



Mit der adaptiven Optik NIRC2 am Keck-Teleskop gelingt der Blick ins Herz unseres Milchstraßensystems: Die Aufnahme bei der infraroten Wellenlänge 2,12 Mikrometer vom Mai 2010 zeigt die beiden Sterne S0-2 und S0-102 in unmittelbarer Nähe von Sagittarius A\*, dem Ort des extrem massereichen Schwarzen Lochs. S0-102 ist um einen Faktor 16 lichtschwächer als S0-2.

## Wettrennen rund um Sgr A\*: Pole Position für S0-102

Über viele Jahre hinweg gewonnene Nahinfrarotaufnahmen zeigen, dass sich eine Reihe von Sternen auf Umlaufbahnen um das Schwarze Loch im Zentrum unserer Galaxis befinden. Der neue Rekordhalter S0-102 benötigt für einen Umlauf nur 11,5 Jahre. Seine Nähe zum Schwarzen Loch erlaubt eine genauere Charakterisierung dessen Gravitationspotenzials und Tests zur Genauigkeit der Relativitätstheorie.

Heutzutage betrachten es die Astronomen als erwiesen, dass sich im Zentrum unserer Milchstraße ein extrem massereiches Schwarzes Loch mit der millionenfachen Masse unserer Sonne befindet. Noch bis zur Jahrtausendwende gehörte diese Möglichkeit ins Reich der Spekulation. Seit den 1990er Jahren richten Astronomen die besten Teleskope dieser Welt, darunter die beiden Keck-Teleskope auf Hawaii und auch das Very Large Telescope (VLT) der europäischen Südsternwarte auf dem Paranal, in Richtung galaktisches Zentrum. Dort befindet sich eine Radioquelle, die unter dem Namen Sagittarius A\*, kurz Sgr A\*, bekannt ist, und mit dem Ort des Schwarzen Lochs übereinstimmt.

Innovative Beobachtungsmethoden ermöglichten es den Astronomen dabei erstmals, in quasi beugungsbegrenzten Aufnahmen im Infrarotbereich einzelne Sterne aufzulösen. Zunächst verwendeten sie dabei das so genannte Speckle-Imaging, bei dem Aufnahmen in rascher Folge typischerweise im Bereich von 0,1 Sekunde erstellt werden. Dies erlaubt schließlich den Effekt der Atmosphäre durch Vergleich der jeweiligen Einzelbilder zu bestimmen und herauszurechnen. Heutzutage erreicht man beugungsbegrenzte Aufnahmen hauptsächlich durch Systeme mit adaptiver Optik. Mit Hilfe verformbarer Spiegel und so genannter Leitsterne lassen sich dabei die durch Atmosphärenunruhe verschobenen Wellenfronten korri-

gieren. Im Idealfall trifft das Licht schließlich wieder als parallele Wellenfront auf den Detektor und der Einfluß der Atmosphäre ist somit eliminiert.

Im Laufe der Zeit wurde bei den Nahinfrarotbeobachtungen des galaktischen Zentrums bei einer Reihe von Sternen, den so genannten S-Sternen, Positionsänderungen festgestellt, die man als Bahnbewegung um Sgr A\* herum interpretierte. Dies ließ zwar Rückschlüsse auf die Präsenz eines im Zentrum bei diesem Wellenlängenbereich unsichtbaren Objekts mit einer Masse von mehreren Millionen Sonnen zu, jedoch zunächst nicht auf dessen Größe. Im Jahr 2002 gab ein Forscherteam um Rainer Schödel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Phy-

sik in Garching bekannt, dass mit Hilfe des VLTI bei einem dieser Sterne, S0-2, eine gravierende Richtungsänderung beobachtet worden war. Diese interpretierten die Forscher als Durchlauf des Sterns durch die Periapsis, der größtmöglichen Annäherung zweier Objekte in einem elliptischen Orbit. Sie erfolgte in einem Abstand von lediglich 17 Lichtstunden (122 Astronomische Einheiten) zu Sgr A\*. Diese Beobachtung belegte, dass die zentrale Massenansammlung sehr kompakt sein muss und als einzig plausible Erklärung die Präsenz eines Schwarzen Lochs am Ort von Sgr A\* übrig blieb.

### S0-102: neuer Rekordhalter

Mit den 15 Jahren, die er für eine Reise um Sgr A\* herum benötigt, galt S0-2 lange Zeit als derjenige mit der kürzesten Umlaufdauer. Des Weiteren war er der einzige dieser Sterne mit einer solch großen Bahnabdeckung durch Beobachtungen: mehr als 40 Prozent seines Orbits sind durch Messungen belegt. Nun gab ein Forscherteam um Andrea Ghez von der Universität von Kalifornien in Los Angeles (UCLA) die Entdeckung eines Sterns bekannt, der S0-2 als Rekordhalter ablöst: S0-102. Er umrundet das zentrale Schwarze Loch in lediglich 11,5 Jahren, und ist damit noch einmal rund 30 Prozent schneller als S0-2.

S0-102 ist mittlerweile der zweite Stern, der seit Beginn der Beobachtungen einen kompletten Orbit durchlaufen hat und öffnet damit die Tür für eine Reihe von Tests der einsteinschen Relativitätstheorie. So ließ sich zum Beispiel die durch große Massen hervorgerufene Krümmung der Raumzeit bisher lediglich innerhalb unseres Sonnensystems überprüfen. Die hier vorhandenen Gravitationsfelder sind jedoch nur relativ schwach, und relativistische Effekte treten somit nicht sehr deutlich hervor. Dahingegen bewegen sich die Sterne S0-2 und S0-102 in einem Schwerfeld, das im Vergleich zu dem unserer Sonne um das rund Hundertfache stärker ist. Einsteins Theorie prognostiziert eine durch die Krümmung der Raumzeit hervorgerufene Deformation der Umlaufbahn von einem geschlossenen Keplerorbit hin zu einer offenen Rosettenbahn – das heißt einer Präzession der Apsidenlinie, die Periapsis und Apoapsis (den fernsten Punkt vom Zentralkörper) verbindet. Die Umlaufbahn wird jedoch nicht nur durch das Gravitationspotenzial des Schwarzen Lochs allei-

## ZUM NACHDENKEN

### Periheldrehung von S0-102



Um das galaktische Zentrum rast in geringem Abstand eine Anzahl von Sternen. S0-102 ist nach derzeitigem Kenntnisstand der schnellste von ihnen. Seine Umlaufdauer um das zentrale Schwarze Loch beträgt lediglich  $P_{102} = 11,5$  a, seine große Bahnhalbachse ist  $a_{102} = 815$  AE.

**Aufgabe 1:** Man berechne die Masse  $M_{SL}$  des Schwarzen Lochs im Zentrum mit Hilfe des dritten keplerschen Gesetzes  $P^2 = 4 \pi^2 a^3 / (G M_{SL})$  in Sonnenmassen.  $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}$  kg,  $G = 6,6743 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> s<sup>-2</sup>, 1 AE = 1,496 · 10<sup>8</sup> km.

**Aufgabe 2:** Wie groß ist der Schwarzschildradius  $R_{SS} = 2 G M_{SL} / c^2$  des Schwarzen Lochs?  $c = 2,998 \cdot 10^8$  m/s. Man gebe das Ergebnis in AE an.

**Aufgabe 3:** Die Astrophysiker betrachten das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxis als Testgelände der allgemeinen Relativitätstheorie. Bislang sind alle Test auf Skalen des Sonnensystems erfolgreich ausgefallen. Allerdings ist

das Gravitationspotenzial  $\epsilon_{\odot} = G M_{\odot} / (R_{\odot} c^2)$  der Sonne nicht allzugroß. Man vergleiche es mit demjenigen des Schwarzen Lochs:  $\epsilon_{SL} = G M_{SL} / (q_{102} c^2)$ . Der Sonnenradius ist  $R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8$  m, die geringste Entfernung zum Schwarzen Loch ist  $q_{102} = a_{102} (1 - e_{102})$  und die Bahnexzentrizität ist  $e_{102} = 0,68$ .

**Aufgabe 4:** Die enge Umlaufbahn und die große Masse des Schwarzen Lochs zwingen die Apsidenlinie des Sternorbits zu einer raschen Rotation. Pro Umlauf dreht sie sich um den Winkel:

$$\delta\varphi_{102} \approx \frac{180}{\pi} \frac{6 \pi}{c^2} \frac{G M_{SL}}{a_{102} (1 - e_{102}^2)}$$

Um wieviele Bogensekunden rotiert die Apsidenlinie pro Jahr? AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **11. Januar 2013** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Haus der Astronomie, MPIA-Campus, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528377. Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern Preise verlost: siehe S. 119

ne bestimmt, sondern auch durch die Präsenz jeglicher, einschließlich nicht-strahlender Materie in dessen Umgebung. Daher reicht die Beobachtung der Bahnbewegung eines einzelnen Sterns nicht aus, um die relativistischen Effekte genau zu charakterisieren. Dies wird erst mit der gemeinsamen Beobachtung von S0-2 und S0-102 möglich sein.

Des Weiteren sagt die Relativitätstheorie vorher, dass im Zusammenhang mit großen Massen Licht eine so genannte Gravitationsrotverschiebung erfährt. Dabei verliert das Licht, das von einem der Sterne emittiert wird, durch die Überwindung des Schwerfelds des Schwarzen Lochs Energie und Beobachtern auf der Erde erscheint es zu längeren Wellenlängen hin verschoben. S0-2 wird seine Periapsis das nächste Mal im Jahr 2018 durchlaufen. Drei Jahre später wird S0-102 seine nächste größte Annäherung an das Schwarze Loch erreichen. Die spektrale Auflösung heutiger Nahinfrarotspektrometer ist

noch nicht ausreichend, um die vorhergesagte Rotverschiebung in den Sternspektren messen zu können. Doch die nächste Generation von Beobachtungsinstrumenten, die bis dahin an den Großteleskopen installiert sein sollten, werden wahrscheinlich dazu in der Lage sein. Das Ende dieses Jahrzehnts wird für die Forschung in und um Sagittarius A\* herum wohl eine äußerst interessante Epoche.

MARKUS SCHMALZL promovierte am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Zur Zeit ist er Postdoc bei »Allegro« (ALMA Local Expertise Group), einem Teil des europäischen ALMA Regional Centres.

#### Literaturhinweis

Meyer, I, Ghez, A. et al.: The shortest-known-period star orbiting our galaxy's supermassive black hole. In: Science 338, S. 84 – 87, 2012