

Unser supermassives Schwarzes Loch

Drei Jahre nachdem das Bild des Schwarzen Lochs M87* veröffentlicht wurde, sah die Menschheit im Frühling 2022 erstmals ein Bild des supermassiven Schwarzen Lochs Sgr A* im Zentrum unserer Galaxie. Dieser Artikel zeigt, weshalb dieses eigentliche Zielbild des Projektes Event Horizon Telescope (EHT) schwieriger zu erreichen war als dasjenige von M87* und warum es wissenschaftlich gesehen wesentlich interessanter ist.

Radiowellen aus der Richtung des Sagittarius

Im Neujahrsblatt 1954 beschreibt Max Waldmeier, wie der US Physiker Karl G. Jansky im Dezember 1931 rauschartige Störungen im Kurzwellenbereich feststellte, die nur tagsüber auftraten und von Osten nach Westen wanderten (Abb. 1). Bereits nach etwa einem Monat konnte er die Sonne als Quelle ausschliessen, da die Störungen jeden Morgen um durchschnittlich 4 Minuten früher im Osten erschienen und deshalb synchron mit der Sternzeit und nicht mit der Sonnenzeit auftraten.

Es musste sich also um eine Quelle ausserhalb des Sonnensystems handeln. Nach weiteren Beobachtungen wurde klar: Die Radiowellen, die die Störungen verursachten, mussten aus dem Sternbild Sagittarius (Schütze) stammen, wo die Milchstrasse am hellsten erscheint. Jansky nahm deshalb an, dass die Radiowellen aus unserer Galaxie stammten und nannte die Störungen «galaktisches Rauschen». Hätte man dieser Beobachtung mehr Aufmerksamkeit geschenkt, wäre die Radioastronomie nicht erst Ende der 1940er-Jahre entstanden.

Vermutung eines Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxie

Die US Radioastronomen Robert L. Brown und Bruce Balick entdeckten 1974 mit Hilfe von gekoppelten Radioteleskopen, die rund 40 km voneinander entfernt waren, eine schwache Radioquelle im Zentrum der Milchstrasse. Die Quelle zeigte kein ther-

misches Strahlungsspektrum wie ein Stern, war erstaunlich klein und regte die Wasserstoffwolken in der Umgebung zum Strahlen an. Brown und Balick vermuteten, dass es sich bei der Quelle um ein Schwarzes Loch handeln könnte und nannten es in Anlehnung an die in der Kernphysik übliche Bezeichnung für angeregte Atome Sgr A* (Sgr = Sagittarius, * bedeutet angeregt).

Die Hypothese, dass im Zentrum der meisten oder sogar aller Galaxien Schwarze Löcher mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen liegen, geht auf die frühen 1960er-Jahre zurück. Sie basiert auf Beobachtungen von sogenannten Quasaren (oder Quasi Stellar Objects). Diese Quasare wurden in kosmologischen Entfernungen von vielen Milliarden Jahren gefunden und waren teilweise heller als ganze Galaxien.

Als plausibelste Energiequelle wurde die Umwandlung von Gravitationsenergie in elektromagnetische Strahlung in der Umgebung von Schwarzen Löchern angesehen. Also mussten diese Objekte dort angesiedelt sein, wo die Materiedichte gross ist, wie in den Zentren der Galaxien.

Mit dem Hubble Space Telescope konnte später bestätigt werden, dass Quasare wirklich im Zentrum von Galaxien sitzen, die rund 10 Mia. Jahre in der Vergangenheit liegen. Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie dürfte «auf Diät gesetzt sein», da es bereits alle leicht erreichbare Materie in seiner Umgebung verschlungen haben dürfte. Deshalb leuchtet es nur noch schwach.

Um Sgr A* kreisende Sterne

Der endgültige Beweis, dass Sgr A* ein Schwarzes Loch ist, kann nur erbracht werden, wenn gezeigt werden kann, dass die in ihm enthaltene Massendichte jede abweichende Hypothese ausschliesst. Die technische Weiterentwicklung von optischen und Radioteleskopen hat zu Beginn der 1990er-Jahre einen Stand erreicht, der es erlaubte, diese Herausforderung anzugehen.

Andrea Ghez (USA) und Reinhard Genzel (D) versuchten mit verschiedenen Methoden, Bahnen von Sternen, die um Sgr A* kreisen, zu vermessen. Das Zentrum der Milchstrasse ist von der Erde aus

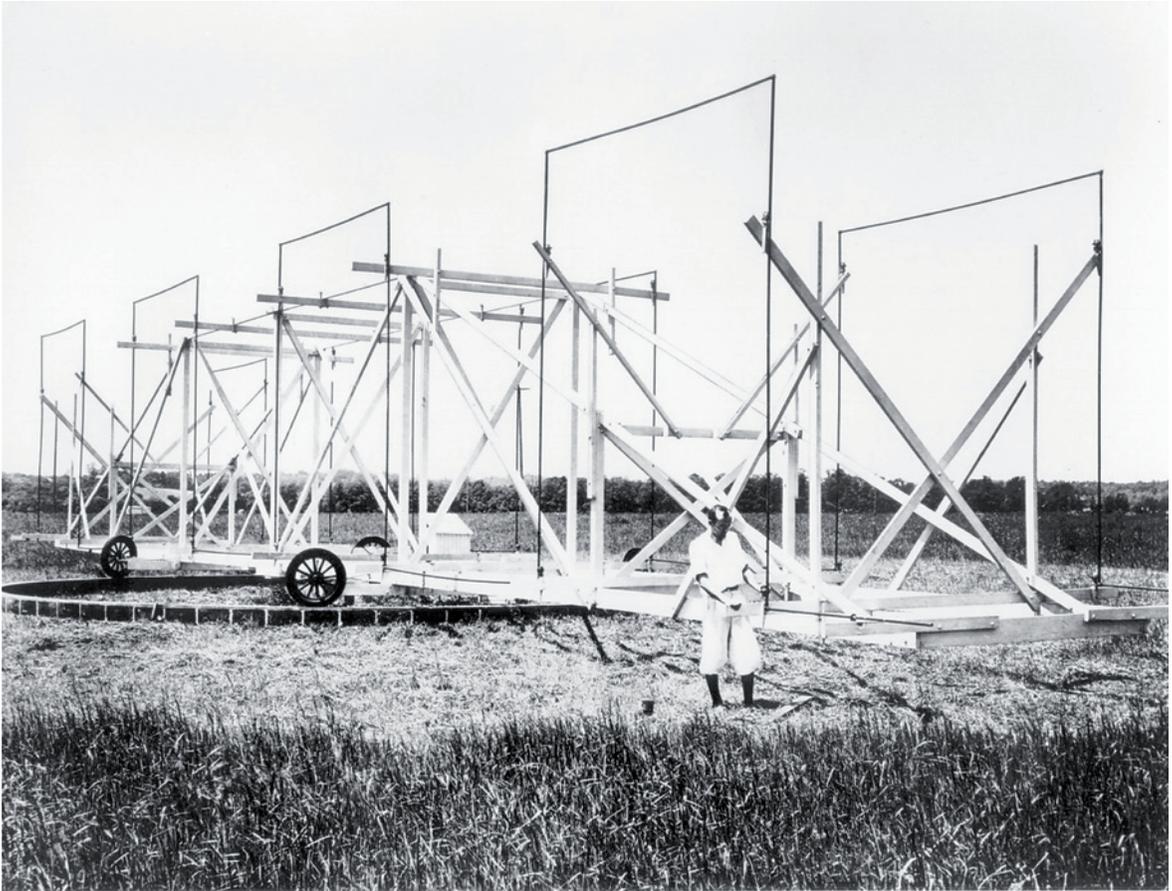


Abb. 1: Karl Jansky mit seiner drehbaren 20,5-MHz-Kurzwellenantenne (15 m Band) in Holmdel (New Jersey, USA). Mit dieser Antenne stellte er nach monatelangen Beobachtungen ein Rauschsignal fest, das aus dem Zentrum der Milchstrasse kam. Jansky war bei den Bell Telephone Laboratories angestellt, die den Kurzwellenbereich für transatlantische Radiotelefonverbindungen nutzen wollte. (Bild: NRAO/AUI, CC BY 3.0)

im sichtbaren Bereich nicht beobachtbar, da Gas- und Staubwolken die Strahlung um mehr als eine Billion (10^{12}) mal abschwächen. Im infraroten Bereich bei $2,2\ \mu\text{m}$ Wellenlänge ist die Abschwächung jedoch nur etwa einen Faktor 10 (vgl. Schödel 2021).

Mit einem 10-Meter-Teleskop ist die maximal mögliche Auflösung $1,2 \times 2,2\ \mu\text{m} / 10\ \text{m} = 0,26\ \mu\text{rad}$ ($\approx 0,054$ Bogensekunden, vgl. VJS 2|2019, S. 6-9). In der Entfernung des galaktischen Zentrums von 27000 Lichtjahren können damit zwei Sterne als getrennt erkannt werden, wenn sie mindestens 440 AE auseinander liegen. (Eine Astronomische Einheit [AE] beträgt 500 Lichtsekunden oder 150 Mio. km [Distanz Erde-Sonne]).

Die atmosphärische Turbulenz verringert diese Auflösung aber noch zusätzlich um den Faktor 10 bis 20. Die beiden Forschungsgruppen um Ghez und Genzel haben dieses Problem mit zwei verschiedenen Techniken gelöst und erzielten nach

einigen Jahren sehr ähnliche Parameter für die Umlaufbahnen von mehreren Sternen. Diese Übereinstimmung der Resultate basierend auf zwei verschiedenen Methoden war entscheidend für deren Akzeptanz innerhalb der anfänglich skeptischen astronomischen Forschergemeinschaft.

Bemerkenswerte Umlaufbahn

Der Stern S2 stellte sich als besonders interessant heraus, weil seine Umlauf-Ellipse eine grosse Exzentrizität zeigte. Der entscheidende Moment geschah im Frühling 2002, als S2 das Perizentrum seiner Bahn und damit seine maximale Geschwindigkeit erreichte. Nun konnten alle Bahnparameter berechnet werden: Die grosse Halbachse ist ca. 1000 AE weit, Umlaufzeit beträgt 16 Jahre und Exzentrizität 0,89 (vgl. Abb. 2). Aus dem dritten Keplersgesetz folgt, dass eine Kreisbahn mit einem Radius von 1000 AE dieselbe Umlaufzeit hätte.

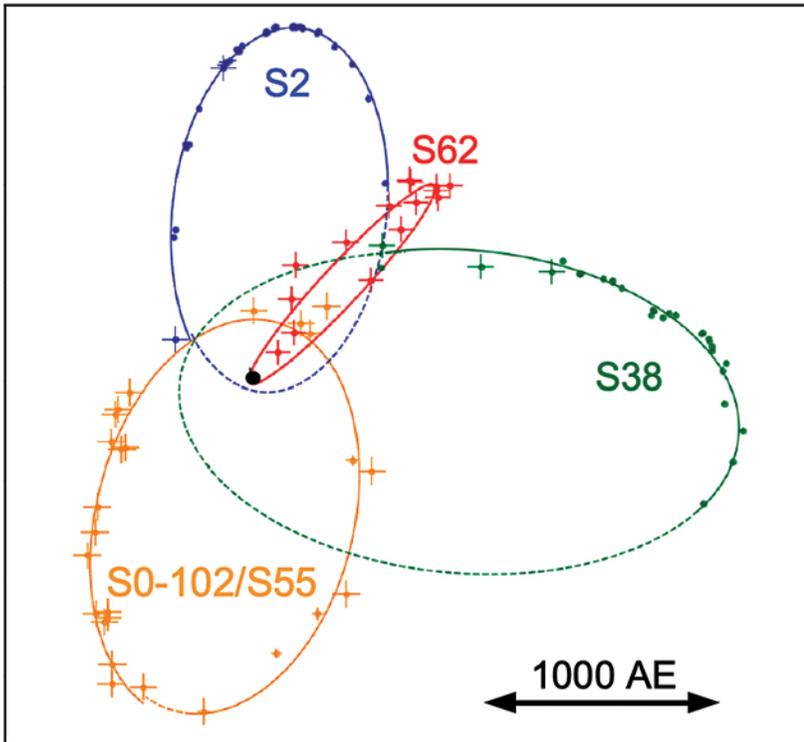


Abb. 2: Bahnellipsen der vier nahe um Sgr A* kreisenden Sterne S2, S62, S38 und SO-102/S55. Die Sterne wurden durch Infrarot-Teleskope beobachtet. Sgr A* liegt beim schwarzen Punkt. (Figur aus Peissker F. et al. 2020, Gold Open Access, Ergänzungen in Schwarz durch F. Gassmann)

Die entsprechende Geschwindigkeit wäre also $2 \times 1000 \times \pi / 16$ AE/Jahr. Nach Umrechnung der Masseinheit ergibt sich die enorme Geschwindigkeit von 1867 km/s.

Bei der gemessenen Exzentrizität von 0,89 ist der Stern S2 im Perizentrum 110 AE (11 Prozent von 1000 AE) vom Zentrum des hypothetischen Schwarzen Lochs entfernt und hat dort näherungsweise (mit dem Newtonschen Energiesatz berechnet) eine Geschwindigkeit von 7750 km/s, also 2,6 Prozent der Lichtgeschwindigkeit! Zum Vergleich: Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 30 km/s um die Sonne. Mit S2 kann also die Relativitätstheorie mit grossen Massen erstmals direkt überprüft werden und bisherige Resultate zeigen eine perfekte Übereinstimmung im Rahmen der Messgenauigkeit.

Die Masse von Sgr A*

Aus der oben erwähnten kreisförmigen Bahn mit Radius r_m und Geschwindigkeit v_m kann auch die Masse M des Zentralobjekts bestimmt werden. Mit

dem Newtonschen Bewegungs- und Gravitationsgesetz ergibt sich die Beziehung $M = v_m^2 r_m / G$, wobei G die Gravitationskonstante bedeutet. Damit erhält man 3,92 Millionen Sonnenmassen, was mit den neuesten Resultaten von 4,15 Millionen (Peissker et al. 2020) gut übereinstimmt.

Obwohl dieses Objekt also 4 Millionen mal mehr Masse hat als die Sonne, leuchtet es nur etwa 100 mal heller als diese. Seine riesige Masse ist innerhalb einer Kugel mit einem Radius von weniger als 110 AE konzentriert.

Die Messungen reichen noch nicht

Der Schwarzschildradius in Kilometern (also der sogenannte Ereignishorizont) eines Schwarzen Lochs ist in guter Näherung dreimal seine Masse gemessen in Sonnenmassen. Für Sgr A* ergibt sich so 12 Mio. km oder 0,08 AE. Ein Perizentrum von 110 AE genügt also nicht, um die Existenz eines Schwarzen Lochs zu beweisen. Wir benötigen zusätzlich ein Bild mit einer Auflösung, die wesentlich besser ist als die 440 AE der Infrarotteleskope.

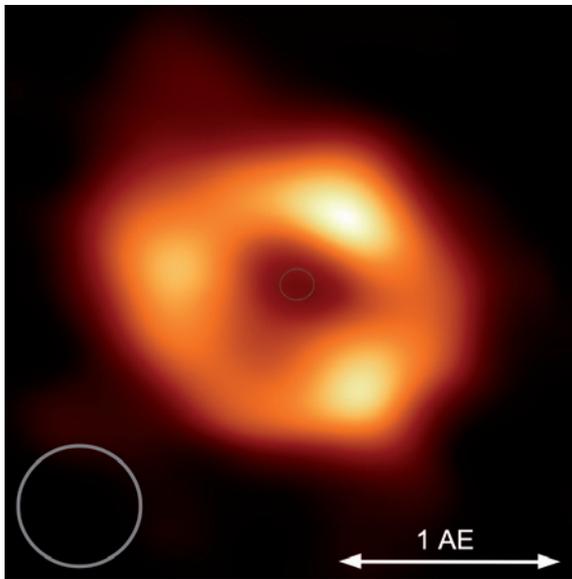


Abb. 3: Das erste Bild von Sgr A*, dem supermassiven Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstrasse. Es wurde 2017 aufgenommen durch das Projekt «Event Horizon Telescope» (EHT). In diesem Projekt wurden Radioteleskope an acht über die Erde verteilten Standorten zusammengeschlossen. Damit wurde die Auflösung eines virtuellen Teleskops mit dem Durchmesser der Erde erreicht. Das Unschärfescheibchen ist als grauer Kreis links unten angegeben. Das Schwarze Loch selbst (Ereignishorizont = grauer Kreis in Bildmitte) ist unsichtbar und liegt im Zentrum seines «Schattens», der einen Durchmesser von 0,43 AE hat. Der leuchtende Ring ist die Lichtemission von Ionen, die das Schwarze Loch mit nahezu Lichtgeschwindigkeit umkreisen. Sgr A* enthält die Masse von 4 Millionen Sonnen. Die ungefähre Grösse von 1 AE ist durch den Doppelpfeil angegeben. (Bild: EHT Collaboration, CC BY 4.0, graue und weisse Ergänzungen F. Gassmann)

Erstaunliche Befunde

Bereits vor diesem lang ersehnten Bild ergaben Spektralanalysen von S2 erstaunliche Resultate: Die Astronomen waren überrascht, dass sich S2 als kurzlebiger Stern mit etwa 15 Sonnenmassen herausstellte. Eine Bildung dieses Sterns so nahe bei einem so riesigen Gravitationszentrum wird als unmöglich erachtet. Aber auch die Sternbildung in grösserer Distanz und anschliessende Heranführung zu Sgr A* scheint aus Zeitgründen nicht in Frage zu kommen. Andrea Ghez hat deshalb in einer Publikation von 2003 vom *paradox of youth* gesprochen (vgl. Schödel 2021). Ghez und Genzel erhielten für ihre bahnbrechenden Entdeckungen den Physik-Nobelpreis 2020.

Das Bild des Schwarzen Lochs, um das sich unsere Galaxie dreht

Die Arbeiten der Gruppen um Ghez und Genzel ergaben noch ein weiteres, sehr nützliches Resultat: Da Sgr A* im Infrarotbereich nicht zu sehen war, kombinierten die Astronomen Infrarotbilder mit Mikrowellenaufnahmen von Radioteleskopen, auf denen die Position von Sgr A* zu erkennen war. Mit Hilfe von 7 in beiden Wellenlängenbereichen gut sichtbaren Sternen, die weniger als 15 Bogensekunden von Sgr A* entfernt liegen, wurde ein Referenzkoordinatensystem entwickelt, in dem das Zentrum von Sgr A* exakt und stabil festgelegt werden konnte.

Dieses Koordinatensystem war hilfreich, um die im Event Horizon Telescope Projekt (EHT) zusammengeschlossenen Radioteleskope exakt auf Sgr A* auszurichten. Die Rohdaten von Sgr A* und M87* wurden alle im April 2017 während 10 Tagen aufgenommen und ergaben über 65 Stunden Daten, die 1024 Festplatten mit einer Kapazität von je 8 Terabyte füllten.

Weil sich Sgr A* innerhalb von Minuten stark veränderte, entschied die EHT-Projektleitung, zuerst das wesentlich ruhigere Objekt M87* in ein Bild umzuwandeln (vgl. VJS 2|2019, S. 4-5) und an diesem einfacheren Objekt die besten Strategien zu entwickeln. Am 10. April 2019 wurde das erste Bild eines Schwarzen Lochs veröffentlicht und als Sensation gefeiert. Obwohl unser Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse wissenschaftlich wesentlich interessanter ist, war das öffentliche Interesse weniger gross, als dessen Bild am 12. Mai 2022 publiziert wurde (vgl. Abb. 3 und Fletcher 2022).

Ähnlich, aber viel kleiner

Das Bild von Sgr A* ist demjenigen von M87* sehr ähnlich, aber rund 1600 mal kleiner. Beide zeigen den typischen Schatten mit einem Radius von 2,6 Schwarzschildradien, was beweist, dass es sich wirklich um ein Schwarzes Loch handelt. Der Radius des Schattens von Sgr A* ist 26 Mikrobogensekunden, was etwa dem Radius eines Doughnuts auf dem Mond entspricht. Der Schwarzschildradius beträgt 10 Mikrobogensekunden oder umgerechnet 0,083 AE, was hervorragend mit dem aus der Masse berechneten Radius von 0,08 AE (vgl. voriger Abschnitt) übereinstimmt. Dies beweist, dass es sich wirklich um ein Schwarzes Loch handelt!

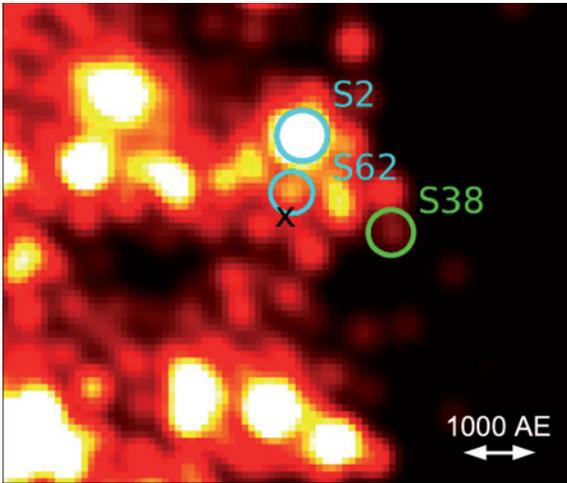


Abb. 4: Am Europäischen Südobservatorium ESO in Chile aufgenommenes Bild des galaktischen Zentrums. Die Position des Schwarzen Lochs Sgr A* ist mit dem schwarzen Kreuz bezeichnet. Kreise markieren die drei um Sgr A* rotierenden Sterne S2, S62 und S38. Das Bild wurde im nahen Infrarot (1,1 - 2,45 μm Wellenlänge) aufgenommen. Mit Hilfe einer adaptiven Optik wurden die Verzerrungen durch die atmosphärische Turbulenz eliminiert und das Licht mit dem neu entwickelten Infrarot-Spektrometer SINFONI analysiert. (Bild aus Peissker et al. 2020, Gold OpenAccess, Massstab angefügt durch F. Gassmann)

Das Schwarze Loch scheint sich zu drehen, aber die Rotationsgeschwindigkeit ist noch unklar. Es ist unruhig und produziert sogar grosse Ausbrüche. Eine solche Röntgen-Flamme (*x-ray-flare*) wurde am 11. April 2017 beobachtet und wird noch analysiert. Auch die Umgebung von Sgr A* ist interessant: Innerhalb eines Radius von 10 Lichtjahren um das Schwarze Loch herum befinden sich über eine Million Sterne. Dies ist im Vergleich zu den 14 Sternen innerhalb einer gleich grossen Kugel rund um die Sonne sehr, sehr viel.

Weitere Sterne nahe bei Sgr A*

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden die Beobachtungsmethoden weiterentwickelt und die Apparaturen erreichten immer höhere Genauigkeiten und Empfindlichkeiten. Dies erlaubte die Entdeckung weiterer Sterne im Nahfeld von Sgr A*.

Sehr interessant ist S62 mit einer Bahn innerhalb von S2 mit noch stärkerer Exzentrizität von 0,976, einer grossen Halbachse von nur 740 AE und einer Umlaufzeit von 9,9 Jahren (vgl. Abb. 2 und 4). Er nähert sich dem Schwarzen Loch im Perizentrum

bis auf 18 AE und hat dort eine Geschwindigkeit von sagenhaften 20 000 km/s, was 6,7 Prozent der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Zufolge relativistischer Effekte nimmt seine Masse dabei um messbare 2,3 Promille zu. Damit wird es möglich, die Relativitätstheorie noch viel genauer zu überprüfen als bisher. So dreht sich die Bahnellipse aufgrund relativistischer Effekte um das Gravitationszentrum herum.

Beim Merkur konnte dieser Effekt nachgewiesen werden, obwohl die Drehung nur 43 Bogen Sekunden pro Jahrhundert ausmacht. Bei S62 vergrössert sich die Drehgeschwindigkeit um etwa den Faktor 1000 auf 12,5 Winkelgrade pro Jahrhundert. Damit lässt sich der Effekt bei S62 wesentlich präziser messen als beim Merkur. Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie wird also zum Prüffeld für die relativistische Physik!

Gibt es Schwarze Löcher näher bei uns?

Astronomen nehmen an, dass es mindestens zwölf weitere Schwarze Löcher gibt, die näher bei uns sind als Sgr A* (vgl. List of nearest known black holes auf Wikipedia). Das der Erde am nächsten liegende vermutete Schwarze Loch «Gaia BH1» wurde 2022 mit Hilfe des ESA-Weltraumobservatoriums «Gaia» entdeckt. Es ist 1560 Lichtjahre entfernt und hat eine Masse von fast 10 Sonnen und daher einen Radius des Ereignishorizonts von gegen 30 km. Es wird umkreist von einem beobachtbaren Stern, der stark unserer Sonne gleicht. Da sich dieses Binärsystem in einer Region mit sehr kleiner Massendichte befindet, kann sich kein Feuerring um das hungernde Schwarze Loch herum bilden, weshalb dieses vollkommen unsichtbar ist. Es wäre höchstens durch den Gravitationslinseneffekt zu entdecken, wenn es sich über Hintergrundsterne hinwegbewegen würde.

Fritz Gassmann

Literatur

Fletcher S. 2022. Portrait of a Black Hole. Scientific American, Sept. 2022: 46-51.

Peissker F. et al. 2020. S62 on a 9.9-year orbit around Sgr A*. ApJ 889:1, arXiv:2002.02341v1, 31.1.2020.

Schödel R. 2021. The Discovery of the Massive Black Hole at the Centre of the Milky way. SPG Mitteilungen 63: 10-12.