

Mein Nachbar, das Schwarze Loch

WIS wissenschaft
in die schulen!

Schon seit Längerem werden schlafende Schwarze Löcher innerhalb unserer Galaxis gesucht. Sie sammeln keine Materie auf und verhalten sich daher sehr unauffällig. Nun ist es einer Forschungsgruppe gelungen, ein derartiges Schwarzes Loch zu entdecken, das sogar das uns nächstgelegene seiner Art ist.

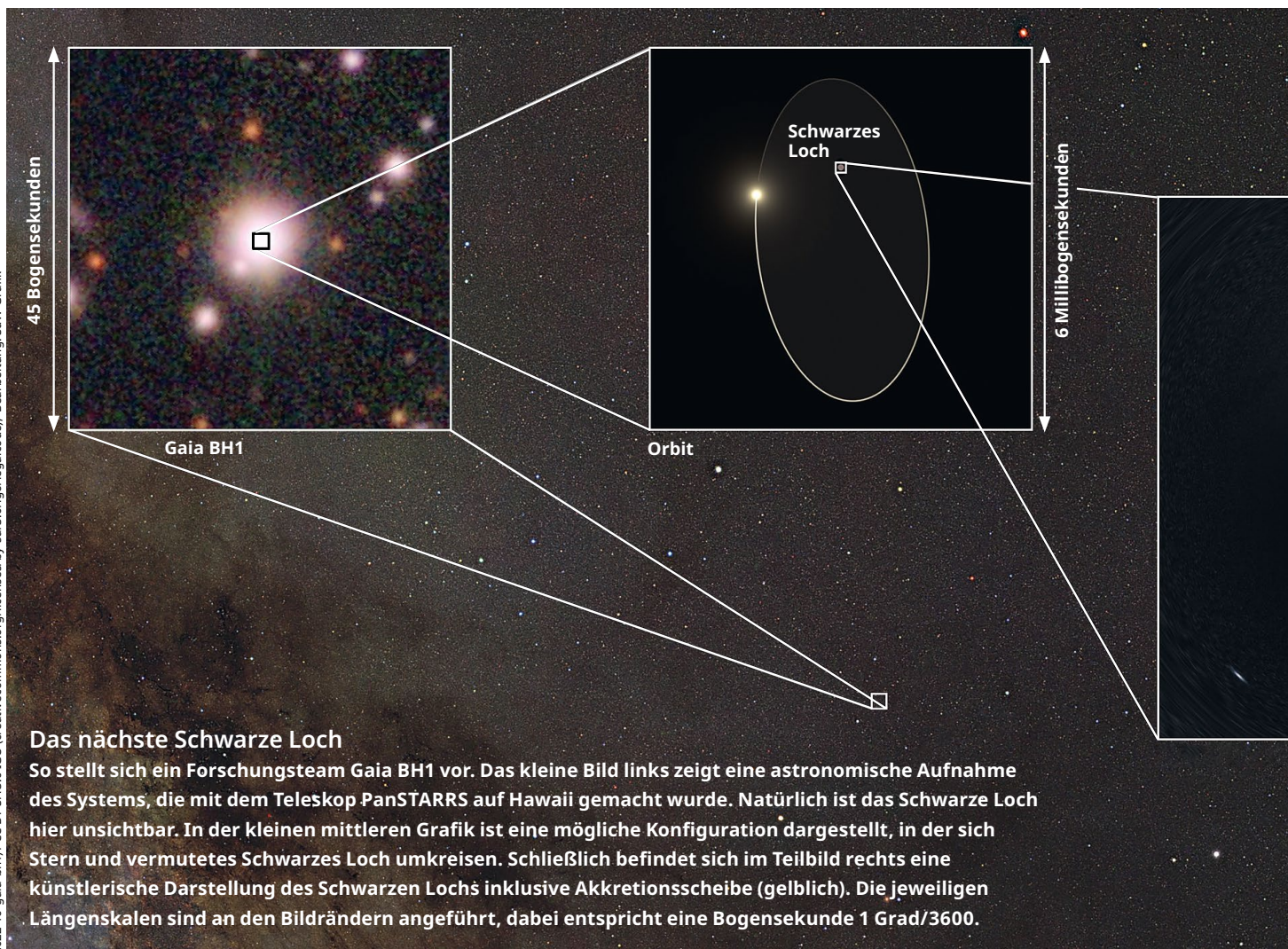
Während der letzten Monate hat sich Kareem El-Badry vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und dem Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA, besonders als Experte im Entlarven vermeintlicher Schwarzer Löcher hervorgetan. Viele der von verschiedenen Teams gefundenen Kandidaten stellten sich nach El-Badrys kritischem Prüfen als schnöde Sterne heraus

(siehe »Schwarze Löcher abschießen«). Im Juli 2022 identifizierte eine Forschungsgruppe, der El-Badry angehörte, das erste schlummernde Schwarze Loch außerhalb unserer Galaxis (siehe SuW 11/2022, S. 15). Nur wenige Monate später fand sie das erste inaktive Schwarze Loch innerhalb des Milchstraßensystems. Es ist etwa 1560 Lichtjahre von der Erde entfernt und damit der uns nächstgelegene Kandidat

für ein Schwarzes Loch überhaupt. Seine Entdeckungsgeschichte soll hier vorgestellt werden.

Die Nadel im Heuhaufen

Auf der Grundlage von Sternentwicklungsmodellen haben Forschende eine ungefähre Vorstellung davon, welche Objekte, und wie viele von ihnen, in unserer Galaxis herumschwirren. Sie gehen



von einigen 100 Millionen galaktischen Schwarzen Löchern mit wenigen Sonnenmassen aus. Schwarze Löcher, die so massereich sind, werden auch stellare Schwarze Löcher genannt. Hiervon sollen sich einige Tausend in Röntgendoppelsternen (englisch: X-ray binaries) befinden. Sie senden Röntgenstrahlen aus, wenn ein Schwarzes Loch von einem Begleitstern Materie erhält, die dann auf spiralförmigen Bahnen in das Schwarze Loch fällt. Dieser Prozess nennt sich Akkretion (siehe S. 29). Dabei wird die Gravitationsenergie der Materie schlussendlich in Form von Strahlungsenergie frei. Die extreme Aufheizung in der Akkretionsscheibe produziert Wärmestrahlung, die besonders hell im Röntgenbereich ist.

Mittlerweile werden in unserer Heimatgalaxie ungefähr 75 Röntgendoppelsterne vermutet, von denen etwa 20 als gesichert gelten (siehe »Röntgendoppelsterne in unserer Galaxis«). Der Anteil dieser Röntgendoppelsterne macht nur einen winzigen Bruchteil der gesamten Population der kleinen Schwarzen Löcher in un-

serer Galaxie aus – etwa ein Promille. Der Großteil der Schwarzen Löcher im Milchstraßensystem muss sich offenbar ruhig verhalten und damit keine Materie akkretieren. Aber wie findet man ein verstecktes dunkles Objekt im dunklen Weltall?

Diese Frage stellen sich übrigens gleichermaßen Astronominnen und Astronomen, die nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems suchen, denn Planeten selbst produzieren kaum Licht, eher Infrarotstrahlung. Somit können sich die Jäger nach Schwarzen Löchern auch der Methoden bedienen, um Exoplaneten zu entdecken – besonders der Astrometrie und der Spektroskopie. Das funktioniert jedoch nur für Schwarze Löcher in Doppelsystemen, also jenen, die einen Begleitstern haben. Welcher Bruchteil der stellaren Schwarzen Löcher sich in solchen Systemen befindet, ist nicht ganz klar, aber El-Badry geht davon aus, dass von drei bis zehn Millionen Sternen einer als Begleiter ein Schwarzes Loch hat. Zum Vergleich: Im Milchstraßensystem befinden sich einige 100 Milliarden Sterne.

Eine neue Methode

Sehr massereiche Schwarze Löcher, zum Beispiel Sagittarius A* mit etwa vier Millionen Sonnenmassen im Zentrum unserer Galaxis, können inzwischen sogar direkt abgebildet werden. Der Schatten von Sagittarius A* wurde erst vor wenigen Monaten vom Event Horizon Telescope (EHT) als Radiobild aufgenommen (siehe SuW 7/2022, S. 26). Einige der kleineren Schwarzen Löcher im Milchstraßensystem stehen uns zwar räumlich viel näher, aber ihr Schatten ist geradezu winzig und übersteigt deshalb selbst die Leistungsfähigkeit des EHT. Andere Methoden müssen her, um kleine Schwarze Löcher nachzuweisen.

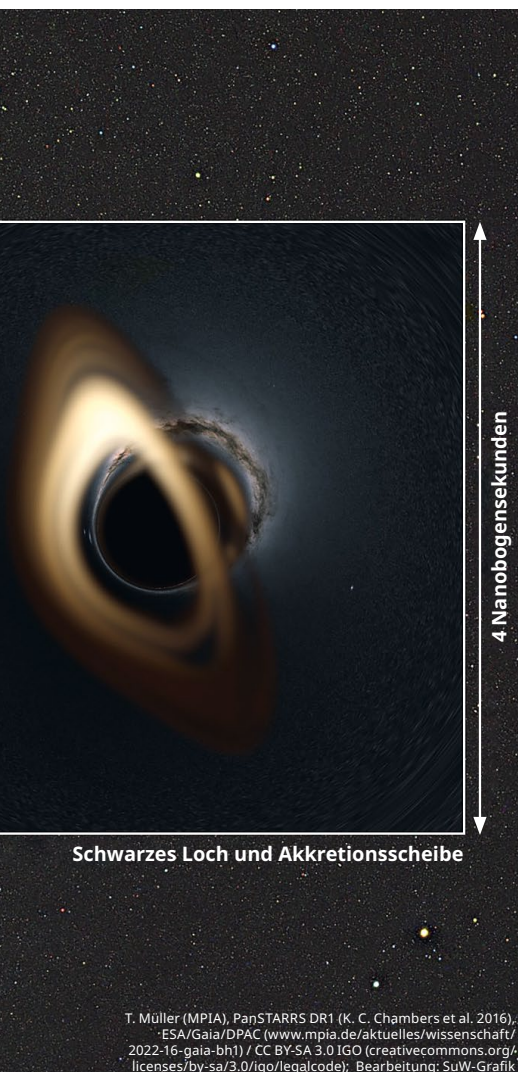
Der neue Kandidat für ein Schwarzes Loch wurde aufgespürt, indem sich unser Forschungsteam genau angesehen hat, wie sich ein Stern am Himmel bewegt (siehe »Das nächste Schwarze Loch«). Die clevere Grundidee: Ist der Stern nicht allein, sondern umkreist einen Partner in einem Doppelsternsystem, dann bewegen sich beide um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Handelt es sich bei ihnen um helle Sterne, bewegt sich ihr gemeinsames Helligkeitszentrum in ähnlicher Weise wie das Massezentrum. Ist aber eines der Objekte dunkel und weist eine sternähnliche Masse auf, beispielsweise ein stellares Schwarzes Loch, so bewegt sich das Hel-

Schwarze Löcher abschießen

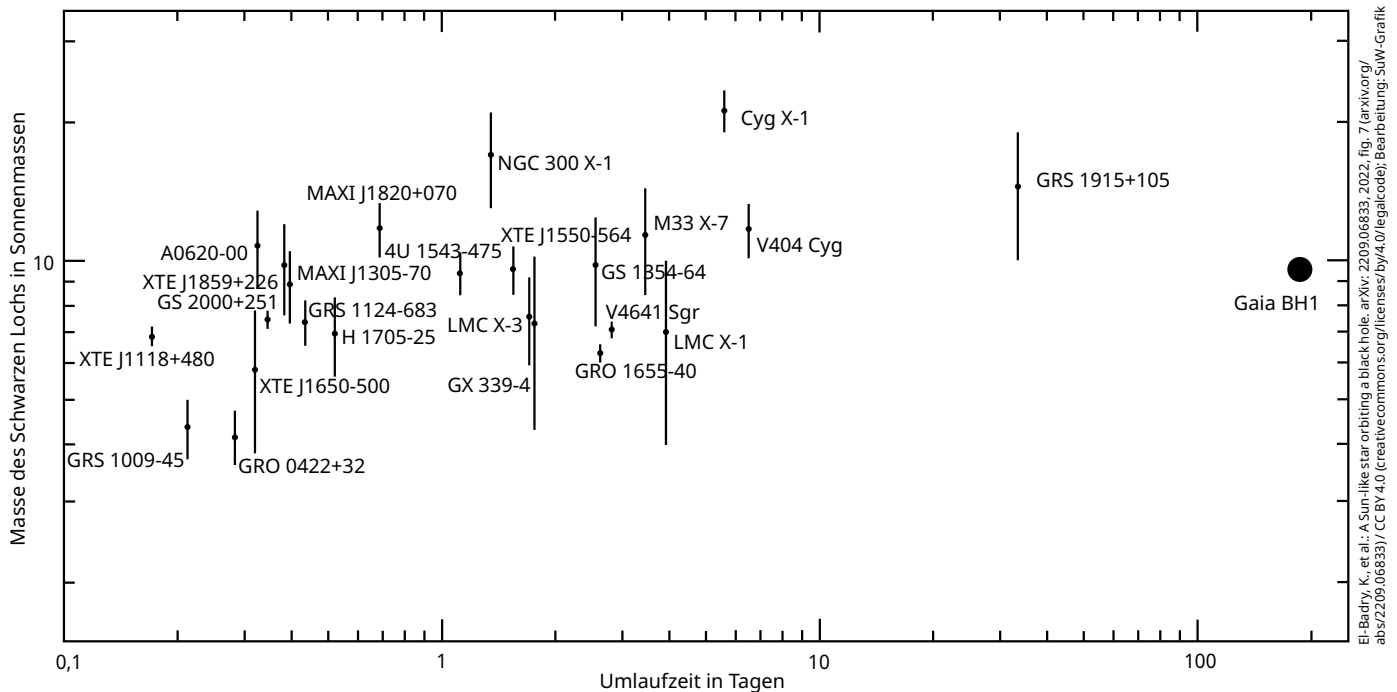
Eigentlich waren Kareem El-Badry und sein Team eher dafür bekannt, die Träume anderer Astronominnen und Astronomen zu zerschlagen, indem sie die vorgeschlagenen Kandidaten, die sich als Schwarze Löcher ausgegeben hatten, einen nach dem anderen als Sterne entlarvten. Doch wie funktioniert das genau?

Schwarze Löcher haben, verglichen mit Sternen, zwei ausschlaggebende Charakteristika: sie sind dunkel und massereich. Ist eines dieser Kriterien nicht erfüllt, so handelt es sich nicht um ein Schwarzes Loch. Natürlich gibt es auch massereiche Sterne, zum Beispiel solche des Spektraltyps O oder B, aber sie sind dann auch sehr leuchtkräftig und würden in vielen Situationen einen weniger massereichen Begleiter einfach überstrahlen. Weiterhin existieren besonders leuchtschwache Sterne, zum Beispiel Zwergsterne, die schlichtweg auf Grund ihrer geringen Größe nicht besonders hell sind. Die maximal mögliche Masse der Zwerge ist stark begrenzt. So können Weiße Zwerge die Masse unserer Sonne nur geringfügig überschreiten (Chandrasekhar-Grenze). Normalerweise gilt: Je massereicher ein normaler Stern ist, desto heller wird er auch. Kann man also beweisen, dass ein Kandidat für ein Schwarzes Loch entweder zu hell oder zu leicht ist, ist ein Stern die wahrscheinlichere Erklärung.

ligkeitszentrum mit dem primären, hellen Stern, und beschreibt so vergleichsweise große Bahnellipsen am Himmel. Diese Ellipsen werden jedoch nicht als geschlossene Kurven beobachtet, sondern man sieht nur einzelne Messpunkte auf der vermuteten Ellipsenform zu bestimmten Zeiten. Die Fachleute müssen durch Berechnungen auf die Bahnellipse schließen. Dabei hilft ihnen der Astrometriesatellit Gaia. Das Ergebnis wird astrometrischer Orbit genannt. Es gibt hier allerdings ein Problem: Der Raum ist dreidimensional; von der Erde aus sehen wir jedoch mit der Astrometrie nur eine Veränderung der Position, wenn sich diese tangential zur Sichtlinie abspielt – eine Bewegung auf uns zu oder von uns weg ist durch Astrometrie allein nicht feststellbar (siehe »Ballett im All«, S. 37).



T. Müller (MPIA), PanSTARRS DR1 (K. C. Chambers et al. 2016).
 *ESA/Gaia/DPAC (www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2022-16-gaia-bh1) / CC BY-SA 3.0 IGO (creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/legalcode); Bearbeitung: SuW-Grafik



El-Badry, K. et al.: A Sun-like star orbiting a black hole, arXiv: 2209.06833, 2022, fig. 7 (arxiv.org/abs/2209.06833) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode), Bearbeitung: SuW-Grafik

Röntgendoppelsterne in unserer Galaxis

Im Diagramm versammeln sich alle bekannten Röntgendoppelsterne mit Schwarzen Loch unseres Milchstraßensystems, sortiert nach ihrer Masse und der Umlaufzeit der beiden Komponenten umeinander. Die nun entdeckte Quelle Gaia BH1 tanzt aus der Reihe und befindet sich auf Grund ihrer langen Umlaufzeit ganz rechts. Die Umlaufbahn dieses Systems ist weit und zeichnet am Himmel eine verhältnismäßig große Ellipse. Gerade das macht Gaia BH1 besonders interessant, denn es ist zu weit von seinem stellaren Begleiter entfernt, als dass es viel Masse akkretieren könnte. Es konnte nur über seine Gravitationswirkung gefunden werden. Vermutlich kommen schlafende Schwarze Löcher wie Gaia BH1 sehr viel häufiger vor als ihre auffälligen Geschwister in Röntgendoppelsternen. Dennoch wurden bisher sehr viel mehr der letztgenannten Spezies gefunden, aus dem einfachen Grund, weil die Jagd nach Röntgensternen um einiges einfacher ist.

Unser Team machte sich im Datensatz des europäischen Astrometriesatelliten Gaia (siehe »Suche mit Gaia« und SuW 8/2022, S. 22) auf die Suche nach auffallend großen astrometrischen Orbits, und wurde fündig: Insgesamt sechs Objekte hatten verdächtige Orbits, fünf von ihnen konnte das Team jedoch soweit ausschließen. Einige, weil ihre von Gaia gemessenen Radialgeschwindigkeiten gar nicht zu den aus den Orbits errechneten Geschwindigkeiten passen. Andere, weil ihre Orbits so groß sind, und sich die Sterne so langsam bewegen, dass ihre Perioden länger als die Beobachtungszeit von Gaia sind. Das heißt, Gaia konnte bisher nicht einmal einen ganzen Orbit beobachten, was natürlich die Qualität des errechneten Orbits stark herabsetzt. Mit unvollständigen Daten ist nicht gut Kirschen essen. Doch ein guter Kandidat blieb übrig und wurde »Gaia BH1« getauft.

Die Jagd nach Spektren

Um sich ein genaueres Bild vom Orbit machen zu können, benötigten wir spektroskopische Daten. Aus ihnen kann eine Vielzahl

von Eigenschaften des Systems errechnet werden, wie zum Beispiel der Spektraltyp, die Effektivtemperatur und die chemische Zusammensetzung des Primärsterns. Es stellte sich heraus, dass sich Gaia BH1 um einen G-Stern mit etwa einer Sonnenmasse bewegt, der unserer Sonne verblüffend ähnelt. Unglücklicherweise wurden zwei Archivspektren des Systems gerade zu dem Zeitpunkt aufgenommen, als die beiden Komponenten ihre größte räumliche Distanz (Apastron) einnahmen. Mit diesen Spektren lässt sich der astrometrische Orbit der Gaia-Daten nicht widerlegen, und auch ein potenziell stillstehender Einzelstern lässt sich nicht ausschließen. Dies liegt mitunter daran, dass am Apastron die Geschwindigkeiten der beiden Körper am kleinsten sind (2. keplersches Gesetz). Messen wir zweimal (fast) die gleiche Geschwindigkeit, und ist ihr Zahlenwert vergleichsweise klein, dann ist es schwer zu sagen, ob sich der Stern jetzt wirklich in einem Orbit um ein anderes Objekt befindet oder ob es sich um einen Einzelgänger handelt.

Erschwerend kam hinzu, dass auch ein großer Teil der astrometrischen Daten

nahe am Apastron aufgenommen worden waren. Der Orbit konnte also nur mit relativ großer Unsicherheit bestimmt werden. Um das zu illustrieren, kann man sich vorstellen, einen Formel-1-Wagen bei einem Rennen immer nur kurz zu beobachten. Nehmen wir Folgendes an: Immer, wenn man die Augen aufmacht, passiert der Wagen die Ziellinie. Dann ist es für den Betrachtenden schwer zu entscheiden, ob der Wagen eine, zwei oder sogar drei Runden gedreht, sogar, ob er sich überhaupt bewegt hat, während man die Augen geschlossen hatte. Übertragen auf unser astronomisches Problem heißt das: Um klare Aussagen zu bekommen, musste nochmals spektroskopiert werden.

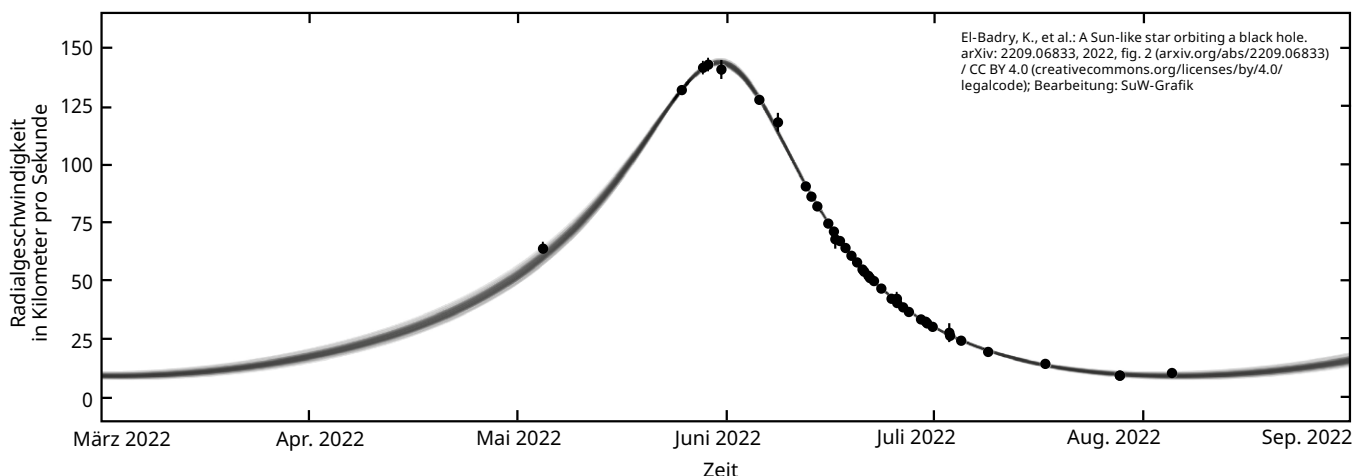
Nach einem Schneesturm, vielen E-Mails und weiteren Beobachtungen mit fünf verschiedenen Instrumenten hatte unser Team endlich genügend Messdaten beisammen, um ziemlich sichere Aussagen über die Bewegung des Sterns treffen zu können. Allein aus diesen Daten geht hervor, dass der Begleiter des Primärsterns eine Masse von mindestens fünf Sonnenmassen haben muss. Ein Stern mit

Ballett im All

Wir sprechen in der Astronomie oft von Radial- und Tangentialbewegungen, die uns verraten, wie sich Himmelsobjekte im dreidimensionalen Raum bewegen. Dabei meint die Radialgeschwindigkeit eines Objekts diejenige Geschwindigkeitskomponente, die entlang der Sichtlinie zum Objekt entweder zur Erde oder von ihr wegzeigt. Die Tangentialgeschwindigkeit hingegen ist die Komponente der Geschwindigkeit senkrecht zur Sichtlinie, also die Veränderung der Position am Nachthimmel in 2-D. Wir verwenden diese vielleicht etwas seltsame Aufteilung, weil Radial- und Tangentialgeschwindigkeiten auf unterschied-

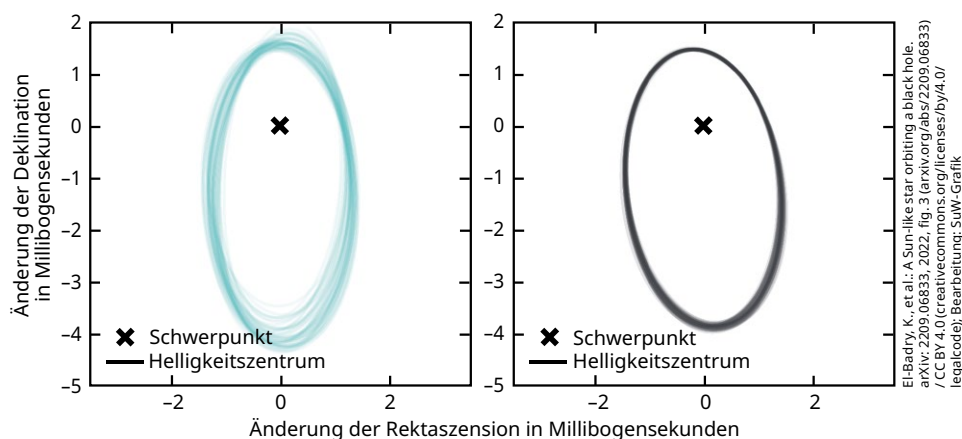
liche Art und Weise gemessen werden. Radialgeschwindigkeiten erhalten wir meist unter Zuhilfenahme der Spektroskopie, wohingegen Tangentialgeschwindigkeiten aus astrometrischen Daten berechnet werden. Es kommt vor, dass von einem Objekt beispielsweise die Radialgeschwindigkeit bekannt ist, nicht aber die Tangentialgeschwindigkeit.

Die Grafiken »Gemessene Radialgeschwindigkeiten« und »Bahn um das Schwarze Loch« zeigen, wie astrometrische Orbits mit Hilfe von Tangentialbewegungen berechnet und dann durch die Radialgeschwindigkeiten überprüft werden können.



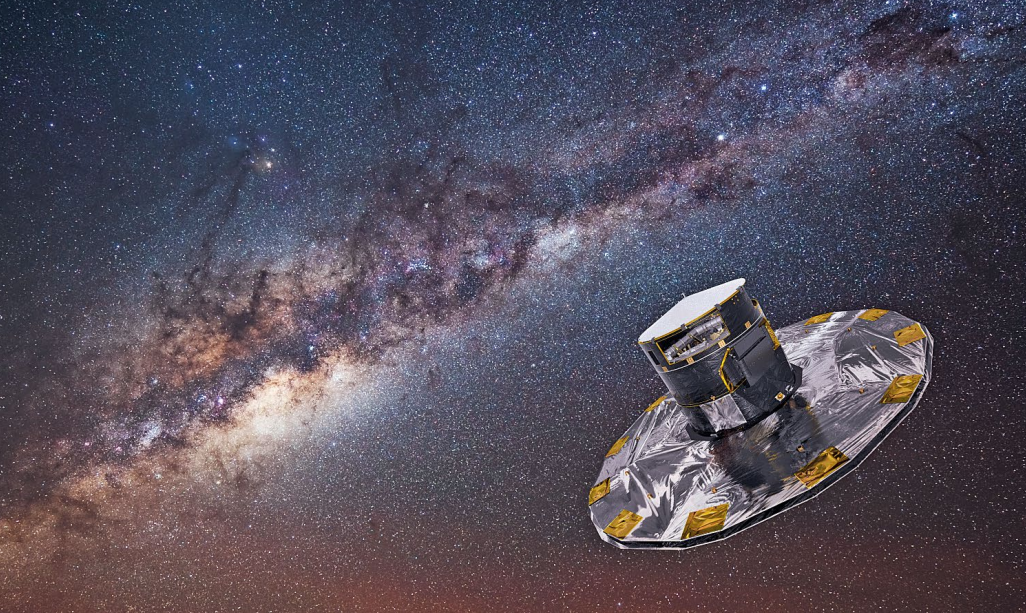
Gemessene Radialgeschwindigkeiten

Im Sommer 2022 wurden für Gaia BH1 die Geschwindigkeiten in Blickrichtung gemessen. Diese Radialgeschwindigkeiten – hier in der Senkrechten aufgetragen – variieren für das System zwischen etwa 10 und 130 Kilometer pro Sekunde. Die hier dargestellte schwarze Linie ergibt sich unter anderem aus den keplerschen Gesetzen und reproduziert die gemessenen Radialgeschwindigkeiten des Sterns im System von Gaia BH1. Die große Zahl an Messpunkten sowie ihre starke Schwankung ist entscheidend, um Vertrauen in die gefundene Lösung zu haben.



Bahn um das Schwarze Loch

Mit Hilfe der Astrometrie allein ergibt sich eine relativ unsichere Bahnellipse (links): Eine Vielzahl an möglichen Orbits kann die beobachtete Bewegung des Systems erklären. Nimmt man nun die Spektroskopie zur Hilfe und berücksichtigt die daraus bestimmten Radialgeschwindigkeiten (Kurve oben) bei der Berechnung des Orbits, können viele der astrometrisch möglichen Umlaufbahnen ausgeschlossen werden. Es ergibt sich eine sehr viel präziser bekannte Bahnellipse (rechts).



ESA/ATG medialab; background: ESO/S. Brunier / (www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/05/Gaia_mapping_the_stars_of_the_Milky_Way)

Suche mit Gaia

Der ESA-Astrometriesatellit Gaia – hier als Computergrafik vor einem Ausschnitt der Milchstraße montiert – kartiert seit dem Jahr 2014 unsere Galaxis mit extrem hoher Präzision. Bis zum Ende der Mission sollen die Positionen und Bewegungen von fast zwei Milliarden Sternen, Planeten, Asteroiden und anderen Objekten gemessen und katalogisiert werden. Gaia kam nun zum Einsatz, um verräterische Spuren von Schwarzen Löchern zu finden.

einer solchen Masse müsste sehr viel heller als der Primärstern und somit sichtbar sein. Das ist jedoch nicht der Fall. Glaubt man an die astrometrischen Informationen, müsste der Begleiter eine Masse von etwa zehn Sonnenmassen haben – also noch mehr als von den Radialgeschwindigkeiten allein suggeriert wird.

Es kann sich also bei dem Begleiter nur um ein oder mehrere dunkle Objekte handeln. Laut unserer Analyse kommt dafür ein Schwarzes Loch in Frage oder eine Kombination aus mehreren Schwarzen Löchern und/oder Neutronensternen. Vielleicht sind es auch zehn Weiße Zwerge oder sogar rund 200 Braune Zwerge? Die letztgenannten Optionen sind allerdings höchst unwahrscheinlich, da kaum zu erklären ist, wie sie entstanden sein könnten und sie auch dynamisch instabil wären. Es handelt sich also wahrscheinlich um ein bis zwei dunkle Objekte, von denen zumindest eines ein Schwarzes Loch sein muss.

Eine schwierige Kindheit

Aber wie entsteht nun so ein Doppelsystem aus einem Schwarzen Loch und einem stellaren Begleiter? Wir schlagen dafür diese Szenarien vor:

■ Bei Option 1 besteht das System anfänglich aus zwei Sternen, von denen einer, der Vorläufer des Schwarzen Lochs, etwa 40 Sonnenmassen haben müsste, um letzten Endes zu einem Schwarzen Loch mit zehn Sonnenmassen zu kollabieren. Ein solcher Stern hätte sich in seiner Phase als Roter Riese auf ungefähr zehn Astronomische Einheiten aufgebläht. Das entspricht einem Vielfachen des heutigen Abstands zwischen Stern und Schwarzen Loch. Die beiden Sterne wären wohl vor der Entstehung des Schwarzen Lochs

miteinander in Berührung gekommen. In der Astrophysik wird dieser Zustand des Systems mit dem Begriff »gemeinsame Hülle« (englisch: common envelope, CE) bezeichnet. Dieses Szenario kommt für Gaia BH1 eher nicht in Frage, weil der kleinere und leichtere Stern die CE-Phase wahrscheinlich nicht überstehen würde. Oder sind die gängigen CE-Modelle falsch und müssten modifiziert werden?

■ Auch Option 2 setzt ein Doppelsystem aus zwei Sternen voraus. Hierbei befindet sich das Paar ursprünglich in einem Kugelsternhaufen, in dem Sterne verhältnismäßig nahe beieinander sind. Das kann dazu führen, dass der Sekundärstern durch ein zufällig herannahendes Schwarzes Loch aus dem Orbit gekickt wird, und das Loch die Rolle des Partnersterns übernimmt. Diese Idee kommt ohne die schwer zu erklärende CE-Phase aus, ist aber dennoch unwahrscheinlich, weil die chemische Zusammensetzung des Primärsterns und der Orbit von Gaia BH1 nicht auf eine Entstehung in einem Kugelsternhaufen hinweisen.

■ Weitere Entstehungsszenarien involvieren Dreifachsysteme, bei denen der dunkle Begleiter aus zwei Objekten besteht; diskutiert wird auch ein direkter Kollaps eines besonders massereichen Sterns zu einem Schwarzen Loch.

Die aktuelle Datenlage bevorzugt leider keines der Szenarien eindeutig. Wir hoffen, dass uns weitere Beobachtungen Klarheit verschaffen werden. Weiterhin vermuten wir, dass das mögliche Schwarze Loch doch ein wenig Materie akkretiert – und zwar von den stellaren Winden des Primärsterns, ganz ähnlich wie bei Cygnus X-1 (siehe SuW 5/2012, S. 29). Wäre dies der Fall, wäre das Schwarze Loch wahrscheinlich mit bloßem Auge

von einer zweiten Erde aus sichtbar, die um den primären G-Stern kreist. Ob, und wie viel das Schwarze Loch akkretiert, sollen Nachbeobachtungen im Röntgen- und Radiobereich zeigen.

Leuchtende Zukunft für dunkle Objekte

Unser Forschungsteam ist zuversichtlich, dass sich Gaia BH1 als Schwarzes Loch bestätigen lässt und dies nur am Anfang von vielen spannenden Entdeckungen steht, die mit Schwarzen Löchern und anderen dunklen Objekten in unserer Galaxis zu tun haben. Wir versprechen uns viel von neuen Gaia-Daten. Sollten sich darin weitere dunkle Begleiter finden, wird das deutlich präzisere Populationsmodelle erlauben. Mit jedem Objekt, das gefunden wird, lernen wir mehr über die diversen Bewohner unserer Heimatgalaxie. ■

Luzian Seeburger promoviert am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und ist Koautor der Studie zu Gaia BH1.

Literaturhinweise

El-Badry, K., et al.: A Sun-like star orbiting a black hole. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 518, 2022 [arXiv:2209.06833]

Shenar, T. et al.: An X-ray-quiet black hole born with a negligible kick in a massive binary within the Large Magellanic Cloud. Nature Astronomy 6, 2022

Dieser Artikel und Weblinks:

www.sterne-und-weltraum.de/artikel/2086632

WIS Didaktische Materialien: www.wissenschaft-schulen.de/alias/1571158