

Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 40 (2024)

Artikel: Das supermassive Schwarze Loch in unserer Galaxie
Autor: Gassmann, Fritz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1077402>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



FRITZ GASSMANN

Das supermassive Schwarze Loch in unserer Galaxie

Abstract

Three years after the publication of the picture of the Black Hole M87*, mankind saw in spring 2022 for the first time a picture of the supermassive Black Hole Sgr A* in the center of the Milky Way, i.e. in our own Galaxy. This article sheds light on the history of the development of *Radio Astronomy* and shows, why this main aim of the Project Event Horizon Telescope (EHT) was more difficult to reach than the picture of M87*. From the scientific point of view, the picture of Sgr A* is much more interesting and provides for physicists the final proof that Black Holes are real.

Zusammenfassung

Drei Jahre nach der Veröffentlichung des Bildes des Schwarzen Lochs M87* sah die Menschheit im Frühling 2022 erstmals ein Bild des supermassiven Schwarzen Lochs Sgr A* im Zentrum der Milchstrasse, also unserer eigenen Galaxie. Dieser Artikel beleuchtet die Entwicklungsgeschichte der *Radioastronomie* und zeigt, weshalb dieses eigentliche Zielbild des Projektes Event Horizon Telescope (EHT) schwieriger zu erreichen war als dasjenige von M87*, aber wissenschaftlich wesentlich interessanter ist. Für die Physiker ist es der endgültige Beweis, dass Schwarze Löcher real sind.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Erste Entdeckung von Radiowellen aus der Milchstrasse
3. Die Entwicklung der Radioastronomie
4. Stellenwert der Radioastronomie
5. Entdeckung der Radioquelle Sgr A* im Zentrum der Milchstrasse
6. Um Sgr A* kreisende Sterne
7. Sternbahnen zeigen Monstermasse von 4 Mio. Sonnen
8. Nur ein Bild kann definitiv entscheiden, ob Sgr A* ein Schwarzes Loch ist
9. Sgr A* als relativistisches Labor
10. Gibt es näher liegende Schwarze Löcher?
11. Zukunftsaussichten
12. Quellenverzeichnis

1. Einleitung

Im vorherigen Band 39 (GASSMANN, 2020) erschien mein Artikel «Von der Lochkamera zum ersten Bild eines Schwarzen Lochs», der die Technik hinter Radioteleskopen erklärte. Mit der Lochkamera wurde gezeigt, dass die Auflösung eines Bildes umso besser wird, je grösser der Durchmesser der Empfangsantenne und je kleiner die verwendete Wellenlänge sind. Im dort ebenfalls vorgestellten EHT-Projekt (EHT = Event Horizon Telescope) wurde die kleinstmögliche Wellenlänge für Radioteleskope von 1,3 mm mit dem grösstmöglichen Antennendurchmesser von 11 000 km (fast Erddurchmesser) kombiniert, um eine Auflösung zu erhalten, mit der man Tennisbälle auf dem Mond hätte sehen können. Das Erstaunliche ist an der sogenannten VLBI-Technik (VLBI = Very Long Baseline Interferometry), dass es nicht notwendig ist, eine zusammenhängende Parabolantenne mit 11 000 km Durchmesser zu bauen: Es genügt, einige wenige Punkte der Antenne korrekt miteinander zu synchronisieren, um ein entsprechend aufgelöstes Bild zu erhalten. Dies ist allerdings schneller gesagt als getan und hat zwei der grössten Rechenzentren der Welt mehrere Jahre beansprucht. All dies und noch viel mehr wurde im Band 39 dargelegt und wird deshalb im vorliegenden Artikel höchstens stark zusammengefasst erwähnt.

Das im Band 39 behandelte Zwischenresultat des EHT-Projektes war das erste Bild eines Schwarzen Lochs, das die Menschheit je gesehen hat. Dies war zurecht eine Sensation aber dabei ging unter, dass der grosse Wunsch der Physiker noch nicht erfüllt werden konnte, nämlich ein einfacher und direkter Beweis eines Schwarzen Lochs, der jeden denkbaren Zweifel ausschliesst. Natürlich wurde betont, dass alle Aspekte des Bildes von M87* mit 6,5 Mia. Sonnenmassen in 55 Mio. Lichtjahren Entfernung mit der Allgemeinen Relativitätstheorie übereinstimmen. Aber hinter allen Angaben zu diesem Schwarzen Loch stecken Kalibrierungen und Annahmen, die man lieber durch direkte Beobachtungen ersetzen möchte. Was braucht es für einen direkten Beweis eines Schwarzen Lochs, das für M87* nur teilweise erbracht werden kann? Dies sind drei Angaben:

- Ein Bild der Umgebung des Schwarzen Lochs mit seinem feurigen Ring und seinem «Schatten», von dessen Radius mit der Relativitätstheorie der Radius des Ereignishorizonts (auch Schwarzschild-Radius genannt) berechnet werden kann.
- Eine direkte Messung der Masse des Schwarzen Lochs durch die Vermessung von Bahnen von Sternen, die das Schwarze Loch umkreisen. Die grosse Halbachse der Bahnellipse zusammen mit der Umlaufzeit ergibt mit Hilfe der Newtonschen Gesetze die Masse des Zentralkörpers.
- Da bei astronomischen Beobachtungen nur relative Längen (Winkel) direkt gemessen werden können, für beide oben aufgeführten Grössen aber absolute Längen gebraucht werden, muss die Distanz zum beobachteten Phänomen möglichst genau bekannt sein, um Winkeldifferenzen in Distanzen umrechnen zu können.

Bei M87* mussten alle Berechnungen auf dem ersten und dem dritten Punkt beruhen. Beim hier vorgestellten Schwarzen Loch Sgr A* (Sgr = Saggitarius, also Sternbild Schütze) im Zentrum unserer eigenen Galaxie, der Milchstrasse, konnten mit voneinander unabhängigen Beobachtungen alle drei Punkte erfüllt werden. Es liegt etwa 2000 mal näher als M87*, ist aber rund 1600 mal kleiner als dieses. Rein beobachtungstechnisch heben sich diese beiden Faktoren gerade etwa auf. Welchen wichtigen Grund hatte dann das EHT-Team, das wissenschaftlich viel interessantere Schwarze Loch Sgr A* erst als zweites auszuwerten, nachdem beide bereits im April 2017 innerhalb von 10 Tagen aufgenommen wurden? Da sich das grosse Schwarze Loch M87* viel ruhiger verhielt als das unserige und die Sicht nicht durch dazwischenliegende Gaswolken getrübt wird, wurde entschieden, dessen Auswertung vorzuziehen. Obschon die verschiedenen Aufnahmen einander ähnlich waren, dauerten die Arbeiten zwei Jahre, bis das Bild von M87* im April 2019 der Öffentlichkeit vorgestellt werden konnte. In diesen zwei Jahren wurde eine Strategie entwickelt, die es erlaubte, das unruhige Bild von Sgr A* innerhalb weiterer dreier Jahre fertigzustellen. Am 12. Mai 2022 wurde das Bild von Sgr A* erstmals publiziert, fand aber in der Öffentlichkeit keine grosse Resonanz, da es aus grundsätzlichen physikalischen Gründen sehr ähnlich wie das bekannte erste Bild aussah und seine wissenschaftliche Bedeutung schwieriger zu verstehen war.

Im vorliegenden Artikel werde ich auf die Entdeckungsgeschichte unseres galaktischen Schwarzen Lochs eingehen, die eng mit der Entwicklung der *Radioastronomie* verknüpft ist. Dann werde ich zeigen, wie die Masse des Schwarzen Lochs unabhängig davon mit Hilfe der *Infrarot-Astronomie* bestimmt werden konnte. Zusammen mit der ebenfalls recht genau bekannten Entfernung von 27 000 Lichtjahren ergab sich ein überbestimmtes System von Beziehungen: Der Schwarzschildradius konnte einerseits aus der Masse berechnet werden und andererseits konnte er aus dem bildlich erfassten «Schatten» des Schwarzen Lochs abgeleitet werden. Die Übereinstimmung der beiden Resultate war für die Physiker die Bestätigung, dass wirklich alles zusammenpasst.

2. Erste Entdeckung von Radiowellen aus der Milchstrasse

Es war um 1900 bekannt, dass jeder Stern Radiowellen aussenden musste, nachdem der deutsche Physiker Max Planck (1858–1947) das Strahlungsgesetz veröffentlichte. Nach diesem sehr allgemein gültigen Gesetz senden ideale, sogenannte *schwarze Körper* (fast alle realen Körper kommen den *schwarzen Körpern* sehr nahe) elektromagnetische Strahlung aus, die nur von deren absoluter Temperatur abhängt. Das Spektrum der Strahlung ist kontinuierlich und überstreich alle Wellenlängen von Radiowellen über Mikrowellen, infrarotes Licht (Wärmestrahlung), sichtbares Licht, ultraviolettes Licht bis zu Röntgenstrahlen. Die in *Kelvin* gemesse-

ne absolute Temperatur bestimmt, bei welcher Wellenlänge am meisten Strahlung emittiert wird. Beim absoluten Nullpunkt, also bei 0 Kelvin, wird keine Strahlung emittiert (0 K entspricht $-273,15^{\circ}\text{C}$ und ein Temperaturunterschied von 1 K ist dasselbe wie ein Temperaturunterschied von 1°C). Jeder Körper, der wärmer als 0 K ist, strahlt elektromagnetische Wellen ab, deren Intensität mit zunehmender Temperatur ansteigt. Gleichzeitig verschiebt sich auch das Maximum der Emission zu immer kürzeren Wellenlängen (d.h. zu höheren Frequenzen). Bei einem rotglühenden Draht (man denke an eine Glühbirne) liegt das Emissionsmaximum im fernen Infrarot und verschiebt sich mit zunehmender Temperatur zum näheren Infrarot. Im menschlichen Auge sprechen so auch Grün-Sensoren vermehrt an und die Farbempfindung wechselt von Rot nach Gelb. Bei noch höherer Temperatur reagieren auch die Blau-Sensoren und die Farbempfindung wird weissglühend. Die Sonnenoberfläche strahlt mit 6000 K neutrales Tageslicht aus, weil das Emissionsmaximum für Menschen im sichtbaren (grünen) Bereich liegt und deshalb alle drei Sensoren (Zapfen für Rot, Grün, und Blau) gleichmäßig angeregt werden (dies ist kein Zufall, sondern evolutiv so entstanden). Gegen kürzere und längere Wellen fällt die Intensität des Sonnenspektrums stark ab. Im Radiobereich mit Meter- bis Kilometerwellen ist die Strahlung 10^{24} bis 10^{36} mal schwächer, weshalb sie mit den einfachen Empfangsgeräten der Zeit kurz nach 1900 trotz gezielter Suche nicht festgestellt werden konnte.

Es dauerte drei Jahrzehnte, bis die Radiotechnik so weit entwickelt war, dass sich erste Radiosignale aus dem Weltraum bemerkbar machen konnten. Im Dezember 1931 stiess der US Physiker *Karl G. Jansky* (1905–1950) bei der Untersuchung von Störungen im kommerziell wichtigen Radio-Kurzwellengebiet zufällig auf rauschartige Störungen, 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 weit ausserhalb des Sonnensystems handeln. Nach weiteren Beobachtungen wurde klar, dass die Radiowellen, die die Störungen verursachten, aus dem Sternbild Sagittarius (Schütze) stammen mussten, wo die Milchstrasse am hellsten erscheint und die Sterndichte am grössten ist. Jansky nahm deshalb an, dass die Radiowellen aus unserer Galaxie stammten und nannte die Störungen *galaktisches Rauschen* ($\gamma\alpha\lambda\alpha$ = griech. Milch). Da man ausgehend von der Sonne immer noch keine Signale empfangen konnte, waren die Quellen des galaktischen Rauschens ein Rätsel.

Erst 1942, als in England Versuche mit Radargeräten durchgeführt wurden, konnten Radiowellen mit einer Wellenlänge um 5 Meter nachgewiesen werden, die eindeutig von der Sonne stammen mussten. Damit wurde erstmals gezeigt, dass Sterne wirklich Radiostrahler sind und es sich lohnen würde, Radiowellen aus dem Weltraum zu untersuchen.

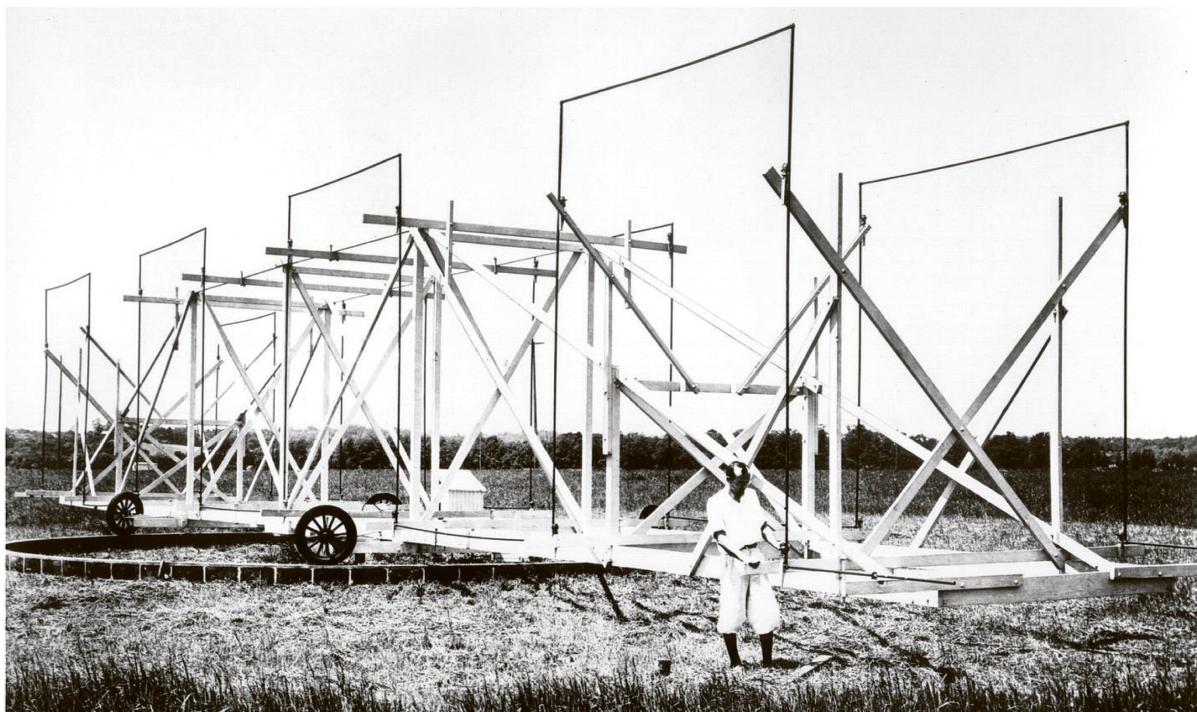


Abb. 1: Karl G. Jansky mit seiner drehbaren 20,5 MHz Kurzwellenantenne (15 m Band) in Holmdel (New Jersey, USA), mit der er nach monatelangen Beobachtungen ein Rauschsignal feststellte, das von der Richtung zum Zentrum der Milchstrasse her kam. Jansky war bei den Bell Telephone Laboratories angestellt, die den Kurzwellenbereich für transatlantische Radiotelefonverbindungen nutzen wollte. (Image courtesy of NRAO/AUI, CC BY 3.0)

3. Die Entwicklung der Radioastronomie

«Wie das Gemurmel, wenn tausend Stimmen durcheinander reden, oder wie das Geräusch eines Radioapparates beim Durchgang eines Gewitters», so beschrieb Max Waldmeier (1912–2000) im Neujahrsblatt auf das Jahr 1954 der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich die Signale, welche die damals neu aufkommende *Radioastronomie* untersucht (WALDMEIER, 1954). Waldmeier war Professor und Vorsteher der eidgenössischen Sternwarte an der ETH Zürich und bekannt durch die Führung des Welt-Sonnenfleckenzentrums. Während seiner Amtszeit von 1945 bis 1979 wurden Sonnenbeobachtungen von über 30 Observatorien nach Zürich geliefert, wo sie zusammen mit eigenen Beobachtungen in Zürich und Locarno zur Zürcher Sonnenflecken-Relativzahl kondensiert wurden. Es entstand eine lückenlose Reihe, die bis 1610 zurückreicht und später im Rahmen der Klimaforschung viel Beachtung fand.

Die *Radioastronomie* öffnete ein neues Fenster zu den Sternen. Aufgrund der Absorptionseigenschaften der Atmosphäre ist das traditionelle sichtbare Fenster auf einen engen Spektralbereich begrenzt, der nicht wesentlich über das sichtbare Licht hinausreicht. Zudem wird die Sicht oft durch Wolken beeinträchtigt. Erst bei viel längeren Wellen im Millimeterbereich wird die Atmosphäre wieder durchsichtig.

Dies bleibt so bis zu einer Wellenlänge von rund 10 Metern (Radio-Kurzwellenbereich), wo das Spektrum durch ionisierte Schichten in 100 bis 400 Kilometern Höhe erneut abgeschnitten wird.

Dieses riesige Fenster steht auch bei getrübter Sicht weitgehend offen; die *Radioastronomie* wird durch die Atmosphäre also wenig gestört. Ihre Begrenzung liegt vielmehr in der Schwäche der Signale, im Eigenrauschen der Empfänger und in der Überdeckung durch terrestrische Funksignale. Die über alle Wellenlängen hinweg summierte Leistung der auf die gesamte Erdoberfläche einfallenden galaktischen Strahlung beträgt nur rund 1 Watt. Die Empfangsantennen und die angeschlossenen Hochfrequenzverstärker erzeugen selbst Radiowellen nach demselben Planckschen Strahlungsgesetz, nach dem auch die Sterne Radiowellen aussenden. Trotz der viel niedrigeren Temperatur der Empfangseinrichtungen gegenüber derjenigen der Sterne spielt das Eigenrauschen eine wichtige Rolle, wenn derart kleine Leistungen verstärkt werden sollen. Man entschärft das Problem durch den Bau von Antennen mit grossen parabolischen Reflektoren, welche die Radiowellen auf eine kleine Antenne im Zentrum fokussieren. So wird die Leistung der schwachen galaktischen Strahlung um viele Zehnerpotenzen erhöht. Das Lovell Teleskop der Jodrell Bank Station, 40 Kilometer südlich von Manchester (GB), hat einen Durchmesser von 76 Metern und war bei der Inbetriebnahme 1957 das weltweit grösste in alle Richtungen drehbare Radioteleskop. Heute haben etliche grosse drehbare Radioteleskope Durchmesser von 100 m und einige wenige sogar mehr.

Die schlechte Richtungsauflösung war eine grosse Herausforderung für die Radioastronomen. Für alle Arten von Wellen gilt aufgrund von Interferenzerscheinungen, dass die Richtungsauflösung proportional zu λ/D ist, wobei D der Durchmesser der Antenne und λ die Wellenlänge sind. Um eine hohe Auflösung zu erzielen, braucht es also riesige Radioteleskope, die möglichst kleine Wellenlängen empfangen. Zwei nebeneinander liegende Sterne sind gerade noch auseinander zu halten, wenn der zwischen ihnen liegende Winkel im Bogenmass $1,2 \lambda/D$ beträgt. Der eine Stern liegt dann genau im ersten Interferenz-Minimum des anderen (der Faktor 1,2 ist das Resultat einer komplizierteren Rechnung und gilt für rotationssymmetrische Antennen). Zur Umrechnung in Winkelgrade muss man noch mit dem Faktor $360^\circ/2\pi$ multiplizieren. Drei Beispiele sollen den Zusammenhang verdeutlichen:

- Ein Radioteleskop mit einer Parabolantenne von 100 m Durchmesser kann bei einer Wellenlänge von 1 m zwei Quellen nur dann als getrennt wahrnehmen, wenn diese um mehr als 0,7 Winkelgrade entsprechend 42 Winkelminuten auseinander liegen. Die Sonnenscheibe oder der Mond mit einem Durchmesser von je 0,5 Grad können also beispielsweise nicht aufgelöst werden und erscheinen nur als Punkte.
- Ein optisches Teleskop mit einem Primärspiegel von 1 m Durchmesser erzielt bei einer Wellenlänge im grünen Bereich (Wellenlänge 0,5 μm) eine 20 000 mal bessere Auflösung von 0,13 Winkelsekunden.

- Mit einem Richtmikrofon in einem 1 m Parabolreflektor kann man zwei Fledermäuse (Empfangsfrequenz 20 kHz entsprechend 1,7 cm Wellenlänge) richtungsgetrennt wahrnehmen, wenn sie in 100 m Distanz 1,7 m voneinander entfernt sind und gleichzeitig rufen.

Um die Auflösung zu verbessern, stiessen die Radioastronomen zu immer kleineren Wellenlängen vor. Da die Technik beim Übergang von Meter- zu Dezimeter- und schliesslich Millimeterwellen immer anspruchsvoller wird, dauerte diese Entwicklung einige Jahrzehnte.

Es gibt glücklicherweise noch eine zweite Möglichkeit zur Verbesserung der Auflösung: Werden mehrere weit voneinander entfernte Parabolantennen zusammengeschlossen, wirken sie wie ein einzelnes Radioteleskop mit entsprechend grossem Antennendurchmesser. Die Auflösung kann auf diese Weise fast beliebig verbessert werden. Erstaunlicherweise beschreibt *Max Waldmeier* in seinem Neujahrsblatt auf das Jahr 1954 bereits detailliert Interferenzbeobachtungen mit zwei voneinander

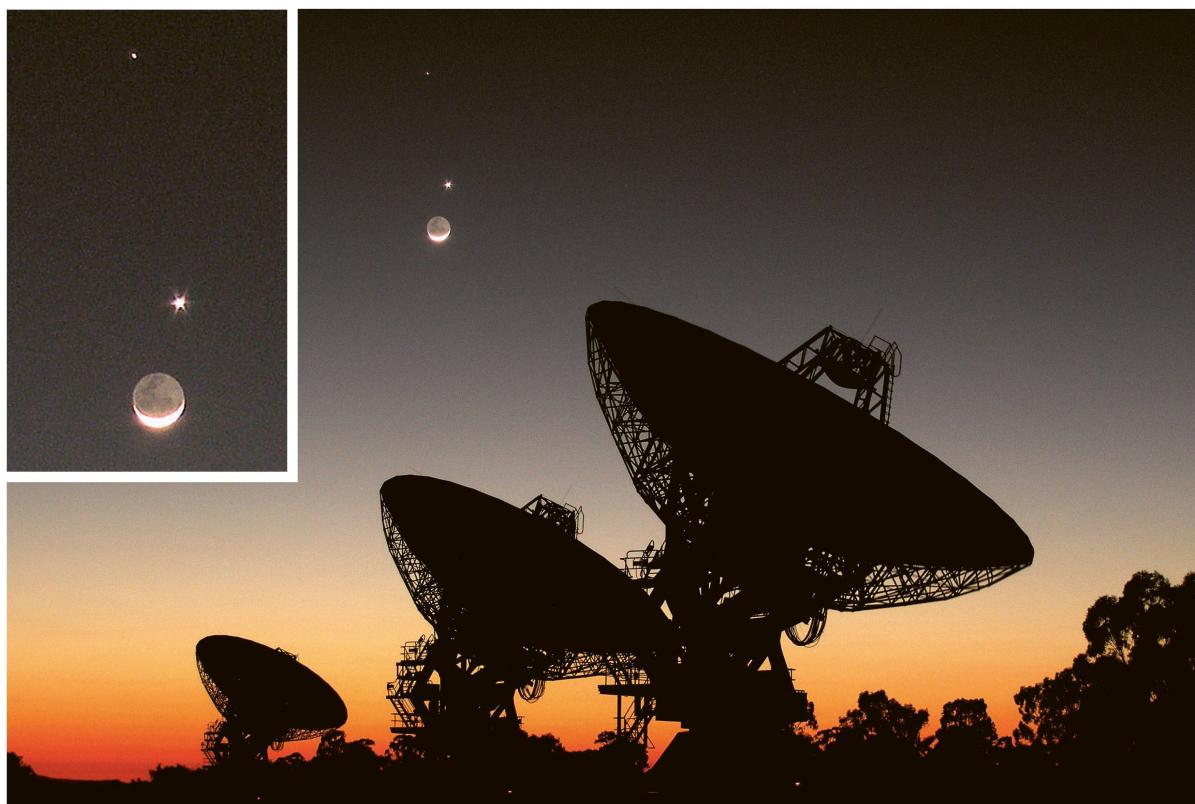


Abb. 2: Drei der sechs 22-Meter-Radioteleskop-Antennen des 1988 errichteten Paul Wild Observatoriums bei Narrabri in Australien kurz vor dem Sonnenaufgang. Neben dem Mond ist die Venus zu sehen, am oberen Bildrand zudem der Merkur. 5 der 6 Teleskope sind auf einer West-Ost orientierten 3 km langen Schiene verschiebbar. Das 6. Teleskop steht fix auf derselben Linie in 3 km Entfernung vom Ende der Schiene. Die Empfänger wurden 2007 auf 7 mm kurze Wellen aufgerüstet. Die Auflösung beträgt seitdem in einer Dimension $\lambda/D = 1,2 \text{ parc} = 67 \text{ Mikrograde oder } 0,24 \text{ Bogensekunden (} D = 6 \text{ km)}$.

Bild: CSIRO, CC BY 3.0

entfernten Radioteleskopen, um die Auflösung in einer Dimension entscheidend zu verbessern (WALDMEIER, 1954). 1974 erhielt *Martin Ryle* (1918–1984) den Nobelpreis für seine Arbeiten zur Radio-Interferometrie. Seine Ideen wurden beharrlich weiterentwickelt und gipfelten in den kürzlich publizierten Bildern der Schwarzen Löcher M87* (GASSMANN, 2020) und Sgr A*. Das in Abb. 2 gezeigte Paul Wild Observatorium in Australien besteht beispielsweise aus sechs in einer Linie aufgestellten und zusammengeschalteten Antennen. Mit seiner nach 2007 verbesserten Auflösung dank der Aufrüstung der Empfänger auf 7 mm kurze Wellen wurde es sogar zeitweise zur Verfolgung von Raumschiffen der NASA eingesetzt. Da sich die Erde dreht, kann dasselbe astronomische Objekt durch Kombination mehrerer Aufnahmen auch in zwei Dimensionen scharf aufgenommen werden.

4. Stellenwert der Radioastronomie

Radioteleskope ergänzen die klassischen Spiegelteleskope in idealer Weise, indem sie durch Wolken in der Atmosphäre wie auch durch kosmische Staub- und Gaswolken hindurchsehen können. Eine wichtige Rolle spielt dabei die 21 Zentimeter Spektrallinie von atomarem Wasserstoff, das weitaus am häufigsten anzutreffende Element im Weltraum. Im Grundzustand können die Spins des Protons und des Elektrons eines Wasserstoffatoms parallel oder antiparallel angeordnet sein, wobei die antiparallele Anordnung eine etwas tiefere Energie hat. Aus der Energiedifferenz kann die Wellenlänge von emittierter oder absorbierter Strahlung berechnet werden. Mit Beobachtungen in diesem 21 Zentimeter-Bereich lassen sich Wasserstoffkonzentrationen bestimmen und aus der Dopplerverschiebung erhält man die radiale Geschwindigkeit dieser Wolken gegenüber der Erde. Die Zusammensetzung vieler Beobachtungen ergab ein detailliertes Bild der dynamischen Struktur der Milchstrasse, das beispielsweise zeigt, wie die Gase immer schneller um das galaktische Zentrum rotieren, je näher sie ihm sind.

Eine spektakuläre Entdeckung waren die *Radiopulsare*, die 1967 durch *Jocelyn Bell* (*1943, Abb. 3) und *Antony Hewish* (1924–2021) am Mullard Radio Astronomy Observatory in der Nähe von Cambridge (England) entdeckt wurden (BELL BURNELL, 1979). Der aus Österreich stammende Physiker *Thomas Gold* (1920–2004), Professor für Astronomie an der Harvard University, vermutete, dass Pulsare rotierende Neutronensterne sind. Obwohl der bekannte Astronom *Fritz Zwicky* (1898–1974) aus Mollis (Kt. Glarus) Neutronensterne bereits in den 1930er Jahren postulierte, wurde Golds Idee vorerst als absurd abgelehnt. Heute weiß man, dass nach einer Supernova Neutronensterne entstehen können, die etwa 1,4 bis 2 Sonnenmassen besitzen, aber trotzdem nur um die 20 Kilometer Durchmesser haben. Sie rotieren teilweise relativ langsam wie ein Leuchtturm, können sich aber auch bis mehrere hundertmal pro Sekunde um ihre Achse drehen. Ihr starkes Magnetfeld

steht in einem bestimmten Winkel zur Drehachse und dreht sich mit, wobei es ein Plasma aus Protonen, Elektronen und Positronen mitreisst. Beim Entstehungsmechanismus der emittierten Strahlung sind immer noch Fragen offen, es dürfte sich aber um Synchrotronstrahlung handeln, die im Radiowellennbereich sogar kohärent sein könnte. Falls die Verbindungsline zwischen der Erde und dem Pulsar vom sich drehenden Strahlungskegel überstrichen wird, kann man Pulse registrieren, deren Frequenz teilweise so stabil ist wie diejenige einer Atomuhr.

Mit Hilfe von Radiowellen wurden zudem Überreste von Supernovae, Quasare und Radiogalaxien entdeckt. Auch bezüglich der Sonne wurden viele Erkenntnisse gewonnen. Und nicht zuletzt wird die *Radioastronomie* auch bei der Suche nach ausserirdischer Intelligenz eingesetzt.



Abb. 3: Jocelyn Bell (heute: Jocelyn Bell Burnell, rechts) analysierte 1967 täglich rund 30 Meter Papierstreifen, auf denen Radiosignale aus dem Weltraum aufgezeichnet waren. Sie entdeckte innerhalb von 5 Kilometern etwa 5 Zentimeter, die eigenartige Signale zeigten. Schnellere Aufzeichnungen für dieselbe Himmelsregion zeigten regelmässige Pulse im Abstand von 1,33 Sekunden. Das Radioteleskop (links) bestand aus über 2000 Dipolantennen und benötigte etwa 200 Kilometer Drähte und Kabel auf einer Fläche von 2 Hektaren, Photo: Cambridge University.

5. Entdeckung der Radioquelle Sgr A* im Zentrum der Milchstrasse

Die US Radioastronomen Robert L. Brown (1943–2014) und Bruce Balick (*1943) entdeckten 1974 mit Hilfe von gekoppelten Radioteleskopen, die rund 40 km voneinander entfernt waren, eine isolierte schwache Radioquelle im Zentrum der Milchstrasse. Die Quelle zeigte kein thermisches Strahlungsspektrum wie ein Stern, war erstaunlich klein und regte die Wasserstoffwolken in der Umgebung zum Strahlen an. Sie 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 und basiert auf Beobachtungen von sogenannten Quasaren (oder Quasi Stellar Objects). Diese Quasare wurden in kosmologischen Entfernung von vielen Milliarden Lichtjahren gefunden und waren teilweise heller als ganze Galaxien. Als plausibelste Energiequelle wurde die Umwandlung von Gravitationsenergie in elektromagnetische Strahlung in der Umgebung von Schwar-

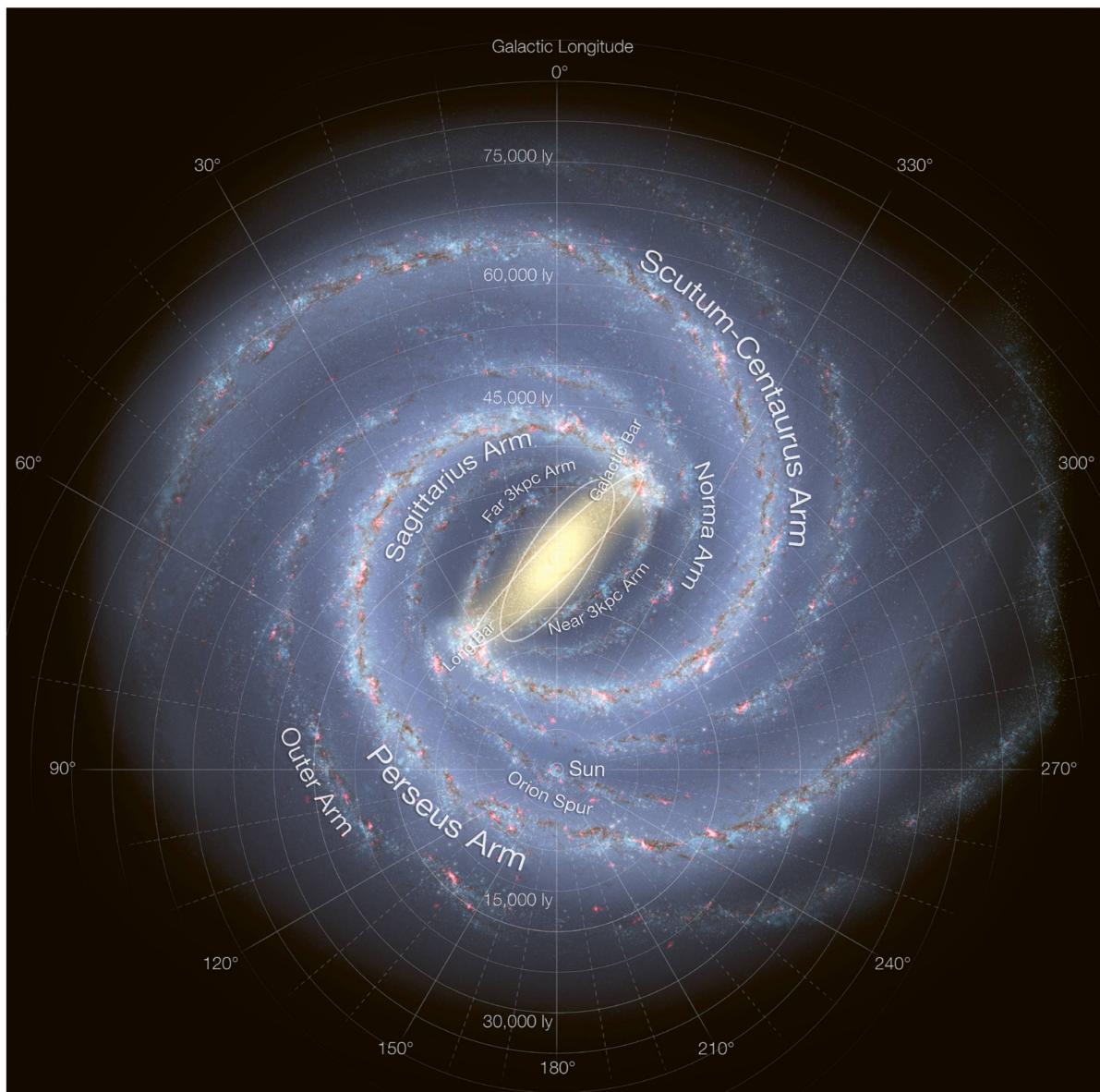


Abb. 4: Künstlerische Darstellung der Milchstrasse mit galaktischen Koordinaten und Bezeichnung der Arme. Kreise geben Distanzen von der Sonne in Stufen von 5000 Lichtjahren (ly). Das Schwarze Loch liegt 27 000 ly in der Richtung 0° in der Mitte des gelben Balkens mit sehr hoher Sterndichte. Die Sonne liegt auf dem kleinen Orion-Nebenarm zwischen dem Perseus- und dem Sagittarius-Arm im Nullpunkt des Koordinatensystems. Sie dreht sich in rund 230 Mio. Jahren um das Schwarze Loch, was einer Bahngeschwindigkeit von etwa 220 km/s entspricht. (Bild NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt – <http://www.eso.org/public/images/eso1339el/>, gemeinfrei)

zen 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 und konnte deshalb nicht früher entdeckt werden.

6. 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* (*1965, USA) und *Reinhard Genzel* (*1952, D) versuchten mit unterschiedlichen Methoden, Bahnen von um Sgr A* kreisenden Sternen zu vermessen. Das Zentrum der Milchstrasse ist von der Erde aus 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 ein Faktor 10 (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). In der Entfernung des galaktischen Zentrums von 27 000 Lichtjahren können also 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 Turbulenz-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.

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: Grosse Halbachse ca. 1000 AE, Umlaufzeit 16 Jahre und Exzentrizität 0,89 (vgl. Abb. 5). Aus dem dritten Keplergesetz folgt, dass eine Kreisbahn mit einem Radius von 1000 AE dieselbe Umlaufzeit hätte. Die entsprechende Geschwindigkeit wäre also $2\pi \times 1000 / 16 \text{ AE/Jahr}$. 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% 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 % der Lichtgeschwindigkeit! Zum Vergleich: Die Erde bewegt sich mit 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.

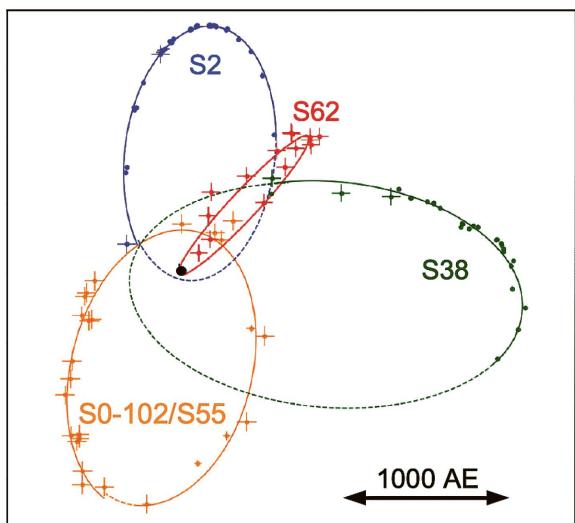


Abb. 5: Bahnellipsen von vier nahe um Sgr A* kreisende Sterne S2, S62, S38 und S0-102/S55, die durch Infrarot-Teleskope beobachtet wurden. Sgr A* liegt beim schwarzen Punkt. (Bild aus PEISSKER *et al.* 2020. Gold Open Access. Ergänzungen in Schwarz durch F. Gassmann)

7. Sternbahnen zeigen Monstermasse von 4 Mio. Sonnen

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 durch kurze Umrechnung die Beziehung $M = v_m^2 r_m / G$, wobei G die Gravitationskonstante bedeutet. Damit erhält man 3,9 Mio. Sonnenmassen, was mit den neuesten Resultaten von 4,0 Mio. (EHT, 2022) gut übereinstimmt. Obwohl dieses Objekt 4 Mio. mal mehr Masse hat als die Sonne, leuchtet es nur etwa 100 mal heller als diese. Gemäss der oben erläuterten Umlaufbahn des Sterns S2 ist seine riesige Masse innerhalb einer Kugel mit einem Radius von weniger als 110 AE konzentriert.

Der Schwarzschildradius $r^* = 2GM/c^2$ ist der Radius des Ereignishorizonts eines Schwarzen Lochs der Masse M (G ist die Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit). Für eine Erklärung dieses Zusammenhangs, den *Karl Schwarzschild* (1873–1916) 1916 erstmals von Hand aus der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeleitet hat, sei auf GASSMANN (2016) verwiesen. Setzt man für M die Masse der Sonne ein, erhält man für r^* fast genau 3 km. Für Sgr A* mit 4 Mio. Sonnen-

massen ergibt sich also 12 Mio. km oder 0,08 AE. Das S2-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.

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 (SCHÖDEL, 2021).

Ghez und Genzel erhielten für Ihre Entdeckungen den Physik Nobelpreis 2020.

8. Nur ein Bild kann definitiv entscheiden, ob Sgr A* ein Schwarzes Loch ist

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 Sgr A* sich innerhalb von 10 Minuten stark veränderte und weil dessen Sicht durch turbulente Gaswolken behindert wurde, entschied die EHT-Projektleitung, zuerst das wesentlich ruhigere und besser sichtbare Objekt M87* in ein Bild umzuwandeln (vgl. GASSMANN, 2020) 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 das entsprechende Bild am 12. Mai 2022 publiziert wurde (vgl. Abb. 6 und FLETCHER, 2022).

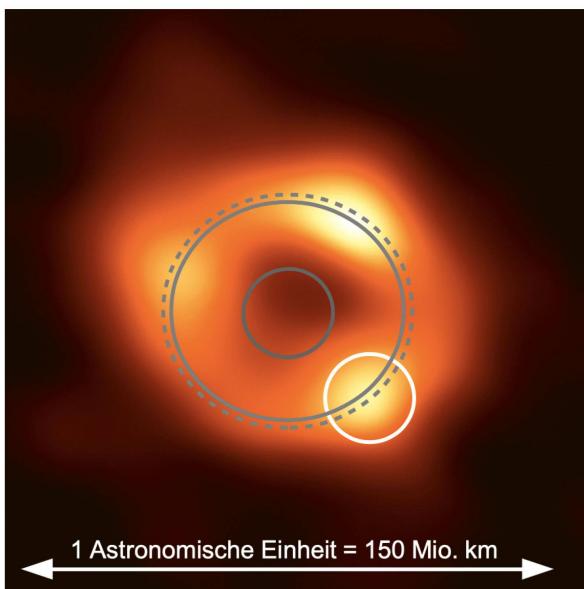


Abb. 6: Erstes Bild von Sgr A*. Es wurde 2017 durch 8 synchronisierte Radioteleskope an 6 über die Erde verteilten Standorten aufgenommen. Das Schwarze Loch (Ereignishorizont = kleiner grauer Kreis in Bildmitte mit Radius 0,08 AE, AE = Astronomische Einheit) ist unsichtbar und liegt im Zentrum seines «Schattens» (grosser grauer Kreis), der einen Radius von 0,20 AE hat. Der leuchtende Ring mit 0,215 AE (grau gestrichelt) ist die Lichtemission von Ionen, die das Schwarze Loch umkreisen. Das reduzierte Unschärifescheibchen (Radius 0,08 AE) ist als weisser Kreis angegeben. Weitere Erklärungen im Text. (Bild: EHT Collaboration, CC BY 4.0, graue und weisse Ergänzungen F. Gassmann)

Das in Abb. 6 gezeigte erste Bild von Sgr A* wurde ohne Angabe eines Massstabes veröffentlicht. Ich habe deshalb basierend auf der Publikation EHT (2022) die wichtigsten beobachteten Größen ergänzt, nämlich den Radius des leuchtenden Rings (0,215 AE), den Radius des Schattens (0,20 AE) und den Radius des Ereignishorizonts (0,08 AE). Zur Erinnerung: AE bedeutet *Astronomische Einheit*, also die Distanz Erde-Sonne oder rund 150 Mio. km.

Wie kommt der leuchtende Ring zustande? Die Antwort zu dieser Frage ist komplizierter, als sich dies die meisten Betrachter des Bildes vorstellen dürften. Einigermassen verständliche Angaben dazu finden sich im ESO-BLOG (vgl. Internetquellen). Sgr A* besteht aus dem zentralen unsichtbaren Schwarzen Loch mit Radius 0,08 AE. Es wird von einer Scheibe umkreist (man denke an Saturnringe), die zum Teil aus geladenen Teilchen (Plasma) besteht, die annähernd Lichtgeschwindigkeit haben. Dieses gigantische kosmische Karussell sendet wie ein ringförmiger Beschleuniger für Elementarteilchen ein riesiges Spektrum von Lichtwellen aus (Radiowellen bis Röntgenstrahlung) das jedoch nicht direkt beobachtet werden kann wie etwa die Saturnringe, weil das ausgesendete Licht dem durch das Schwarze Loch stark verkrümmten Raum folgen muss. Ein künstlich erzeugter Film im ESO-BLOG gibt eine Idee davon, was mit dem Licht passiert. Es wird abgelenkt und umkreist zum Teil mehrere Male das Schwarze Loch, bevor es schliesslich zufälligerweise den geraden Weg zur Erde aufnimmt. In einem höher aufgelösten Bild würden wir auf Grund dieser verwickelten Lichtdynamik ein gegen das Zentrum scharf begrenztes und kreisförmig geschlossenes Lichtband sehen, wenn die Drehachse der Plasmascheibe um weniger als 30° gegen die Richtung zur Erde geneigt ist. Falls dieser Winkel bedeutend grösser wäre, sähen wir nur einen unvollständigen Kreisbogen in Form einer Sichel. Es muss als Geschenk des Himmels betrachtet werden, dass wir nahezu frontal auf die Plasmascheibe blicken können und deshalb einen voll-

ständigen Kreis sehen. Die bei grossen Schwarzen Löchern zu erwartenden beiden Jets in Achsenrichtung wie bei M87* konnten bislang bei Sgr A* nicht beobachtet werden. Dies passt zusammen mit der oben erwähnten Feststellung, dass Sgr A* «auf Diät» gesetzt ist, also nicht mehr viel Materie verschlingt.

Der Schwerpunkt des Leuchtrings liegt bei 0,215 AE und der Radius des Schattens wurde zu 0,20 AE bestimmt. Um zu verstehen, weshalb der «fotografierte» Ring weit in den Schattenbereich hineinreicht, benötigen wir eine weitere Angabe: Die Grösse des Unschärfescheibchens, das einen Winkelradius von $1,2 \lambda/D$ hat (vgl. Kap. 3). Rechnen wir dies auch in AE um, erhalten wir einen Unschärfekreis mit einem Radius von 0,24 AE, der jedoch ein grober und zu hoher Wert ist. Die Intensitätsverteilung eines einzelnen leuchtenden Punktes des Leuchtrings ist genauer betrachtet eine Funktion mit einem Maximum im Zentrum des Unschärfekreises, die gegen dessen Peripherie gegen Null abfällt. Ein besseres Mass ist deshalb der Radius, bei dem diese Intensitätsfunktion auf die Hälfte abfällt und dieser wird durch EHT (2022) mit rund 0,08 AE angegeben (durch den Autor umgerechnet in AE). Dieser reduzierte Unschärfekreis ist in Abb. 6 ebenfalls eingezeichnet (weisser Kreis). Das Licht, das beim gestrichelt grauen Kreis emittiert wird, wird also zufolge der Unschärfe der Aufnahme auf ein Kreisband mit der Breite von mindestens 0,16 AE verschmiert. Der wahre Radius des Schattens wurde, einfach ausgedrückt, durch Rückwärtsrechnen bestimmt, indem ein Radius angenommen wurde und daraufhin mit der Intensitätsfunktion auf das unscharfe Bild zurückgerechnet wurde. Durch Variation dieses angenommenen Radius wurde schlussendlich die beste Übereinstimmung mit dem aufgenommenen Bild gesucht. Das Verfahren ist in EHT (2022) detailliert beschrieben.

Als Resultat der Bildanalyse ergaben sich also die beiden Radien des Schwerpunktes des Lichtbandes und des Schattens, ohne die aus den Sternbahnen ermittelte Masse des Schwarzen Lochs zu verwenden. Beide Größen können jedoch auch aus dieser Masse von 4 Mio. Sonnen mit Hilfe der Relativitätstheorie berechnet werden, was am Beispiel des Schattens gezeigt werden soll. Es ist aus Simulationsrechnungen von Lichtbahnen bekannt, dass der Radius des Schattens rund 2,5 Schwarzschildradien beträgt, was nun als Test verwendet werden kann. Der im vorigen Abschnitt aus Sternbahnen berechnete Schwarzschildradius beträgt 0,08 AE und der Radius des mit synchronisierten Radioteleskopen beobachteten Schattens ergab sich zu 0,20 AE, also genau 2,5 Schwarzschildradien! Diese Übereinstimmung zweier auf völlig verschiedenen Wegen erhaltenen Resultate ist für die Physiker der erste absolut überzeugende Beweis, dass Sgr A* ein Schwarzes Loch ist!

Ähnliche Tests werden in Zukunft mit weiteren Eigenschaften von Sgr A* durchgeführt werden können. So scheint sich beispielsweise das Schwarze Loch 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. Weiter fand ich bisher keine Erklärung für die 3 nahezu symmetrisch angeordneten Intensitätsmaxima auf dem Leuchtring. 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.

9. Sgr A* als relativistisches Labor

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. 5 und 7). 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 % der Lichtgeschwindigkeit entspricht. Zufolge relativistischer Effekte nimmt seine Masse dabei um messbare 2,3 Promille zu und es ist möglich, damit die Relativitätstheorie noch viel genauer zu überprüfen, als dies bisher möglich war. So dreht sich die Bahnellipse aufgrund relativistischer Effekte um das Gravitationszentrum herum. Beim Merkur konnte dieser Effekt nachgewiesen werden, obwohl die Drehung nur 43 Bogensekunden pro Jahrhundert ausmacht. Bei S62 vergrössert sich die Drehgeschwindigkeit um etwa den Faktor 1000 auf 12,5 Winkelgrade pro Jahrhundert, was wesentlich präziser gemessen werden kann.

Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxie wird zum Labor für relativistische Physik!

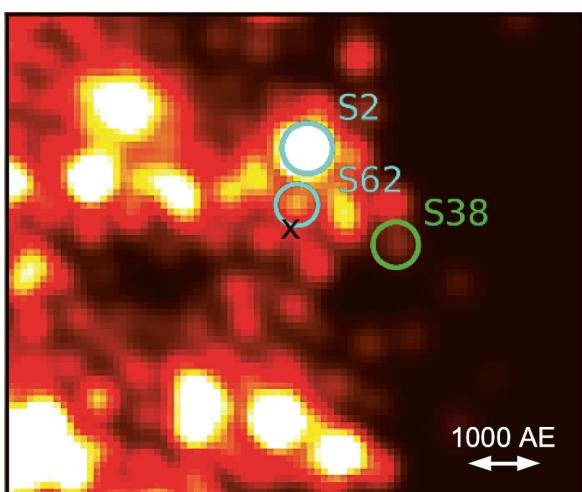


Abb. 7: Am Europäischen Südobservatorium ESO in Chile aufgenommenes Bild des galaktischen Zentrums. Die Position des Schwarzen Lochs Sgr A* ist mit dem schwarzen Kreuz bezeichnet. Kreise markieren die drei um Sgr A* rotierenden Sterne S2, S62 und S38. Das Bild wurde im nahen Infrarot (1,1–2,45 μ m Wellenlänge) 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)

10. Gibt es näher liegende Schwarze Löcher?

Astronomen nehmen an, dass sich mindestens 12 weitere Schwarze Löcher näher bei uns als Sgr A* befinden dürften (vgl. Internetquellen LIST OF BLACK HOLES). 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 ausbilden, weshalb dieses vollkommen unsichtbar ist und nur durch seinen Begleitstern entdeckt werden konnte.

Singuläre Schwarze Löcher ohne Begleitstern und ohne Feuerring sind äusserst schwer zu finden. Sie wären höchstens durch den Gravitationslinseneffekt zu entdecken, wenn sie sich über Hintergrundsterne hinwegbewegen würden. Der Ablenkeffekt des Gravitationsfeldes auf das Licht der Hintergrundsterne kann bei Schwarzen Löchern so gross werden, dass ein Hintergrundstern als Kreisbogen oder sogar als ganzer Kreis um das unsichtbare Schwarze Loch herum erscheint, wenn sich der Stern von der Erde aus betrachtet genau hinter seinem Zentrum befindet.

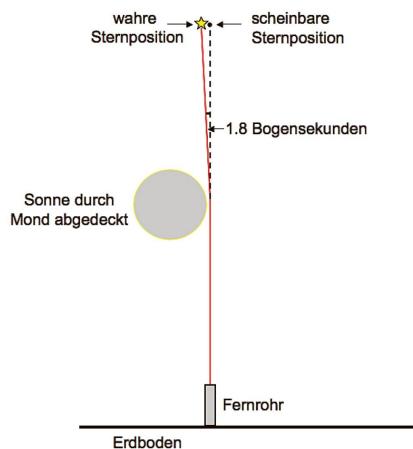


Abb. 8: Die Krümmung der Lichtstrahlen durch Gravitationsfelder, auch Raumkrümmung genannt, bewirkt eine falsche scheinbare Sternposition. Der Ablenkeffekt durch die Sonne kann nur während einer Sonnenfinsternis beobachtet werden, weil diese sonst zu stark blendet. In der Skizze ist der Ablenkungswinkel tausendfach zu gross dargestellt. Mit Hilfe der Relativitätstheorie ergeben sich rund 1,8 Bogensekunden, was auf 1 % genau mit Messungen während der Sonnenfinsternis im Jahre 1960 übereinstimmt. (Bild: Fritz Gassmann)

11. Zukunftsaussichten

Vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet kann die Auflösung von Radioteleskopen noch deutlich gesteigert werden. Mit Radioteleskopantennen in Umlaufbahnen um die Sonne könnte der Durchmesser eines virtuellen Radioteleskops von 11 000 km auf den Durchmesser der Erdbahn um über 4 Zehnerpotenzen vergrössert werden. Dies liegt im Bereich der heute zur Verfügung stehenden Technologie und ist eine reine Preisfrage.

Mit der Verwendung des galaktischen Zentrums als relativistischem Labor steht die Forschung erst ganz am Anfang. Zu erwarten sind weitere Bestätigungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Physiker würden es jedoch begrüßen, wenn sich auch Überraschungen ergeben würden, die Hinweise geben könnten auf offene fundamentale Probleme der heutigen Physik. Die beiden grossen und sehr erfolgreichen Theorien, die Relativitätstheorie und die Quantentheorie, haben tief liegende fundamentale Unterschiede, die sich jeder Vereinheitlichung entgegenstellen. Überdeutlich zeigte der Physik-Nobelpreis 2022 zum endgültigen Nachweis des Phänomens der Verschränkung von Photonen (GASSMANN, 2023), dass die Quantentheorie Aspekte der Realität korrekt beschreiben kann, die im Rahmen der Relativitätstheorie absolut unmöglich sind.

12. Quellenverzeichnis

- BELL BURNELL, S. J. (1979): Little Green Men, White Dwarfs or Pulsars? *Cosmic Search* 1(1), 16ff.
- EHT (2022): Event Horizon Telescope Collaboration with Authors from 176 Institutes. First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *Astrophys. Journal Letters* 930: L12: 21 pages, April 4 2022 (Open Access)
- FLETCHER, S. (2022): Portrait of a Black Hole. *Scientific American*, Sept. 2022, 46–51
- GASSMANN, F. (2016): Schwarze Löcher und Gravitationswellen. *Aarg. Naturf. Ges., FOKUS* 2/2016, 96–115
- GASSMANN, F. (2020): Von der Lochkamera zum ersten Bild eines Schwarzen Lochs. *ANG-Mitt.* Bd. Nr. 39, 191–202
- GASSMANN, F. (2023): Verschränkte Photonen – Phänomen ausserhalb von Raum und Zeit. *Naturf. Ges. in Zürich. Vierteljahrsschrift* 2/2023, 6–10
- PEISSKER, F., ECKART, A., PARSA, M. (2020): S 62 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. *Schweizerische Phys. Ges. Mitteilungen* 63, 10–12
- WALDMEIER, M. (1954): Radiowellen aus dem Weltraum. *Naturf. Ges. in Zürich. Neujahrsblatt* 156, 79 Seiten

Internetquellen:

ESO-BLOG: <https://www.eso.org/public/blog/spot-the-difference-sagittarius-a-m87/>

LIST OF BLACK HOLES: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nearest_known_black_holes

Adresse des Autors

Dr. Fritz Gassmann
Limmatstrasse 6
5412 Vogelsang
gassmann@bluewin.ch