

Massereiche Schwarze Löcher

Vom galaktischen Zentrum bis zu Quasaren in der Frühzeit des Universums

Reinhard Genzel

Mit der adaptiven Optik in großen bodengebundenen Teleskopen sowie mit empfindlichen neuen Instrumenten für den Infrarotwellenlängenbereich ist es in den letzten Jahren gelungen, die Bewegung von Sternen im Zentrum unserer Milchstraße bis auf Skalen von zehn Lichtstunden zu verfolgen. Diese Messungen und insbesondere der Nachweis von Sternen auf Kepler-Bahnen um die kompakte Radioquelle SgrA* liefern einen überzeugenden Beweis, dass SgrA* ein massereiches Schwarzes Loch von etwa drei Millionen Sonnenmassen sein muss. Fast alle größeren Galaxien in unserer Nachbarschaft scheinen ebenfalls solche zentralen Schwarzen Löcher zu beherbergen. Diese massereichen Löcher sind bereits ein bis zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden bei Prozessen, die offenbar eng mit der Entstehung der Galaxien selbst verknüpft waren.

Seit der Entdeckung der Quasare („quasi-stellar radio sources“) vor etwa vierzig Jahren haben Astrophysiker versucht, eine schlüssige Erklärung für die Energieproduktion dieser spektakulären Objekte zu finden. In den weit entfernten Quasaren wird in einem Gebiet von nur wenigen Lichtjahren Durchmesser 1000- bis einige 100000-mal mehr elektromagnetische Strahlung erzeugt als sonst in ganzen Galaxien. Quasare sind die Kernbereiche von großen Galaxien, die oft hochgebündelte Jets von relativistischen Elektronen und zeitlich schnell variierende Röntgen- und Gamma-Strahlung aufweisen. Diese Phänomene sind nicht durch die sonst in Galaxien dominierenden Kernverschmelzungsprozesse in Sternen zu erklären, dagegen aber recht plausibel durch Materieakkretion auf massereiche Schwarze Löcher.

Wenn Materie von außen in das Gravitationsfeld eines Schwarzen Loches einfällt, kann außerhalb des Ereignishorizonts¹⁾ Gravitationsenergie in Strahlung umgewandelt werden, und zwar mit größerer Effizienz als in jedem anderen uns bekannten physikalischen Prozess. Inzwischen hat sich dieses Modell unter Astrophysikern generell durchgesetzt. Dennoch ersetzt dieser „Indizienbeweis“ natürlich keinesfalls den direkten Nachweis, der nur über die charakteristische Schwerkraft und die Existenz eines Ereignishorizonts führen kann. Gibt es also solche massiven Schwarzen Löcher wirklich?

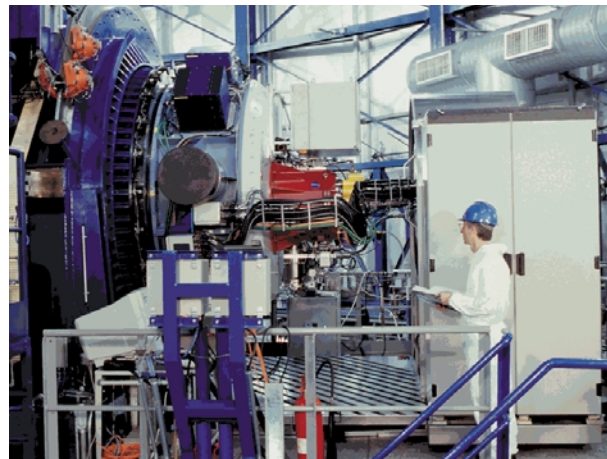


Abb. 1: Mit dieser Infrarot-Kamera (inkl. Spektrometer) an einem der vier 8m-Teleskope des Very Large Telescopes der ESO gelangen die bislang schärfsten und tiefsten Infrarot-Aufnahmen des galaktischen Zentrums. Das Instrument besteht aus dem von drei französischen Gruppen entwickelten Modul für die adaptive Optik NAOS (blau) sowie der kryogenen AO-Kamera/Spektrometereinheit CONICA (rot), die vom MPI für Astronomie (Heidelberg) und vom MPI für extraterrestrische Physik (Garching) unter der Leitung von R. Lenzen entwickelt wurde. Das Licht kommt von links.

Anzeichen für massive Schwarze Löcher in Galaxienkernen

Eine räumlich konzentrierte Masse lässt sich nachweisen, indem man die Geschwindigkeiten von Testteilchen in ihrem Gravitationspotential bei verschiedenen Abständen bestimmt. Dies können Sterne oder Gase sein. Damit diese Methode aber zu schlüssigen Ergebnissen führt und verschiedene Formen von Massenkonzentrationen unterscheiden kann, müssen die Testteilchen nahe genug an der Zentralmasse beobachtet werden. Wegen ihrer großen Entfernung lassen sich solche direkten Messungen nicht an Quasaren durchführen. Für eine Reihe von nahen Galaxienkernen, einschließlich des Zentrums unserer eigenen Milchstraße, sind dagegen in den letzten zehn Jahren große Fortschritte bei der Suche nach zentralen Massenkonzentrationen gelungen. Diese teils mit bodengebundenen Teleskopen und teils mit dem Hubble Space Telescope gewonnenen Daten lassen es jetzt als wahrscheinlich erscheinen, dass fast alle Galaxienkerne dunkle zentrale Massenkonzentrationen besitzen, mit Massen zwischen einigen Millionen und einigen Milliarden Sonnenmassen. Mit der Ausnahme der aktiven Galaxie

1) Der Ereignishorizont wird charakterisiert durch den sog. Schwarzschild-Radius. Dieser wächst linear mit der Masse und beträgt 13 Sonnenradien für eine Masse von 3 Millionen Sonnenmassen.

Prof. Dr. Reinhard Genzel, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Giessenbachstraße, 85740 Garching und Department of Physics, University of California, Berkeley, USA – Festvortrag anlässlich der Verleihung der Stern-Gerlach-Medaille 2003 auf der 67. Physikertagung in Hannover

NGC 4258, bei der man mit interkontinentaler Radiointerferometrie die Geschwindigkeiten von dichtem Molekulargas auf einem Bruchteil eines Lichtjahres nachweisen konnte [1], reicht wegen der großen Entfernung der meisten dieser Objekte die räumliche Auflösung der Messungen noch nicht aus, um sicher zu sein, dass es sich notwendigerweise um Schwarze Löcher handeln muss.

Ein massives Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße

Dem Zentrum unserer Milchstraße kommt bei der Frage eines überzeugenden Beweises für die Existenz von massiven Schwarzen Löchern eine besondere Rolle zu. Das galaktische Zentrum ist „nur“ 26000 Lichtjahre entfernt, also etwa hundertmal näher als die nächsten externen Galaxien, tausendmal näher als die nächsten aktiven Galaxienkerne und hunderttausendmal näher als der nächste Quasar. Damit kann man mit den besten Messungen im optischen und Infrarotbereich Gebiete von wenigen Lichttagen auflösen, mit den Methoden der interkontinentalen Radiointerferometrie (VLBI) sogar Gebiete von etwa zehn Lichtminuten. Auch im Zentrum unserer Milchstraße gibt es seit mehr als zwanzig Jahren Anzeichen für eine zentrale Massenkonzentration [2]. Da interstellarer Staub und Gas in der Ebene unserer Milchstraße sichtbare,

ultraviolette und weiche Röntgenstrahlung fast vollständig absorbieren, kann man das galaktische Zentrum aber nur bei großen Wellenlängen – im Infrarot- und Radiobereich – und bei ganz kleinen Wellenlängen – im harten Röntgen- und im Gammabereich – untersuchen. Deshalb sind die wesentlichen Fortschritte im Verständnis des galaktischen Zentrums eine direkte Folge der in den letzten zwanzig Jahren erreichten großen Verbesserungen in der Messtechnik (Empfindlichkeit, Winkelauflösung und abbildende Detektoren) in diesen „neuen“ Astronomiebereichen. Hier spielt insbesondere die „adaptive Optik“ eine ganze entscheidende Rolle (siehe Infokasten „Infrarotinstrumente und adaptive Optik“)

Im Zentrum unserer Milchstraße findet man einen dichten Sternhaufen, in dessen Mittelpunkt vor zwanzig Jahren eine sehr kompakte, helle Radioquelle (SgrA*) entdeckt wurde, deren Durchmesser kleiner als der Erdbahndurchmesser ist. Deshalb lag es nahe, im Milchstraßenzentrum, analog zu Quasaren, ein zentrales massives Schwarzes Loch zu vermuten. In den letzten zehn Jahren ist es unserer Gruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik gelungen, die Geschwindigkeiten von tausend Sternen bis auf einen Abstand von unter einer Lichtwoche von SgrA* zu vermessen. Der entscheidende Schritt dabei bestand darin, die durch die Erdatmosphäre verursachte Bild-

Infrarotinstrumente und adaptive Optik

Die im Infrarotwellenlängenbereich ($\lambda \geq 1\mu\text{m}$) benutzten Techniken sind – im Unterschied zu den im Sichtbaren verwendeten – in den meisten Fällen durch die Wärmestrahlung der Atmosphäre, des Teleskops und des im Instrument entstehenden Photonenhintergrunds in ihrer Empfindlichkeit bei astronomischen Messungen limitiert. Der instrumentelle Hintergrund lässt sich durch Abkühlen von Instrument und Detektor auf Temperaturen von flüssigem Stickstoff (77 K), flüssigem Helium (< 4 K) oder darunter wesentlich verringern bzw. sogar eliminieren. Der atmosphärische Hintergrund kann aber in den meisten Fällen nur durch die Verlagerung des Teleskops in den Weltraum ausgeschaltet werden. In diesem Fall wird, wenn möglich, sogar das ganze Teleskop aktiv oder passiv gekühlt. Durch die Entwicklung von hochempfindlichen, zweidimensionalen Halbleiterdetektoren, auf der Basis von HgCdTe, InSb oder extrinsisch dotiertem Silizium, verbunden mit rauscharmen kryogenen Ausleseelektroniken, spielt dagegen das früher einmal dominierende Detektorrauschen oft keine Rolle mehr, und die $10^{5..6.5}$ unabhängigen Detektorelemente

(Pixel) dieser Detektoren erlauben einen großen Multiplexvorteil für abbildende oder spektroskopische Messungen. Diese modernen Techniken, gekoppelt mit IR-optimierten Optiken, haben es in den letzten zehn Jahren ermöglicht, die Empfindlichkeit von Infrarotkameras und -spektrometern um mehrere Größenordnungen zu steigern. Die aus dem Weltall kommenden Wellenfronten werden durch die Refraktion der turbulenten Erdatmosphäre dynamisch verzerrt, wobei im Sichtbaren die räumliche und zeitliche Kohärenz nur etwa 15 cm bzw. 10 ms beträgt. Bei langbelichteten Aufnahmen wird daher die Bildschärfe vom atmosphärischen „Seeing“ limitiert, das im Sichtbaren selbst auf den besten Observatorien 0,5–1,0" beträgt, also etwa einen Faktor 40–80 mal größer als die beugungslimitierte Auflösung eines 8m-Teleskops. Die während der Beobachtung stattfindende Messung und Analyse der zweidimensionalen Verzerrung der Wellenfront durch einen Sensor und Rechner, gefolgt von der schnellen (10^2 – 10^3 Hz) Korrektur durch einen aktiven deformierbaren Spiegel im Strahlengang, nennt man adaptive Optik (AO). Hierzu benötigt man

einen hellen Stern (optische Magnitude 12–15) innerhalb des isoplanatischen Winkelabstands zum Messobjekt ($\sim 3''$ im Sichtbaren), der ausreichend viele Photonen zur Wellenfrontanalyse liefert. Da die räumliche Kohärenzskala proportional zu $\lambda^{6/5}$ skaliert sowie die zeitliche Kohärenz proportional zu λ ist, ist es an großen Teleskopen wesentlich einfacher, solche AO-Systeme im nahen Infraroten zu realisieren als im Sichtbaren. Hinzu kommt, dass der isoplanatische Winkel ebenfalls mit $\lambda^{6/5}$ skaliert. Leider ist selbst im nahen Infraroten die Wahrscheinlichkeit, einen geeigneten hellen Stern nahe einer vorgegebenen Quelle zu finden, oft nur ein Bruchteil eines Prozents. In diesem Falle muss man einen weiteren Schritt gehen und sich eines „künstlichen Lasersterns“ bedienen. Zu diesem Zweck projiziert man z. B. einen auf die 589 nm-Wellenlänge der D2-Linie von Natrium stabilisierten Laserstrahl von einem kleineren Projektionsteleskop nahe der Achse des Hauptteleskops und fokussiert diesen Laserstrahl in die obere Erdatmosphäre. Der durch resonante Rückstreuung von Natriumatomen in etwa 90 km Höhe entstehende

Fleck sieht entlang des Laserstrahls wie ein künstlicher Stern aus, der natürlich an beliebiger Stelle am Himmel erzeugt werden kann. Obwohl nicht perfekt, ist die Wellenfrontverzerrung des rückgestreuten Lasersterns in erster Näherung ein Maß der Verzerrung der Wellenfront des astronomischen Objekts. Seit den ersten AO-Experimenten vor mehr als zehn Jahren gibt es inzwischen eine Reihe von AO-Einrichtungen an großen bodengebundenen Teleskopen. Einige wenige, wie das von den Max-Planck-Instituten für Astronomie und extraterrestrische Physik gemeinsam für das 3,5m-Teleskop in Calar Alto (Südspanien) entwickelte ALFA-System, benutzen dabei inzwischen auch erfolgreich einen künstlichen Laserstern. Abbildung 1 zeigt das für das VLT entwickelte NAOS/CONICA-AO-System. Ende diesen Jahres soll NAOS/CONICA um die von MPE, MPIA und ESO gemeinsam entwickelte Laser Guide Star Facility erweitert werden. Bei den bisherigen Aufnahmen konnte routinemäßig und mit hoher Abbildungsgüte die beugungslimitierte Auflösung des 8m-Teleskops bei 1,6–2,2 μm erreicht werden (~ 40 – 55 Millibogensekunden).

verschmierung (das so genannte „Seeing“) auszuschalten. Durch die Techniken der „Speckle-Abbildung“ und der „adaptiven Optik“ kann man so Infrarotbilder erhalten, die nur noch durch die fundamentale Begrenzung der Lichtbeugung des Teleskops limitiert sind (siehe Infokasten). Mit großen Teleskopen wie dem Keck-Teleskop auf Hawaii sowie dem New Technology Telescope (NTT) und dem Very Large Telescope (VLT) der europäischen Südsternwarte ESO lässt sich damit die Bildschärfe im nahen Infraroten um mehr als eine Größenordnung verbessern (Abb. 1).

Aus dem Vergleich von solchen Infrarotaufnahmen über eine Reihe von Jahren gelang es uns 1996, die Geschwindigkeiten von Sternen am Himmel, die so genannten Eigenbewegungen zu bestimmen [3]. Weiterhin erlaubte es die Analyse von Linien in den stellaren Infrarotspektren, auch noch Doppler-Bewegungen (also Geschwindigkeiten entlang der Sichtlinie) abzuleiten. Aus einer statistischen Analyse der Geschwindigkeiten lässt sich dann das Gravitationsfeld bzw. die Massenverteilung quantitativ bestimmen. Das Ergebnis dieser Messungen zeigte deutlich, dass es eine kompakte zentrale Masse von etwa drei Millionen Sonnenmassen gibt, die in einem Gebiet von weniger als 15 Lichttagen um SgrA* konzentriert ist. Diese Masse ist „dunkel“, kann also nicht durch die Verteilung normaler Sterne erklärt werden [4]. Die wahrscheinlichste Konfiguration dieser Massenkonzentration ist die eines massereichen Schwarzen Lochs. Im Prinzip könnte diese zentrale Massenkonzentration im Milchstraßenzentrum (und in den oben angesprochenen externen Galaxien) aber auch ein dunkler, extrem kompakter Haufen von kleinsten (schwach strahlenden) Sternen, Neutronensternen oder substellaren Objekten (wie Felsbrocken etc.) sein oder aus hypothetischen schweren Elementarteilchen ohne Ladung bestehen.

Ein Stern in der Umlaufbahn um das Schwarze Loch

Um eine solche Konfiguration auszuschließen, war es nötig, noch wesentlich näher an das Massenzentrum heranzukommen. Dieser Durchbruch gelang im Frühjahr 2002 mit der neuen NAOS/CONICA-Kamera auf einem der 8m-Teleskope auf dem VLT der Europäischen Südsternwarte ESO (Abb. 1). Das Ergebnis waren die schärfsten und empfindlichsten Bilder, die je vom Zentrum unserer Milchstraße aufgenommen wurden (Abb. 2). Mit einer Auflösung von rund 60 Millibogensekunden ist diese Abbildung dreimal schärfer und zwanzigmal tiefer als noch vor wenigen Jahren möglich. Die neuen VLT-Infrarotbilder ermöglichten es auch, SgrA* mit einer Genauigkeit von zehn Millibogensekunden auf den Infrarotbildern zu lokalisieren. Dabei stellte sich bei den Messungen im Frühjahr 2002 heraus, dass sich der Stern S2 bis auf etwa 12 Millibogensekunden (etwa 17 Lichtstunden) der Radioquelle genähert hatte und sich mit bislang nicht beobachteter Geschwindigkeit von mehr als 5000 km/s bewegte – das sind 18 Millionen km pro Stunde oder die 200fache Geschwindigkeit der Erde um die Sonne. Damit eröffnete sich die Möglichkeit, die Massenverteilung auf Skalen unseres Sonnensystems zu messen. Eine genauere astrometrische Analyse der Position von S2 in den letzten zehn Jahren zeigte dann zweifelsfrei, dass sich dieser Stern auf einer hochelliptischen Kepler-Bahn um die Radioquelle bewegt (Abb. 3). S2 kreist also um das vermutete Schwarze Loch wie ein Planet

um die Sonne, und zwar mit einer Umlaufperiode von nur 15 Jahren. In der Zwischenzeit gelang es, fünf weitere solche Sterne auf elliptischen Umlaufbahnen mit Periabständen zwischen zehn Lichtstunden und einigen Lichttagen nachzuweisen [7].

Aus den neuen VLT-Messungen, die kürzlich durch eine unabhängige Serie von Beobachtungen mit dem Keck-Teleskop bestätigt und teilweise verbessert wurden [8], lässt sich dann mithilfe der Keplerschen Gesetze sehr einfach die Masse bestimmen, die sich innerhalb des Periradius von 17 Lichtstunden befindet (etwa 200-mal dem Schwarzschild-Radius eines Schwarzen Lochs mit drei Millionen Sonnenmassen): $3,3 \pm 0,7$ Millionen Sonnenmassen. Dies ist innerhalb der Fehler genau dieselbe Masse, die aus den oben diskutierten statistischen Methoden bei viel größeren Abständen von SgrA* abgeschätzt wurde. Das bedeutet, dass das Gravitationspotential mit hoher Präzision dem einer Punktmasse entspricht. Wenn man statt einer Punktmasse eine ausgedehnte Massenverteilung annimmt, muss der charakteristische Radius einer solchen Verteilung kleiner als zehn Lichtstunden sein und damit deren Dichte mindestens $2 \times 10^{17} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ (oder etwa $10^{-5} \text{ g cm}^{-3}$). Dies ist etwa elf Größenordnungen größer als die der dichtesten bekannten astrophysikalischen Sternhaufen, einschließlich des Sternhaufens im galaktischen Zentrum selbst.

Eine weitere Einengung der Eigenschaften der Zentralmasse ergibt sich aus der Tatsache, dass SgrA* sich selbst mit weniger als 20 km/s bewegt. Aus theoretischen Modellen der stochastischen Bewegung einer Punktmasse in einem Sternhaufen kann man dann abschätzen, dass die Masse der Radioquelle selbst mindestens $5 \times 10^4 M_{\odot}$ sein muss, die Dichte also mindestens $10^{20} M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$. Dies ist nur noch wenige Größenordnungen kleiner als die über den Schwarzschild-Radius gemittelte Dichte eines Schwarzen Lochs.

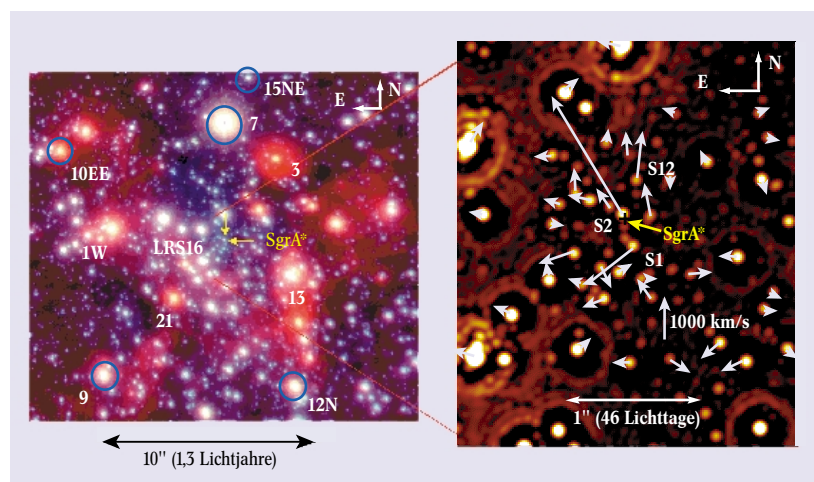


Abb. 2: Hochauflösendes Infrarotbild und stellare Eigenbewegungen im Zentrum unserer Milchstraße. Das linke Bild zeigt eine im August 2002 aufgenommene Dreifarbeninfrarotaufnahme (H-Band: 1,6 μm , K_s-Band: 2,1 μm und L'-Band: 3,8 μm Wellenlänge) der zentralen 20'' (etwa 2,6 Lichtjahre). Die verschiedenen Flecke sind Sterne im dichten zentralen Sternhaufen. Die zwei gelben Pfeile markieren die Position der kompakten Radioquelle SgrA*. Die Position der Radioquelle konnte mithilfe von Sternen, die sowohl im Infrarot-, wie im Radiobereich strah-

len (blaue Kreise) mit einer Genauigkeit von 10 Millibogensekunden im Infrarotbild lokalisiert werden. Das rechte Bild zeigt einen Ausschnitt des linken Bildes im H-Band (Auflösung 40 Millibogensekunden) in der unmittelbaren Umgebung von SgrA*. Die Eigenbewegungen von einigen Sternen sind als Pfeile dargestellt, darunter der schnellste Stern (S2), der im Frühjahr 2002 nur 12 Millibogensekunden von SgrA* entfernt war und sich mit einer Geschwindigkeit von über 5000 km/s bewegt. (aus [5, 6])

Wenn man also annimmt, dass das zentrale Objekt ein sehr kompakter Haufen von dunklen astrophysikalischen Objekten (Weiße Zwerge, Neutronensterne, stellare Schwarze Löcher etc.) ist, kann man aus der obigen Dichte direkt eine obere Grenze für die Lebensdauer angeben, nach der der Haufen einerseits teilweise kollabiert (z. B. zu einem Schwarzen Loch) und andererseits „verdampft“. Mit den obigen Zahlen würde diese Lebensdauer zwischen 10000 und 100000 Jahren betragen, also wesentlich geringer als das Alter aller in Abbildung 2 sichtbaren Sterne. Es ist also mit großer Sicherheit auszuschließen, dass man ein solch kurzlebiges Objekt beobachten könnte. Die Daten eliminieren

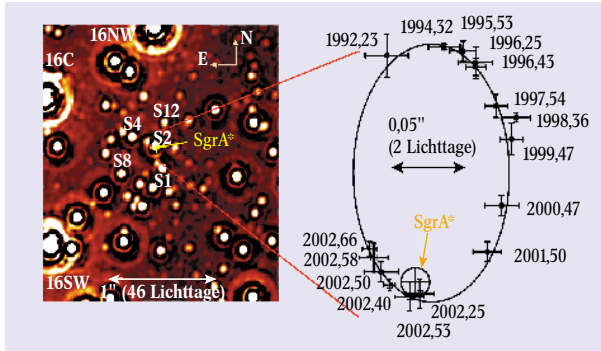


Abb. 3: Bahn des Sterns S2 (kleine Kreise und Rechtecke mit Fehlerbalken) um die Position der kompakten Radioquelle SgrA* (großer Kreis mit Kreuz). Die Daten werden perfekt durch eine hochelliptische Bahn mit Exzentrizität 0,87, Umlaufperiode 15,7 Jahre und Semi-Halbachse 0,12" beschrieben, in deren einer Fokus die Radioquelle sitzt [5].

ren auch ganz klar eine weitere Konfiguration, die in den letzten Jahren diskutiert wurde, nämlich die eines „Balls“ entarteter Fermionen ohne Ladung (z. B. eines sterilen Neutrinos), die in verschiedenen Modellen jenseits des heutigen Standardmodells der Teilchenphysik möglich sind. Ein solcher Ball wäre einfach zu groß und die damit verbundene Massendichte zu klein, um mit den Messungen von S2 vereinbar zu sein. Die einzige noch verbleibende Konfiguration, die kein Schwarzes Loch wäre, ist ein Ball von hypothetischen schweren, schwach wechselwirkenden Bosonen, da diese im Prinzip auf ein Volumen von wenig größer als dem eines Schwarzen Loches kondensieren könnten. In diesem Fall würde aber die unvermeidbare Akkretion von baryonischer Materie auf den Bosonenball dazu führen, dass dieser letztendlich zu einem Schwarzen Loch kollabiert, sodass auch eine solche Konfiguration nicht stabil ist. Die neuen Messungen lassen also als einzig mögliche Konfiguration nur die eines massereichen Schwarzen Lochs zu.

Diese Beobachtungen läuten eine neue Phase von Präzisionsmessungen ein, in der mit immer höherer räumlicher Auflösung die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Loches und die dort ablaufenden physikalischen Prozesse untersucht werden können. In den nächsten Jahren wird es mit interferometrischen Verfahren möglich werden, durch die Zusammenkoppelung der vier 8m-Spiegel des VLT Auflösungen von weniger als 10 Millibogensekunden zu erreichen und damit den relativistischen Bereich starker Gravitation um das Loch zu untersuchen. Es wird vielleicht auch mit interkontinentaler Sub-Millimeter-Interferometrie möglich werden, den Ereignishorizont als „Schattenwurf“ selbst zu detektieren. Das galaktische Zentrum bleibt also auf viele Jahre ein spannendes Labor der Gravitationsphysik.

Neben dem eindeutigen Nachweis der Existenz des zentralen Schwarzen Loches liefern die Messungen im galaktischen Zentrum auch interessante und teilweise sehr überraschende und bisher unverstandene Ergebnisse über die Eigenschaften und die Bildung der Sterne in der unmittelbaren Nachbarschaft des Lochs sowie die Materieakkretion auf das Loch [6]. So belegen die Daten zum Beispiel eindeutig, dass das Produkt von Strahlungs- und Akkretionseffizienz der Materieakkretion auf SgrA* um Größenordnungen geringer ist als bisher in theoretischen Modellen angenommen.

Relativistische Akkretionsscheiben

In einer Reihe von nahen aktiven Galaxienkernen haben Messungen mit den Röntgensatelliten ASCA und XMM/Newton gezeigt, dass die 6-keV-K-Schalen-Linienemission von Eisen extrem verbreitert ist [9]. Die Linienbreiten übersteigen 100000 km/s, also etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Die spektrale Form der Röntgenlinie lässt sich quantitativ durch ein Modell einer relativistisch rotierenden Scheibe in der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Loches verstehen. Dabei sind sowohl Effekte der speziellen Relativitätstheorie (wie der transversale Doppler-Effekt und das so genannte „Doppler boosting“) als auch Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie (wie der Gravitationsrotverschiebung) deutlich in den Daten zu erkennen [10]. Damit sind die Röntgenlinienspektren ein deutlicher, wenn auch vielleicht noch nicht eindeutiger Beweis für die Existenz rotierender Akkretionsscheiben von wenigen Schwarzschild-Radien Durchmesser um ein tiefes (relativistisches) Gravitationspotential, das dem von der allgemeinen Relativitätstheorie für ein Schwarzes Loch vorhergesagten voll entspricht.

Insgesamt darf man deshalb die astrophysikalische Evidenz für die Existenz von massiven Schwarzen Löchern in Galaxienkernen als überzeugend bewerten. Wie sind diese Löcher aber entstanden?

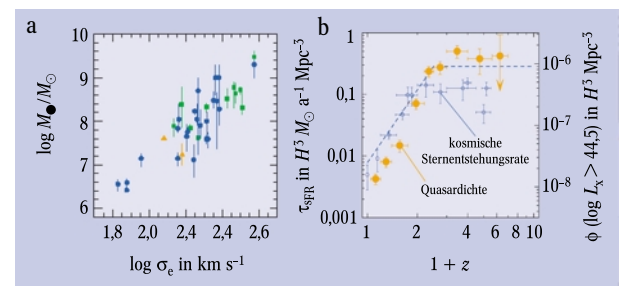


Abb. 4: ► a: Aus der Korrelation der aus verschiedenen Datensätzen abgeleiteten Masse des zentralen Schwarzen Lochs (vertikale Achse) mit der Geschwindigkeitsdispersion (oder Masse) der Muttergalaxie, in deren Kern das Schwarze Loch sitzt (horizontale Achse), lässt sich abschätzen, dass die Masse der zentralen Schwarzen Löcher etwa 0,15 % der Gesamtmasse der „bulge“ oder „elliptischen“ Komponente der Muttergalaxie ist [13]. ► b: Korrelation der aus den Daten des Röntgensatelliten ROSAT abgeleiteten Quasaraktivität (rote Punkte), sowie der aus optischen Beobachtungen mit dem Keck-Teleskop bestimmten kosmischen Sternentstehungsrate in Galaxien (blaue Punkte), in Abhängigkeit von der kosmologischen Rotverschiebung z [14–16].²⁾ Die Phase immenser Quasar- und Sternentstehungsaktivität etwa 1 bis 6 Milliarden Jahre nach dem Urknall kann man als die Zeit der Bildung von Galaxien und Schwarzen Löchern interpretieren.

2) Je größer z ist, um so entfernter und damit um so weiter in der Vergangenheit sind die Objekte. $z=0$ ($1+z=1$) entspricht der Gegenwart. Einer Rotverschiebung von 1 entspricht etwa die Hälfte des Weltalters, einer Rotverschiebung von 5 etwa 90 % des Weltalters.

Entstehung von schwarzen Löchern und Galaxien

In den letzten zehn Jahren haben optische, Infrarot-, Radio- und Röntgenbeobachtungen Beweise für eine immer größer werdende Anzahl von dunklen Zentralmassen in benachbarten Galaxien erbracht. Es ist eher die Norm als die Ausnahme, in relativ massereichen Galaxien ein massives Schwarzes Loch zu finden. Dabei liegt die Masse des Schwarzen Loches in unserer Milchstraße an der unteren Grenze der in anderen Galaxien gefundenen Zentralmassen. In einigen Galaxien erreicht das zentrale Schwarze Loch eine Masse von mehreren Milliarden Sonnenmassen. Interessanterweise zeigt sich, dass es eine Korrelation der Masse des Schwarzen Lochs mit der Leuchtkraft und Masse der umgebenden Galaxie gibt [11, 12] (Abb. 4a). Etwa 0,15 % der in der zentralen kugelförmigen Komponente („bulge“, „elliptical“) enthaltenen Masse der Galaxie liegt in Form eines Schwarzen Loches vor. Dies bedeutet, dass ein Schwarzes Loch „weiß“, in welcher Galaxie es „lebt“. Umgekehrt können die Sterne der Galaxie nicht „wissen“, wie groß das zentrale Schwarze Loch ist, da seine Gravitationskraft im typischen Abstand von tausend Lichtjahren vernachlässigbar ist. Die Lösung dieses Rätsels liegt wahrscheinlich in der Entstehungsgeschichte der Galaxien und der Schwarzen Löcher, die in der Frühzeit des Universums liegt.

In den letzten zehn Jahren ist es möglich geworden, sowohl die Entwicklung der Quasare (also der Schwarzen Löcher) als auch der Galaxien selbst bis vor etwa 12 Milliarden Jahre zurückzuverfolgen. Dabei ist klar geworden, dass Galaxien und Quasare zwischen eine und sechs Milliarden Jahre nach dem Urknall durch eine extrem aktive Phase gegangen sind (z. B. [14–16]). Die kosmische Sternentstehungsaktivität sowie die Quasaraktivität war damals 20- bis 40-mal höher als heute (Abb. 4b). Die überraschende Ähnlichkeit des Verlaufs der beiden Kurven in Abbildung 4 unterstützt die Interpretation, dass Schwarze Löcher und Galaxien etwa zur gleichen Zeit, und damit sehr früh in der Entwicklungsgeschichte des Universums, entstanden sind.

Die Entstehung von Galaxien wird im Wesentlichen durch das Wachsen und Verschmelzen von Dichtefluktuations der Materie im expandierenden Weltall bestimmt. Dabei kommt der dunklen Materie die dominierende Rolle zu. In Bereichen hoher Dichte dunkler Materie, die schon kurz nach dem Urknall entstanden waren, kam es zur lokalen Umkehr der Expansion und zur Bildung von dichten Gasklumpen.

Diese Klumpen kühlten ab und fielen einerseits durch den Einfluss der Gravitation in sich zusammen, zum anderen kam es in der Folge zu Verschmelzungsprozessen mit andern Klumpen in der Nachbarschaft. In diesem Prozess könnte es zur Bildung von zentralen Gaskonzentrationen gekommen sein, die dann zu massiven Schwarzen Löchern kollabierten. Je größer dabei die zentrale Masse war, umso größer auch die sich darum bildende „Urgalaxie“, wobei die dabei eine Rolle spielenden physikalischen Prozesse zur Zeit im Einzelnen noch nicht verstanden sind. Insbesondere ist die kürzliche Entdeckung sehr leuchtkräftiger, und damit recht massiver Quasare mit Rotverschiebung $z > 6$, die also bereits weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall entstanden sein müssen, überraschend und im gegenwärtigen „cold dark matter“-Standardmodell nicht leicht zu verstehen [17]. Auch in der späteren Entwicklung kam es weiterhin gelegentlich zum Zu-

sammenstoß und zum Verschmelzen von Galaxien. So könnten große elliptische Galaxien aus kleineren Spiralgalaxien entstanden sein. Im Prozess des Verschmelzens könnten sich auch sehr große Schwarze Löcher durch das Verschmelzen zweier kleinerer Löcher oder durch schnellen und starken Gaseinfall gebildet haben und dabei für einige zehn Millionen Jahre ein Quasar entstanden sein.

Unsere Milchstraße ist bisher von einem solchen kosmischen Verkehrsunfall verschont geblieben. Als Folge hat sie auch nur ein recht kleines zentrales Schwarzes Loch. Dieses könnte ursprünglich durch den Kernkollaps eines dichten zentralen Sternhaufens entstanden sein und dann in der Folge sehr langsam, aber stetig durch Einfall von lokalen Gaswolken und hin und wieder von Sternen auf seine heutige Größe gewachsen sein.

Literatur

- [1] M. Miyoshi et al., *Nature* **373**, 127 (1995)
- [2] J. H. Lacy, C. H. Townes, T. R. Geballe und D. J. Hollenbach, *Astrophys. J.* **241**, 132 (1980)
- [3] A. Eckart und R. Genzel, *Nature* **383**, 415 (1996)
- [4] R. Genzel, A. Eckart, T. Ott & F. Eisenhauer, *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* **291**, 21 (1997)
- [5] R. Schödel et al., *Nature* **419**, 694 (2002)
- [6] R. Genzel et al., *Astrophys. J.* (2003) eingereicht
- [7] R. Schödel, T. Ott, R. Genzel, A. Eckart und N. Mouawad, *Astrophys. J.* 2003, eingereicht
- [8] A. Ghez et al., *Astrophys. J.* **586**, L127 (2003)
- [9] Y. Tanaka et al., *Nature* **375**, 659 (1995)
- [10] A. C. Fabian, X-Rays and Accretion Discs as Probes of the Strong Gravity of Black Holes, in: J. C. Wheeler and H. Martel (Hrsg.), 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, AIP Conf. Proc. **586**, S. 643 (2001)
- [11] K. Gebhardt et al., *Astrophys. J.* **539**, L13 (2000)
- [12] L. Ferrarese und D. Merritt, *Astrophys. J.* **539**, L9 (2000)
- [13] J. Kormendy und K. Gebhardt, Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei, in: J. C. Wheeler and H. Martel (Hrsg.), 20th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, AIP Conf. Proc. **586**, S. 363 (2001)
- [14] P. Madau et al., *Monthly Notices of the Royal Astronom. Soc.* **283**, 1388 (1996)
- [15] G. Hasinger, *Astronom. Nachrichten* **319**, 37 (1998)
- [16] C. Steidel et al., *Astrophys. J.* **519**, 1 (1999)
- [17] X. Fan et al., *Astronom. J.* **122**, 2833 (2001)

Der Autor

Reinhard Genzel hat die moderne experimentelle Astrophysik entscheidend mitgeprägt. Er promovierte 1978 an der Universität Bonn und ging nach Forschungsaufenthalten in den USA 1986 als Direktor an das MPI für extraterrestrische Physik in Garching. Seit 1988 ist Genzel auch Honorarprofessor an der LMU München. Seine Ideen für neuartige Beobachtungstechniken gepaart mit seinem Gespür für das technisch Machbare sind Grundlage für eine Fülle realisierter Projekte, mit denen vormals schwer zugängliche Wellenlängenbereiche, vom Nahen Infrarot bis zum Sub-mm-Bereich, ins Blickfeld der Astronomen gelangt sind. Genzel ist vielfach ausgezeichnet worden, u. a. mit dem Newton-Lacey-Preis der American Astronomical Society, dem Leibniz-Preis der DFG (1989), und ist auswärtiges Mitglied der National Academy of Sciences (USA) und der Académie des Sciences (Frankreich). Außerdem ist er Mitglied in zahlreichen Aufsichts- und Programm-Gremien.

