

4 Blick in die Maschinerie eines Massemonsters

**FRANK EISENHAUER,
REINHARD GENZEL**

↳ *Max-Planck-Institut
für extraterrestrische Physik,
Garching*

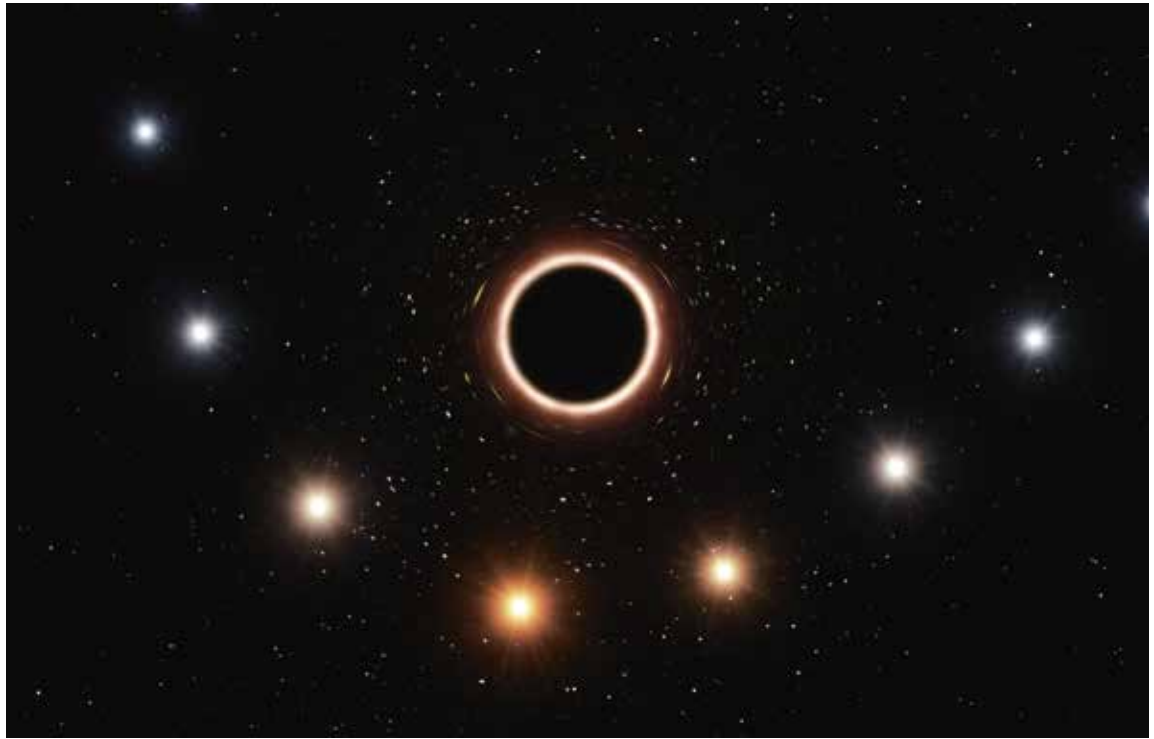
Vor gut einem Jahrhundert vollendete Albert Einstein seine allgemeine Relativitätstheorie. Die darin getroffenen Aussagen lassen sich im Universum testen – etwa im Zentrum unserer Milchstraße, wo die große Schwerkraft eines schwarzen Lochs fantastische Möglichkeiten bietet, bestimmte Effekte zu messen. Im Jahr 2018 ist uns dies in drei Fällen hervorragend gelungen: So konnten wir mit dem unter der Leitung unseres Instituts gebauten Instrument Gravity erstmals die Gravitationsrotverschiebung im Schwerfeld des galaktischen schwarzen Lochs messen; zudem verfolgten wir die Kreisbahnen nahe dem Punkt ohne Wiederkehr und bestimmten die Masse von kosmischen Schwerkraftfallen, die Milliarden Lichtjahre entfernt sind. Mit seiner einzigartigen Bildschärfe und Empfindlichkeit wird Gravity die Astronomie revolutionieren.

Albert Einstein hat mit seiner Beschreibung der Gravitation in der allgemeinen Relativitätstheorie den Grundstein für unser Verständnis von Raum und Zeit gelegt. Die Gültigkeit seiner Theorie wurde in den schwachen Schwerfeldern von Sonne und Erde in vielen Experimenten eindrucksvoll bestätigt. Und deren Anwendung, etwa in den weltweiten Navigationssystemen, bringt ganz konkreten Nutzen für uns alle. Die Effekte der Gravitation sind verblüffend: Die Zeit vergeht langsamer, der Raum wird gekrümmt und in schwarzen Löchern werden ganze Raumregionen unumstößlich von der Umgebung abgetrennt. Damit ist ein schwarzes Loch so etwas wie der „Stein von Rosetta“ für die Entschlüsselung des Alls.

Mit dem unter der Führung unseres Instituts entwickelten Instrument Gravity können wir nun erstmals ganz präzise die Eigenschaften von schwarzen Löchern beobachten. Hierfür schalten wir die vier größten Fernrohre der Europäischen Südsternwarte (ESO) zu einem virtuellen 130-Meter-Teleskop zusammen. Diese Technik

– genannt Interferometrie – geht auf Albert Michelson (1852 bis 1931) zurück, der damit erstmals den Durchmesser eines Sterns gemessen hat. Dabei werden die Lichtwellen eines Objekts überlagert und dieses erscheint im Ergebnis schärfer. Das bedeutet konkret, das Gravity in Verbindung mit den vier Acht-Meter-Spiegeln des erwähnten Very Large Telescope den Abstand zweier Autos auf dem Mond bis auf zwei Zentimeter genau messen könnte. So ist uns nach Jahrzehnten intensiver Beobachtung mit anderen Instrumenten jetzt dank Gravity ein technischer Durchbruch gelungen, und wir beginnen damit die Geheimnisse der schwarzen Löcher zu ergünden.

Das schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße ist für unsere Forschungen ein ideales Labor. Denn kein anderes schwarzes Loch mit ähnlich großer Masse (gut vier Millionen Sonnen) ist uns näher. Doch selbst dessen Durchmesser erscheint nur so groß wie eine Euromünze auf dem Mond. Mit Gravity gelang es uns, die Bewegung von Sternen und heißem Gas auf den



Farbwechsel: Diese Illustration zeigt den Stern S2 beim Vorübergang am schwarzen Loch im galaktischen Zentrum. Deutlich zu sehen ist die durch das extrem starke Schwerefeld verursachte Gravitationsrotverschiebung.

Bahnen um das schwarze Loch sehr exakt zu verfolgen. Mit seiner Genauigkeit und Empfindlichkeit übertrifft Gravity seine Vorgänger um das Hundert- bis Tausendfache und ist damit weltweit einzigartig.

Ein Stern beschleunigt bis auf 27 Millionen Kilometer pro Stunde

Das galaktische schwarze Loch offenbart sich zuallererst durch seine ungeheure Schwerkraft. Ganz ähnlich wie die Planeten im Schwerefeld der Sonne, kreisen im Herzen der Milchstraße die Sterne um das Massemonster. Seit mehr als 25 Jahren verfolgt unsere Gruppe die Bewegung dieser Sterne. Insbesondere ein Stern – genannt S2 – nähert sich wie ein Komet alle 16 Jahre dem schwarzen Loch bis auf lediglich den 120-fachen Abstand zwischen Sonne und Erde, umgerechnet entspricht das einer Distanz von rund 17 Lichtstunden. Die Anziehungskraft des schwarzen Lochs beschleunigt den Stern auf ein Tempo von etwa 27 Millionen Kilometern pro Stunde, also 2,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Aufgrund der geringen Distanz zum schwarzen Loch kommt es zu einem Effekt, der sich in der Gravitationsrotverschiebung im Licht des Sterns zeigen sollte. Dazu muss man wissen, dass eine solche Rotverschiebung nicht nur vom Dopplereffekt herrührt. Diesen kennen wir aus dem Alltag, wenn etwa ein Rettungswagen an uns vorbeifährt und die Tonhöhe des Martinshorns an- und abschwilt, was gleichzeitig einer Verschiebung der Wellenlänge in den kurz- beziehungsweise langwel-

ligen Bereich entspricht. Diesen Effekt gibt es auch bei Lichtwellen, wo man dann von Blau- oder eben Rotverschiebung spricht. Unabhängig davon tritt im Gravitationsfeld eine Rotverschiebung auf, wenn sich Licht dort bewegt und gewissermaßen dagegen ankämpft. Mit der überragenden Präzision und Empfindlichkeit von Gravity und dem ebenfalls an unserem Institut entwickelten Spektrometer Sinfoni gelang es, diesen Effekt der allgemeinen Relativitätstheorie erstmals für ein massereiches schwarzes Loch direkt zu messen und damit Einsteins Vorhersage eindrucksvoll zu bestätigen.

Obwohl das eigentliche schwarze Loch unsichtbar ist, macht es sich doch immer wieder bemerkbar – und zwar immer dann, wenn einfallendes Gas auf Temperaturen von Milliarden Grad aufgeheizt wird und dadurch leuchtet. In diesem rotierenden Gas entstehen starke Magnetfelder. Sie entladen sich in Strahlungsausbrüchen, ähnlich wie wir sie auch von Sonneneruptionen her kennen. Im Sommer 2018 konnten wir mit Gravity drei solche Flares beobachten.

Flares nahe dem Ereignishorizont

Die Ergebnisse sind spektakulär: Die Strahlungsausbrüche stammen offenbar aus der sogenannten Akkretionsscheibe – einem Ring aus Gas mit einem Durchmesser von nur etwa zehn Lichtminuten, der sich mit extrem hoher Geschwindigkeit um das galaktische Zentrum dreht. Die Materie kann dabei gefahrlos kreisen, solange sie dem schwarzen Loch nicht zu nahe kommt. Materie

innerhalb des Ereignishorizonts (dem Punkt ohne Wiederkehr) gelingt es aber nicht mehr, der enormen Schwerkraft zu entfliehen. Die Flares entstehen also in einem Orbit nahe dem Ereignishorizont.

In allen drei Fällen beobachteten wir, wie das heiße Gas mit 30 Prozent der Lichtgeschwindigkeit nur knapp über dem Ereignishorizont um das schwarze Loch feigt. Ein Umlauf dauert dabei lediglich 45 Minuten. Wir schließen daraus, dass die ungeheure Masse von mehr als vier Millionen Sonnen auf kleinstem Raum konzentriert ist. Genau das sagt die Theorie der schwarzen Löcher vorher. Dieses Ergebnis ist eine überwältigende Bestätigung des Paradigmas von dem massereichen schwarzen Loch im Zentrum unserer Milchstraße.

Mit dem Very Large Telescope und Gravity haben wir jedoch auch sehr tief ins All geschaut, weit jenseits

Annahmen für die unbekannte Verteilung und Bewegung dieser Wolken machen. Dank Gravity haben wir nachgewiesen, dass sich auch diese Gaswolken auf geordneten Kreisbahnen um die kosmische Schwerkraftfalle bewegen. Dazu haben wir einen Quasar mit der Katalogbezeichnung 3C 273 ins Visier genommen – das erste dieser „quasi-stellaren Objekte“, das der Astronom Maarten Schmidt vor mehr als 50 Jahren als solches identifiziert hatte. Der Quasar erwies sich als extrem heller, aber weit entfernter Himmelskörper. Die Energie, die er abgibt, ist viel größer als die einer normalen Galaxie wie unserer Milchstraße und lässt sich nicht durch reguläre Fusionsprozesse im Innern von Sternen erklären. Vielmehr gehen die Astronomen davon aus, dass Gravitationsenergie in Hitze umgewandelt wird, wenn Materie in ein extrem massereiches schwarzes Loch strudelt.

Turbulente Schwerkraftfalle: Diese Visualisierung basiert auf Simulationen der Bewegung von Gas, das mit etwa 30 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf einer kreisförmigen Umlaufbahn um das schwarze Loch im galaktischen Zentrum herumwirbelt.



des 26.000 Lichtjahre entfernten galaktischen Zentrums. Denn massereiche schwarze Löcher finden sich nicht nur in unserer Heimatgalaxie, sondern in den Herzen aller großen Milchstraßensysteme. Sie können bis zu mehrere Milliarden Sonnenmassen in sich vereinen. Wenn Materie auf diese schwarzen Löcher fällt, leuchtet das erhitzte Gas so hell, dass es die gesamte Galaxie überstrahlt und noch in einer Entfernung von Milliarden Lichtjahren sichtbar ist. Aber gerade deshalb sind diese aktiven schwarzen Löcher nur schwer zu vermessen, denn man sieht die Sterne nicht mehr, aus deren Umlaufbahnen man sonst die Zentralmasse berechnen könnte.

Bisher ließen sich die Massen solcher Objekte nur über das Lichtecho an Gaswolken ableiten, die das schwarze Loch umgeben. Aber hierzu muss man

Raumzeit in Rotation

Unser Team hat tief ins Herz dieses Quasars 3C 273 geblickt und direkt die Struktur des sich schnell bewegenden Gases um das zentrale schwarze Loch beobachtet. Bisher waren solch detaillierte Einsichten aufgrund der geringen Winkelgröße der inneren Region des Quasars nicht möglich, da diese nur etwa die Ausdehnung unseres Sonnensystems hat, aber etwa 2,5 Milliarden Lichtjahre entfernt ist. Mit dem gemessenen Abstand der Wolken zum Zentrum von 150 Lichttagen und deren Umlaufgeschwindigkeit konnten wir erstmals die Masse eines aktiven schwarzen Lochs bestimmen: 300 Millionen Sonnenmassen.

In Zukunft wollen wir einen weiteren Effekt messen, der aus Einsteins Theorie folgt. Er hängt mit einer ungewöhnlichen Eigenschaft schwarzer Löcher zusammen: Wenn diese rotieren, dann sollten sie auch den Raum und die Zeit mitreißen – gleichsam wie ein Löffel, den man in Honig taucht und dann dreht. Dazu lautet eine höchst erstaunliche Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie, dass alle beobachtbaren Eigenschaften eines schwarzen Lochs durch lediglich zwei Größen bestimmt sind: Masse und eben Rotation, und dies unabhängig von der komplexen Entstehungsgeschichte und dem inneren Aufbau. Mit Gravity und weiteren am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Entwicklung befindlichen Instrumenten werden wir in den nächsten Jahren diese Rotation der Raumzeit in der Bewegung der Sterne und der einfallenden Materie vermessen – und damit einen nächsten großen Schritt hin zum Verständnis der allgemeinen Relativitätstheorie machen. ◦