

Press release**Max-Planck-Institut für Astronomie****Dr. Markus Pössel**

04/16/2020

<http://idw-online.de/en/news744665>Research results
Physics / astronomy
transregional, national

Hochgenaue Sternbeobachtungen zeigen, wie zentrales Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße umgebenden Raum krümmt

Die Allgemeine Relativitätstheorie und Newtons Gravitationstheorie treffen unterschiedliche Vorhersagen zum Verhalten von Objekten, die eine Masse umkreisen. Jetzt haben Forscher unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik, darunter Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astronomie, erstmals die so genannte Schwarzschild-Präzession bei einem Stern nachgewiesen, der ein supermassereiches Schwarzes Loch umkreist. Zu diesem relativistischen Effekt trägt auch die Krümmung des Raums rund um die zentrale Masse bei. Der Nachweis gelang für die Umlaufbahn eines Sterns um das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße.

Die Allgemeine Relativitätstheorie, Einsteins Theorie von Raum, Zeit und Gravitation, hat einen weiteren Test bestanden: Ihre Vorhersage dazu, was mit der Umlaufbahn eines Sterns geschehen sollte, wenn dieser nahe an einem Schwarzen Loch vorbeizieht, in diesem Fall dem supermassereichen zentralen Schwarzen Loch unserer Milchstraße, hat sich als richtig erwiesen. Die betreffenden Messungen stellen ihrerseits einen Meilenstein der beobachtenden Astronomie dar: Sie gelangen mit dem Instrument GRAVITY, das am Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte ESO installiert ist. GRAVITY nutzt die Welleneigenschaften des Lichts, um Unterschiede zwischen zwei Sternpositionen mit einer Genauigkeit von bis zu 30 Millionstel Bogensekunden zu messen. Damit könnte das Instrument zwei Glühwürmchen voneinander unterscheiden, die im Abstand von 6 cm auf dem Mond sitzen. Die hohe Genauigkeit war entscheidend für den Nachweis des allgemein-relativistischen Effekts, der sogenannten Schwarzschild-Präzession, anhand der Umlaufbahn des Sterns S2 um das galaktische Zentrum.

Umlauf um das zentrale Schwarze Loch

Von unserer Warte aus ist das zentrale Schwarze Loch unserer Heimatgalaxie hinter Wolken aus Gas und Staub verborgen, fast 27000 Lichtjahre entfernt. Aufgrund des Staubes kann es nicht im sichtbaren Licht beobachtet werden, sondern nur bei längeren Wellenlängen, die den Staub weitgehend ungestört durchdringen. Radiobeobachtungen haben das Schwarze Loch seit langem dort lokalisiert, wo sich die Radioquelle "Sagittarius A*" (gesprochen "Sagittarius A-Stern") befindet. Deren Radiowellen dürften in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Lochs erzeugt werden, nämlich dort, wo Materie um das Schwarze Loch herumwirbelt und letztlich hineinfällt.

In den frühen 2000er Jahren zeigten erste Infrarotbeobachtungen einer Gruppe unter der Leitung von Reinhard Genzel am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) die Bewegung von Sternen in unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs – und damit auch den Einfluss der starken Schwerkraft des Schwarzen Lochs. Bis heute konnten die Forscher die Bahnen von mehr als einem Dutzend Sternen verfolgen. Einer davon, genannte "S2", ist besonders gut untersucht: Seine beobachtete Umlaufbahn ließ sich besonders gut verfolgen und verläuft zudem besonders nahe am Schwarzen Loch. Zusammengenommen ist S2 damit ein ideales Testobjekt, um relativistische Effekte des zentralen Schwarzen Lochs auf Objekte in seiner unmittelbaren Umgebung nachzuweisen.

Die Umlaufdauer eines Objekts, das eine zentrale Masse umkreist, hängt von der Entfernung des Objekts zur Masse und vom Wert der Masse selbst ab. Spätere Beobachtungen der Genzel-Gruppe sowie einer unabhängigen Gruppe unter der Leitung von Andrea Ghez an der UCLA erlaubten es den Forschern, aus den Umlaufbahnen der Sterne auf die Masse des zentralen Schwarzen Lochs zurück zu schließen; der beste moderne Wert liegt bei etwa 4 Millionen Sonnenmassen.

Technischer Fortschritt und neues Wissen

Die Untersuchungen des zentralen Schwarzen Lochs unserer Milchstraße sind eng mit dem technischen Fortschritt in der Astronomie verknüpft. Je näher ein Stern dem zentralen Schwarzen Loch ist, umso stärker ist der Einfluss des Schwarzen Lochs auf seine Umlaufbahn; die Beobachtung der Umlaufbahnen von Sternen in einer Entfernung von 27000 Lichtjahren erfordert, dass die Beobachter kleinste Details in der Position unterscheiden können, und das für vergleichsweise dicht gedrängte Lichtquellen.

Die beträchtlichen Fortschritte in der Genauigkeit, die beispielsweise Anfang der 2000er Jahre die präzise Verfolgung der Sternbahnen um Sagittarius A* ermöglichten, stehen in direktem Zusammenhang mit der Einführung der sogenannten Adaptiven Optik für Großteleskope. Adaptive Optik gleicht die durch atmosphärische Turbulenzen verursachten leichten Positionsverschiebungen von Himmelskörpern – in der Alltagssprache: das Funkeln der Sterne – aktiv aus. Aber wenn es um die Messung relativistischer Effekte ging, war selbst diese fortschrittliche Technologie für sich genommen noch nicht genug. Die betreffenden relativistischen Effekte sind nämlich sehr klein. Relativistische Effekte in der Nähe des Schwarzen Lochs SgrA*

Umkreist ein Stern das Schwarze Loch, kommen gleich mehrere Effekte ins Spiel, die von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt werden. Der erste Effekt betrifft die Zeit: Sowohl aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Sterns als auch aufgrund seiner Nähe zum Schwarzen Loch stellt ein externer Beobachter fest, dass die Zeit auf dem Stern langsamer vergeht. Dieser Effekt ist als Zeitdilatation bekannt.

Der zweite Effekt betrifft die Form der Umlaufbahn. In der klassischen Mechanik bewegt sich ein einzelnes Objekt, das eine Masse umkreist, auf einer elliptischen Umlaufbahn, wobei sich die Masse in einem der Brennpunkte befindet. Das sagt Keplers erstes Gesetz, das erstmals im frühen 17. Jahrhundert für Planeten in unserem Sonnensystem formuliert wurde. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt eine kleine Abweichung von diesem Gesetz voraus: Auf einer elliptischen Umlaufbahn gibt es einen Punkt namens Periapsis, an dem das umkreisende Objekt der anziehenden Masse am nächsten ist. Im klassischen Fall, auf einer rein elliptischen Umlaufbahn, befindet sich die Periapsis immer am gleichen Ort.

Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt dagegen voraus, dass die Bahnellipse als Ganzes im Laufe der Zeit rotieren sollte. Damit rückt die Periapsis entlang jeder abgeschlossenen Umlaufbahn ein wenig weiter vor. Insgesamt ergibt sich eine Bahn in Form einer Rosette, mit den verschiedenen Beinahe-Ellipsen jedes Umlaufs als Blütenblättern. Ein wichtiger Teil dieses Effekts beruht auf dem Umstand, dass der Raum rund um die zentrale Masse gekrümmt ist. Die Beschreibung des Gravitationseinflusses von kugelförmigen Körpern in der allgemeinen Relativitätstheorie beruht auf der so genannten Schwarzschild-Lösung. Entsprechend wird der Vorrück-Effekt auch als "Schwarzschild-Präzession" bezeichnet. Dieser Effekt wurde in unserem Sonnensystem bereits nachgewiesen, insbesondere für den Planeten Merkur. Er wurde auch in Doppelsternen nachgewiesen, bei denen mindestens einer der Sterne ein Neutronenstern ist, aber bislang nicht für die Bewegung eines Sterns um ein supermassereiches Schwarzes Loch.

GRAVITY: Präzisionsinstrument zur Stern-Verfolgung in der Nähe des Schwarzen Lochs

So sehr sich astronomische Kameras mit adaptiver Optik in den letzten 20 Jahren bewährt haben: Der Nachweis der Schwarzschild-Präzession für den Stern S2 erfordert noch eine deutlich höhere Präzision. Deshalb entwickelte Anfang der 2000er Jahre eine Gruppe von Astronomen unter der Leitung von Frank Eisenhauer (MPE), zu der auch Wolfgang Brandner (MPIA) gehört, ein neuartiges Instrument: GRAVITY, ein sogenanntes interferometrisches Instrument im

nahen Infrarot, ausgerüstet mit eigener adaptiver Optik. Interferometrische Instrumente schalten das Licht mehrerer Einzelteleskope so zusammen, dass das Auflösungsvermögen – also die Fähigkeit, kleinste Details zu unterscheiden – in der Kombination deutlich größer wird als für jedes der beteiligten Einzelteleskope. GRAVITY kann das Licht aller vier 8-Meter-Teleskope des Very Large Telescope der ESO kombinieren und erreicht damit das Auflösungsvermögen eines hypothetischen Einzelteleskops von 130 Metern Durchmesser. In der derzeitigen Konfiguration ist für GRAVITY an jedem der 8-Meter-Teleskope des VLT ein eigenes Adaptive-Optik-System namens CIAO eingebaut. CIAO wurde am MPIA konstruiert und gebaut und erhöht die Empfindlichkeit von GRAVITY um einen Faktor zwischen 50 und 100, was die Beobachtung besonders schwacher Objekte ermöglicht.

GRAVITY wurde im Januar 2016 in Betrieb genommen (MPIA-Pressemitteilung) und beobachtete im Juni desselben Jahres erstmals erfolgreich den Stern S2 (MPIA-Pressemitteilung). Die Astronomen hatten dabei schon während der Planungen gewusst, dass ihre größte Chance am 19. Mai 2018 kommen würde. Das war der Tag, an dem S2 dem supermassereichen Schwarzen Loch auf seiner Umlaufbahn einmal mehr am nächsten kommen würde, und dann würden die relativistischen Effekte am deutlichsten sein. Während das Schwarze Loch selbst natürlich unsichtbar ist, befindet sich in seiner direkten Umgebung immer genügend Gas, deren Infrarotstrahlung GRAVITY nachweisen kann. Zwischen Ende März und Ende Juni 2018 könnte GRAVITY die scheinbare Entfernung zwischen dem Schwarzen Loch und S2 mit einer Genauigkeit von 30 Mikrobogensekunden direkt messen – das entspricht der Bestimmung Abstandes von einer zu einer zweiten Kerze auf dem Mond mit einer Genauigkeit von weniger als 6 Zentimetern. Mit Hilfe dieser Messungen sowie von Beobachtungen mit der NACO-Kamera und dem Spektrographen SINFONI konnten die Astronomen zeigen, dass die Beobachtungen mit relativistischen Vorhersagen für die Zeitdilatation übereinstimmen, die die Wellenlänge des Sternenlichts um winzige 0,003% verschiebt. Die Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und den Vorhersagen auf der Basis der allgemeinen Relativitätstheorie liegt innerhalb von 15% (MPIA-Pressemitteilung).

GRAVITY misst die Schwarzschild-Präzession

Das war der Stand vom Sommer 2018. Jetzt hat dieselbe Forschergruppe mit zusätzlichen GRAVITY-Messungen zum ersten Mal die Schwarzschild-Präzession in der Umlaufbahn des Sterns S2 nachgewiesen. Thomas Henning, Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie, sagt: "Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die verschiedenen Teile von GRAVITY, darunter das am MPIA gebaute Adaptive-Optik-System, in genau aufeinander abgestimmter Weise mit der Infrastruktur Very-Large-Telescope-Interferometers zusammenarbeiten." Mithilfe der neuen Daten bestimmten die Astronomen die Bewegungsrichtung von S2 bis zu mehr als einem Jahr nach der dichtesten Annäherung und verglichen das Ergebnis mit der Bewegungsrichtung bis zu mehr als einem Jahr davor. Insgesamt wurden dabei 193 Beobachtungen mit der NACO-Kamera genutzt, welche die Bahn S2 seit 2001 verfolgt, darunter 75 direkte Beobachtungen der Entfernungen zwischen S2 und dem Schwarzen Loch, die zu Zeiten gemacht wurden, in denen das Schwarze Loch durch einfallende Materie ("Flares") für NACO sichtbar war, plus 54 direkte Messungen mit GRAVITY und weitere 92 spektroskopische Messungen.

Die Beobachtungsdaten zeigen, dass sich die Umlaufbahn aufgrund der Schwarzschild-Präzession zwischen 0,196 und 0,272 Grad pro Umlaufbahn dreht, verglichen mit der relativistischen Vorhersage von 0,202 Grad – eine Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie innerhalb von 17%. "Dieser berühmte Effekt, erstmals bei der Umlaufbahn des Planeten Merkur um die Sonne beobachtet, war der erste Beweis für die Allgemeine Relativitätstheorie. Hundert Jahre später haben wir nun denselben Effekt bei der Bewegung eines Sterns entdeckt, der die kompakte Radioquelle Sagittarius A* im Zentrum der Milchstraße umkreist", sagt Reinhard Genzel, Direktor am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching und treibende Kraft hinter dem 30 Jahre dauernden Beobachtungsprogramm, das jetzt zu diesem Ergebnis führte.

Von astronomischem Interesse ist, dass die Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung außerdem eine Obergrenze dafür festlegt, wieviel Masse in unmittelbarer Nähe des supermassereichen Schwarzen Lochs innerhalb der Umlaufbahn des Sterns S2, vorhanden sein kann. Eine kompakte Masse (etwa ein weiteres, kleineres Schwarzes Loch) in dieser Region kann nicht mehr als 100 Sonnenmassen haben. Eine dort befindliche diffuse Masse, etwa eine

ausgedehnte Gaswolke, dürfte nicht mehr als etwa 8000 Sonnenmassen hat. Das stimmt mit vorangehenden Studien der Bewegung zahlreicher Sterne um das zentrale Schwarze Loch überein.

Dies ist das erste Mal, dass relativistische Umlaufbahn-Effekte dieser Art für einen Stern gemessen wurden, der ein supermassereiches Schwarzes Loch umkreist. Der nächste Durchbruch dieses Kalibers wird wahrscheinlich auf das Extremely Large Telescope (ELT) der ESO warten müssen, das derzeit in Chile gebaut wird und 2025 den Beobachtungsbetrieb aufnehmen soll. Wenn es Sterne gibt, die sich in hinreichend großer Nähe zum Schwarzen Loch beobachten lassen, könnten sich mit dem ELT sogar die Auswirkungen der Rotation des Schwarzen Lochs auf Raum und Zeit nachweisen lassen. Rotierende Schwarze Löcher reißen den sie umgebenden Raum sozusagen mit, und dieser Effekt könnte durch eine entsprechend genaue Vermessung der Umlaufbahn eines dem Schwarzen Loch nahen Sterns nachgewiesen werden.

contact for scientific information:

Prof. Dr. Reinhard Genzel, MPE, +49 (0)89 30000-3280, genzel@mpe.mpg.de

Dr. Stefan Gillessen, MPE, +49 (0)89 30000-3839, ste@mpe.mpg.de

Dr. Wolfgang Brandner, MPIA, +49 6221 528-289, brandner@mpia.de

Prof. Dr. Thomas Henning, MPIA, +49 6221 528-200, henning@mpia.de

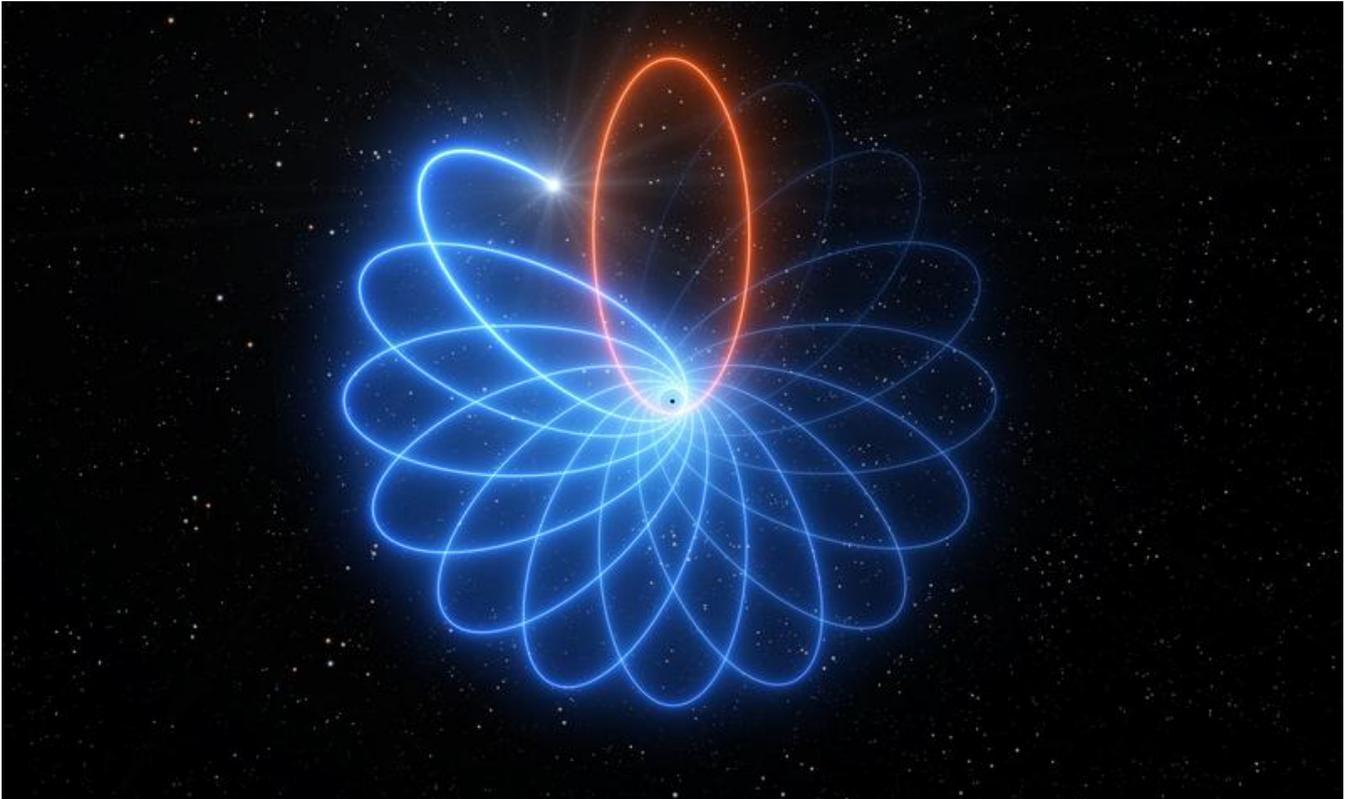
Original publication:

“Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole”,
Astronomy & Astrophysics, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037813>

URL for press release: <https://www.mpg.de/14668659/hochgenaue-sternbeobachtungen-zeigen-wie-das-zentrale-schwarze-loch-im-zentrum-der-milchstrasse-den-umgebenden-raum-krummt> - Online-Version der MPIA-Pressemitteilung

URL for press release: <http://www.mpe.mpg.de/7433630/news20200416> - Online-Version MPE-Pressemitteilung

URL for press release: <https://www.eso.org/public/germany/news/eso2006/> - Online-Version ESO-Pressemitteilung



Künstlerische Darstellung der Schwarzschild-Präzession einer Stern-Umlaufbahn um das zentrale Schwarze Loch unserer Milchstraße - der relativistische Effekt ist übertrieben dargestellt
Bild: ESO/L. Calçada