



Stefan Gillessen

Stefan Gillessen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik und sein Team erforschen mit dem GRAVITY-Instrument am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile die Umgebung des massereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxis.

Und wieder hatte Einstein Recht

Der Stern S2 umrundet das massereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße so schnell, dass relativistische Effekte bemerkbar sind. Dank des neuen Instruments GRAVITY wurde dort erstmals die Gravitationsrotverschiebung gemessen.

Sterne und Weltraum: *Es gibt Neuigkeiten vom Zentrum der Milchstraße. Doch zunächst einmal: Was ist an diesem Ort an sich so spannend für einen Astrophysiker?*

Stefan Gillessen: Das Zentrum der Milchstraße ist ein ganz besonderer Ort. Mit einer Entfernung von 26 000 Lichtjahren ist es im Gegensatz zu allen anderen Galaxienkernen vergleichsweise nahe. Dadurch kann man es sehr gut im Detail beobachten. Und deshalb wissen wir auch, dass dort ein massereiches Schwarzes Loch sitzt. Das ist insofern bemerkenswert, weil das in jeder Galaxie heute so sein sollte und wir damit ein schönes Testlabor für die allgemeine Relativitätstheorie direkt vor unserer kosmischen Haustür haben.

Wie ist der Zusammenhang zwischen einem solchen Schwarzen Loch und der allgemeinen Relativitätstheorie?

Albert Einstein hat diese Theorie vor rund hundert Jahren entwickelt. Aus ihr folgt unter anderem, dass eine ausreichend kompakte Masse die Raumzeit so stark krümmt, dass Materie und Strahlung nur hinein-, aber nicht mehr herausgelangen können. Ein solches Schwarzes Loch macht sich nur durch seine Gravitation, auch Schwerkraft genannt, bemerkbar. Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße hat die gleiche Gravitationswirkung wie vier Millionen Sonnen – und ist dabei kleiner als der Durchmesser der Erdbahn! In anderen Galaxien gibt es zentrale Schwarze Löcher, die sogar noch weit mehr Masse haben – etwa um einen Faktor hundert.

Ein Schwarzes Loch kann man ja nicht direkt sehen. Was genau misst man denn, woraus man letztlich auf sein Vorhandensein im Zentrum der Milchstraße schließen kann?

Sie können sich das vielleicht so vorstellen: Wenn man an einem Wasserloch sitzt und den Löwen sehen möchte, ist das nicht

ganz so einfach, weil der Löwe sich relativ gut im Busch tarnen kann. Andererseits: Alle anderen Tiere starren genau dorthin, wo der Löwe sitzt. Denn sie wollen sehen, ob der gerade schläft oder nicht. – Übertragen auf das Schwarze Loch bedeutet das, dass man dessen Wirkung auf seine Außenwelt durchaus sehr gut wahrnehmen kann. In diesem Fall ist das die Schwerkraft; sie beeinflusst die Bewegung der Sterne in seiner Nähe. Ganz ähnlich wie die Planeten um die Sonne, kreisen die Sterne um das Schwarze Loch. Und sie tun das in einem Zeitraum, der durchaus beobachtbar ist. Den Stern, der sich am besten für solche Messungen eignet, nennen wir S2; er schafft es in 16 Jahren einmal um das Schwarze Loch herum. – Dieser Zeitraum ist für eine Doktorarbeit etwas lang; aber für die Lebensdauer einer Arbeitsgruppe oder eines Instituts, die sich das als Thema setzen, ist das ein Glücksfall.

Wie lassen sich die Bahnen dieser Sterne in der Nähe des Schwarzen Lochs charakterisieren?

Vor allem bewegen sich diese Sterne auf sehr exzentrischen Bahnen, also sehr ausgeprägten Ellipsen. Die meiste Zeit sind sie relativ weit außen, doch sie schwingen regelmäßig nach innen und kommen dabei dem Schwarzen Loch sehr nahe. In dieser kurzen Zeitspanne bewegen sie sich sehr schnell. Genau das ist mit S2 dieses Jahr passiert. Am 19. Mai 2018 näherte sich dieser Stern dem Schwarzen Loch auf den rund 1400-fachen Durchmesser des Schwarzen Lochs, das sind weniger als 20 Milliarden Kilometer. Dabei erreichte er vorübergehend eine Geschwindigkeit von 25 Millionen Kilometern pro Stunde, das entspricht fast drei Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Das klingt bedrohlich, ist aber nicht wirklich gefährlich, denn er macht das alle 16 Jahre. Aber es ist doch nahe genug, so dass die Allgemeine Relativitätstheorie auf einmal eine Rolle spielt.

Diesen Stern beobachten Sie und Ihre Kollegen schon seit 26 Jahren. Hat man da nicht schon einmal so einen nahen Vorbeiflug gesehen?

Ja. Den ersten Vorbeiflug haben wir 2002 beobachtet. Da war die Technologie allerdings noch nicht weit genug ausgereift, so dass wir nicht im Voraus wussten, dass dieser Vorbeiflug passieren würde. Man hat das erst im Nachhinein gesehen. Und die Messungen von damals sind, wie wir heute sagen würden, von »moderater Qualität«. Insbesondere waren sie nicht genau genug, um zu zeigen, wo der Unterschied zwischen einer klassischen und einer einsteinschen Weltsicht liegt. Dieses Mal waren wir hingegen vorbereitet. Wir wussten ganz genau, wann wir mit entsprechender Genauigkeit hinsehen mussten. Und das haben wir getan!

Woran kann man erkennen, dass man sich tatsächlich im Gültigkeitsbereich der allgemeinen Relativitätstheorie befindet und nicht mehr in jenem der newtonschen Gravitation?

Es gibt verschiedene Effekte, die da auftreten. Am dominantesten ist jener, den wir jetzt auch tatsächlich beobachtet haben: die so genannte Gravitationsrotverschiebung. Wenn ein Stern, wie kürzlich S2, dem Schwarzen Loch relativ nahe kommt, kann sein Licht laut Einsteins Theorie nicht mehr so einfach dem Schwerefeld des Schwarzen Lochs entfliehen. Das Licht braucht etwas von seiner eigenen Energie, um aus dem Potenzial zu entkommen. Das macht sich nicht etwa bemerkbar, indem das Licht langsamer würde. Denn Licht bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit. Aber es verändert eben ein bisschen seine Farbe: Der Stern erscheint etwas röter, als er sein sollte. Dieser Effekt ist nicht besonders groß. Aber er ist für uns doch deutlich genug gewesen, um ihn jetzt mit hoher Sicherheit zu messen.

Und das ist zum allerersten Mal gelungen?

Es ist ein absolutes Novum, dass man bei einem massereichen Schwarzen Loch die Gravitationsrotverschiebung ganz direkt sieht, wie sie Einsteins Theorie vorhersagt. Es gibt natürlich bereits andere Messungen der allgemeinen Relativitätstheorie dazu. So hat man die Gravitationsrotverschiebung bei Laborversuchen im Schwerefeld der Erde an verschiedenen Atomübergängen sehr genau vermessen oder an besonders kompakten Sternen wie dem Weißen Zwerg Sirius b beobachtet. Aber das sind Objekte, die bei Weitem nicht so massereich und kompakt sind wie unser Schwarzes Loch. Wir haben diesen Effekt jetzt für einen Massenbereich gemessen, der zuvor überhaupt noch nicht zugänglich war. Und ich glaube auch nicht, dass es irgendwo ein anderes derartiges Schwarzes Loch gibt, bei dem man so einen Test in dieser Klarheit jemals wird durchführen können.

Astronomen unterscheiden ja zwischen unterschiedlichen Arten der Rotverschiebung. Wie lassen sich diese verschiedenen Einflüsse in den Daten voneinander unterscheiden?

Man misst in der Tat einen kombinierten Effekt. Am stärksten kommt der gewöhnliche Dopplereffekt zum Tragen: Wenn sich eine Lichtquelle von uns weg oder auf uns zu bewegt, ändert sich ihre Farbe. Das ist ganz ähnlich wie beim akustischen Dopplereffekt: Rast ein Rettungswagen vorüber, ändert sich die Tonhöhe seines Martinshorns. Der Stern S2 bewegt sich auf seiner Bahn zunächst mit rund 4000 Kilometer pro Sekunde von uns weg. Das entspricht einem Interkontinentalflug innerhalb von nur zwei Sekunden! Diese Geschwindigkeit ändert sich dann sehr schnell

auf ungefähr minus 3000 Kilometer pro Sekunde; dann fliegt der Stern auf einmal auf uns zu. Entsprechend groß ist die Dopplerverschiebung in seinem Spektrum.

Und die Gravitationsrotverschiebung?

Die kommt nun noch hinzu. Sie liegt aber nur im Prozentbereich der normalen Dopplerverschiebung. Und dann gibt es sogar noch einen weiteren Effekt, der durch die spezielle Relativitätstheorie zu Stande kommt. Demnach ändert sich die Farbe eines Sterns, wenn er nur schnell genug an unserer Nase vorbeifliegt, sich also gar nicht auf uns zu oder von uns fort bewegt. Dieser so genannte transversale Dopplereffekt rührt daher, dass die Lichtgeschwindigkeit für jeden Beobachter eine Konstante ist.

Wie lassen sich diese verschiedenen Effekte in den Beobachtungen auseinanderhalten?

Man kann diese beiden schwächeren Effekte in diesem Experiment nicht trennen. Aber wir können ihre Summe messen: Wenn wir die Bahn des Sterns genau genug kennen – und das war auch genau die Hauptschwierigkeit unserer Messungen – können wir anhand dieser Daten den gewöhnlichen Dopplereffekt berechnen und ihn von der tatsächlich gemessenen Rotverschiebung abziehen. Was dann übrig bleibt, entspricht der Kombination aus Gravitationsrotverschiebung und dem Effekt aus der speziellen Relativitätstheorie. Und dabei bekommt man genau das heraus, was man anhand der Theorie berechnet hat. In der vorliegenden Situation sind beide gleich groß.

Die Messungen sind ja relativ genau. Aber letztlich hat man doch nur einen einzigen Stern beobachtet ...

Wir haben ja die gesamte Bahn des Sterns vermessen, und das über einen längeren Zeitraum: Dazu haben wir allein 30 Positionen mit der neuen Technologie des GRAVITY-Instruments aufgenommen, hinzu kommen etwa 160 Positionen aus den Jahren davor. Und Spektren haben wir auch etwa 100 Stück. Darunter sind ungefähr 30 Spektren, in denen wir auch tatsächlich die Rotverschiebung sehen. Das ist also nicht nur eine einzelne Messung gewesen, sondern wir haben sie beinahe Woche für Woche wiederholt und dabei genau verfolgt, wie die Rotverschiebung stärker und wieder schwächer wurde.

Wie genau ließen sich denn die Positionsmessungen derart verbessern, dass dies nun geglückt ist? Sie haben GRAVITY erwähnt ...

GRAVITY ist ein spezielles Instrument, das die vier Acht-Meter-Teleskope des Very Large Telescope der ESO in Chile zu einem Superteleskop kombiniert. Diese Technik nennt man Interferometrie. Wenn man sich in Gedanken den gesamten Berg, auf dem die Teleskope verteilt sind, als Spiegelfläche vorstellt, dann bekommt man ein Superteleskop mit 120 Meter Durchmesser. Leider ist die größte Fläche dieses Spiegels quasi schwarz angemalt und nur an vier Stellen freigelegt: den vier realen VLT-Teleskopen. Gleichwohl ist das Auflösungsvermögen dadurch gegeben, wie weit diese Teleskope auseinander stehen. Und das sind die 120 Meter. Verglichen mit einem einzelnen Acht-Meter-Teleskop gewinnt man damit einen Faktor 15 in der Positionsgenauigkeit und in der Schärfe. Um die nötige Bildtiefe zu erhalten, arbeitet GRAVITY außerdem mit adaptiver Optik und einer neuen Technologie, die wir als Fringe-Tracking bezeichnen. Damit lassen sich die interferometrischen Wellenüberlagerungen stabilisieren, und zwar beliebig lange. Davor konnte das Interferometer nur Schnapp-

»Es ist ein absolutes Novum, dass man bei einem massereichen Schwarzen Loch die Gravitationsrotverschiebung ganz direkt sieht.«



Das Very Large Telescope auf dem Cerro Paranal in Chile beherbergt im Interferometrielabor das GRAVITY-Instrument (kleines Bild). Es kombiniert das von allen vier Teleskopen einge-fangene Licht.

schüsse von wenigen Millisekunden aufnehmen; diese kurzen Belichtungszeiten hatten die Empfindlichkeit des Interferometers eigentlich auf alles eingeschränkt, was das menschliche Auge auch sehen kann. Indem wir jetzt zum ersten Mal vier Teleskope gemeinsam mit einem Fringetracker kombiniert haben, können wir nun Objekte beobachten, die um zehn Magnituden lichtschwächer sind. Das ist fast ein Unterschied wie Tag und Nacht.

Das war für die exakte Bahnbestimmung von S2 wichtig. Die Spektren nehmen Sie aber mit einem anderen Instrument auf?

Genau. Dafür verwenden wir den Integralfeldspektrografen Sinfoni, den wir seit 2004 am VLT betreiben. Er liefert Bilder, die in jedem Pixel auch noch ein Spektrum beinhalten. Mit seiner Auflösung können wir diese Dopplerverschiebungen genau messen.

Wurde das GRAVITY-Instrument ausschließlich am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, dem MPE, gebaut?

Nein. Das MPE war zwar federführend bei diesem Projekt, aber es waren daran verschiedene europäische Partner beteiligt. Zum Beispiel LESIA, ein Zusammenschluss verschiedener Institute in Paris und Meudon, das MPI für Astronomie in Heidelberg, die Universität zu Köln und die Université de Grenoble und die Universitäten von Porto und Lissabon. Und natürlich hat die Europäische Südsternwarte ESO sehr viel an der Infrastruktur gearbeitet, also an den Teleskopen und Tunnels für die Strahlengänge.

Wie kann man sich das vorstellen?

Eine der Hauptschwierigkeiten bei solchen Beobachtungen ist es, dass irgendwelche Dinge wackeln: Irgendjemand montiert an einen Computer einen Lüfter; dieser Lüfter bringt dann irgendeine Struktur zum Vibrieren, und das zerstört dann die interferometrischen Signale. Da war sehr viel Arbeit notwendig, um bei diesen großen Maschinen alle Vibrationen zu beseitigen. – Und wir hatten eine harte Deadline, gegen die wir arbeiten mussten. Denn wir wussten genau: Im Mai 2018 fliegt der Stern S2 vorbei, und wir müssen im Jahr 2017 anfangen zu messen. Es gab keine Gnadenfrist; sonst hätten wir 16 Jahre warten müssen!

Mit »wir« meinen Sie die genannten europäischen Partner?

Ja, dieser Aspekt ist mir wirklich sehr wichtig: Das war ein großes Team, das über die Jahre hinweg auf diese Messungen hingearbeitet hat. Vielleicht nicht ganz so groß, wie die aktuellen Kollaborationen in der Teilchenphysik am CERN: Aber die Autorenliste in der Veröffentlichung spricht für sich. Wirklich jeder hat in den letzten zehn Jahren einen signifikanten Teil seiner Arbeitszeit in das GRAVITY-Projekt gesteckt.

Behalten Sie S2 auch weiterhin genau im Visier?

Wir werden den Stern natürlich weiter verfolgen. Als Nächstes hoffen wir, die so genannte Schwarzschildpräzession zu beobachten. Dieser Effekt ist ein ganz berühmter Test für die allgemeine Relativitätstheorie. Er wurde bereits, kurz nachdem Einstein seine Theorie aufgestellt hatte, am Planeten Merkur, dort bekannt als Periheldrehung, nachgerechnet. Es zeigte sich, dass sich die Bahn des Merkur um die Sonne tatsächlich um 43 Bogensekunden anders dreht, als die newtonsche Theorie es vorhersagt. Diesen Effekt müssten wir sehr bald auch bei dem Stern S2 sehen: Man kann sich das so vorstellen, dass der Stern beim Vorbeiflug am Schwarzen Loch einen kleinen Schlag bekommen hat und deshalb jetzt auf einer etwas anderen Bahn weiterläuft als zuvor. Bis der Unterschied zur ursprünglichen Bahn groß genug geworden ist, dass wir ihn auch gut sehen können, müssen wir allerdings noch ein bisschen warten. Ende nächsten Jahres sollten wir ihn gemessen haben. Aber es kommt auch ein bisschen darauf an, wie gut wir unsere Daten analysieren können. Da ist es schwer, eine Vorhersage zu machen. – Den Effekt würde man zwar auch ohne Interferometer irgendwann sehen, aber vermutlich erst fünf Jahre später. Die höhere Genauigkeit mit GRAVITY führt dazu, dass dieser Effekt sehr viel früher sichtbar wird.

Ist der Vorbeiflug von S2 der nächste Messpunkt überhaupt, auf den man an das Schwarze Loch herankommt?

Es gibt noch einen anderen Stern, S5, der es in zwölf Jahren einmal um das galaktische Zentrum schafft. – Aber das ist so ein dunkles Sternchen, mit dem lässt sich zur Zeit nicht viel anfangen. Er ist sehr schwer zu messen, weil er sich oft nicht gut von anderen Sternen trennen lässt. Und er ist so lichtschwach, dass wir kein Spektrum von ihm nehmen können. Deshalb müssen wir im Moment mit dem zweitnächsten, S2, vorlieb nehmen. Allerdings hoffen wir, dank GRAVITY bald noch Sterne auf kürzeren Umlaufbahnen zu sehen. Denn GRAVITY liefert ja nicht nur genauere Positionen, sondern auch 15 Mal schärfere Bilder. Da kann man sich gut vorstellen, dass dort, wo wir im Moment noch nichts sehen, einzelne kleine Sternchen auftauchen. Das wären dann Sterne, bei denen die Effekte der Relativitätstheorie noch viel stärker zum Tragen kommen, weil sie sich näher am Schwarzen Loch befinden.

Reisen Sie selber auch zum Beobachten nach Chile?

Viel zu häufig! Unser Team reist monatlich für zehn Tage da hin. Ich selbst war dieses Jahr schon fünf Mal dort.

Die Beobachtungen laufen also nicht ferngesteuert per Computer oder unterstützt durch einen Assistenten? Sind sie so komplex? Zum einen ist das eine komplexe Aufgabe. Zum anderen ist Teleskopzeit zu wertvoll. Das ist ja nicht irgendein Observatorium, sondern das weltweit beste. Und wenn man mit GRAVITY beobachtet, sind wirklich die vier großen Teleskope des VLT für uns allein im Einsatz. Da möchte man das Optimum herausholen und vermeiden, dass irgendwelche Fehler passieren. Und das können wir als diejenigen, die das Instrument gebaut haben, am besten. Und wir wissen auch genau, was wir wissenschaftlich wollen. Das geht letztlich über Telefon oder Videoanrufe oder E-Mails nicht so gut, als wenn man stattdessen vor Ort ist. – Und verglichen mit dem Wert der Teleskopzeit ist so eine Reise ziemlich billig.

Was macht die Konkurrenz? Zu den Sternorbits gibt es bereits seit Jahren ebenfalls Messungen von einer unabhängigen Gruppe in den USA.

Spektroskopie können unsere Kollegen vermutlich ähnlich gut machen wie wir. Aber sie haben kein GRAVITY-Instrument und keine vier Teleskope, die sie kombinieren können. Daher kennen sie vermutlich den Orbit noch nicht so genau, um mit der gleichen Sicherheit sagen zu können, wie groß die Gravitationsrotverschiebung ist. Aber sie werden den Effekt auch beobachten; das ist eine Frage der Zeit: Wenn man die Sternbahn nur lange genug verfolgt, wird die Genauigkeit auch immer besser. Aber diesbezüglich sind unsere Daten dank GRAVITY konkurrenzlos.

Ist eine solche wissenschaftliche Konkurrenz auf eine gewisse Art inspirierend, oder hat sie auch negative Auswirkungen?

Also, für die Erforschung des galaktischen Zentrums war das ein absolut belebendes Element. Beide Gruppen haben mit Nachdruck versucht, die nächste interessante Messung jeweils am bes-

ten durchzuführen. – Mit einem Instrument wie GRAVITY stehen wir nun vor einer neuen Situation: Das kann man wirklich nur an einer Stelle auf der Welt machen, nämlich am VLT. Dadurch tritt eine ganz neue Schwierigkeit auf: Wir müssen unsere Arbeit intern noch viel besser kontrollieren, als wenn es noch jemand anderes gibt, der gleich gut ist. Denn im Zweifelsfall korrigiert der andere einen schon. Aber so ein Korrektiv kann es jetzt nicht geben. – Das ist vielleicht ganz ähnlich wie bei den aktuellen Experimenten am Large Hadron Collider am CERN. Dort müssen die Forscher auch ihre interne Qualitätskontrolle sehr ernst nehmen, damit die Außenwelt ihnen trotzdem glaubt.

Zum Schluss noch eine persönliche Frage: Wie sind sie zur Astronomie gekommen? Während des Studiums oder schon früher?

Bereits als Junge. Mein Vater hatte glücklicherweise ein kleines Teleskop und hat damit ab und zu an den Himmel geschaut. Dann habe ich auch mal selbst durchgeschaut, und es interessierte mich. Ich wollte dann Physik studieren, um Astronomie machen zu können. – Meine erste Beobachtung, an die ich mich erinnern kann, war vermutlich die Bewegung der Jupitermonde um ihren Planeten. Irgendwie bin ich da nicht viel weiter gekommen: Jetzt schaue ich mir Sterne an, die um ein Schwarzes Loch herumfliegen. Nur mit einem größeren Teleskop. Das Thema ist aber ganz ähnlich geblieben. Die Faszination hat also offensichtlich weit über dreißig Jahre getragen!

Herr Gillessen, herzlichen Dank für das Gespräch!

Die Fragen stellte Felicitas Mokler, Astrophysikerin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg. Die Fachveröffentlichung zur Entdeckung der Gravitationsrotverschiebung im Stern S2 ist erschienen in: Astronomy & Astrophysics 615, L15, 2018.

Spektrum LIVE

Veranstaltungsreihe zum 40-jährigen Jubiläum des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft

9. November 2018
Hannover

Vom Neandertal zum Konzertsaal

Professor Eckart Altenmüller erläutert in einem Gesprächskonzert, wie Musik im Gehirn verarbeitet wird und wie sie ihre emotionale Kraft entfaltet. Dabei greift er selbst zur Flöte, um anhand von Musikstücken aus verschiedenen Epochen die Wirkungen hörbar zu machen. Diese Veranstaltung findet im Rahmen des »November der Wissenschaft« in Hannover statt.

Infos und Anmeldung:

Spektrum.de/live