

Blick ins Zentrum

Reinhard Genzel und Andrea Ghez haben das extrem massereiche Schwarze Loch im Herzen der Milchstraße charakterisiert.

Karl M. Menten

Roger Penrose hat bewiesen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie das Entstehen Schwarzer Löcher vorhersagt. Die astronomischen Untersuchungen von Reinhard Genzel und Andrea Ghez haben entscheidend dazu beigetragen, dass wir zweifelsfrei wissen, dass sich im Zentrum der Milchstraße ein extrem massereiches Schwarzes Loch befindet.

In unserem Universum kommen Schwarze Löcher in zwei sehr unterschiedlichen Formaten vor. Zum einen entstehen sie beim Kollaps eines massereichen Sterns als Überrest einer Supernovaexplosion. Die Masse dieser Schwarzen Löcher beträgt bis zu mehrere Dutzend Sonnen-

massen. Verschmelzen zwei dieser stellaren Schwarzen Löcher, entstehen Gravitationswellen; ihr erstmaliger direkter Nachweis wurde mit dem Physik-Nobelpreis 2017 ausgezeichnet. Zum anderen befinden sich Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien. Ihre Massen entsprechen der millionen- oder gar milliardenfachen Sonnenmasse. Ein populäres Beispiel ist das Schwarze Loch im Zentrum der aktiven Galaxie Messier 87: Sein „Foto“ faszinierte im letzten Jahr die Weltöffentlichkeit.

Seit den 1960er-Jahren ist bekannt, dass Quasare die energiereichen Zentren aktiver Galaxien bilden: Sie setzen in einer sehr kompakten Region so viel Energie frei wie ganze Galaxien. Als Ursache kommt dafür nur die poten-



◀ Das großräumige Infrarot-Panorama zeigt die innersten 800×550 Lichtjahre unserer Milchstraße. Bei einer Wellenlänge von $3,8 \mu\text{m}$ sind weite Teile transparent, aber es sind auch dichte Staubwolken als Schatten zu sehen. Der zentrale Sternhaufen leuchtet hell in der Bildmitte; in dessen Zentrum befindet sich das supermassereiche Schwarze Loch Sgr A*.

Milchstraße überein [1]. Das hat Sagittarius A* sofort zu einem Kandidaten für das zentrale Schwarze Loch gemacht.

Allerdings hatte Sgr A* im Radiobereich weit weniger Leuchtkraft als die Zentren damals bekannter Radiogalaxien. Es sollte mehrere Jahrzehnte dauern und die weltweit leistungsfähigsten Teleskope sowie bahnbrechende neue Instrumente brauchen, bis Reinhard Genzel und Andrea Ghez den schlüssigen Beweis lieferten, dass es sich bei Sgr A* tatsächlich um das zentrale Schwarze Loch unserer Milchstraße handelte. Dafür teilen sich die beiden eine Hälfte des diesjährigen Nobelpreises für Physik.

Von Bonn über Berkeley nach Garching

Reinhard Genzel hat sich seit 1984 an entsprechenden Untersuchungen beteiligt. Seine Diplomarbeit und Dissertation fertigte er am Max-Planck-Institut für Radioastronomie an, was 1978 zu seiner Promotion an der Universität Bonn führte. Anschließend arbeitete er als Postdoc am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts. Dort nutzte er die Very Long Baseline Interferometry, um Maserquellen mit sehr hoher Winkelauflösung zu studieren. 1980 wechselte er an die University of California in Berkeley und kollaborierte dort mit Charles H. Townes. Der Pionier der Spektroskopie von Molekülen im Mikrowellenbereich (Nobelpreis 1964) hatte sein Forschungsinteresse schon Ende der 1960er-Jahre auf astronomische Fragen fokussiert. Genzel und Townes erschlossen gemeinsam das ferne Infrarot für die Spektroskopie des interstellaren Mediums und entwickelten die benötigte Instrumentierung dafür selbst; Reinhard Genzels Vater Ludwig hatte in den 1950er-Jahren diesen Wellenlängenbereich im Labor zugänglich gemacht.

Die Entwicklung bahnbrechender Instrumentierung zieht sich seitdem wie ein roter Faden durch Reinhard Genzels Karriere – mit dem besonderen Interesse am galaktischen Zentrum. Als wichtiges, frühes Ergebnis entdeckten Genzel und Townes 1985 eine Scheibe aus neutralem Gas mit einem Radius von weniger als acht Lichtjahren um Sgr A*. Aus den gemessenen Doppler-Geschwindigkeiten leiteten sie eine eingeschlossene Masse von $(4,8 \pm 1) \times 10^6$ Sonnenmassen ab [2], sodass sie dort ein massereiches Schwarzes Loch vermuteten [3]. Dieser Wert stimmt sehr gut mit einem früheren [4] und vielen späteren Ergebnissen überein [5].

Auch nach dem Wechsel an das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching 1986 hat Genzel seine Professur in Berkeley weitergeführt. Er hat nach wie vor im fernen Infrarot gearbeitet und entwickelte Schlüsselinstrumente für das Infrared Space Observatory (in Betrieb: 1995 – 1998) und das Herschel-Weltraumteleskop (2009 –

tielle Energie infrage, die frei wird, wenn Materie in das extreme Gravitationspotential eines riesigen Schwarzen Lochs stürzt. Dabei entsteht intensive Radiostrahlung, die für Messier 87 und viele andere Fälle nachweisbar ist. Das stärkte die Vermutung, dass sich im Zentrum vieler, vielleicht sogar aller Galaxien supermassereiche Schwarze Löcher befinden – auch in unserer Milchstraße.

Entsprechend begann die Suche nach dem Schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße mit Radioteleskopen. Bruce Balick und Robert Braun entdeckten 1974 eine recht intensive, sehr kompakte Quelle nichtthermischer Synchrotronstrahlung. Deren Position stimmte innerhalb weniger Lichtjahre mit dem vermuteten Zentrum der

NASA / JPL-Caltech / S. Stolovy (Spitzer Science Center / Caltech)



Elena Zhukova / U of California

Reinhard Genzel, geboren 1952 in Bad Homburg vor der Höhe, forscht seit 1986 am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und ist Professor an der LMU München und der University of California, Berkeley. Andrea Ghez, geboren 1965 in New York, arbeitet seit 1994 als Professorin an der University of California, Los Angeles.

2013) der ESA. Parallel weckte auch das nahe Infrarot sein Interesse, insbesondere das „Fenster“ der Erdatmosphäre bei einer Wellenlänge von $2\ \mu\text{m}$, die sich für seine Messungen am Besten eignete: Genzels zweiter Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung von Galaxien und der Entstehung von Sternen im frühen Universum. Dafür hat er das Interferometer des Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM) genutzt, in Kombination mit seinen Instrumenten an den Teleskopen der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile.

Vom Mount Palomar auf den Mauna Kea

Andrea Ghez hat seit Beginn ihrer Karriere im nahen Infrarotbereich gearbeitet. Sie promovierte 1992 am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena. Ihre Beobachtungen von Doppelsternsystemen und Mehrfachsystemen junger Sterne führten zu einer viel beachteten Veröffentlichung [6]. Um die Komponenten der Systeme zu trennen, ist eine hohe Winkelauflösung erforderlich. Diese lieferte das Speckle Imaging – ein Verfahren, das astronomische Bilder korrigiert, welche die Turbulenz in der Erdatmosphäre verschlechtert hat. Gerry Neugebauer, der Doktorvater von Ghez, hatte Anfang der 1960er-Jahren die moderne Infrarotastronomie begründet und mit seinem Studenten Eric Becklin unter anderem intensive Strahlung im nahen Infrarot aus der unmittelbaren Umgebung des galaktischen Zentrums nachgewiesen [7].

Für ihre Promotion nutzte Andrea Ghez das 5-Meter-Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar; ab der Inbetriebnahme 1949 war es lange Zeit das größte Teleskop der Welt. Nach einer Postdoc-Station an der University of Arizona

Die vier Teleskope des Very Large Telescope (links) mit jeweils 8,2 Metern Durchmesser können einzeln eingesetzt oder zusammen als Interferometer genutzt werden. Sie gehören zur Europäischen Südsternwarte ESO in der chilenischen Atacama-Wüste. Die beiden 10-Meter-Teleskope des William M. Keck Observatory (rechts) befinden sich auf dem Mauna Kea, Hawaii, und können ebenfalls interferometrisch arbeiten.

startete Ghez 1994 ihre akademische Karriere als Assistant Professor an der University of California, Los Angeles. Drei Jahre später wurde sie dort Associate Professor und lehrt seit 2000 als Full Professor für Astronomie. Mit der Rückkehr nach Kalifornien begann sie, das erste der beiden 10-Meter-Teleskope des William M. Keck Observatory auf dem Mauna Kea auf Hawaii zu benutzen. Mit der Near Infrared Camera (NIRC) konzentrierte sie sich auf das galaktische Zentrum, veröffentlichte aber auch Beiträge zu jungen Doppelsternsystemen und anderen astronomischen Fragen. Anfangs benutzte sie noch das Speckle Imaging, wechselte aber schließlich zur effizienteren Adaptiven Optik, die in Echtzeit das Flimmern der Atmosphäre über dem Teleskop korrigiert.

Hochaufgelöste Infrarotastronomie

Zwei Übersichtsartikel von Genzel und Townes von 1987 und 1994 fassten das Wissen zum galaktischen Zentrum zusammen [8, 9]. Insbesondere diskutierten die beiden, wie sich die Masse in der Umgebung des Zentrums verteilte – von etwa 500 Lichtjahren Abstand bis zu 0,5 Lichtjahren. Bis dahin beruhten die gemessenen Geschwindigkeiten auf dem Doppler-Effekt von Spektrallinien und charakterisierten nur eine Dimension entlang der Sichtlinie. Notwendig war es aber, die Bewegungen in der Himmelsebene zu bestimmen. Weil Sterne anders als das interstellare Gas ausschließlich der Schwerkraft folgen, eignen sie sich besser als Testkörper. Für ein detailliertes Bild musste sich die Messgenauigkeit um ein Vielfaches steigern: Das Galaktische Zentrum ist mehr als 26 000 Lichtjahre entfernt, sodass selbst Sterne mit den erwarteten großen Geschwindigkeiten von Hunderten oder sogar Tausenden von Kilometern pro Sekunde nur zu sehr kleinen Positionsänderungen am Himmel führen.

Als Wellenlänge kam das nahe Infrarot infrage, weil hier der interstellare Staub deutlich weniger absorbiert als im sichtbaren Bereich. Um Sterne in der Himmelsebene zu finden, starteten Reinhard Genzel und Andrea Ghez unabhängig voneinander systematische Suchen mit ihren Teams. Als die Gruppe von Ghez während einer Konferenz ähnliche Resultate präsentierte, veröffentlichten 1996

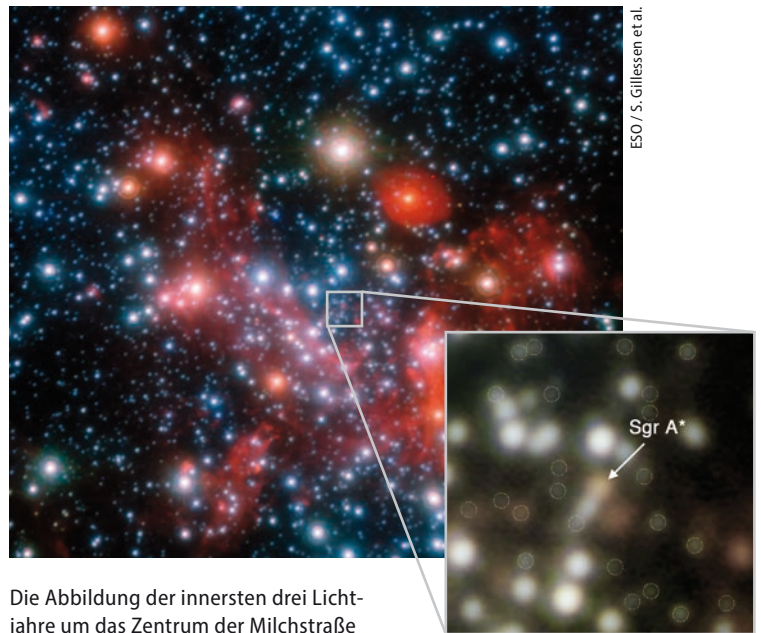


Andreas Eckart und Reinhard Genzel ihre Ergebnisse zu den Eigenbewegungen von einigen Dutzend Sternen mit Geschwindigkeiten bis zu 500 km/s [10]. In den darauffolgenden Jahren erweiterte Ghez' Team die Liste deutlich. Besondere Aufmerksamkeit erregten die Sterne S1, S2, S3 usw. in unmittelbarer Nähe von Sgr A* [11]. Die Beschleunigung dreier Sterne nahe bei Sgr A* [12] konnte Genzels Team bestätigen [13], sodass eine Vorhersage der Orbits möglich war.

Um die Positionen von S2, dem hellsten Stern innerhalb einer halben Bogensekunde Abstand zu Sgr A*, von 1994 bis 2002 zu bestimmen [14], nutzte Reinhard Genzel eines der vier 8-Meter-Teleskope des neuen Very Large Telescope (VLT) der ESO mit modernster Adaptiver Optik. Damit erreichte er ein ähnliches Winkelauflösungsvermögen wie Andrea Ghez am Keck-Observatorium. Mehr als ein Dutzend Messpunkte erlaubten es, einen Kepler-Orbit für S2 eindeutig zu bestimmen: In einem der Brennpunkte der hochexzentrischen Ellipse mit einer Bahnperiode von etwa 16 Jahren befindet sich Sgr A* [14]. Im Perizentrum – mit nur etwa 0,2 Prozent eines Lichtjahres Abstand zu Sgr A* – erreicht S2 eine Geschwindigkeit von mehr als 5000 km/s. Als zentrale Masse ergab die Analyse $(3,7 \pm 1,5) \times 10^6$ Sonnenmassen. Andrea Ghez hatte zeitgleich den Orbit von S2 vermessen und analysiert; die Publikation der Ergebnisse beinhaltete 2003 auch das erste Infrarotspektrum von S2 [15]. Demnach ist S2 ein deutlich jüngerer massereicher Stern, als es in solcher Nähe zu Sgr A* zu erwarten ist. Dafür prägte Ghez den Ausdruck „Paradox of Youth“; dieses Paradoxon zählt bis heute zu den vielen ungelösten Rätseln des galaktischen Zentrums.

Riesige Masse im Zentrum

Eine Herausforderung bei der Datenanalyse bestand zum damaligen Zeitpunkt darin, dass Sgr A* ausschließlich im Radiobereich nachgewiesen war. Um den Orbit von S2 festzulegen, galt es, die Bezugssysteme in beiden Wellenlängenbereichen miteinander in Einklang zu bringen [16]. Erst nach 2003 gelang es beiden Teams, Sgr A* direkt im Infraroten zu detektieren [17, 18]. Dort erweist sich die Quelle, wie auch im Röntgenbereich [19], als stark variabel. Etwas



Die Abbildung der innersten drei Lichtjahre um das Zentrum der Milchstraße basiert auf Daten des Very Large Telescope aus den Jahren 2004 bis 2006 und kombiniert Wellenlängen von 1,65 und 2,2 sowie 3,8 μm . Der Zoom zeigt Sgr A* als sehr schwache rötliche Quelle; diese Daten stammen vom Keck-Observatorium.

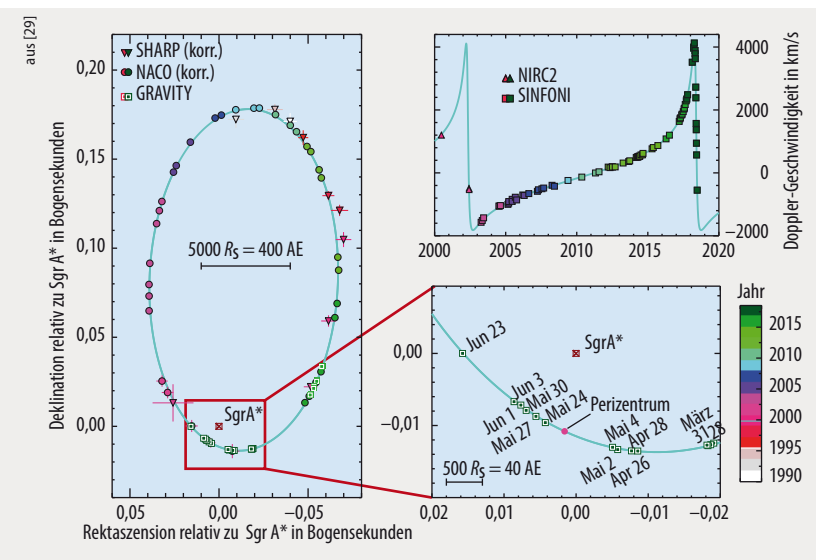
später ließ sich mit höchstpräzisen Messungen die Eigenbewegung der kompakten Radioquelle Sgr A* relativ zu weit entfernten extragalaktischen Quellen bestimmen, also in einem absoluten Bezugssystem [20]: Jenseits des erwarteten Beitrags der Rotation der Sonne um das galaktische Zentrum bewegt sich Sgr A* nicht, entspricht also wirklich dem Massenzentrum der Milchstraße.

In den folgenden Jahren erweiterten neue Instrumente die Beobachtungsmöglichkeiten. Genzels Gruppe installierte SINFONI am Very Large Telescope [21]. Dessen „integral field spectrometer“ SPIFFI zeichnet gleichzeitig für jedes Pixel eines Bildes ein Spektrum auf [22] und erlaubt es so, mit einer einzigen Beobachtung die Geschwindigkeitsvektoren mehrerer Sterne gleichzeitig zu messen. Am Keck-Observatorium kamen neben NIRC und dem Spektrometer NIRSPEC sukzessive immer leistungsfähigere Instrumente hinzu, darunter eine verbesserte Adaptive Optik, eine neue Infrarotkamera, die Spektrometer NIRC2 und OSIRIS sowie die Keck Laser Guide Stars [23]. Beide Teams nutzten die technischen Neuerungen, um abwechselnd Daten in immer besserer Qualität und Quantität zu bestimmen – zuletzt von etwa 30 Sternen.

Fast zeitgleich präsentierten beide auch ihre „definitiven“ Ergebnisse: Im Dezember 2008 veröffentlichte Ghez die Analyse der zwischen 1995 und 2007 gesammelten Daten am Keck-Observatorium [24]; im Februar 2009 folgte Genzel mit den Resultaten aus den Daten der ESO-Teleskope zwischen 1992 und 2008 [25]. Beide Artikel wurden bisher mehr als tausendmal zitiert. Die unabhängig bestimmten Massen sind miteinander konsistent: $(4,5 \pm 0,4) \times 10^6$ Sonnenmassen [24] bzw. $(4,31 \pm 0,36) \times 10^6$ Sonnenmassen [25]. Daher wurden die Resultate sofort akzeptiert.

Reinhard Genzel und Andrea Ghez erhielten in der Folge viele wichtige Auszeichnungen, darunter gemeinsam den





Die Bewegung des Sterns S2 um Sgr A* wurde von 1992 bis 2018 detailliert untersucht und führte zu einer genauen Bestimmung der Umlaufbahn (links) [28]. Die Farbe gibt den Zeitpunkt der Messung an. Die Doppler-Geschwindigkeit von S2 (rechts oben) variiert zwischen -2000 und 4000 km/s. GRAVITY hat die Position von S2 während der Passage des Perizentrums 2018 hochgenau bestimmt (rechts unten). Um den besten Fit für den Orbit von S2 zu bestimmen (cyan), gilt es, Effekte der Speziellen und der Allgemeinen Relativitätstheorie zu berücksichtigen. Man beachte die Längenskala, die das 5000-Fache des Schwarzschild-Radius R_S von Sgr A* angibt, also etwa 400 Astronomische Einheiten (AE). Eine AE entspricht etwa dem mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne.

Crafoord-Preis 2012. Diesen vergeben die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften und die Crafoord Foundation in Lund seit 1982 für Leistungen in Astronomie und Mathematik sowie in Bio- und Geowissenschaften. Andrea Ghez war die erste weibliche Preisträgerin.

Die offizielle knappe Widmung des diesjährigen Physik-Nobelpreises besagt, dass Reinhard Genzel und Andrea Ghez eine Hälfte des Preises „für die Entdeckung eines supermassiven kompakten Objektes im Zentrum unserer Galaxie“ erhalten. Die ausführlichere Pressemeldung fügt hinzu: „Ihre Pionierarbeit hat uns den bisher überzeugendsten Beweis für ein supermassives Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße geliefert.“ Diese vorsichtige Aussage ist darin begründet, dass ein Schwarzes Loch mit 4 Millionen Sonnenmassen die einfachste Erklärung aller Beobachtungen darstellt und daher gemäß Occam's Razor akzeptiert sein sollte. In den letzten zehn Jahren wurde der Physik-Nobelpreis viermal für Leistungen in Astronomie und Astrophysik vergeben. Andrea Ghez erhält ihn als erste Astrophysikerin und als vierte Frau nach Marie Curie (1903, Chemie 1919), Maria Goeppert-Mayer (1963) und Donna Strickland (2018). Vor Reinhard Genzel wurde zuletzt 2007 mit dem Festkörperphysiker Peter Grünberg ein in Deutschland arbeitender Wissenschaftler mit diesem Preis geehrt.

Weder Reinhard Genzel noch Andrea Ghez haben ihre Untersuchungen des galaktischen Zentrums abgeschlossen. Als sich 2018 der Stern S2 dem Schwarzen Loch näherte, wiesen beide Teams mittels der gravitativen Rotverschiebung des Lichts von S2 nach, dass das Einsteinsche Äquivalenzprinzip auch in der Nähe von Sgr A* gilt – also in

der nächsten Umgebung einer sehr großen Masse [26, 27]. Seit 2016 hat das Instrument GRAVITY am Very Large Telescope die hochauflösende Infrarotastronomie neu definiert. Es kombiniert die Signale aller vier, bis zu 130 Meter voneinander entfernten Teleskope und erreicht eine Winkelauflösung, die etwa 16-mal besser ist als diejenige eines einzelnen Teleskops. Die seitdem erschienenen Fachartikel der Gravity Collaboration enthalten viele hochinteressante Ergebnisse zu verschiedenen Fragestellungen. Allein acht Paper befassen sich mit Sgr A* und berichten von der Messung relativistischer Effekte wie der gravitativen Rotverschiebung [28] oder der Schwarzschild-Präzession [29]: Der Orbit von S2 schließt sich nicht. Die Messungen von GRAVITY nutzen das galaktische Zentrum als eine Art Laboratorium, um die Grundlagen der Physik zu testen.

Literatur

- [1] B. Balick und R. L. Brown, *ApJ* **194**, 265 (1974)
- [2] R. Genzel et al., *ApJ* **297**, 766 (1985)
- [3] M. K. Crawford et al., *Nature* **315**, 467 (1985)
- [4] L. F. Rodriguez und E. J. Chaisson, *ApJ* **228**, 734 (1979)
- [5] R. Giesten et al., *ApJ* **318**, 124 (1987)
- [6] A. M. Ghez, G. Neugebauer und K. Matthews, *AJ* **106**, 2005 (1993)
- [7] E. E. Becklin und G. Neugebauer, *ApJ* **151**, 145 (1968)
- [8] R. Genzel und C. H. Townes, *Ann. Rev. Astron. Astroph.* **25**, 377 (1987)
- [9] R. Genzel, D. Hollenbach und C. H. Townes, *Rep. Prog. Phys.* **57**, 417 (1994)
- [10] A. Eckart und R. Genzel, *Nature* **383**, 415 (1996)
- [11] A. M. Ghez et al., *ApJ* **509**, 678 (1998)
- [12] A. M. Ghez, *Nature* **407**, 349 (2000)
- [13] A. Eckart et al., *MNRAS* **331**, 917 (2002)
- [14] R. Schödel et al., *Nature* **419**, 694 (2002)
- [15] A. M. Ghez et al. *ApJ* **586**, L127 (2003)
- [16] K. M. Menten et al., *ApJ* **475**, L111 (1997)
- [17] R. Genzel et al., *Nature* **425**, 934 (2003)
- [18] A. M. Ghez et al., *ApJ* **601**, L159 (2004)
- [19] F. K. Baganoff et al., *ApJ* **591**, 891 (2003)
- [20] M. J. Reid und A. Brunthaler, *ApJ* **616**, 872 (2004)
- [21] H. Bonnet et al., *The ESO Messenger* **117**, 17 (2004)
- [22] F. Eisenhauer et al., *The ESO Messenger* **113**, 17 (2003)
- [23] P. Wizinowich, *PASP* **125**, 798 (2013)
- [24] A. M. Ghez et al., *ApJ* **689**, 1044 (2008)
- [25] S. Gillessen et al., *ApJ* **692**, 1075 (2009)
- [26] Gravity Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 101102 (2019)
- [27] T. Do et al., *Science* **365**, 664 (2019)
- [28] Gravity Collaboration, *A&A* **615**, L15 (2018)
- [29] Gravity Collaboration, *A&A* **636**, L5 (2020)

Der Autor



Karl Menten studierte Physik und Astronomie an der U Bonn und fertigte Diplom- wie Doktorarbeit am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) an. Nach der Promotion 1987 arbeitete er am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts, bis er 1996 ans MPIfR berufen wurde. Dort leitet er die Abteilung für Millimeter- und Submillimeterastronomie. Sein Interesse gilt vor allem der Physik und Chemie des interstellaren Mediums und der Entstehung von Sternen.

Prof. Dr. Karl M. Menten, Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53121 Bonn