



## Massemonster im All – wie Forscher das schwarze Loch in der Galaxis durchleuchten

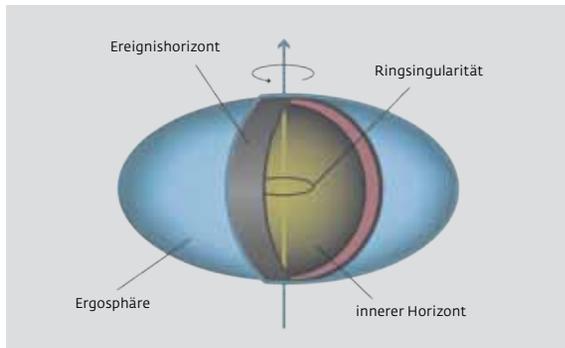
**Cerro Paranal, 2635 Meter über Meereshöhe. Der Raum liegt im Halbdunkel. Auf den Bildschirmen flimmern Zahlen und Kurven. Ähnlich Piloten in der Kanzel einer Düsenmaschine tauschen die Menschen vor den Monitoren routiniert Informationen aus, raunen sich gelegentlich Nummern oder Buchstabenkürzel zu. Draußen spähen unterdessen vier gigantische Spiegelteleskope zum Himmel über den chilenischen Anden. Seit Stunden überträgt eines der Fernrohre Bilder aus dem Herzen der Milchstraße auf den Beobachtungsmonitor. Weit nach Mitternacht ein Ausruf des Erstaunens: „Was macht der denn da!“ Ein Lichtpunkt war aus dem Nichts aufgetaucht und wenig später spurlos verschwunden. Was hat das zu bedeuten? Bald steht fest: Die Wissenschaftler haben das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße bei einer Mahlzeit ertappt.**

Der Beginn eines Science-Fiction-Films? Nein, die Szene ist Realität. Abgespielt hat sie sich im Kontrollraum des Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte. Die Protagonisten: ein internationales Team von Astronomen um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching und – ein schwarzes Loch. Was verbirgt sich hinter einem solchen Massemonster?

Schon der britische Naturforscher John Mitchell spekulierte 1783 über „dunkle Sterne“. Ein paar Jahre später vermutete der französische Mathematiker Pierre-Simon Laplace, dass diese Objekte tatsächlich existieren. In Gedanken ließ er eine Materiekugel bei gleichbleibender Masse so lange schrumpfen, bis die Gravitationsbeschleunigung an ihrer Oberfläche so stark anwuchs, dass die Fluchtgeschwindigkeit den Wert der Lichtgeschwindigkeit erreichte. Unter diesen Verhältnissen entkommen nicht einmal mehr Photonen den Schwerkraftfesseln des Körpers: Er wird für den Betrachter unsichtbar, gleichsam zum schwarzen Loch.

Der Astronom Karl Schwarzschild berechnete Anfang des 20. Jahrhunderts mithilfe der kurz zuvor von Albert Einstein vorgestellten **allgemeinen Relativitätstheorie** als Erster den Radius einer Kugel, die das oben genannte Kriterium erfüllt, auf deren Oberfläche also die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit (ungefähr 300.000 Kilometer pro Sekunde) ist. Die Erde etwa müsste man dazu auf die Größe einer Erbse zusammenquetschen, ihr **Schwarzschildradius** beträgt knapp einen Zentimeter! Die Überlegungen von Laplace und die Berechnungen von Schwarzschild blieben zunächst theoretisch. Erst als die Wissenschaftler in den 1930er-Jahren die Physik der Sterne zu verstehen begannen, rückten die schwarzen Löcher allmählich ins Blickfeld.

Abb. A Hinter dem Horizont



Die Grafik zeigt ein rotierendes schwarzes Loch. Die Ergosphäre bezeichnet jenen Bereich, in dem jedes beliebige Objekt mitrotieren muss. Der Ereignishorizont ist so etwas wie die Oberfläche des schwarzen Lochs; was dahinter verschwindet, ist im wahrsten Sinne aus der Welt.

© designgold nach einer Vorlage des MPI für Gravitationsphysik

Um einen solchen kosmischen Exoten hervorzubringen, braucht es einen Stern mit mehr als der achtfachen Masse unserer Sonne. Am Ende seines Lebens angekommen, verbrennt der Gasgigant in mehreren übereinanderliegenden Schalen chemische Stoffe. Im Zentrum dieser „Zwiebel“ produziert der Fusionsreaktor bei Temperaturen von einer Milliarde Grad zunehmend komplexere Elemente wie Sauerstoff und Silizium. Kurz vor dem Sterbentod geht es immer schneller: Innerhalb von wenigen Monaten und später nur mehr einigen Tagen werden Nickel, Kobalt und schließlich Eisen erzeugt.

### DER STERN GERÄT AUS DEM GLEICHGEWICHT

Damit ist das Ende erreicht: Weil Eisen die höchste Bindungsenergie pro Kernbaustein besitzt, lässt sich aus seiner Fusion keine Energie mehr gewinnen. Der stellare Ofen erlischt, was die Gaskugel aus dem Gleichgewicht bringt. Das Wechselspiel zwischen dem Druck der Sternmaterie, der nach außen wirkt, und dem nach innen gerichteten Gravitationsdruck wird empfindlich gestört. Der Kern des Sterns bricht unter seinem eigenen Gewicht in sich zusammen. Die äußere Hülle dagegen schießt ins All und leuchtet als **Supernova** hell auf.

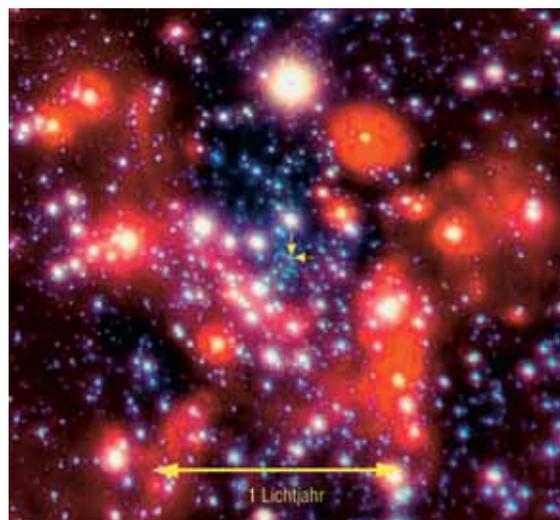
Gleichzeitig erreicht die Dichte im Zentrum des Sterns astronomisch hohe Werte. Dies führt dazu, dass elektrisch negativ geladene Elektronen in die elektrisch positiv geladenen Protonen gequetscht werden und Neutronen bilden. Auf diese Weise formt sich eine Kugel mit ungefähr 20 Kilometern Durchmesser und der Masse unserer Sonne – ein **Neutronenstern**. Auf der Erde würde ein Teelöffel seiner Materie einige Milliarden Tonnen wiegen. Weil der **Drehimpuls**, das Produkt aus Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit, nicht verloren geht, beschleunigt sich die eher gemächliche Rotation des vormals gesunden Sterns in dem Maße, wie sich sein kollabierter Kern verdichtet und schrumpft. Wegen der immensen Fliehkräfte verlassen ständig Teilchen die Oberfläche, werden in dem starken Magnetfeld beschleunigt und senden in zwei gebündelten Strahlungskegeln sogenannte **Synchrotronstrahlung** aus. Überstreicht dieser kosmische Leuchtturm die Erde, scheint der Stern im Millisekundentakt zu blinken, man spricht von einem **Pulsar**.

Es geht aber noch dichter. Wenn die kollabierte Restmasse des gestorbenen Sterns etwa drei Sonnenmassen überschreitet, dann zieht sich die ausgebrannte Kugel völlig in sich zusammen – bis das exotische Gebilde schließlich die Größe des doppelten Schwarzschildradius erreicht. Bei diesem Prozess gehen alle Strukturen verloren, ein schwarzes Loch entsteht. Lediglich drei Parameter charakterisieren ein solches Objekt: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung.

Ähnlich einem Schlafenden, der eine weiche Matratze eindellt, krümmen nach Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie Massen den Raum. Die extrem starken Gravitationsfelder eines schwarzen Lochs sollten den Raum so verbiegen, dass er sich trichterförmig abkapselt. Karl Schwarzschild selbst hat die Struktur des Raums um ein ruhendes schwarzes Loch beschrieben – das es in der Natur wegen der Erhaltung des Drehimpulses wohl gar nicht gibt. Ein Teil des Drehimpulses wird zwar in Form von **Gravitationswellen** abgestrahlt (siehe auch **TECHMAX 4**), gleichwohl sollte das schwarze Loch rotieren. Erst in den 1960er-Jahren gelang es den Theoretikern, allen voran dem neuseeländischen Mathematiker Roy Kerr, die Metrik eines solchen Objekts in Formeln zu fassen.

Wie also sieht ein schwarzes Loch aus? Vereinfacht gesagt, liegt ganz außen eine abgeplattete Kugelfläche, die Ergosphäre. Sie umschließt den kugelförmigen Ereignishorizont, gleichsam die Grenzfläche des schwarzen Lochs. Was sich jenseits von ihm abspielt, ist von außen unzugänglich. Weiter innen liegt der innere Horizont, auch Cauchy-Horizont genannt. Im Zentrum sitzt die Singularität, die sich mit den Gesetzen unserer Physik nicht beschreiben lässt. Bei einem schwarzen Loch, wie es Roy Kerr durchgerechnet hat, ist das eine Ringsingularität – aber ohne Ausdehnung und mit dem Radius null! So ein Konstrukt kann man sich beim besten Willen nicht vorstellen (**Abb. A**). Einfacher ist das mit dem Schicksal von Gasteilchen, die mit langsamer Geschwindigkeit die oben genannte Ergosphäre überschreiten. Sie landen dann auf spiralförmigen Bahnen und ziehen immer engere Kreise. Die Gravitationsenergie wächst, während das

Abb. B Zoom ins Zentrum



Mit einer Infrarotkamera am Very Large Telescope in Chile blicken Astronomen ins Herz der Milchstraße. Die beiden gelben Pfeile in der Mitte markieren die Position der Radioquelle SgrA\*.

© MPI für extraterrestrische Physik

schwarze Loch seinerseits Drehimpuls einbüßt. Fällt also Gas auf ein schwarzes Loch, heizt es sich durch diesen Mechanismus sehr stark auf. Am heißesten wird die Materie auf der letzten stabilen Umlaufbahn (*last stable orbit*), wo Temperaturen um die 100 Milliarden Grad Celsius auftreten. Doch dort verharrt das Gas nicht lange, nach etwa einer halben Stunde wilder Fahrt verschwindet es hinter dem Ereignishorizont.

Genau das haben die Astronomen im Kontrollraum des Very Large Telescope auf dem Andengipfel Cerro Paranal live verfolgt! Aus gutem Grund beobachteten die Forscher das Herz unserer Galaxis (**Abb. B**). Denn darin hatte eine Gruppe um Reinhard Genzel, Direktor am Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, in den 1990er-Jahren ein gigantisches schwarzes Loch entdeckt. Es besitzt ungefähr vier Millionen Sonnenmassen und kann nicht durch eine einzige Supernova entstanden sein. Daher sprechen die Forscher nicht von einem stellaren, sondern von einem supermassiven schwarzen Loch. Nach der lateinischen Bezeichnung des Sternbilds Schütze, in dem der Mittelpunkt des Milchstraßensystems von der Erde aus gesehen liegt, heißt das Objekt „Sagittarius A Stern“ (SgrA\*). Es sitzt innerhalb eines dichten Sternhaufens mit einer sehr kompakten, ungewöhnlich hellen zentralen Radioquelle. Deren Durchmesser beträgt weniger als 300 Millionen Kilometer und ist damit kleiner als der Durchmesser der Erdbahn um die Sonne.

Doch handelt es sich bei SgrA\* wirklich um ein schwarzes Loch? Angesichts der hohen Masse auf engem Raum erscheint dies als sehr wahrscheinlich. „Aber zwischen Plausibilität und physikalischer Sicherheit gibt es doch einen Unterschied“, sagt Reinhard Genzel. „Daher denken wir uns alle möglichen Tests aus. Das galaktische Zentrum bietet hier fantastische Möglichkeiten.“ War die eingangs beschriebene Live-Beobachtung – also das Verschlucken von Materie – vor ein paar Jahren eher Zufall, so haben die Astronomen in den vergangenen Monaten gezielt nach einem solchen Prozess gesucht. Und kürzlich sind sie fündig geworden!

#### VIER TELESKOPE WERDEN ZU EINEM

Geholfen haben ihnen dabei wiederum das Very Large Telescope und ein sehr komplexes Instrument namens *Gravity*. Mit ihm nutzen die Forscher alle vier Acht-Meter-Spiegel des VLT gleichzeitig. Dieses Verfahren heißt **Interferometrie**. Bei ihm werden die Wellen ein und desselben Objekts aus den vier Einzelteleskopen überlagert, wodurch dieses im Ergebnis schärfer erscheint. In der Radioastronomie ist die Methode schon seit Jahrzehnten etabliert, im optischen Licht dagegen nicht. Daher hat das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik unter Leitung von Frank Eisenhauer zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie, der Europäischen Südsternwarte, der Universität Köln, zwei französischen CNRS-Instituten sowie Instituten in Porto und Lissabon *Gravity* entwickelt. Dieses Instrument verarbeitet die Signale der vier Einzelteleskope und verbessert im Infrarotbereich die Detailauflösung enorm. Das heißt, das VLT könnte dank *Gravity* zwei nebeneinanderliegende Zwei-Euro-Münzen auf dem Mond sichtbar machen.

Mit *Gravity* haben die Astronomen um Reinhard Genzel gleichsam den Rand des vermeintlichen schwarzen Lochs ins Visier genommen. Der Theorie nach müssten die Elektronen des Gases, das sich dem Ereignishorizont nähert, beschleunigt werden und dadurch die Helligkeit zunehmen. In der nur wenige Lichtstunden kleinen Region um das schwarze Loch herrschen chaotische Verhältnisse ähnlich

wie in irdischen Gewittern oder Strahlungsausbrüchen auf der Sonne. Dabei spielen auch noch starke Magnetfelder eine Rolle, denn das Gas ist elektrisch leitend, also ein **Plasma**. Dieses sollte sich schließlich als flackernder heißer Fleck zeigen, der das schwarze Loch auf der letzten stabilen Bahn umkreist. Tatsächlich: Dank *Gravity* sahen die Forscher gleich drei solcher Flares, *hot spots* genannt. „Alle hatten sie dieselben Radien und dieselben Umlaufperioden“, sagt Genzel. Wie erwartet, war das Gas nach 30 Minuten verschwunden, gleichsam verschluckt vom schwarzen Loch. Nicht nur bedeutet diese Beobachtung ein ziemlich starkes Indiz für die Existenz des dunklen Massemonsters im Herzen der Galaxis. Zudem können die Forscher anhand derartiger Messungen entscheiden, ob es sich um ein ruhendes Schwarzschild-Loch oder ein rotierendes Kerr-Loch handelt. Die bisher gesammelten Hinweise sprechen für Letzteres.

Tief im galaktischen Zentrum warten noch mehr spannende Entdeckungen auf die Astronomen. Diese haben schon vor einigen Jahren damit begonnen, die weitere Umgebung des schwarzen Lochs zu studieren. Denn dort ziehen jede Menge Sterne ihre Bahnen (**Abb. C**). Aus dem Vergleich von mehreren, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gewonnenen scharfen Aufnahmen mit neuen Beobachtungstechniken bestimmten die Forscher die Eigenbewegungen der Sterne sowie mittels des **Dopplereffekts** deren Ra-

**Abb. C Galaktischer Bienenschwarm**



© ESO/L. Calçada/spacengine.org

Die Simulation zeigt die Sternbahnen nahe dem supermassiven schwarzen Loch im Herzen der Milchstraße.

dialgeschwindigkeiten. Diesen Effekt kennen wir aus dem Alltag, wenn etwa ein Rettungswagen an uns vorbeifährt und die Tonhöhe des Martinshorns an- und abschwilt. Das bedeutet gleichzeitig eine Verschiebung der Wellenlänge in den kurz- beziehungsweise langwelligen Bereich. Dies gibt es auch bei Lichtwellen, wobei man dann von Blau- oder Rotverschiebung spricht.

Die erwähnte Eigenbewegung bezeichnet die Winkelgeschwindigkeit am Himmel, die Radialgeschwindigkeit das Tempo entlang der Sichtlinie zur Erde. Die Analyse beider Komponenten ergab die wahren Bewegungen der Sterne im Raum. Als „Star“ auf den Fotos entpuppte sich S2: Der Stern nähert sich der Radioquelle SgrA\* bis auf etwa 17 Lichtstunden oder die dreifache Distanz zwischen Sonne und Neptun. S2 läuft auf seiner hochelliptischen Keplerbahn und wird dabei bis zu 25 Millionen Kilometer pro Stunde schnell. Für die Umrundung des schwarzen Lochs benötigt er etwa 15 Jahre.

Ein schwarzes Loch direkt beobachten? Das klingt nach Fiction, doch jetzt wird daraus Science. Ein Radioobservatorium der Superlative soll es möglich machen. Es heißt Event Horizon Telescope (EHT) und besteht aus vielen, über die gesamte Erdoberfläche verteilten Stationen. Die Technik dafür ist die Very Long Baseline Interferometry. Dabei werden die einzelnen Antennen zusammengeschaltet und so zu einem virtuellen Riesenteleskop von der Größe unseres Planeten vereint. Die Anlage empfängt Strahlung im Millimeterbereich des elektromagnetischen Spektrums und liefert eine Winkelauflösung, bei der man einen Tennisball auf dem Mond sehen könnte. Das EHT nimmt unter anderem SgrA\* im Zentrum der Milchstraße ins Visier. Dabei registriert es jene Lichtteilchen, die um Haaresbreite den Fängen des schwarzen Lochs entkommen sind. Auf dem am Computer rekonstruierten Bild sollte sich der Ereignishorizont als „Schatten“ direkt abbilden. Auch in fernen Milchstraßensystemen wie M 87 wollen die Astronomen die Umgebung von schwarzen Löchern untersuchen, insbesondere die ausströmenden Jets energiereicher Teilchen.



© M. Moscibrodzka, T. Bronzwaer, H. Falcke (Radboud-Universität Nijmegen)

das Verschlucken von Gas weiter an Gewicht zu, wuchsen also zu supermassiven schwarzen Löchern heran.

Bis vor wenigen Jahren dachten die Wissenschaftler, es gebe im Wesentlichen nur zwei Klassen von schwarzen Löchern: stellare und supermassereiche. Dann wurden am 14. September 2015 Gravitationswellen entdeckt, die offenbar aus der Kollision von zwei schwarzen Löchern mit 29 und 36 Sonnenmassen stammten. Deren Entstehung liegt ebenso im Dunkeln wie die von schwarzen Löchern mit einigen Hundert oder Tausend Sonnenmassen, welche die Forscher im All ebenfalls gefunden haben wollen. Nicht zuletzt mit der Entdeckung von Gravitationswellen und den Messungen im Herzen der Milchstraße hat die Ära der Beobachtung schwarzer Löcher begonnen. Die Astronomen im Kontrollraum auf dem Paranal haben wohl noch manche aufregende Nacht vor sich ...

Im Mai 2018 sollte S2 wieder einmal in der geringsten Entfernung von 14 Milliarden Kilometern am Massemonster vorbeiziehen – eine perfekte Gelegenheit, um in dieser Region mit der stärksten Schwerkraft unserer Galaxis die allgemeine Relativitätstheorie zu testen. Wieder lagen die Astronomen mit dem Instrument *Gravity* auf der Lauer. Und erneut gelang eine bemerkenswerte Beobachtung: Der Stern zeigte eine Rotverschiebung, die nicht vom Dopplereffekt herrührt. Denn unabhängig von ihm sollte nach Einsteins Theorie auch im Schwerfeld eine Rotverschiebung auftreten, wenn sich Licht dort bewegt und gewissermaßen dagegen ankämpft. Diesem Effekt unterlag die Strahlung des Sterns S2: Die Forscher registrierten genau diese Gravitations-Rotverschiebung **(Titelbild)**.

Das schwarze Loch in der Milchstraße ist aber nicht nur ein „Freilandlabor“ für die Physik der Schwerkraft, sondern ein Modellfall: Offensichtlich verbergen sich auch in den Zentren der meisten anderen Spiralgalaxien mit stellarem Kernbereich sowie in elliptischen Galaxien solche schwarzen Löcher. Dabei gilt: Je massereicher der Kern, desto massereicher das schwarze Loch. Diese enge Korrelation deutet auf eine gemeinsame Genese hin. Doch über die Geburten der Galaxien rätseln die Forscher noch, ebenso über die Entwicklung einer Schwerkraftfalle mit einigen Millionen oder gar Milliarden Sonnenmassen. Ein Szenario sieht so aus: Schon wenige 100 Millionen Jahre nach dem **Urknall** existierten Sternrigiganten mit bis zu 1000 Sonnenmassen. Sie explodierten als Meganovae und hinterließen entsprechend massereiche schwarze Löcher. Diese sammelten sich in Energiemulden, verschmolzen miteinander und legten durch

### Schlagwörter

allgemeine Relativitätstheorie, Schwarzschildradius, Supernova, Neutronenstern, Drehimpuls, Synchrotronstrahlung, Pulsar, Gravitationswellen, Interferometrie, Plasma, Dopplereffekt, Urknall

### Lesetipps

Das Rückgrat der Nacht

→ [www.mpg.de/12140139](http://www.mpg.de/12140139)

Interview mit Reinhard Genzel

→ [www.mpg.de/12139882](http://www.mpg.de/12139882)

### Videotipps

Reise ins Herz der Milchstraße

→ [www.youtube.com/watch?v=Da\\_Wc\\_G9ms4](https://www.youtube.com/watch?v=Da_Wc_G9ms4)

Umlaufbahn des Sterns S2

→ [www.youtube.com/watch?v=Eysechn7yqc](https://www.youtube.com/watch?v=Eysechn7yqc)

**www.maxwissen.de**

► der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils maximal zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von **BIOMAX**, **GEOMAX** und **TECHMAX**. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen unter: [www.maxwissen.de/heftbestellung](http://www.maxwissen.de/heftbestellung)