

Sgr D

HII-Region

Supernova-
überrest

Supernovaüberrest

Sgr B2

Sgr B1

Supernovaüberrest

Bogen

Radiofilamente

Galaxie im Hintergrund

Sgr A

Sgr A*

Radiofilamente

Sgr C

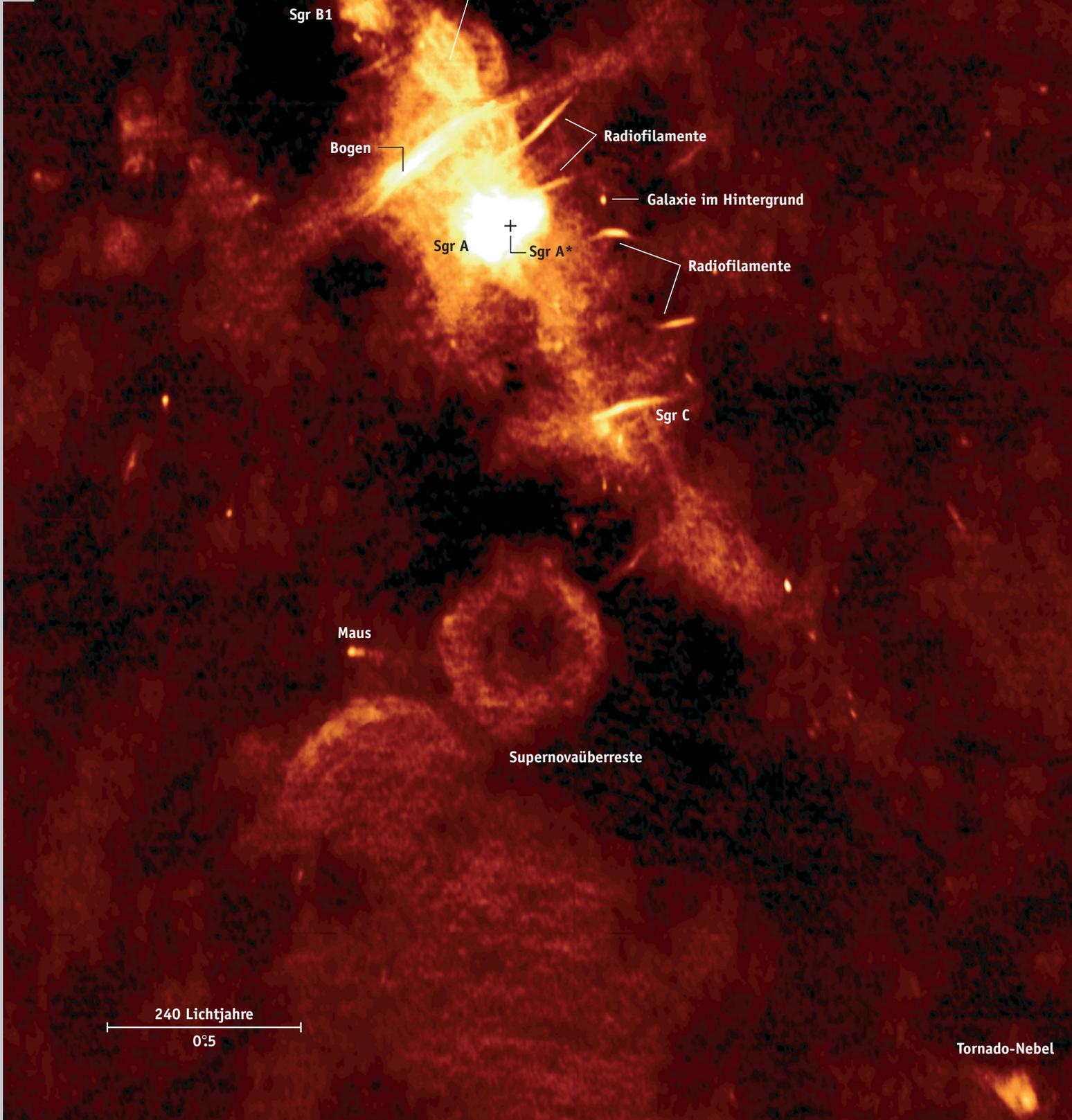
Maus

Supernovaüberreste

240 Lichtjahre

0.5

Tornado-Nebel



Ein Schwarzes Loch und seine Umgebung im Radiolicht

VON HEINO FALCKE UND KARL M. MENTEN

Seit Jahrzehnten kämpfen die Astronomen darum, den innersten Zentralbereich unserer Galaxis zu verstehen. Was bis vor wenigen Jahren ein punktförmiges Rätsel war, entfaltet sich heute zu einer vielfältigen Landschaft, in der das zentrale Schwarze Loch faszinierende Phänomene erzeugt.

Das Galaktische Zentrum ist wahrscheinlich die reichhaltigste Region unserer Milchstraße. Das gilt auch für den Radiobereich, wo seit Jahren wichtige und schöne Beobachtungen gelingen. Ein besonders beeindruckendes Beispiel liefert eine Karte der Strahlung bei einer Wellenlänge von 90 Zentimetern, die Namir Kassim vom Naval Research Laboratory in Washington und seine Kollegen aus Daten berechneten, welche mit dem Very Large Array (VLA) in New Mexico entstanden (Abb. 1).

Ein Radiobild des Zentrums

Die Karte gibt einen guten Eindruck von der großräumigen Struktur des Galaktischen Zentrums und seiner Komponenten. Das sind zum einen die Überreste von Supernovae, die durch die Explosion junger Sterne entstanden (zum Beispiel Sgr D). Die damit einhergehende Schockwelle beschleunigt Elektronen und Protonen in einem heißen magnetisierten Plasma. Die

schnellen Elektronen werden im Magnetfeld auf Kreisbahnen gezwungen und geben dabei (nichtthermische) Synchrotronstrahlung ab. Die kollektive Leistung vieler Supernovae reichert die Scheibe der Galaxis mit hochenergetischen Teilchen an. Die Scheibe wird dadurch als leuchtendes Radioband sichtbar. Ein anderer Teil dieser diffusen Strahlung beruht auf der direkten Einwirkung junger Sterne. Deren Strahlung ionisiert das umgebende Gas, welches anschließend thermische Bremsstrahlung aussendet. Besonders stark ist diese Strahlung in der Nähe von Regionen, in denen Sterne entstehen. Ein Beispiel in der Umgebung des Galaktischen Zentrums ist die Radioquelle Sgr B2 (Abb. 1). Mit hochauflösenden Radiobeobachtungen kann man in dieser Region sogar die Winde einzelner Sterne identifizieren und räumlich auflösen. Ähnliches gilt inzwischen sogar für Röntgenbeobachtungen (Abb. 2).

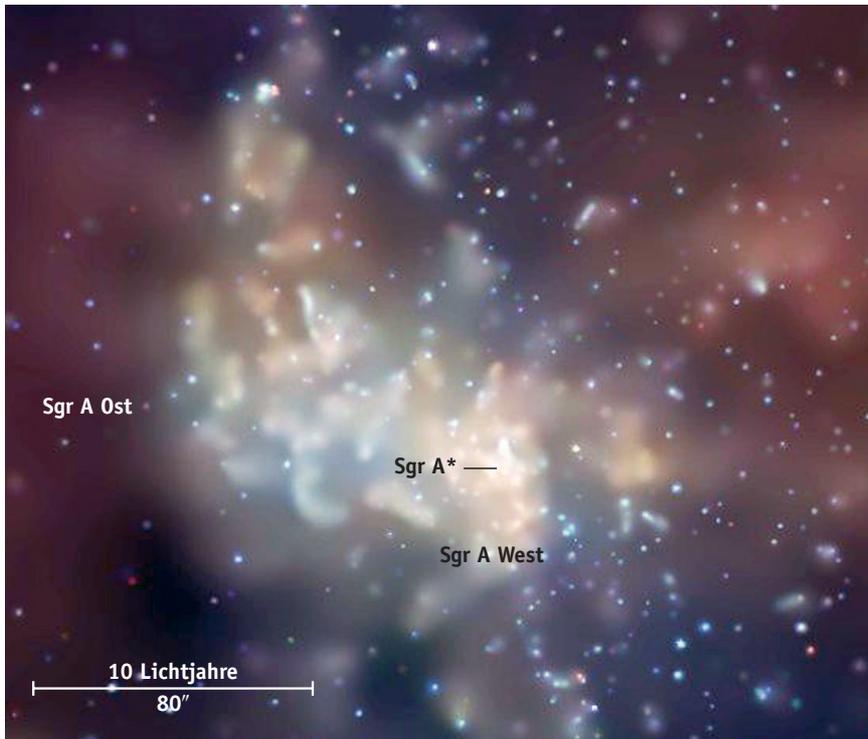
Noch geheimnisvoller sind andere Phänomene im Zentralbereich unserer Galaxis, zum Beispiel die so genannte Maus und der Tornadonebel (Abb. 1). In beiden Fällen wird spekuliert, ob sie mit Pulsaren zusammenhängen. Sicher nachgewiesen ist das aber nicht. Auffallend sind auch die Radiofilamente. Das sind lange, dünne Bereiche, deren Radiostrahlung sehr intensiv und auffallend polarisiert ist. Vielleicht handelt es sich dabei um Magnetfeldbündel, in denen Elektronen beschleunigt werden und dadurch Synchrotronstrahlung aussenden. Warum die Filamente jedoch gerade an diesen Stellen leuchten, ist Gegenstand einer andauernden Debatte. Vielleicht ist der gesamte

Zentralbereich unserer Milchstraße von unsichtbaren Magnetfeldbündeln durchzogen. Nur einige davon senden intensive Radiostrahlung aus. Das mag daran liegen, dass sich dort zwei Magnetfeldkonfigurationen kreuzen. Möglicherweise verbindet sich an diesen Stellen das torusförmige Feld einer Molekülwolke mit dem poloidalen Feld der Galaxis. Benachbarte, junge und heiße Sterne könnten ein Plasma erzeugen, dessen Elektronen in diesen komplexen Magnetfeldern beschleunigt werden. Dabei können gigantische elektrische Ströme produziert werden, deren Auswirkung wir im Radiobereich nachweisen.

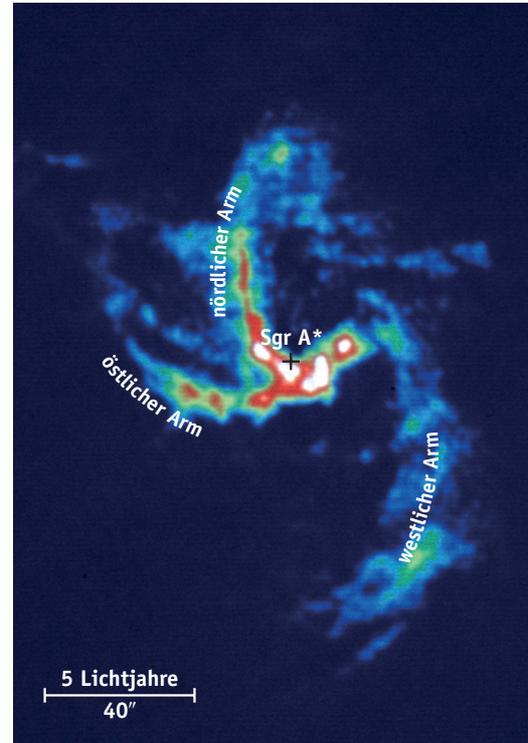
Sagittarius A

Von größtem Interesse ist allerdings nach wie vor das Zentrum selbst. In der 90-cm-Karte erscheint seine Umgebung als heller Fleck in der Mitte. Diese als Sagittarius A (Sgr A) bezeichnete Struktur wurde spätestens durch die Beobachtungen von Mark Morris und Farhad Yusef-Zadeh bekannt. Abb. 2 zeigt eine Röntgenaufnahme dieser Region, die zunächst in zwei Bereiche unterteilt werden kann: Sgr A Ost und Sgr A West. Sgr A Ost ist der ausgedehnte Bereich in Abb. 3, der an eine Explosion erinnert. Tatsächlich könnte es sich dabei um einen relativ jungen Supernovaüberrest handeln, der vor etwa 40 000 Jahren entstand. Jüngste Röntgenbeobachtungen der Region unterstützen diese Hypothese (Abb. 2). Angesichts der besonderen Lage von Sgr A Ost ist allerdings nicht auszuschließen, dass die Quelle durch die Explosion eines Sternes entstanden ist, welcher dem Schwarzen Loch im Zentrum zu nahe gekommen ist (vergleiche dazu den Beitrag auf Seite 36). Auch eine Hypernova, also der Kollaps eines extrem massereichen Sterns, könnte die Ursache sein. Zumindest im Radiobereich ist Sgr A Ost extrem hell. Möglicherweise ist diese Quelle sogar für einen Teil der hochenergetischen Gamma-

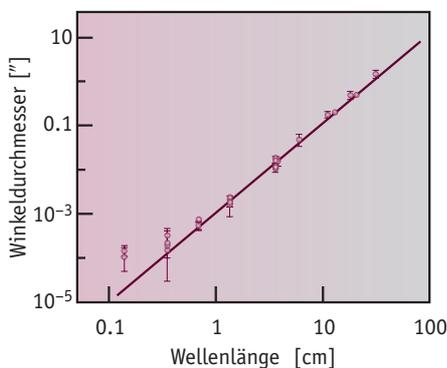
◀ Abb. 1: Radiokarte des Galaktischen Zentrums bei einer Wellenlänge von 90 cm, aufgenommen mit dem VLA. Die Karte beruht auf Messungen aus den Jahren 1989 und 1991. Mit Hilfe neuer Berechnungsverfahren war es möglich, eine Auflösung von 43 Bogensekunden zu erreichen. Der dargestellte Himmelsausschnitt beträgt etwa $4^\circ \times 5^\circ$. (Bild: T. N. La Rosa, N. E. Kassim, T. J. W. Lazio und S. D. Hyman, Naval Research Laboratory, Washington, Daten: NRAO)



▲ Abb. 2: Röntgenbild des Galaktischen Zentrums, aufgenommen mit dem Satelliten CHANDRA. Das Bild ist die Summe aus elf Belichtungen in den Spektralbereichen 2keV – 3.3 keV (rot), 3.3 keV – 4.7 keV (grün) und 4.7 – 8 keV (blau). Die gesamte Belichtungszeit betrug 164 Stunden. Siehe auch SuW 3/2003, S. 10–11. (Bild: NASA/CMX/MIT)



▶ Abb. 3: Radiokarte von Sgr A West, aufgenommen mit dem VLA bei einer Wellenlänge von 6 cm. (Bild: K. Y. Lo und M. J. Clausen, NRAO)



▲ Abb. 4: Messungen der Winkelgröße von Sgr A* in Abhängigkeit der Wellenlänge. Diese Messdaten lassen sich als Auswirkung der interstellaren Streuung interpretieren. Bei keiner der gezeigten Wellenlängen ist Sgr A* aufgelöst. (Bild: T. P. Krichbaum, MPIFR, Bonn)

strahlung aus der Region des Galaktischen Zentrums verantwortlich.

Im Gegensatz dazu hat Sgr A West eine recht gemäßigte Vergangenheit hinter sich. Sgr A West besteht aus Gas, das von heißen Sternen der Umgebung ionisiert wird, und dadurch im Radiobereich sogenannte Bremsstrahlung aussendet. Vielleicht steht dieser Quelle eine umso dramatischere Zukunft bevor, denn das Gas kreist um das Schwarze Loch und wird von ihm einmal verschluckt werden. Die Struktur wird als Minispirale bezeichnet (Abb. 3).

Im Herzen von Sgr A West befindet sich ein ganz besonderes Objekt: Sgr A*. Diese Quelle wurde erstmalig 1974 von Bruce Balick und Robert Brown mit einem Radiointerferometer entdeckt. Seitdem wird Sgr A* mit dem zentralen Schwarzen Loch des Milchstraßensystems in Verbindung gebracht, dessen Masse mit Hilfe von Messungen im nahen Infrarot auf drei Millionen Sonnenmassen geschätzt wird (siehe Seite 40).

Bereits vor den Beobachtungen von Balick und Brown war diese Quelle nicht nur durch ihre Lage genau im Zentrum der Galaxis aufgefallen, sondern auch durch ihre bemerkenswerte Kompaktheit, also ihre große Radio-Helligkeit auf kleinem Raum. Tatsächlich wissen wir bis heute nicht genau, wie klein diese Quelle wirklich ist. Es stellte sich nämlich bald heraus, dass ihre scheinbare Größe kleiner wurde, wenn man sie bei einer kürzeren Wellenlänge beobachtete (Abb. 4). Diese Abhängigkeit der Größe von der Wellenlänge kennen wir auch von anderen Radioquellen. Es ist ein Verhalten, das

man erwartet, wenn sich eine Radioquelle hinter einer »Wand« aus turbulentem heißem Gas befindet, welches das Abbild der Quelle verschwommen erscheinen lässt. Wir wissen nicht genau, wo sich dieses Gas zwischen dem Galaktischen Zentrum und uns befindet, doch es reicht aus, um unser Bild von den innersten 500 Lichtjahren des Milchstraßensystems »verwaschen« erscheinen zu lassen. Dieses Phänomen wird als interstellare Streuung bezeichnet. Um es zu minimieren, muss man eine Quelle bei den kleinstmöglichen Wellenlängen beobachten. Aus Radiomessungen bei drei Millimetern Wellenlänge wissen wir nun, dass Sgr A* nicht größer als eine Astronomische Einheit sein kann. Die entspricht etwa dem 17-fachen des »Radius« des vermuteten Schwarzen Lochs.

Ist Sgr A* das Schwarze Loch?

Es ist faszinierend, Sgr A* als das massereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum anzusehen. Bevor wir dies jedoch mit gutem Gewissen tun können, müssen wir uns zunächst fragen, ob sich Sgr A* wirklich genau im Galaktischen Zentrum befindet. Könnte es nicht bloß irgendeine zufällige Hintergrundquelle oder sogar nur ein Röntgendoppelstern mit einem stellaren Schwarzen Loch sein? Letzteres ist unwahrscheinlich, da die Radiostrahlung von Sgr A* im Verhältnis zu seiner relativ geringen Röntgenstrahlung für ein stellares Schwarzes Loch viel zu stark ist. Darüber hinaus gibt es aber noch weitere gute Argumente, welche die Verbindung von Sgr A* mit dem vermuteten massereichen Schwar-

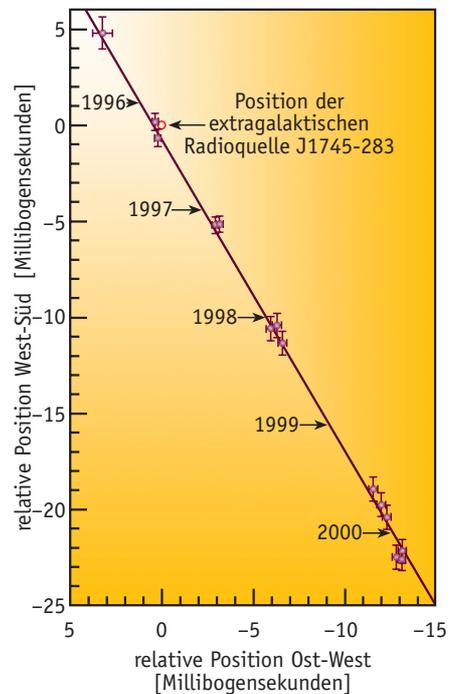
zen Loch weitgehend dingfest machen. Sie basieren auf Radiobeobachtungen, mit denen die Position, die Eigenbewegung und das Spektrum von Sgr A* genau bestimmt werden sollten.

■ **Die Lokalisierung von Sgr A*** mit Maserquellen in Bezug auf die im Infraroten hellen Sterne der Umgebung. Siehe dazu den Kasten »Wo genau ist Sgr A*?« auf Seite 32.

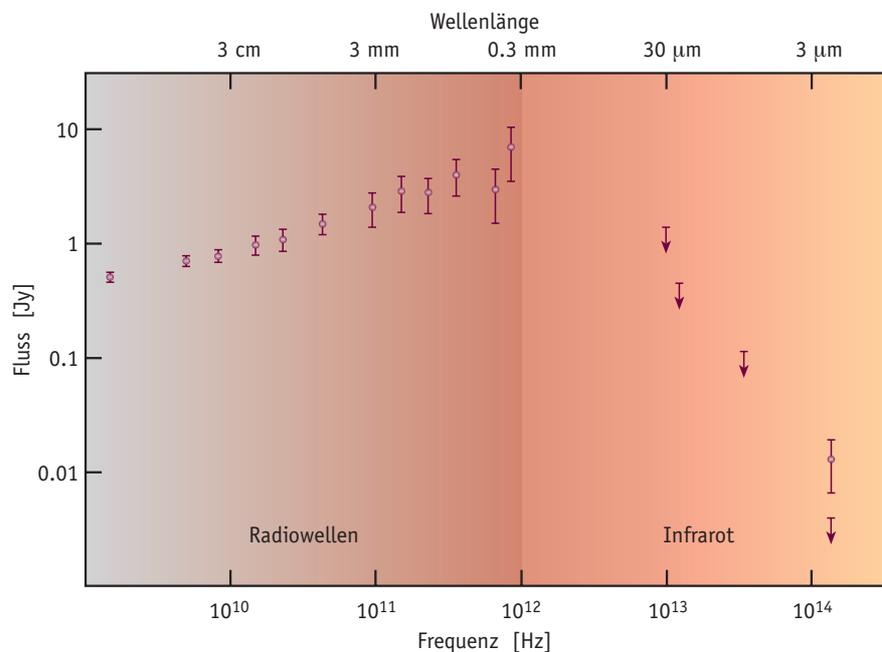
■ **Die Beobachtung der Eigenbewegung von Sgr A*.** Ein außerordentlich interessantes Experiment läuft seit einigen Jahren mit dem Very Long Baseline Array (VLBA), bei dem zehn Radioantennen zwischen Hawaii und der Karibik zu einem Interferometer verbunden werden. Ziel des Experiments ist es, die Eigenbewegung von Sgr A* zu messen. Als Referenzpunkte werden entfernte Quasare benutzt, denn deren Lage ist stationär. Tatsächlich scheint sich Sgr A* vor dem Hintergrund dieser Quellen zu bewegen (Abb. 5). Die dominante Komponente der gemessenen Bewegung verläuft genau entlang der Galaktischen Ebene und beträgt sechs Millibogensekunden pro Jahr. Damit entspricht diese scheinbare Bewegung genau der Rotation unseres Sonnensystems um das Zentrum der Galaxis (220 Kilometer pro Sekunde). Was wir als Bewegung von Sgr A* am Himmel sehen, ist in Wirklichkeit die Rotation des Milchstraßensystems, an der wir mit der Sonne teilnehmen. Mit Hilfe der interkontinentalen Radiointerferometrie lässt sich diese Bewegung am Himmel innerhalb von nur zwei Wochen nachweisen! Das ist auch deshalb ein wichtiges Ergebnis, weil es zeigt, dass unsere Vorstellung von der grundlegenden geometrischen Struktur des Milchstraßensystems korrekt ist – zumindest hinsichtlich seiner Größe und Rotationsgeschwindigkeit. Zieht man diese scheinbare Bewegung ab, so stellt man fest, dass Sgr A* ortsfest geblieben ist. Daraus folgt, dass Sgr A* sehr massereich sein muss.

Das Argument für den letzten Punkt ist sehr einfach. Betrachtet man den innersten Bereich des Milchstraßensystems im infraroten Spektralbereich und misst die Eigenbewegungen der Sterne, so findet man um Sgr A* herum Geschwindigkeiten mehr als 1000 Kilometern pro Sekunde (siehe den Beitrag ab Seite 36). Allein Sgr A* scheint unverrückbar im Zentrum sitzen zu bleiben. Wäre es ein Objekt von lediglich wenigen Sonnenmassen, so würde die Gravitationskraft der vorbeifliegenden Sterne so stark an Sgr A* zerren, dass es sich ebenfalls mit hoher Geschwindigkeit bewegen würde. Aus der Tatsache, dass sich Sgr A* im starken Gravitationsfeld des Zentrums langsamer als zehn Kilometer pro Sekunde be-

▶ Abb. 5: Position von Sgr A* relativ zum Quasar J1745-283, gemessen mit dem Very Long Baseline Array (VLBA). Die scheinbare Bewegung von Sgr A* vor dem extragalaktischen Hintergrund beruht auf der Bewegung der Sonne um das Galaktische Zentrum. Die Jahreszahlen geben die Position von Sgr A* zu Beginn des jeweiligen Jahres an. (Bild: Mark J. Reid, Karl M. Menten und Mitarbeiter)



▼ Abb. 6: Spektrum von Sgr A*, zusammengestellt aus Messungen im Radio-, Infrarot- und Röntgenbereich. Aufgrund der Absorption durch interstellare Materie kann das Spektrum im sichtbaren und ultravioletten Bereich nicht gemessen werden. (Bild: Fulvio Melia und Heino Falcke)



wegt, kann man ableiten, dass es mindestens 400 000-mal so schwer ist wie einer der benachbarten Sterne. Es kann kein normales stellares Objekt sein. Vermutlich liegen die gesamten drei Millionen Sonnenmassen, die Reinhard Genzel und seine Mitarbeiter im Innersten des Galaktischen Zentrums fanden, innerhalb der Radioquelle Sgr A*. Mit größter Wahrscheinlichkeit hängt die Radioquelle Sgr A* direkt mit der dunklen Masse im Zentrum zusammen. Dass die mit der interkontinentalen Radiointerferometrie (VLBI) gemessene Größe der Radioquelle Sgr A* ungefähr derjenigen des Schwarzen Lochs entspricht, untermauert diese Aussage.

■ **Die steile Abnahme der Radiointensität bei hohen Frequenzen.** Die Form des Radiospektrums von Sgr A* gibt uns interessante Hinweise auf die Natur der

Quelle (Abb. 6). Bei niedrigen Frequenzen verläuft das Spektrum relativ flach. Bei hohen Radiofrequenzen um 100 GHz, also einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern, zeigt es jedoch einen deutlichen Anstieg bis hin zum so genannten Submillimeter-Buckel, der bei Wellenlängen unterhalb eines Millimeters beobachtet wurde.

Radioastronomen kennen flache Radiospektren aus zwei Bereichen. Zum einen aus der Bremsstrahlung oder Frei-Frei-Strahlung von Elektronen in den Coulomb-Feldern der Atomkerne. Dies passiert zum Beispiel im heißen Plasma so genannter HII-Regionen um junge Sterne. Zum anderen von kompakten Radiokernen in Quasaren und Radiogalaxien. Die Frei-Frei-Strahlung kann man im Fall von Sgr A* inzwischen ausschließen, weil die Quelle dafür zu klein ist. Bei

Wo genau ist Sagittarius A*?

In der modernen Astronomie werden Objekte in verschiedenen Spektralbereichen untersucht: vom langwelligen Radio bis hin zum Röntgenbereich. Ein permanentes Problem ist es, Details der in den unterschiedlichen Wellenlängen erstellten Bilder miteinander zu vergleichen, denn diese Bilder sind oft mit äußerst verschiedenen Beobachtungsmethoden und Instrumenten erstellt worden. Der Vergleich ist oft kein Problem. So kann man zum Beispiel Aufnahmen eines Sternhaufens im sichtbaren oder infraroten Licht einfach über einander schieben: Man sieht die meisten Sterne auf beiden Bildern. Viel schwieriger ist es, wenn man Radio- und Infrarotbeobachtungen vergleichen will, und dabei eine Genauigkeit anstrebt, die wesentlich höher als eine Bogensekunde ist. Beim Studium des Galaktischen Zentrums trifft diese Situation zu. Sagittarius A* konnte im infraroten Bereich bis heute nicht einwandfrei identifiziert werden. Bis 1997 betrug die relative Positionsunsicherheit zwischen dem Radio- und dem Infrarotbezugssystem etwa 0.3 Bogensekunden. Innerhalb dieses Bereiches existieren mehrere Infrarotquellen, von denen jede das Infrarot-Gegenstück zu Sgr A* hätte sein können. Wenn man die Umlaufbahnen von Sternen um Sgr A* bestimmen will, so ist das ein ernsthaftes Problem (siehe auch den Beitrag auf S. 36 ff).

Vor einigen Jahren kam einem von uns (KMM) und seinem damaligen Kollegen Mark Reid (vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) die Idee, dass man in der unmittelbaren Nachbarschaft von Sgr A* mehrere derjenigen Sterne, die im Infrarotbereich hell sind, auch bei Radiowellenlängen beobachten könnte. Es gibt in dieser Region viele rote Riesensterne, wie Mira-Veränderliche und Überriesen. Deren photosphärische Radiokontinuumsstrahlung ist zwar viel zu schwach, um sie selbst mit dem derzeit leistungsstärksten

Radioteleskop, dem VLA, nachweisen zu können. Allerdings kommt es in der innersten Atmosphäre vieler dieser Sterne zur Maseremission von Siliziumoxidmolekülen. Diese Strahlung sollte selbst in der Entfernung zum Galaktischen Zentrum nachweisbar sein.

Ein Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist die Mikrowellen-»Version« eines Lasers. Er strahlt also sehr intensive Strahlung in einem sehr schmalen Wellenlängenbereich (einer Spektrallinie) ab. Würde man etwa



der beobachteten Kompaktheit von Sgr A* würde eine starke, so genannte Selbst-Absorption der Strahlung im Plasma auftreten. Die Intensität der Radiostrahlung würde dann zu niedrigen Frequenzen hin steil abnehmen.

Insofern bleibt nur noch der Vergleich mit den Radiokernen von Quasaren, die aber um viele Größenordnungen heller sind als Sgr A*. Dort findet man als Emissionsprozess die Synchrotronstrahlung von hochenergetischen Elektronen im Magnetfeld eines relativistischen Plasmastrahls, eines Jets. Diese Jets sind gebündelte Ausflüsse, die in der direkten Umgebung Schwarzer Löcher und von Neutronensternen entstehen und mit sehr hohen Geschwindigkeiten in zwei entgegengesetzten Richtungen nach außen schießen. In Radiogalaxien können sie Millionen von Lichtjahren groß werden. Geht man von den Enden eines solchen Jets zum Zentrum, so wird dieser immer enger. Folglich nimmt die Dichte im Plasma zu, und die Magnetfeldstärke steigt an. Dies setzt sich fort, bis man schließlich in der Nähe des Schwarzen Lochs ankommt, am Fußpunkt des Jets. Dort werden die

größte Magnetfeldstärke und die maximale Teilchendichte erreicht. Jeder Punkt entlang des Jets strahlt in einer für das jeweilige Magnetfeld charakteristischen Frequenz. Dabei gilt: Je kleiner das Emissionsgebiet ist, desto höher ist die Frequenz. Bei Quellen mit flachem Radiospektrum kommt demzufolge die niederfrequente Radiostrahlung aus großen Entfernungen vom Schwarzen Loch, während die hochfrequente Strahlung aus seiner nächsten Umgebung kommt. Zusammen genommen ergibt die Strahlung entlang des Jets ein flaches Spektrum.

Daraus folgt, dass wir aus der Lage des Maximums im Radiospektrum die charakteristische Größe der Radioquelle abschätzen können. Im Fall von Sgr A* liegt das Maximum bei 10^{12} bis 10^{13} Hz, dem so genannten THz-Bereich (im fernen Infrarot). Aus dieser Frequenz und der dort beobachteten Flussdichte (ungefähr zwei Jansky) ergibt sich eine charakteristische Größe von etwa 20 Millionen Kilometer. Das ist ungefähr das Zwölfwache des Sonnendurchmessers. Gleichzeitig entspricht diese Länge gerade dem doppelten Schwarzschild-Radius des ver-

muteten Schwarzen Lochs. Das muss mehr als ein erstaunlicher Zufall sein!

Die einfachste Erklärung für den Abbruch des flachen Spektrums bei hohen Frequenzen jenseits des THz-Bereichs ist, dass die Strahlung aus noch kleineren Gebieten nicht mehr gesehen wird, weil diese Gebiete innerhalb des Ereignishorizonts liegen müssten. Diese Strahlung wird sofort verschluckt.

Übrigens ist diese Abschätzung kaum an die Details der Modelle gebunden. Sie gilt auch für andere Deutungen der Radioemission. So wurde etwa vorgeschlagen, dass die Radiostrahlung von Sgr A* direkt durch das einfallende Gas erzeugt wird. Diese Modelle können zwar nicht so gut das Radiospektrum bei niedrigen Frequenzen erklären. Bei hohen Frequenzen ergeben sie jedoch genau die gleichen Werte. Das ist kein Wunder, denn die Synchrotronstrahlung ist ein fundamentaler Prozess, der allen Modellen zugrunde liegt.

Dass wir aus relativ kleinen Bereichen in unmittelbarer Nähe des Ereignishorizontes keine Radiostrahlung empfangen und das Spektrum deswegen abknickt,

die sehr starke SiO-Maseremission von Mira (o Ceti) nehmen und sie vom Galaktischen Zentrum aus strahlen lassen, so könnte man sie mit dem VLA ohne weiteres entdecken. Wir beobachteten also Sgr A* in der SiO-Maserlinie bei einer Wellenlänge von sieben Millimetern.

Tatsächlich fanden wir mehrere Maserquellen in unserem Gesichtsfeld. Mehr noch: Außer den Maserlinien konnten wir gleichzeitig die recht intensive Radiokontinuumstrahlung von Sgr A* messen. Deshalb war es möglich, den Relativabstand zwischen den Masern und der Radioquelle sehr genau zu bestimmen. Da die SiO-Maser bis auf wenige Millibogensekunden genau den Standort ihrer »Heimat-Infrarot-Sterne« markieren, lässt sich die Position von Sgr A* im Infrarotbereich daraus genau ableiten.

Vor kurzem haben wir die Genauigkeit noch weiter verbessert, indem wir das Very Long Baseline Array (VLBA) benutzen, ein Radiointerferometer, dessen Antennen von Hawaii bis zur Karibik verteilt sind. Mit dem VLBA können wir eine zehnfach so hohe Auflösung erreichen wie mit dem VLA. Die Unsicherheit in der Position von Sgr A* ist damit auf 10 Millibogensekunden geschrumpft. Sollte Sgr A* jemals im Infrarotbereich »ausbrechen«, so wissen wir genau, wo wir danach zu suchen haben!

wird von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Darüber hat einer von uns (HF) in dieser Zeitschrift bereits früher berichtet (SuW 1/2001, S. 12).

Wir verdanken also der Verbindung dreier glücklicher Umstände tiefgreifende Erkenntnisse über das Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum: Erstens, dass die Strahlung, die aus seiner direkten Umgebung kommt, im (gut beobachtbaren) Submillimeterwellenbereich liegt. Zweitens, dass Radiointerferometer bei diesen Wellenlängen die höchste Auflösung erreichen und, drittens, dass die interstellare Streuung dort vernachlässigbar wird. Zusammengefasst sollte es möglich sein, mit Hilfe dieser Effekte gerade den Schatten des Ereignishorizonts aufzulösen, also den dunklen Bereich, der durch das Verschlucken von Licht erzeugt wird. Bevor das möglich ist, müssen VLBI-Experimente eine doppelt so hohe Frequenz erreichen. Das ist zwar mühsam, aber nicht unmöglich. Was dann zu beobachten sein sollte, kann man bereits simulieren (Abb. 7). Natürlich setzt das voraus, dass Sgr A* wirklich ein Schwarzes Loch mit einem Ereignishorizont ist.

Ein hungerndes Loch

Wenn so viele Hinweise auf die Existenz eines Schwarzen Lochs vorliegen, so stellt sich nun die Frage: Warum verschluckt es denn nicht alle Materie in seiner Umgebung?

Die Antwort muss in zwei Schritten erfolgen. Zunächst müssen wir uns klar machen, dass Sgr A* trotz seiner erstaunlich großen Masse im Vergleich zu unserem Milchstraßensystem ein verschwindend kleines Objekt darstellt. Bereits bei einer Entfernung von einem Parsec (3,26 Lichtjahren) von Sgr A* haben die Sterne in geringeren Abständen vom Zentrum zusammengenommen eine größere Masse als das Schwarze Loch! Außerhalb des zentralen Parsecs wirkt das Schwarze Loch vor allem durch seine Masse und spielt für andere Prozesse kaum eine Rolle. Ob Sterne und Gas letztlich in das Loch fallen oder nicht, hängt also in erster Linie von der Dynamik des innersten Bereiches der Galaxis ab. Wir wissen, dass die Zentren von Galaxien oft wahre Hexenkessel sind, in denen andauernd Sterne entstehen und wieder vergehen. Gas wird aufgeheizt und herausgeblasen. Am Ende bleibt oft nicht viel übrig, um das Schwarze Loch zu füttern. Es sitzt sozusagen hilflos in der Mitte und muss dem Treiben unbeteiligt zusehen!

Etwas Material scheint allerdings doch den Weg in den schwarzen Schlund zu finden, denn sonst könnten wir nicht erklären, dass wir überhaupt Strahlung von Sgr A* sehen. Die Energie für diese Strahlung – so die gängige These – kommt aus der Umwandlung von potentieller Energie im Potentialtopf des Gravitationsfeldes in die kinetische Energie des einströmenden Materials. Diese kinetische Energie kann durch viskose Prozesse (Reibung) in Hitze umgewandelt werden. Dabei gilt: Je mehr Material einfällt, desto heller ist die Quelle.

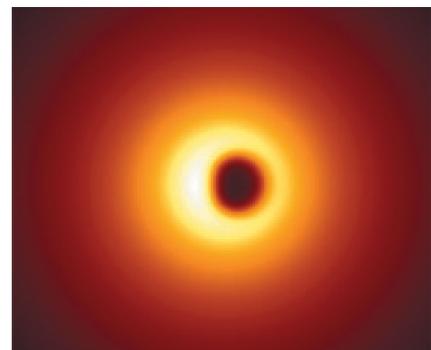
Sgr A* selbst ist aber eines der am schwächsten leuchtenden Schwarzen Löcher, die wir kennen. Es ist geradezu eine Funzel im Vergleich zum großen kosmischen Leuchtfeuer der Quasare. Die große Frage war daher lange, warum Sgr A* so schwach leuchtet. Direkt damit verknüpft war die Frage nach der so genannten Akkretionsrate, also der Menge an Materie, die pro Zeiteinheit in das Schwarze Loch strömt.

Wie viel einfallendes Material nötig ist, um die Strahlung von Sgr A* zu erzeugen, wurde lange Zeit intensiv diskutiert. Die Zahlen für den Masseneinstrom schwanken, je nach Modell, um den Faktor 10 000: zwischen 10^{-4} und 10^{-8} Sonnenmassen pro Jahr! Die niedrigen Zahlen basierten in erster Linie auf den Jetmodellen, während die hohen Zahlen zunächst von

Theoretikern bevorzugt wurden, die sich mit Akkretionsscheiben befassen. Bei diesen Theoretikern hat sich in den letzten Jahren die Annahme etabliert, dass einfließendes (»akkretierendes«) Gas extrem heiß und optisch dünn sei. In diesem Fall wären die Strahlungsprozesse relativ ineffizient, und eine große Gasmenge könnte weitgehend unbemerkt im Loch verschwinden. Andere Theoretiker, die sich mit Jetmodellen befassen (darunter einer von uns, HF), argumentierten dagegen mit der Ähnlichkeit des Radiospektrums von Sgr A* mit denjenigen der Radiokerne von Quasaren. Sie stellten fest, dass man das Radiospektrum von Sgr A* dann mit einem Quasarjetmodell erklären könnte, wenn man eine Akkretionsrate annimmt, die um acht Größenordnungen kleiner ist, als jene der Quasare. Die Diskussion rankte sich also um die Frage, ob Sgr A* so schwach ist, weil es kaum gefüttert wird, oder, weil es so ineffizient strahlt.

Eigentlich gibt es für ein aktives Schwarzes Loch nur zwei entscheidende Parameter: seine Masse und die Masseneinfallrate. Deshalb war die langjährige Unsicherheit über die Akkretionsrate von Sgr A* irritierend groß. Schließlich ist die Masse des Objekts doch recht gut bekannt.

Erst im letzten Jahr hat sich hier Entscheidendes getan. Wieder haben Radiobeobachtungen den Durchbruch erbracht, diesmal mit Hilfe der Radiopolarimetrie. Erinnern wir uns: Licht und auch Radiostrahlung bestehen aus Wellen. Diese kann man in zwei zueinander senkrechte (horizontale und vertikale) Komponenten aufteilen, die zusammen die resultierende Welle ergeben. Eine Welle ist unpolarisiert, wenn die horizontale Komponente und die vertikale Komponente dem Betrage nach gleich groß sind. Überwiegt eine dieser Kompo-



▲ Abb. 7: Computersimulation eines rotierenden Schwarzen Loches, das in ein transparentes, leuchtendes Gas eingehüllt ist. Dargestellt ist die bei einer Wellenlänge von 0,6 mm zu erwartende Strahlung. (Bild: Heino Falcke)

nenten, so spricht man von linear polarisiertem Licht. Alternativ kann man die Strahlung auch in eine rechts- und eine linksdrehende helikale Welle aufteilen; überwiegt eine dieser beiden Komponenten, so nennt man dies zirkulare Polarisation. Radioempfänger messen typischerweise die Strahlung mit für lineare oder zirkulare Strahlung empfindlichen polarisierten Empfangshörnern. Hier ist diese Information automatisch verfügbar.

Polarisationsdaten zu kalibrieren ist jedoch oft mühsam und daher wird diese zusätzliche Information gerne vernachlässigt. Das galt insbesondere für Sgr A*. Seit langem gab es das nie publizierte Gerücht, die Strahlung von Sgr A* sei unpolarisiert und weise keine bevorzugte Schwingungsrichtung auf. Zumindest für die lineare Polarisation wurde das behauptet. Und da die zirkulare Polarisation in normalen Synchrotron-Quellen zehnfach geringer ist als die lineare Polarisation, kümmerte sich niemand um die zirkulare Polarisation.

Doch Sgr A* ist keine normale Quelle! Daran wurde Geoff Bower erinnert, ein

amerikanischer Wissenschaftler, der 1997 als Gast an das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn gekommen war. Nach vielen Diskussionen in unserer Arbeitsgruppe begann er, die alten Mythen über die Polarisation von Sgr A* anhand von Messdaten systematisch zu überprüfen. Zu seiner und unserer großen Frustration kam er zunächst zu dem Ergebnis, dass Sgr A* bei allen Frequenzen innerhalb der Messfehler komplett unpolarisiert war – anders als alle bekannten Radioquellen in Quasaren.

Kurz bevor er sich anderen Fragen widmen wollte, erstellte Bower aus lauter Verzweiflung noch eine Karte der zirkularen Polarisation von Sgr A* und – siehe da – es gab ein positives Signal. Nach vielen Tests wurde zur Gewissheit, dass die Quelle tatsächlich zirkular, aber nicht linear polarisiert ist. Bald wurde das Ergebnis von einer australischen Gruppe mit einem anderen Teleskop bestätigt.

Damit war die Jagd auf die Polarisation im Galaktischen Zentrum eröffnet. Geoff Bower und seine Kollegen in Bonn, Berkeley und Australien führten weitere

Messungen bei immer höheren Frequenzen durch. Gleichzeitig wurde das Archiv des VLA in New Mexico durchforstet, und man fand zirkulare Polarisation über einen Zeitraum von 20 Jahren in den Daten von Sgr A*, die bis dahin völlig übersehen worden waren.

Das Bild, das sich ergab, war immer das gleiche: Sgr A* war zirkular, nicht jedoch linear polarisiert. Dies erschien als völlige Verdrehung dessen, was wir bis dahin von aktiven Schwarzen Löchern kannten. Denn dort ist, wie gesagt, die lineare Polarisation grundsätzlich höher als die zirkulare Polarisation, wobei letztere oft nicht nachweisbar ist.

Die Zerstörung der linearen Polarisation

Was könnte hinter dieser Umkehrung der Verhältnisse stecken? Theoretiker aus Bonn und den Vereinigten Staaten, darunter Thomas Beckert und einer von uns (HF), schlugen schon bald vor, dass eine große Anzahl heißer Elektronen die lineare Polarisation zerstören könnte. Dann würde nur die zirkulare Polarisation übrig bleiben. Die so genannte Faraday-Rotation spielt in diesem Modell eine wichtige Rolle: Durchläuft eine linear polarisierte Welle ein heißes magnetisiertes Plasma, so wird die Polarisations Ebene der Welle gedreht. Die Drehung ist proportional zum Quadrat der Wellenlänge, zur magnetischen Feldstärke sowie zur Teilchendichte. Ist das Medium turbulent oder ist die Drehung zu stark, so wird die Richtung der linearen Polarisation hin und her gewirbelt oder fängt an, extrem schnell zu rotieren, so dass die vormals existierende Vorzugsebene zerstört wird. Die zirkulare Polarisation wird dahingegen nicht beeinflusst.

Doch wo waren diese heißen Elektronen und was bedeuteten sie? Experimentell könnte man diese Frage beantworten, indem man zu kürzeren Wellenlängen übergeht, da die Faraday-Rotation mit zunehmender Wellenlänge quadratisch abnimmt. Doch selbst bei einer Wellenlänge von drei Millimetern war keine lineare Polarisation von mehr als einem Prozent zu finden. Versuche bei einer Wellenlänge von 1.3 mm scheiterten immer wieder an schlechtem Wetter. Dann erschien überraschend eine Arbeit von David Aitken, einem Senior der Polarisationsmessungen von der University of Hertfordshire in England, und seinen Kollegen. Sie behaupteten, die Strahlung von Sgr A* sei bei einer Wellenlänge unterhalb von etwa einem Millimeter tatsächlich zu mehr als zehn Prozent linear polarisiert. Dies wurde zunächst mit großer Skepsis aufgenommen, da die Messungen mit einem Einzelteleskop entstanden waren,

Glossar

Bremsstrahlung: Freie Elektronen werden in den Coulomb-Feldern von Ionen abgelenkt und dabei abgebremst (oder beschleunigt). Die Energiedifferenz zwischen den beiden ungebundenen Zuständen des Elektrons wird in Form von Strahlung emittiert (oder absorbiert). Bremsstrahlung wird oft als thermische Strahlung bezeichnet.

Plasma: Ein hochionisiertes Gas aus Ionen und Elektronen, das jedoch insgesamt elektrisch neutral ist.

Poloidales Magnetfeld: Ein Magnetfeld, das bezüglich einer Achse rotationssymmetrisch ist und keine Komponente in azimuthaler Richtung aufweist.

Radiointerferometer: Eine Anordnung von mehreren Radioantennen (meist Parabolspiegel), deren gegenseitige Abstände vergleichbar oder größer als ihr Durchmesser sind und deren Signale elektronisch kombiniert werden. Mit Radiointerferometern lassen sich Winkelauflösungen von einer Millibogensekunde erzielen. Einzelteleskope erreichen nur etwa die Winkelauflösung des menschlichen Auges (etwa eine Bogenminute).

Schwarzes Loch: Ein Raumgebiet, in dem die Gravitationskraft so stark ist, dass weder Licht noch Materie oder irgendeine Art von Signal aus ihm entweichen kann. Stellare Schwarze Löcher entstehen, indem ein Stern unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenbricht. In den Zentren von Aktiven Galaxien und Quasaren werden massereiche Schwarze Löcher mit Massen von bis zu einer Milliarde Sonnenmassen vermutet.

Schwarzschild-Radius: Stürzt ein Objekt der Masse M unter dem Einfluss seiner eigenen Schwerkraft in sich zusammen (kollabiert), so wächst die Schwerkraft an seiner Oberfläche derart an, dass von dort selbst ein Lichtstrahl nicht mehr entweichen kann. Der kritische Radius, den das Objekt dabei unterschreitet, heißt Schwarzschild-Radius R_S . Es gilt $R_S = 2GM/c^2$, wobei G die Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Der Schwarzschild-Radius der Sonne beträgt rund 3 km.

Synchrotronstrahlung: Geladene Teilchen (z. B. Elektronen), die sich in magnetischen Feldern bewegen, werden abgelenkt. Dabei senden sie elektromagnetische Wellen aus. Bei relativistischen Teilchen wird diese Strahlung vorzugsweise in Bewegungsrichtung abgegeben. Diese sogenannte Synchrotronstrahlung tritt – je nach magnetischer Feldstärke und Geschwindigkeit des Teilchens – vom Radio- bis zum Röntgenbereich auf. Synchrotronstrahlung wird oft als nicht-thermisch bezeichnet.

Toroidales Magnetfeld. Ein Magnetfeld, das bezüglich einer Achse rotationssymmetrisch ist und keine Komponente in Richtung der Symmetrieachse aufweist.

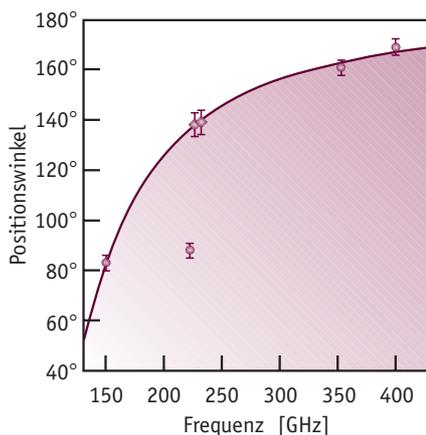
Weitere Informationen

Beinahe die gesamte Literatur zu diesem Thema ist in englischer Sprache erschienen. Ein aktuelles, populäres Buch ist: **Fulvio Melia**: *The Black Hole at the Center of Our Galaxy*. Princeton University Press, Princeton 2003, ISBN 0-691-09505-1.

Ein recht anspruchsvoller Übersichtsartikel ist: **Fulvio Melia und Heino Falcke**: *The Supermassive Black Hole at the Galactic Center*. *Annual Review in Astronomy and Astrophysics*, **39**, 309–352 (2001).

Der Tagungsband der vorletzten »Galactic Center Conference« ist: **H. Falcke, A. Co-tera, W. Duschl, F. Melia, M. Rieke (Hrsg.)**: *The Central Parsecs of the Galaxy*. Astronomical Society of the Pacific, San Francisco 1999.

Eine virtuelle Reise zum Schwarzen Loch kann man auf der folgenden Internet-Seite unternehmen: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/hfalcke/bh/>



◀ Abb. 8: Faraday-Rotation der linearen Polarisation von Sgr A*. Die Daten von David Aitken und seinem Team sind als Kreise dargestellt, neuere Messungen bei 230 GHz von Geoff Bower und seinem Team als Vierecke. Der von Aitken gefundene, niedrige Wert bei einer Frequenz von 230 GHz ist entweder ein Messfehler oder er beruht auf der zeitlichen Veränderung der Polarisationssebene. (Bild: G. Bower, M. Wright, H. Falcke, D. Backer)

welches eine recht geringe Auflösung hatte. Um zu diesem Schluss zu kommen, mussten Aitken und seine Mitarbeiter einen Großteil der diffusen Hintergrundstrahlung im Bereich des Galaktischen Zentrums modellieren und von den beobachteten Daten abziehen – ein sehr unsicherer Prozess. Doch ein Jahr später hatten auch Bower und Kollegen aus Bonn und Berkeley wieder Glück mit dem Wetter und konnten die hohe lineare Polarisation mit einem hoch auflösenden Interferometer bestätigen. Darüber hinaus fanden sie Anzeichen des Faraday-Effekts in ihren Daten. Bei einer so hohen Frequenz hatte man dies noch bei keinem Objekt beobachtet. Die Rotation der Polarisationsrichtung und damit auch die Depolarisation der Strahlung von Sgr A* war einhundert bis tausend Mal so groß wie bei allen anderen Kandidaten für Schwarze Löcher (Abb. 8). Andererseits kam die Submillimeter-Strahlung aber auch aus der direkten Umgebung des Schwarzen Lochs. So nahe war man einem Schwarzen Loch zuvor noch nirgendwo auf die Pelle gerückt.

Die Depolarisation musste also mit größter Wahrscheinlichkeit durch das heiße einströmende Gas erzeugt werden, welches die innere Radiokomponente einhüllte. Dies war der erste Hinweis darauf, dass die von Theoretikern postulierte heiße und geometrisch dicke, optisch je-

doch dünne, also für die eigene Strahlung transparente Scheibe tatsächlich existierte. Strahlt Sgr A* also deshalb so wenig, weil seine Scheibe optisch dünn ist?

Wieder gab es eine Überraschung. Aus der Rotation der Polarisationssebene und der gemessenen Größe der Quelle konnte man Teilchendichte und Magnetfeld im Akkretionsfluss abschätzen. Diese sind direkt proportional zur Akkretionsrate und es ergab sich ein Wert von nur 10^{-8} Sonnenmassen pro Jahr – genau das, was das Modell eines relativistischen Jets schon vor zehn Jahren vorausgesagt hatte. Gleichzeitig ist es um einen Faktor 10 000 weniger, als die reinen Akkretionsmodelle ursprünglich verlangten. Welches Modell stimmt nun?

Ein Kompromiss

Als sich Wissenschaftler, die das Galaktische Zentrum untersuchen, im vergangenen Jahr auf Hawaii zur »Galactic Center Conference« trafen, wurden diese Befunde ausführlich diskutiert. Wie so oft im Leben ergab sich schließlich ein Kompromiss: Alle Effekte scheinen in Sgr A* eine wichtige Rolle zu spielen! Zunächst befindet sich das Loch tatsächlich auf Fastenkur und nur wenig Materie durchquert den Ereignishorizont. Zusätzlich ist aber der Akkretionsfluss offensichtlich optisch dünn und strahlungseffizient. Der größte Teil der Radiostrahlung

bei niedrigen Frequenzen ist am besten durch einen ausströmenden Plasmajet zu erklären. Die Submillimeterstrahlung und auch die Röntgenemission entstammen entweder dem innersten Teil dieses Jets oder dem innersten Teil der Akkretions-scheibe – im Endeffekt mag zwischen diesen beiden Möglichkeiten kein großer Unterschied bestehen, wenn Jet und Scheibe eng miteinander verkoppelt sind. Mit einem solchen Konsens kann eigentlich jeder gut leben.

Durch die weitere Entwicklung der Zentimeter- und (Sub-)Millimeter-Radioastronomie sowie der Polarimetrie wird uns dieser innerste Bereich um ein Schwarzes Loch noch tiefe Einblicke erlauben. Phänomene, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesagt werden, können wir hier beobachten, und die Kopplung zwischen ein- und ausströmendem Plasma im Detail studieren. Dieser Prozess ist von fundamentaler Bedeutung für unser Verständnis stellarer und massereicher Schwarze Löcher, von Neutronensternen und der Sternentstehung.

Verfolgt man die rasante Entwicklung der Entdeckungen im Galaktischen Zentrum, so bleibt der Eindruck zurück, dass man selten so viel in so kurzer Zeit über ein einzelnes Objekt gelernt hat. Sgr A* hat Schwarze Löcher aus dem Bereich der Spekulation in den Bereich unserer erfahrbaren Wirklichkeit gebracht. Gerade radioastronomische Methoden versprechen den Nervenkitzel neuer, aufregender Entdeckungen über die Physik in der Nähe des Ereignishorizonts. Hinter diesen Horizont werden wir jedoch niemals schauen können. □



Heino Falcke ist »Bijzonder Hoogleraar« (außerordentlicher Professor) für Hochenergie-Astrophysik an der Universität Nijmegen (Niederlande) und »Senior Scientist« am Radio-Observatorium Westerbork (ASTRON) in Dwingeloo (NL).



Karl M. Menten ist Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, wo er die Abteilung für Millimeter- und Submillimeter-Astronomie leitet, und Professor für Astrophysik an der Universität Bonn.