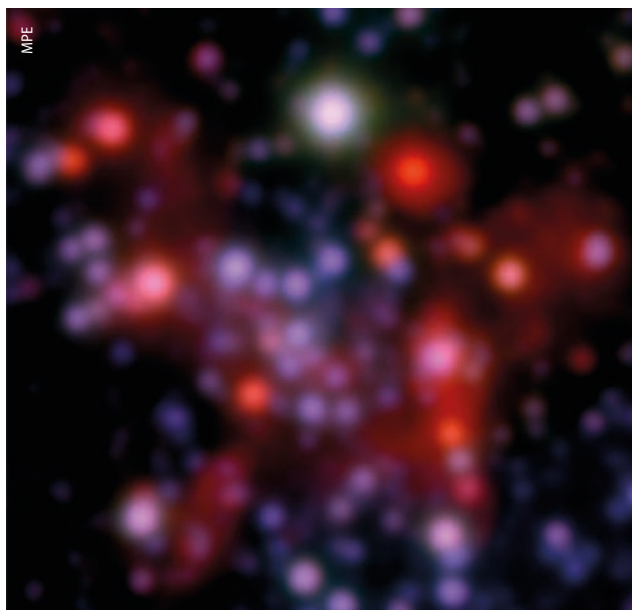




Die Nahinfrarot-Aufnahme des galaktischen Zentrums mit adaptiver Optik (rechts) besitzt 20-mal mehr räumliche Schärfe als die Aufnahme ohne adaptive Optik (links).

STERN-GERLACH-MEDAILLE

Höchste Auflösung

Moderne astronomische Instrumentierung erlaubt es, Einsteins Relativitätstheorie am Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße zu testen.

Stefan Gillessen und Frank Eisenhauer

Die Instrumente SINFONI und GRAVITY kommen am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte zum Einsatz und haben das Studium von Exoplaneten, supermassereichen Schwarzen Löchern und Galaxien mit hoher Sternentstehungsaktivität im frühen Universum revolutioniert. Beide Instrumente spielten eine wichtige Rolle bei der Entdeckung und Charakterisierung des Schwarzen Lochs im galaktischen Zentrum.

Die bedeutenden Himmelsforscher Galileo Galilei, Isaac Newton, Tycho Brahe, William Herschel und Albert Michelson haben die Geräte selbst gebaut, mit denen sie den Himmel beobachteten. Auch heute noch folgen Astronom:innen ihrem Beispiel: Unsere Gruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) unter Leitung von Reinhard Genzel lebt davon, neue Instrumente zu entwerfen, zu bauen, damit zu beobachten und so neue Fenster in den Kosmos zu öffnen. Die Vorteile des Eigenbaus von Instrumenten liegen auf der Hand: Wir können das Design eng an unseren wissenschaftlichen Zielen ausrichten und nutzen die neuen Apparate zuerst. Zwei davon, SINFONI und GRAVITY, möchten wir im Folgenden

vorstellen. Eine ihrer Anwendungen stellt die Beobachtung des galaktischen Zentrums und seines Schwarzen Lochs dar.

CCD- und Infrarot-Detektoren sind zweidimensionale Pixelarrays, auf die sich die zweidimensionale Himmelskugel mittels einer ins Unendliche fokussierten Kamera abbilden lässt. Der Einsatz von Filtern und mehrfache Aufnahmen erlauben es, Farbinformation zu gewinnen. Um das Licht in seine Spektralfarben zu zerlegen, benötigt man eine Dimension der Detektorfläche für die Wellenlängenachse. Damit verbleibt für die räumliche Auflösung nur eine Achse, sodass die spektroskopische Information nur entlang eines eindimensionalen Spaltes vorliegt. Ein astronomisches Instrument kann daher entweder „sehen“ – also gute räumliche Auflösung und moderate spektrale Information liefern – oder „hören“, d. h. eine gute spektrale Auflösung mit begrenzter räumlicher Information bieten.

Die Lösung, um beide Aspekte zu kombinieren, erinnert stark daran, wie ein Strickpullover auf die andere Seite einer verschlossenen Tür kommt: Man fädelt ihn auf, transportiert den Wollfaden durch das Schlüsselloch in den Nebenraum und schickt die Strickanleitung auf einem Blatt Papier unter der Türritze mit. Die Grundlage der „Integral Field

Spectroscopy“ (IFS) unterscheidet sich davon nur wenig: Man zerschneide das Bildfeld in einzelne Reihen und ordne diese optisch zu einem eindimensionalen Pseudoschlitz an. Dieser lässt sich auf herkömmliche Art spektroskopieren, sodass auf einen Schlag die Spektren aller Reihen vorliegen. Diese einzelnen Spektren gilt es anschließend wieder so zusammensetzen, dass ihre Anordnung dem zweidimensionalen Himmelsfeld entspricht – mit Computern keine Schwierigkeit. Das Ergebnis, ein dreidimensionaler Datenkubus, besitzt zwei räumliche Achsen und ein volles Spektrum in jedem Pixel (**Abb. 1**).

SINFONI: Spektrales Multitasking

Weil der Zerschneide-Trick nicht mehr Detektorpixel zur Verfügung stellt, bleiben die erreichbaren Bildfelder meistens eher klein: SINFONI besitzt 64×32 räumliche Pixel und 2048 spektrale. Dem idealen Abtastmuster entspricht eine räumliche Abbildungsfunktion mit einem Raster von zwei bis vier Pixeln, um die eingefangenen Photonen bestmöglich zu nutzen. Deshalb ergibt sich ein Bild, das etwa 20^2 bis 30^2 bzw. 400 bis 900 unabhängige Bildelemente besitzt. Trotz des begrenzten Gesichtsfeldes lassen sich Dutzende von Sternen parallel spektroskopieren: Dieses „Multiplexen“ ist einer der großen Vorteile der IFS. Darüber hinaus ist es nicht nötig, bereits vor der Aufnahme die Orientierung des Spalts festzulegen, weil die IFS de facto alle möglichen Spalte gleichzeitig legt. Entsprechend muss zum Beispiel von einer Galaxie die Orientierung der dynamischen Achsen nicht a priori bekannt sein, um entlang dieser die Doppler-Geschwindigkeiten der Sterne oder des Gases zu messen.

Unser Team am MPE hat die Integral Field Spectroscopy weltweit erstmals realisiert – zunächst mit „3D“, das in den 1990er-Jahren an einem der kleineren ESO-Teleskope zum Einsatz kam. 3D war ein Vorläufer für SINFONI, das wir 2004 am Very Large Telescope (VLT) installiert haben: SINFONI kombiniert IFS mit adaptiver Optik [1]. Diese trickreiche Technik gleicht die stets vorhandene, störende Luftunruhe aus („Seeing“). Dadurch werden die Bilder und Datenkuben beugungsbegrenzt. Das VLT erreicht so im nahen Infrarot bei einer Wellenlänge von $2\ \mu\text{m}$ eine Auflösung von 60 Millibogensekunden. Dazu gilt es, die Wellenfront des Lichts eines geeigneten Sterns in der Nähe zu analysieren, um einen optisch konjugierten, verformbaren Spiegel etwa hundert- bis tausendmal pro Sekunde so zu verbiegen, dass er den Effekt der Atmosphäre wieder rückgängig macht und die Wellenfront glättet. Sowohl der Wellenfrontsensor als auch der verformbare Spiegel liegen in einer Pupillenebene des optischen Systems. Einige Hundert Sensorelemente und entsprechend viele Aktuatoren sorgen für die korrekte Verformung, falls die Interaktionsmatrix zwischen Sensorsignalen und Aktuatorimpulsen bekannt und schnell genug anwendbar ist. Gestochen scharfe Bilder belohnen für die Mühe (**Abb.** auf S. 32). Ohne adaptive Optik begrenzt das Seeing die Auflösung typischerweise auf etwas weniger als eine Bogensekunde: ein rund 20-mal schlechterer Wert als ihn ein Acht-Meter-Teleskop theoretisch ermöglicht.

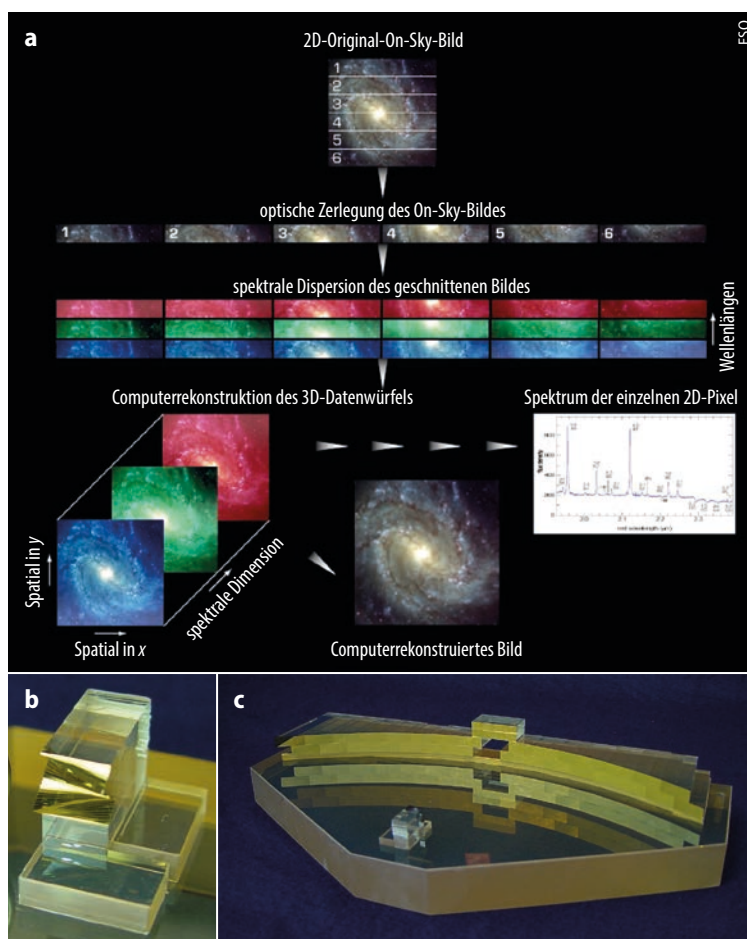


Abb. 1 Der Bildfeldteiler (a) zerlegt die Aufnahme des astronomischen Objekts optisch in einzelne Zeilen und arrangiert sie in einen Schlitz. Dieser wird spektral dispergiert und im Computer als Datenkubus rekonstruiert. Der Bildfeldteiler von SINFONI (b) zerlegt das quadratische Gesichtsfeld, indem er die verschiedenen Zeilen in verschiedene Richtungen reflektiert und mit einem Satz an Fangspiegeln zu einem einzigen Schlitz kombiniert (c).

Wir haben SINFONI vor allem für zwei Projekte eingesetzt: die Erforschung der Galaxiendynamik im frühen Universum und der Sterndynamik im galaktischen Zentrum. Der gasförmige Wasserstoff in einer Galaxie emittiert unter anderem die bekannte H α -Linie bei 656 nm. Bei fernen Galaxien verschiebt die kosmologische Rotverschiebung z das Signal zu längeren Wellenlängen: Bei $z = 2$, in einer Entfernung von rund 9 Milliarden Lichtjahren, findet sich die Linie im nahen Infrarot, dem astronomischen K-Band bei $2\ \mu\text{m}$. Solche Wellenlängen deckt SINFONI ab: Sie lassen sich gut mit adaptiver Optik korrigieren. Die Epoche vor 9 Milliarden Jahren heißt auch „cosmic noon“, weil zu dieser Zeit die meisten Galaxien entstanden. Die räumlich aufgelöste Spektroskopie mit SINFONI erlaubte uns, die zweidimensionalen Radialgeschwindigkeitsfelder der jungen Galaxien erstmals zu untersuchen. Zu unserem Erstaunen zeigten die meisten ein Feld, das auf eine sehr geordnete Rotation schließen lässt – ganz wie bei heutigen Spiralgalaxien [2]. Entgegen der vormals allgemein verbreiteten Annahme wachsen Galaxien also nicht hauptsächlich durch chaotische Kollisionen mit anderen Galaxien. Vielmehr füttert sie über lange Zeit ein geordneter Gaszufluss aus dem großräumigen, kosmischen Netz auf das Massezentrum.

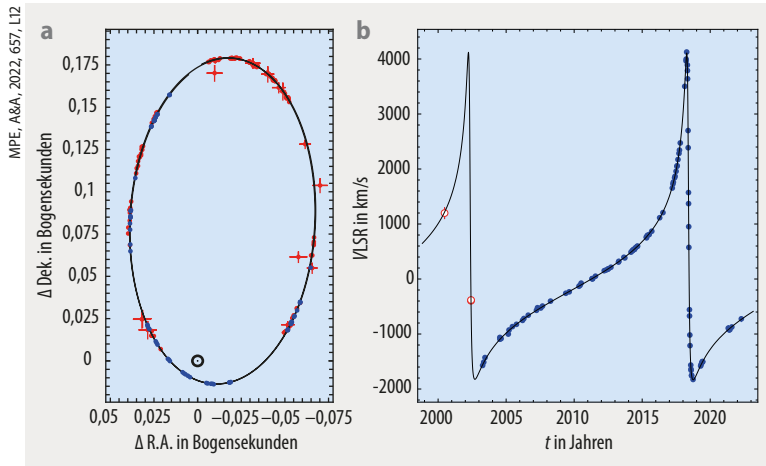


Abb. 2 Beugungsbegrenzte Einzelteleskope (a, rot) haben den Orbit des Sterns S2 von 1992 bis 2017 vermessen, GRAVITY (blau) hat von 2016 bis 2021 interferometrisch dazu beigetragen. Zwischen 2003 und 2019 lieferten Messungen mit SINFONI die Radialgeschwindigkeiten von S2 (b).

Ein anderer Grund macht das K-Band interessant, um das galaktische Zentrum zu beobachten. Bei optischen Wellenlängen verwehrt uns der interstellare, absorbierende Staub den Blick ins Zentrum der Milchstraße vollkommen. Aber der Schleier lichtet sich bei Wellenlängen jenseits von $1,5 \mu\text{m}$. Da sich im K-Band auch die thermische Emission von Sternen zeigt, unterscheiden sich die erhaltenen Bilder kaum von optischen. Wenige Jahre vor der Entwicklung von SINFONI zeigten unsere beugungsbegrenzten Bilder vom galaktischen Zentrum im K-Band, dass sich einzelne Sterne auf ihren Bahnen um das zentrale Schwarze Loch verfolgen lassen. Dieses System ist ähnlich hierarchisch strukturiert wie das Sonnensystem, wobei die Sterne die Testteilchen für das Potential einer rund 200 000-mal schwereren Masse als der Sonne darstellen. Während der Fertigstellung von SINFONI überschlugen sich die Ereignisse: Der Stern S2 flog 2002 durch das Perizentrum seines Orbits [5] und ermöglichte es, diesen mit einer Umlaufdauer von 16 Jahren zu messen und die Masse des Schwarzen Lochs zweifelsfrei

auf 4 Millionen Sonnenmassen zu bestimmen (**Abb. 2a**). Diese Messung liegt den Arbeiten zugrunde, für die unser Teamleiter Reinhard Genzel und die Leiterin eines kalifornischen Forscherteams Andrea Ghez den Physik-Nobelpreis 2020 erhalten haben.

Das Design von SINFONI haben wir unter anderem für die Beobachtung von Sternen in Umlaufbahnen um das Schwarze Loch mit Perioden von wenigen Dekaden optimiert. Die wählbaren spektralen Auflösungen passen zu den natürlichen Linienbreiten, welche die Wasserstoff-, Helium- und Kohlenmonoxid-Linien in den Spektren der Sterne besitzen. Eine der Gesichtsfeldgrößen deckt gerade den spannendsten Bereich der zentralen Bogensekunde um das Schwarze Loch ab und tastet dabei die scharfe Abbildungsfunktion der adaptiven Optik mit 4×4 Pixeln ab. In diesem Modus haben wir zwischen 2003 und 2019 die Radialgeschwindigkeiten von knapp 50 Sternen regelmäßig gemessen [4]. Besonders dramatisch und am besten dokumentiert ist die Radialgeschwindigkeit von S2: Der Stern durchlief 2018 zum zweiten Mal während unserer 30 Jahre dauernden Beobachtung das Perizentrum seiner Bahn. Dabei erreichte er eine Geschwindigkeit von knapp 8000 km/s, die sich innerhalb weniger Wochen stark veränderte. Die Messungen zeigen, dass der Stern eine Doppler-Rotverschiebung von +4000 km/s erreichte, bevor ihn nach wenigen Wochen die Schwerkraft des Schwarzen Lochs auf eine Blauverschiebung von -2000 km/s katapultierte (**Abb. 2b**). Das Zusammenspiel von Astrometrie (gemessen in Winkleinheiten) und Radialgeschwindigkeit (gemessen in absoluten Einheiten) erlaubt es beispielsweise, die Proportionalitätskonstante zwischen den beiden ohne weitere Annahmen zu bestimmen und damit den Abstand zum galaktischen Zentrum [5].

Die Maximalgeschwindigkeit von S2 beträgt 8000 km/s. Das entspricht 2,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, sodass sich der Stern leicht relativistisch bewegt. Damit erlaubt er es, die Gültigkeit der relativistischen Formeln im Schwerkraftfeld eines Schwarzen Lochs zu überprüfen. Der erste detektierbare Effekt ist spektroskopisch: Die Kombination von transversalem Doppler-Effekt und Gravitationsrotverschiebung sollte das Licht von S2 beim Perizentrumsdurchgang um etwa 200 km/s röter erscheinen lassen – eine Änderung, die SINFONI mit einem Messfehler in der Radialgeschwindigkeit von S2 von nur 10 km/s nicht herausfordert. Allerdings gilt es, neben dem eigentlichen Effekt 13 weitere Parameter zu bestimmen: die jeweils sechs Phasenraumkoordinaten des Sterns S2 und des Schwarzen Lochs sowie dessen Masse. Einige Parameter, wie Abstand und Masse des Schwarzen Lochs, sind astrophysikalisch interessant, andere weniger. Das verkompliziert die Messung, und man benötigt die astrometrische Bahn. Diese lässt sich mit GRAVITY zwanzigmal besser bestimmen als mit adaptiver Optik.

GRAVITY: Kombination für Präzision

Die Faustregel „größer ist besser“ gilt insbesondere für Teleskope: Das Lichtsammelvermögen wächst quadratisch mit dem Teleskopdurchmesser, die Auflösung – begrenzt durch die Beugung an der Eintrittspupille – immerhin

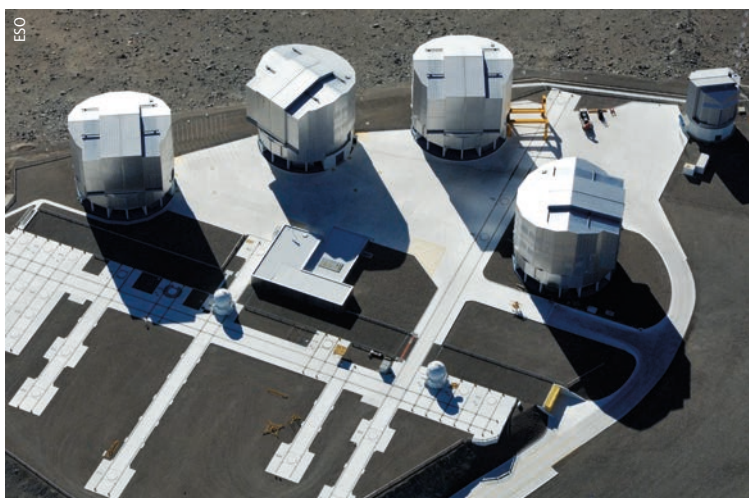


Abb. 3 Die vier großen 8-Meter-Teleskope der ESO befinden sich auf einer Plattform des Berges Paranal in Chile; der größte Abstand zwischen zwei Teleskopen beträgt 130 Meter. Im Tunnelsystem darunter wird das Licht verzögert, bevor die interferometrische Kombination erfolgt.

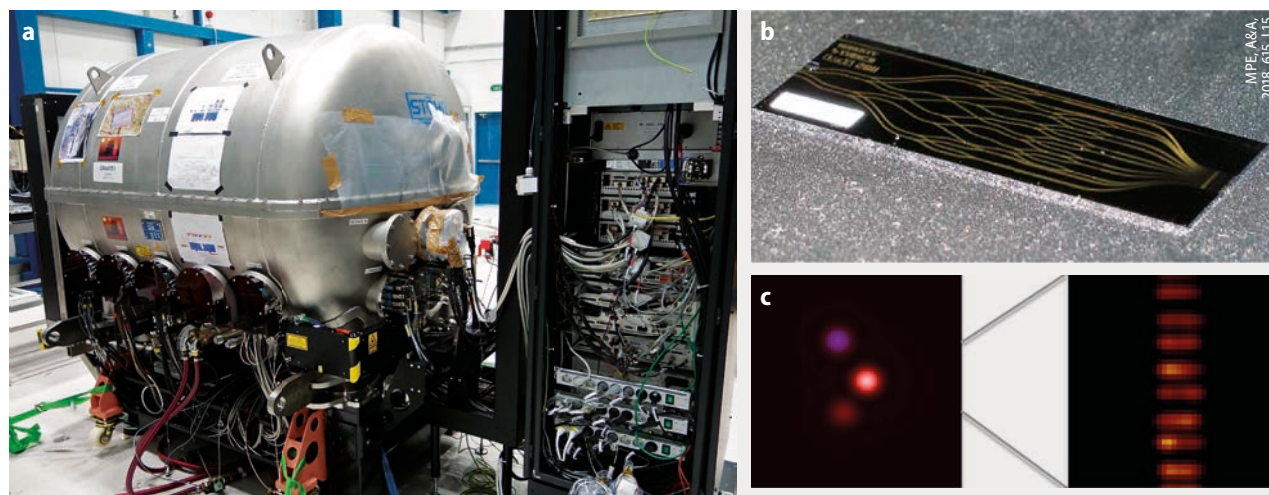


Abb. 4 Der Vakuumtank von GRAVITY (a) enthält die Optik. Die Strahlkombinierer (b) sind als integrierte Optik ausgeführt und kombinieren das Licht der vier Teleskope in 24 Spektren. Die Ausgangsspektren (c) kodieren die Helligkeitsverteilung am Himmel.

linear. Die Kosten steigen etwa mit der dritten Potenz des Durchmessers; große konventionelle Teleskope besitzen aus praktischen Gründen einen Durchmesser von acht bis zehn Metern. Vier davon stehen nebeneinander auf dem Berg Paranal in der nordchilenischen Atacama-Wüste: Seine abgetragene Kuppe bietet Platz für das Very Large Telescope (VLT), das Aushängeschild der europäischen Astronomie (**Abb. 3**). Aber wie viel besser wäre es doch, die gesamte Fläche der Plattform von über 130 Meter Durchmesser als Teleskop verwenden zu können? Dazu ein Gedankenspiel: Stellen Sie sich einen entsprechend großen Spiegel vor. Er hätte eine spektakuläre Auflösung, die rund 20-mal besser als die eines Einzelteleskops ist. Würde man nun an einer Stelle einen kleinen schwarzen Fleck von einem Quadratmeter auf den 130 Meter-Spiegel aufbringen, würde dies das sich ergebende Bild kaum stören – ebenso wenig ein zweiter schwarzer Fleck. Und so ließen sich immer weitere Teile des Spiegels schwarz färben, bis nur noch vier Löcher mit jeweils 8 Meter Durchmesser reflektieren. Wie sieht das sich ergebende Bild aus? Zum einen fiel es natürlich viel dunkler aus, und die Abbildungsfunktion wäre keine einfache Airy-Funktion mehr. Doch die Auflösung sollte weiterhin so gut sein, wie es dem Abstand der Teleskope

entspricht: 130 Meter. Daher lässt sich also ein supraauflösendes Teleskop synthetisieren, indem man die vier einzelnen Teleskope geeignet zusammenschaltet. „Geeignet“ bedeutet in dem Fall, das Licht kohärent zusammenzuführen, ein Einzelspiegel von 130 Metern Durchmesser würde ja nichts anderes machen. Dann interferiert das Licht eines jeden Sterns aus den vier Teleskopen mit sich selbst. Somit hat man ein Interferometer vor sich.

Damit es zur Interferenz kommt, muss das Licht aus den verschiedenen Teleskopen den Detektor gleichzeitig erreichen. Dazu befindet sich ein Tunnelsystem unter der Oberfläche des Paranal. Auf Verzögerungslinien gleichen Retroreflektoren, die sich auf sehr geraden Schienen bewegen lassen, den geometrischen Wegunterschied des Lichts aus. Für Belichtungszeiten von mehr als einigen Millisekunden Dauer ist es nötig, die Interferenz gegen die atmosphärische Turbulenz zu stabilisieren. Ähnlich wie bei der adaptiven Optik braucht es dazu einen hellen Stern, der es erlaubt, die Phasenlage ausreichend schnell zu bestimmen. Das macht Belichtungen bis zu einer Minute praktikabel. Erst dieses „Fringe Tracking“ hat es ermöglicht, Sterne jenseits der 19. Größenklasse (scheinbare Helligkeit: 19 mag) im galaktischen Zentrum für das Interferometer

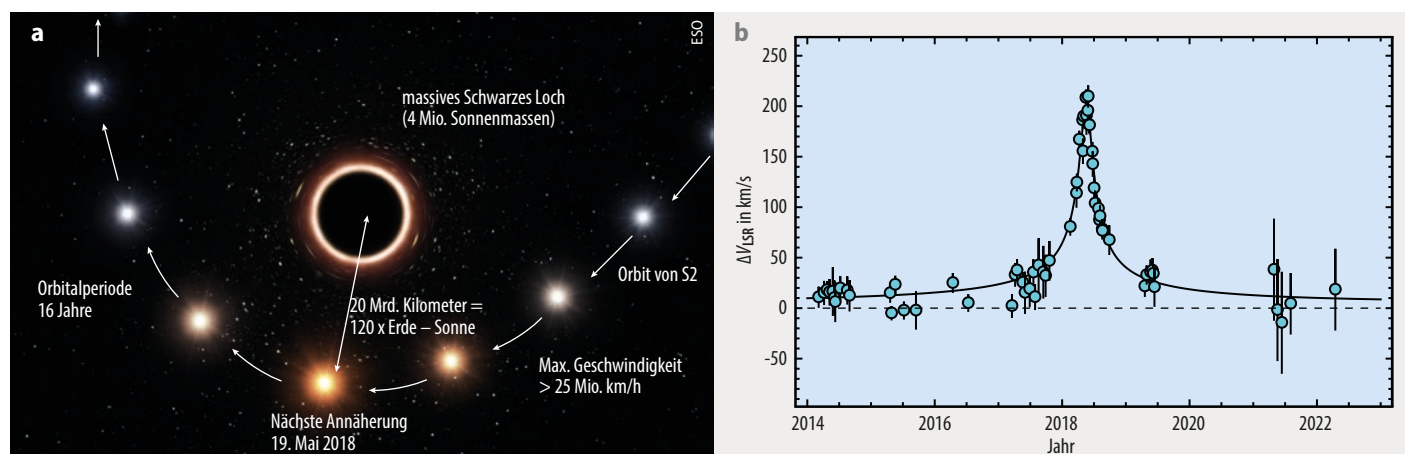
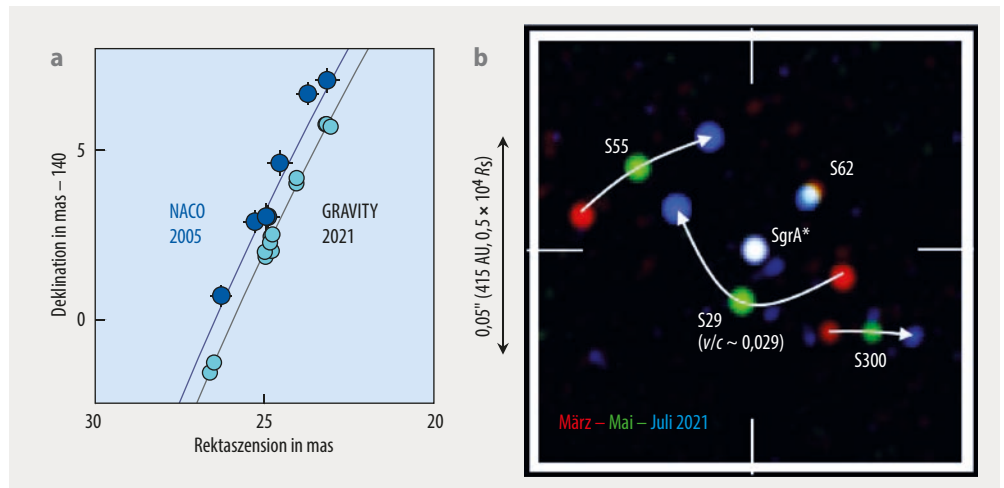


Abb. 5 Die Infografik (a) zeigt einen Ausschnitt des Orbits von S2 um das Perizentrum: Die Rotverschiebung ist am größten bei der nächsten Annäherung. Die Spektrallinien waren im Mai 2018 um bis zu 200 km/s mehr rotverschoben (b), als es allein der Orbit erfordert.

Abb. 6 Der Vergleich der Daten mit adaptiver Optik von 2005 mit den interferometrischen Daten von 2021 (a) zeigt, dass sich die Bahn von S2 beim Vorbeiflug im Perizentrum im Mai 2018 leicht gedreht hat – in bester Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Relativitätstheorie. Ein regelrechtes Sternballett ließ sich 2021 um das Schwarze Loch verfolgen (b).



sichtbar zu machen: Sie sind rund 10 000-mal dunkler als bis dahin interferometrisch beobachtete Objekte. Neben den Verzögerungslinien und dem Fringe Tracking benötigt jedes Teleskop eine adaptive Optik, weil nur so eine scharfe Abbildungsfunktion kohärentes Licht liefert.

In GRAVITY wird das Licht in Fasern gekoppelt [6]: Sie bieten eine elegante Möglichkeit, den kleinen Zeitverzug zwischen Fringe-Tracking-Stern und dem zu untersuchenden Objekt auszugleichen sowie die Polarisationsrichtungen zu adjustieren. Die Fasern leiten das Licht in einen mikrooptischen Chip, in dem optische Wellenleiter, 50:50-Splitter und Phasenverzögerungsstrecken das Licht der vier Teleskope paarweise interferieren (**Abb. 4**). Jede Interferenz wird an vier Phasenlagen gemessen: Um die interferometrische Information zu erhalten, gilt es, $6 \times 4 = 24$ Helligkeiten zu messen; die spektral aufgelösten 24 Ausgänge ergeben 24 Spektren. Für die nach interferometrischen Standards dunklen Sterne im galaktischen Zentrum kommen rund zehn spektrale Kanäle zum Einsatz. Damit ergeben sich rund 240 Messungen, die ausreichen, um mit etwa 60 komplexen Zahlen Kontrast und Phasenlage zu beschreiben. Mathematisch lässt sich zeigen, dass diese Zahlen der Fourier-Transformierten der zweidimensionalen Helligkeitsverteilung der Quelle am Himmel entsprechen, gemessen an 60 Stellen. Da die Erd-

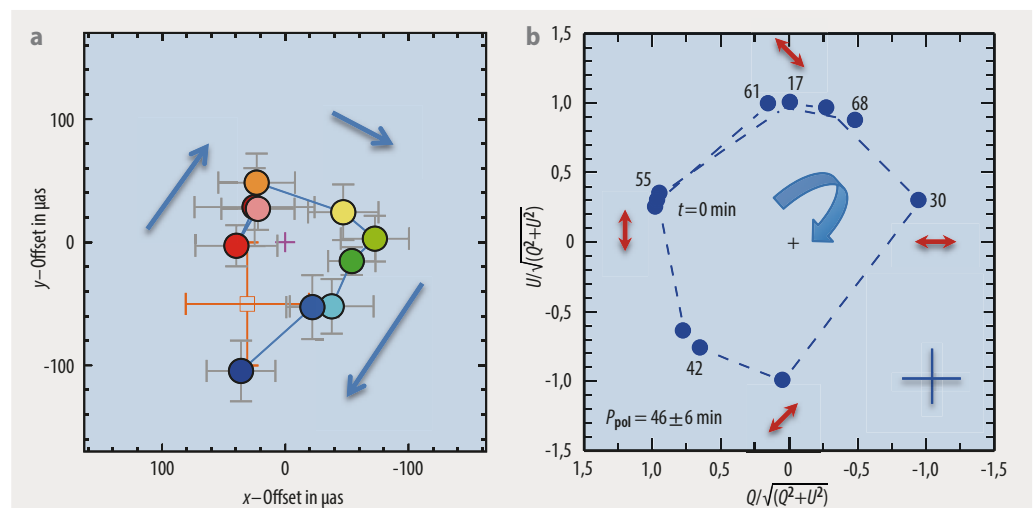
rotation die Geometrie laufend verändert, sammelt sich bei ausreichend langer Wartezeit genügend Information, um ein Bild zu rekonstruieren – mit der Auflösung eines 130-Meter-Teleskops.

Das reicht aus, um Autos auf dem Mond auszumachen. Noch faszinierender ist die erreichbare astrometrische Genauigkeit von wenigen zehn Mikrobogensekunden: Sie entspricht wenigen Zentimetern auf dem Mond. Würde auf dem Mond ein Fußballspiel stattfinden, ließe sich der Videobeweis, ob der Ball die Torlinie überquert hat, von der Erde aus führen. Um im Bild zu bleiben: Die Bahn des Sterns S2 am Himmel ist in etwa so groß, wie das hypothetische Stadion auf dem Mond von der Erde aus erscheinen würde.

Die Messgenauigkeit von GRAVITY ermöglichte 2018, bereits wenige Wochen nach dem Vorbeiflug von S2 am Perizentrum ein signifikantes Rotverschiebungssignal zu detektieren (**Abb. 5**) [7]. Das Licht verhielt sich genau so, wie es die Relativitätstheorie vorhersagt. Außerdem ließ sich die Rotverschiebung zweier verschiedener Spektrallinien vergleichen: Erwartungsgemäß zeigten sie das gleiche Verhalten [8]. Damit hatten wir erstmals das Äquivalenzprinzip im Schwerfeld eines Schwarzen Lochs getestet.

Einen weiteren beobachtbaren relativistischen Effekt bietet die Bewegung des Körpers selbst: die bekannte Periheldrehung eines Orbits in der Schwarzschild-Metrik.

Abb. 7 GRAVITY hat 2018 einen Strahlungsausbruch des Schwarzen Lochs beobachtet. Die astrometrischen Positionen schließen innerhalb einer Stunde eine Kreisbewegung (a). Gleichzeitig dreht sich die lineare Polarisation während des Strahlungsausbruchs (b).



Einstein selbst hatte den Effekt für den Planeten Merkur zu 43 Bogensekunden pro Jahrhundert berechnet und erklärte so die beobachtete Merkurbahn. Für S2 beträgt der Effekt rund zwölf Bogenminuten pro Umlauf von 16 Jahren. Am Himmel projiziert ergibt dies eine Abweichung von etwa 0,5 Millibogensekunden, entsprechend etwa 25 Zentimetern im Bild des Stadions auf dem Mond. Bei einer stark elliptischen Bahn wie der von S2 findet fast die gesamte Drehung im Perizentrum statt, und der Stern verlässt dieses auf einer leicht gedrehten Bahn. Ende 2019 hatte GRAVITY genug Daten der leicht gedrehten Bahn gesammelt. Diese zeigten deutlich, dass der Orbit von S2 präzidiert war [9] – Betrag und Richtung der Drehung stimmen mit der Relativitätstheorie überein. Unsere Daten von 2021 zeigen den Effekt auch im Vergleich mit den 16 Jahre alten Daten, die mit adaptiver Optik aufgenommen wurden (**Abb. 6a**) [10].

Die S2-Daten erlauben es, den Anteil der gemessenen rund 4 Millionen Sonnenmassen abzuschätzen, der sich im Schwarzen Loch befindet: Würde ein Teil der Masse die Bahn von S2 erreichen, läge eine andere Präzession vor. Infrage kommen dafür ein unsichtbarer Schwarm von Neutronensternen oder Dunkle Materie. Gemäß den GRAVITY-Daten befinden sich maximal 0,1 Prozent der Masse außerhalb der S2-Bahn: 99,9 Prozent liegen innerhalb von 120 astronomischen Einheiten vor, dem Perizentrumsabstand der S2-Bahn. Neben der Masse des Schwarzen Lochs wollen wir auch seine Rotation sehr genau vermessen. Auch dazu dienen die Sternorbits, weil ein rotierendes Schwarzes Loch die Raumzeit um sich herum etwas mitzieht, sodass die Orbits um die Drehachse des Schwarzen Lochs rotieren. Dieser Effekt ist jedoch deutlich kleiner als Rotverschiebung oder Perizentrumsdrehung. Deswegen suchen wir nach weiteren dunkleren Sternen, die mit noch kürzeren Perioden um das Schwarze Loch kreisen und die dessen Spin entsprechend stärker beeinflussen. Die Beobachtungen von 2021 (**Abb. 6b**) zeigen einen neuen Stern, der einen Helligkeitsrekord für Interferometer aufstellt [10, 11]: S300, einen Stern 19. Größenklasse. Mittlerweile läuft die Arbeit an einem Upgrade-Projekt: GRAVITY+ soll unter anderem die Sensitivität des Interferometers weiter steigern.

Die hohe Auflösung von GRAVITY erlaubt es, die Emission der Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch zu sehen. Deren schwaches Glimmen überstrahlen benachbarte Sterne in Daten mit adaptiver Optik. Das gibt GRAVITY einen weiteren, unschätzbaren Vorteil: Wir können Sternpositionen damit direkt zum Massenzentrum referenzieren, sodass vier der 13 oben erwähnten Parameter bei der Bahnbestimmung entfallen.

Doch die Akkretionsscheibe leuchtet nicht immer schwach. Etwa einmal pro Tag strahlt sie unvorhersagbar für rund eine Stunde deutlich heller. Dies hatte unser Team bereits 2003 entdeckt [12], aber das zugehörige Modell konnten erst GRAVITY-Daten von 2018 bestätigen: In einem kleinen, begrenzten Raumbereich heizen Elektronen auf und emittieren die detektierte Synchrotronstrahlung. Dem könnte ein Mechanismus ähnlich den Strahlungsausbrüchen auf der Sonnenoberfläche zugrunde liegen: magnetische Kurzschlüsse. Die GRAVITY-Daten zeigten

zweifelsfrei, dass während des Ausbruchs die Emission um das Schwarze Loch rotiert (**Abb. 7**), wobei Radius und Umlaufperiode genau zusammenpassen [13]. „Hotspots“ umlaufen direkt den Ereignishorizont und erlauben es, zum Beispiel die Rotationsachse des Systems zu bestimmen: Wir sehen ungefähr „von oben“ auf die Akkretionsscheibe – ein wahrer Glücksfall. Das inzwischen veröffentlichte EHT-Bild [14] bestätigt diese Geometrie.

In einer beobachtenden Wissenschaft wie der Astronomie lassen sich die untersuchten Systeme nicht manipulieren. Fast der gesamte, beeindruckende Fortschritt der letzten Jahrzehnte beruht aber darauf, dass Astronom:innen auch Experimentalphysik betreiben und immer neue Beobachtungsinstrumente gebaut haben. Wir hoffen, dass diese spannende Reise noch lange weitergeht.

Literatur

- [1] F. Eisenhauer et al., Proc. SPIE **4841**, 1548 (2003); H. Bonnet et al., Proc. SPIE **4839**, 329 (2003)
- [2] R. Genzel et al., Nature **442**, 786 (2006); N. Förster Schreiber et al., ApJS **238**, 21 (2018)
- [3] R. Schödel et al., Nature **419**, 694 (2002)
- [4] F. Eisenhauer et al., ApJ **628**, 246 (2005); S. Gillessen et al., ApJ **692**, 1075 (2009); S. Gillessen et al., ApJ **837**, 30 (2017)
- [5] F. Eisenhauer et al., ApJ **597**, L121 (2003); GRAVITY Coll., A&A **625**, L10 (2019); GRAVITY Coll., A&A **647**, A47 (2021)
- [6] GRAVITY Coll., A&A **602**, A94 (2017)
- [7] GRAVITY Coll., A&A **615**, L15 (2018)
- [8] GRAVITY Coll., Phys. Rev. Lett. **102**, 101102 (2019)
- [9] GRAVITY Coll., A&A **636**, L15 (2020)
- [10] GRAVITY Coll., A&A **657**, L12 (2022)
- [11] GRAVITY Coll., A&A **657**, A82 (2022)
- [12] R. Genzel et al., Nature **425**, 934 (2003)
- [13] GRAVITY Coll., A&A **618**, L10 (2018)
- [14] Vgl. A. Eichhorn, Physik Journal, Juli 2022, S. 18

Die Autoren



Stefan Gillessen hat 2004 an der Universität Heidelberg promoviert, mit einer Arbeit zur Ausrichtungskontrolle der Cherenkov-Teleskope des HESS-Experiments in Namibia. Anschließend trat er der Gruppe von Reinhard Genzel am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) bei. Seitdem forscht er an den Sternbewegungen im galaktischen Zentrum und ist Teil des Teams, das neue Instrumente für den Einsatz an ESO-Teleskopen entwickelt.



Frank Eisenhauer wurde 1998 an der LMU München promoviert und beschäftigte sich schon damals mit der Entwicklung neuartiger astronomischer Instrumente: einer Nahinfrarotkamera für adaptive Optik zur Beobachtung der Sternentstehungsregion NGC 3603. Am MPE leitet er die Entwicklung und wissenschaftliche Ausarbeitung großer astronomischer Instrumente und Experimente wie SINFONI und GRAVITY. Für seine bahnbrechenden Arbeiten zur Entwicklung und Nutzung von Instrumenten in der Infrarotastronomie

und zur adaptiven Optik wurde Eisenhauer 2022 mit der Stern-Gerlach-Medaille ausgezeichnet.

Dr. Stefan Gillessen, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Gießenbachstr. 1, 85748 Garching und **Dr. Frank Eisenhauer**, MPE, Gießenbachstr. 1, 85748 Garching und TU München