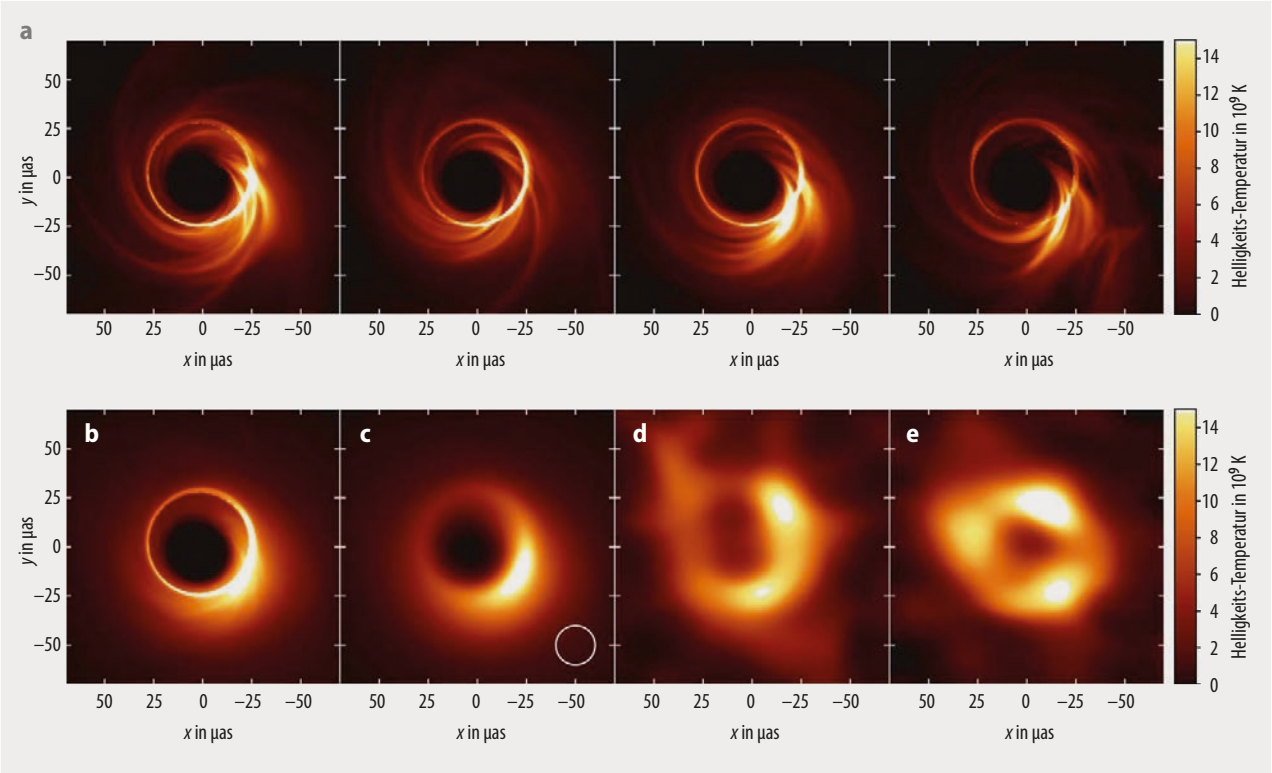
Den Schatten beleuchtet

Die Event Horizon Telescope Collaboration legt das erste Bild des supermassiven Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße vor.

Astrid Eichhorn



aus [6]

Abb. 1 Die Schnappschüsse aus den Simulationen zeigen, wie sich das Erscheinungsbild des Schwarzen Lochs innerhalb einiger Minuten verändert (a). Die Mittelung über diese Schnappschüsse (b) lässt sich mit einer endlichen Auflösung falten (c), deren Halbwertsbreite dem weißen Kreis entspricht. Die simulierte Rekonstruktion einer Beobachtung (d), die der hochaufgelösten Mittelung (b) entsprechen würde, stimmt in ihren Hauptcharakteristika gut mit dem rekonstruierten Bild von Sgr A* (e) überein.

Zum zweiten Mal konnte die Event Horizon Telescope Collaboration den Schatten eines supermassiven Schwarzen Lochs abbilden (**Abb. 1e**): von Sgr A* im Zentrum unserer Milchstraße [1]. Wie bei M87* im Zentrum der Galaxie Messier 87 nutzten die Forschenden Radioteleskope auf der ganzen Welt für die Very Long Baseline Interferometry [2].

Ein Schwarzes Loch ist nicht direkt sichtbar, weil es selbst keine beobachtbare elektromagnetische Strahlung emittiert. Aber seine astrophysikalische Umgebung gibt Strahlung ab, zum Beispiel die Akkretionsscheibe in Form von Synchrotronstrahlung. Dieser helle Hintergrund macht den Schatten des Schwarzen Lochs sichtbar – ähnlich wie bei einer Person, die vor einem Scheinwerfer steht. Im Gegensatz dazu nimmt die Strahlung aus der Akkretionsscheibe aber einen komplizierteren Weg bis zur Beobachtung (**Abb. 2**). Ein Teil verschwindet hinter dem Ereignishorizont des Schwarzen Lochs und erzeugt den Schatten. Der Rest findet aufgrund der starken Raumzeitkrümmung nur teilweise den direkten Weg zum Detektor. Darüber hinaus erreicht ihn Strahlung von der „Rückseite" der Scheibe nach einer oder mehreren Umrundungen des Schwarzen Lochs. Diese Umrundungen hängen stark von der Geometrie der Raumzeit ab. Deshalb enthält das Bild von Sgr A* ineinander verwobene Informationen zur astrophysikalischen Umgebung, z. B. zu den Eigenschaften der Akkretionsscheibe, und der Frage, ob die Raumzeitgeometrie den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie entspricht.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie charakterisieren Masse und Spin ein Schwarzes Loch vollständig („No-Hair-Theorem"). Die Masse bestimmt den Durchmesser des Schattens; der Spin führt zu einer leichten Abweichung des Schattens von der radialen Symmetrie, was deutlich schwieriger nachweisbar ist. Wie zuvor im Fall von M87* entspricht auch das Bild von Sgr A* diesen Erwartungen: Das No-Hair-Theorem ist mit den Beobachtungen für die beiden supermassiven Schwarzen Löcher kompatibel, deren Massen sich um einen Faktor tausend unterscheiden.

Im Gegensatz zu M87* gab es bei Sgr A*eine besondere Schwierigkeit. Das Gas in der Akkretionsscheibe um-

© 2022 Wiley-VCH GmbH

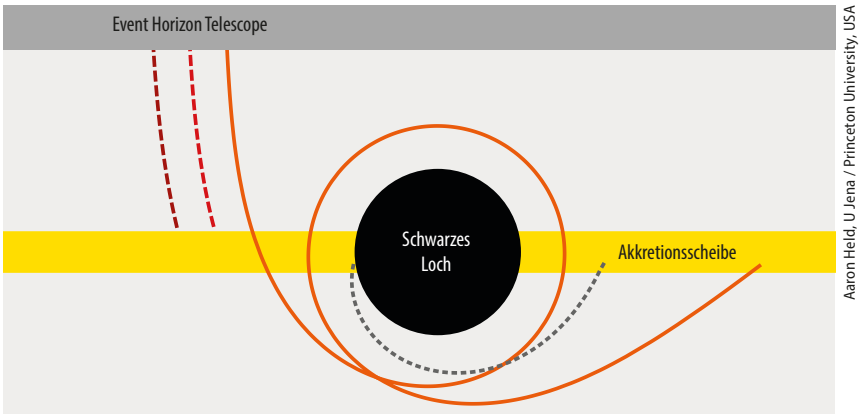
rundet das Schwarze Loch auf einer Zeitskala T, die durch die Masse M des Schwarzen Lochs bestimmt wird: $T \propto GM/c^3$ mit der Gravitationskonstante G und der Lichtgeschwindigkeit c. Die Masse von Sgr A* beträgt etwa vier Millionen Sonnenmassen und ist damit drei Größenordnungen kleiner als die von M87*. Daher variiert das Bild von Sgr A* innerhalb von Minuten (**Abb. 1a**), während M87* über eine Beobachtungsnacht konstant bleibt.

Um der Herausforderung dieser starken zeitlichen Variabilität zu begegnen, hat die Event Horizon Telescope Collaboration zwei Strategien verfolgt. Einerseits ergibt eine Beobachtungsnacht viele Einzelmessungen des Schattendurchmessers. Jede einzelne ist aufgrund der spärlichen Datenmenge mit einer großen Ungenauigkeit behaftet; dennoch liefert die Mittelung dieser Messungen die Masse. Andererseits erfolgt die Rekonstruktion der Masse aus einer Modellierung der Messung mit einem statischen und einem zeitabhängigen Teil, wobei letzterer als Messfehler einer statischen Messung modelliert wird. Beide Strategien führen zu kompatiblen Werten für die Masse [3] und passen auch zu den Ergebnissen, die auf stellaren Orbits bei hundert bis tausend Mal größeren Entfernungen beruhen [4, 5].

Um den Drehimpuls des Schwarzen Lochs zu bestimmen, ist es nötig, die charakteristische „Abplattung" des Schattens im rekonstruierten Bild zu sehen. Doch dafür reicht selbst die hohe Auflösung des Event Horizon Telescope nicht aus (**Abb. 1e**). Erste Hinweise auf den Spin liefert der Vergleich der Messdaten mit Simulationen, die auf verschiedenen Modellen der Akkretionsscheibe sowie unterschiedlichen Werten des Spins und der Inklination beruhen. Letztere entspricht dem Winkel zwischen dem Spin und der Beobachtungsachse. Für Sgr A* passen die Daten nicht zu Simulationen mit verschwindendem Spin; für die Inklination braucht es Werte, die zu einer Akkretionsscheibe gehören, die nicht parallel zur galaktischen Ebene ist [6].

Darüber hinaus erlauben es die Messdaten, die Geometrie der Raumzeit zu testen. Jenseits der Allgemeinen Relativitätstheorie gibt es reguläre Schwarze Löcher ohne Krümmungssingularität [7], motiviert aus Ansätzen zur Quantengravitation [8], sowie horizontlose kompakte Objekte wie Gravasterne. Die endliche Auflösung erschwert es, die charakteristischen Deformierungen des Schattens eines regulären Schwarzen Lochs nachzuweisen. Der Unterschied zwischen dem hellsten und dunkelsten Bildpunkt (dynamischer Bereich) reicht bisher nicht aus, um eindeutig zwischen Schwarzen Löchern und horizontlosen kompakten Objekten zu unterscheiden. Trotzdem gelang es, Raumzeiten und kompakte Objekte jenseits der ART einzuschränken [9].

Wenn künftig weitere Teleskope die Auflösung und den dynamischen Bereich des Event Horizon Telescope verbessern, sollte es möglich sein, Sgr A* genauer zu charakterisieren, die Akkretion des Gases als Film zu beobachten und Gravitationstheorien anhand der Daten zu testen.



Aaron Held, U Jena / Princeton University, USA

Abb. 2 Strahlung aus der Akkretionsscheibe (gelb) kann das Schwarze Loch umrunden, bevor sie auf das Event Horizon Telescope trifft (orange). Der Schatten entsteht, weil alle inneren Trajektorien den Horizont des Schwarzen Lochs (schwarz) überqueren (grau).

[1] *EHT Coll.*, ApJL **930**, L12 (2022)
[2] *A. Eichhorn*, Physik Journal, Juni 2019, S. 18
[3] *EHT Coll.*, ApJL **930**, L15 (2022)
[4] *T. Do* et al., Science **365**, 664 (2019)
[5] *Gravity Coll.*, A&A **657**, L12 (2022)
[6] *EHT Coll.*, ApJL **930**, L16 (2022)
[7] *S. A. Hayward*, Phys. Rev. Lett. **96**, 031103 (2006)
[8] *A. Bonanno* und *M. Reuter*, Phys. Rev. D **62**, 043008 (2000)
[9] *EHT Coll.*, ApJL **930**, L17 (2022)

Kurzgefasst

Gering gedämpft in die Ferne
Einem Forschungsteam der britischen Universität Southampton ist es gelungen, Laserstrahlung mit einem Kilowatt Leistung über eine tausend Meter lange Faser zu übertragen. Der Wirkungsgrad betrug 80 Prozent, was zuvor nur über einige zehn Meter Distanz möglich war. Die extrem geringe Signaldämpfung beruht auf einer antiresonanten Single-Mode-Hohlfaser; der Ansatz lässt sich laut dem Team um einen Faktor 10 skalieren. Zu den möglichen Anwendungen gehören Tiefenbohrungen mit Messungen über große Distanzen und Produktionsstätten, in denen eine zentrale Laserquelle viele Verarbeitungsplätze versorgt.

H. C. H. Mulvad et al., Nat. Photon. **16**, 448 (2022)

„Dead Cone" erstmals beobachtet
Ein freies Quark der Masse m_Q gibt Energie ab, indem es Gluonen in einem Schauer emittiert. Die Quantenchromodynamik sagt für diesen Prozess voraus, dass die Gluonen nur außerhalb eines Kegels mit dem Öffnungswinkel $\theta_{DC} = m_Q/E$ auftreten, der von der Energie E des Quarks abhängt. Diesen als Dead Cone bezeichneten Effekt hat die ALICE-Kollaboration nun am Large Hadron Collider im Gluonenschauer eines Charm-Quarks nachgewiesen. Dabei kamen neue iterative Analysemethoden zum Einsatz. Aus den „toten Winkeln" verschiedener Energiefenster ermittelte die Kollaboration eine Masse von 1,275 GeV/c^2 für das freie c-Quark.

ALICE Coll., Nature **605**, 440 (2022)

Die Autorin

Prof. Dr. Astrid Eichhorn, CP3-Origins, University of Southern Denmark, Campusvej 55, 5230 Odense M, Dänemark

© 2022 Wiley-VCH GmbH