

# Fallen in der Raumzeit

Schwarze Löcher gehören zum festen Inventar der Science-Fiction-Literatur. Tatsächlich gibt es im Universum kaum einen extremeren Ort. Diese Massemonster verschlucken alles, was ihnen zu nahe kommt: Licht ebenso wie Gas, Staub und sogar ganze Sterne. Das klingt recht einfach. Doch die Natur von schwarzen Löchern ist vertrackt. **Maria Rodriguez**, Minerva-Gruppenleiterin am **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** in Golm, will das eine oder andere Rätsel der kosmischen Exoten lösen.

TEXT **FELICITAS MOKLER**

**L**ange Zeit, so schien es, existierten sie nur in den Köpfen der theoretischen Physiker – schwarze Löcher. Seit spätestens einem Jahr aber ist endgültig klar: Es gibt sie wirklich. Am 14. September 2015 versetzten Gravitationswellen die Raumzeit in den amerikanischen LIGO-Detektoren erstmals messbar in Schwingung.

Der Nachweis der von Albert Einstein (1879 bis 1955) 100 Jahre zuvor prophezeiten Kräuselungen der Raumzeit gilt zugleich als experimenteller Beweis für die physikalische Existenz schwarzer Löcher. Das erste gemessene Signal GW150914 rührte von zwei schwarzen Löchern mit jeweils 36 und 29 Sonnenmassen her, die einst in einer Art Doppelsternsystem einander umkreisten, bis sie schließlich zu einem Objekt von 62 Sonnenmassen mitein-

ander verschmolzen. Wenige Monate später registrierten die Forscher Gravitationswellen der Quelle GW151226 von einem ähnlichen System. Diese Ereignisse rüttelten gewaltig am Raumzeitgefüge. Und bestätigten auf eindrucksvolle Weise die Existenz der Massemonster. (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2016, Seite 78 ff.)

## EINSTEINS THEORIE LÖST DAS KLASSISCHE KONZEPT AB

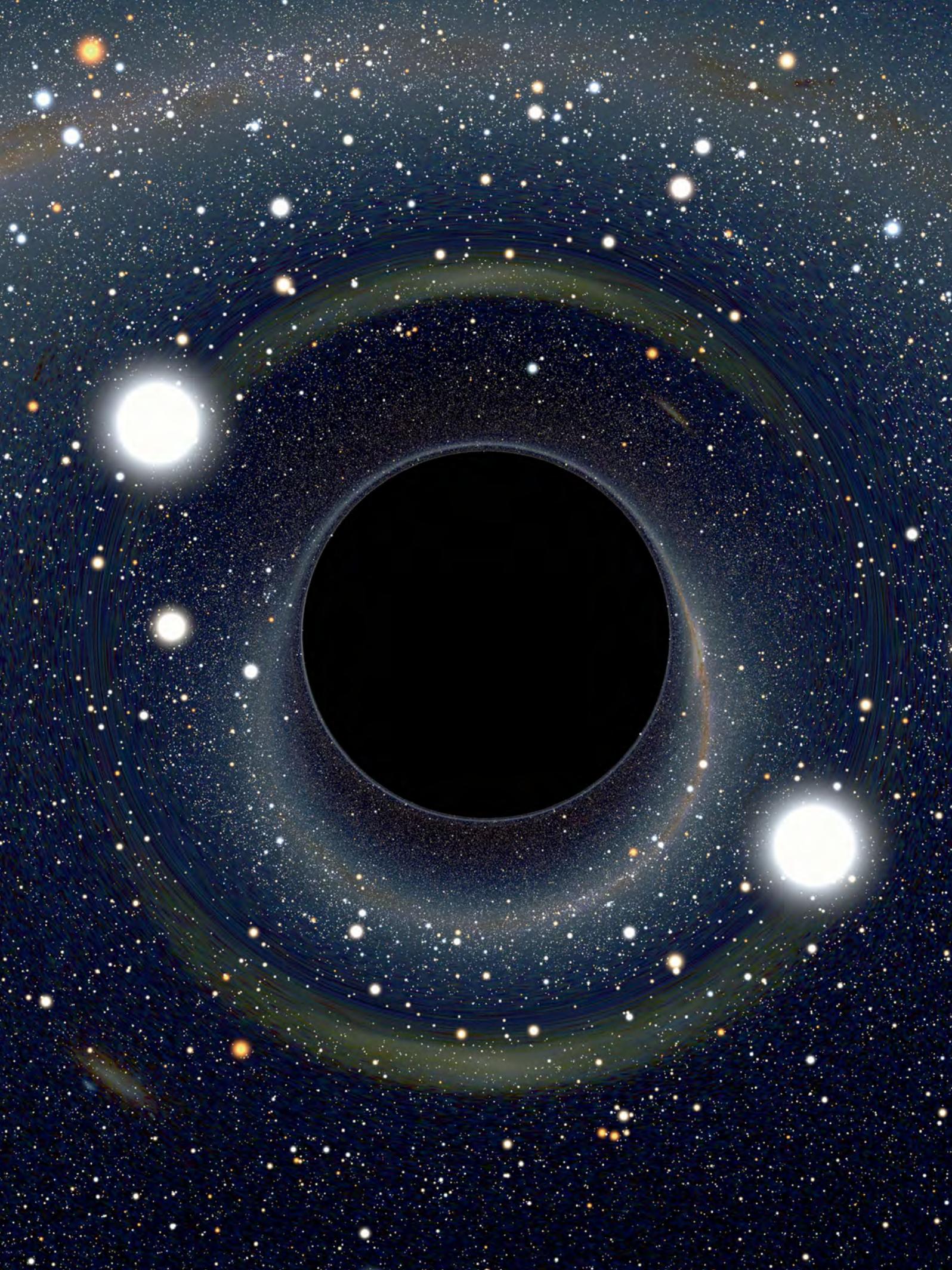
Doch schon Ende des 18. Jahrhunderts spekulierten die Naturforscher John Mitchell (1724 bis 1793) und Pierre Simon de Laplace (1749 bis 1827) über dunkle Sterne oder dunkle astrophysikalische Körper, deren Schwerkraft so stark sei, dass Licht ihnen nicht entkommen könne. Die Ideen der beiden Forscher bewegten sich noch im Rahmen der

newtonschen Gravitationstheorie und der Korpuskulartheorie des Lichts.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts revolutionierte Albert Einstein mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie unser Verständnis der Gravitation – und damit auch jenes von Materie, Raum und Zeit. Sein Konzept löst die klassische Vorstellung von Schwerkraft als unmittelbarer Wechselwirkung zwischen zwei Massen ab, welche sich durch den starren euklidischen Raum bewegen. Vielmehr sind der dreidimensionale Raum und die Zeit zu einer vierdimensionalen Raumzeit vereint und nun selbst verformbar und dynamisch. So krümmt eine Masse wie die Sonne die Raumzeit in ihrer Umgebung – je größer und vor allem kompakter eine Masse ist, umso stärker.

Eine zweite, kleinere Masse wie ein Planet folgt in seiner Bewegung dann dieser Krümmung. Ändert sich die lo-

Im Bann der Schwerkraft: Seit mehr als einem Jahrhundert beschäftigen schwarze Löcher die Astrophysiker. Direkt beobachtet wurde noch keines, aber nicht zuletzt die Entdeckung von Gravitationswellen zeigt, dass diese bizarren Gebilde wirklich existieren.



kale Krümmung, weil eine Masse beschleunigt den Raum durchquert, so pflanzt sich diese Änderung als Gravitationswelle mit Lichtgeschwindigkeit im Raumzeitgefüge fort.

Als mathematische Basis für die dynamische Raumzeit verwendet Einstein den riemannschen Raum. Den Feldgleichungen, die darin die Raumkrümmung durch Materie und umgekehrt die Wirkung der Krümmung auf Materie beschreiben, entspringen schwarze Löcher als natürliche Lösung für auf einen Punkt konzentrierte Materie. Die Gravitation ist dort unendlich groß, die Raumzeit unendlich stark gekrümmt: mathematisch eine Singularität.

„Physikalisch besitzen derlei Unendlichkeiten jedoch keine Aussagekraft“, sagt Maria Rodriguez. „Relevant ist vielmehr jener Abstand von der Punktmasse, ab dem die Gravitation so stark wird, dass ihr nichts mehr entweichen, sondern nur noch in das schwarze Loch hineinfallen kann“, so die Leiterin einer Minerva-Gruppe am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm.

Weder für Materie noch für Licht gibt es also ein Entkommen. Das macht es für Astronomen so schwierig, solche Objekte zu beobachten. Die Erklärung ist einfach: Auch um einen gewöhnlichen Himmelskörper wie etwa die Erde zu verlassen, benötigen Objekte eine von dessen Masse abhängige Mindest-Bewegungsenergie. Die Geschwindigkeit, die dazu etwa für Raketen nötig ist, heißt Fluchtgeschwindigkeit. Für ein schwarzes Loch entspricht diese der Lichtgeschwindigkeit.

### DIE SCHWERKRAFT GEWINNT SCHLIESSLICH DIE OBERHAND

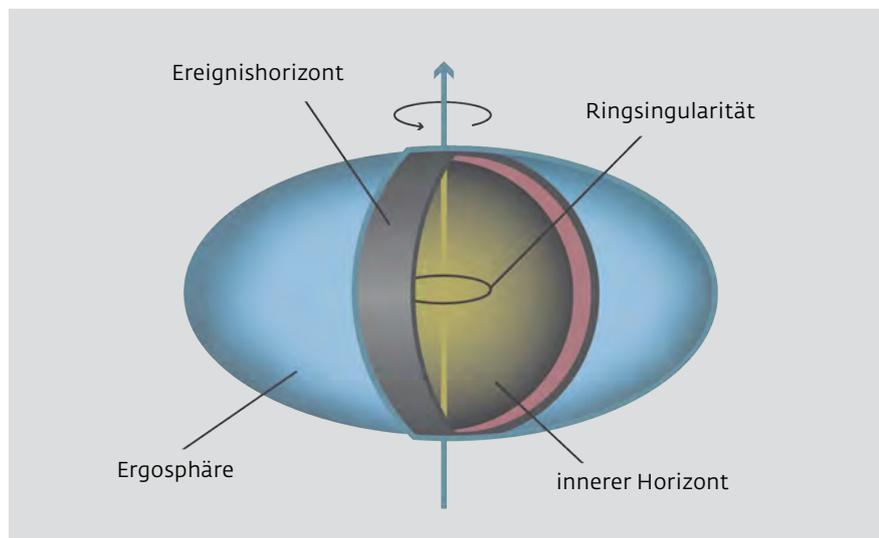
Wie sich die Raumzeit unter solchen Bedingungen verhält, beschrieb im Jahr 1916 erstmals der Astrophysiker Karl Schwarzschild (1873 bis 1916) in der nach ihm benannten Metrik. Der sogenannte Ereignishorizont, der das Innere des schwarzen Lochs von der Außenwelt abschirmt, ist durch den Schwarzschildradius definiert. Letzterer hängt von der Masse ab. „Für ge-

wöhnliche schwarze Löcher, die nicht rotieren und nicht elektrisch geladen sind, ist dieser eine perfekte Sphäre“, sagt Maria Rodriguez. Die Forscherin untersucht die Grenzflächen von schwarzen Löchern mit unterschiedlichen Eigenschaften.

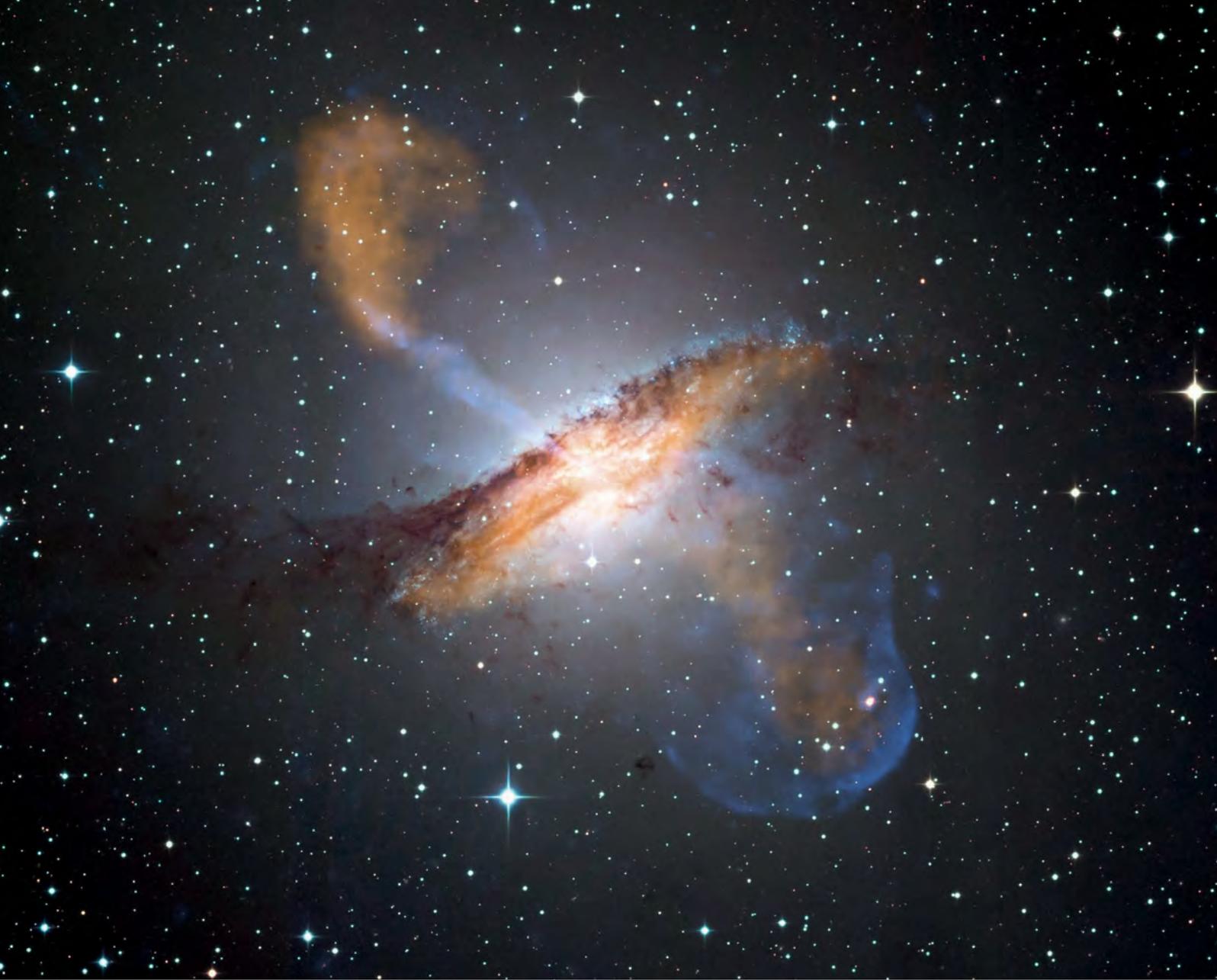
In der Natur dürften schwarze Löcher ohne Drehimpuls allerdings kaum vorkommen. Denn diese Objekte entstehen etwa, wenn besonders massereiche Sterne am Ende ihres Lebens ihren Vorrat an fusionsfähigem Material im Innern aufgebraucht haben. Dann sinkt dort die Temperatur, und thermischer und Strahlungsdruck reichen nicht mehr aus, um der Schwerkraft des Sterns entgegenzuwirken.

Das Sterninnere implodiert, dort werden die einst freien Elektronen in die positiv geladenen Atomkerne gedrückt. Die dabei freigesetzten Neutrinos transportieren bei einer solchen Supernova einen Großteil der Energie ab und schleudern die äußere Sternhülle ins All. Die Kernmaterie hingegen fällt unter der eigenen Schwerkraft immer weiter zusammen. Betrug die Anfangsmasse des Sterns mehr als acht Sonnenmassen, entsteht schließlich ein schwarzes Loch. Da Sterne gewöhnlich um die eigene Achse rotieren und der Drehimpuls erhalten bleibt, geben sie diesen an das schwarze Loch weiter.

Über die Geburt der besonders massereichen schwarzen Löcher von einigen Millionen bis zu einer Milliarde Sonnenmassen, wie sie vermutlich in den Zentren von Galaxien ruhen, rätseln die Astronomen noch. Möglicherweise formten sie sich aus der ersten Generation von extrem schweren Sternen, die – einmal zu einem schwarzen Loch geworden – rasch immer mehr Masse und damit auch mehr Drehimpuls aufgenommen haben. Es wird auch die Hypothese von sogenannten primordialen schwarzen Löchern diskutiert, wonach sich diese kosmischen Schwergewichte bereits kurz nach dem Urknall zusammen mit den ersten Galaxien gebildet haben. Auch spekulieren Astronomen



Klare Strukturen: So komplex die Physik ist, so einfach lässt sich der Aufbau erklären. Die Grafik zeigt ein rotierendes schwarzes Loch mit der Ringsingularität im Zentrum und dem inneren Horizont. Der Ereignishorizont ist so etwas wie die Oberfläche des schwarzen Lochs; was dahinter verschwindet, ist im wahrsten Sinne aus der Welt. Die Ergosphäre bezeichnet jenen Bereich, in dem jedes beliebige Objekt mitrotieren muss.



Motor im Zentrum: Centaurus A ist mit etwa 15 Millionen Lichtjahren Abstand die nächstgelegene Radiogalaxie, sendet aber auch intensive Röntgen- und Gammastrahlung aus. Die auf diesem Bild sichtbare Jetstruktur geht offenbar auf die Aktivität eines zentralen schwarzen Lochs mit ungefähr 55 Millionen Sonnenmassen zurück.

über die Existenz von mittelschweren schwarzen Löchern von 100 bis einer Million Sonnenmassen, die in den Zentren großer Kugelsternhaufen vorkommen könnten.

### TEILCHEN WERDEN HERAUSGESCHLEUDERT

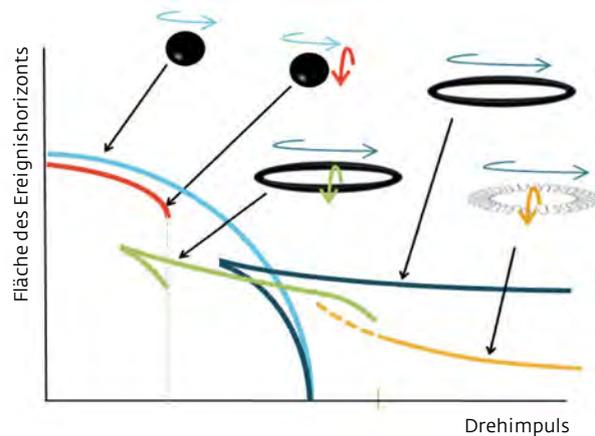
Rotiert ein schwarzes Loch, so verformt sich sein Ereignishorizont ein wenig. Vor allem aber drehen sich die Raumzeit seiner näheren Umgebung sowie die dort vorhandene Materie mit. Dieser Einflussbereich des schwarzen Lochs wird Ergosphäre genannt und hat die Form eines Ellipsoids. Materie, die einmal von außen in sie hineingeraten ist,

stürzt nicht unbedingt auf direktem Weg in die Raumzeitfalle, sondern rotiert zunächst mit dieser mit. Entkommen aber kann sie ihr dennoch nicht.

„Es sei denn, die Materie ist elektrisch geladen“, sagt Maria Rodriguez. Denn durch die mitrotierende geladene Materie bildet sich eine Magnetsphäre. Ein Teil der geladenen Teilchen wird entlang der Magnetfeldlinien abgelenkt. Je nach Vorzeichen der Ladung und Ausrichtung der Feldlinien fallen die Teilchen dann entweder schneller in das schwarze Loch hinein – oder werden entlang der Rotationsachse herausgeschleudert. „Bei rund 20 aktiven Galaxien oder Quasaren haben Astronomen inzwischen sehr

energiereiche Jets beobachtet. In deren Zentrum befindet sich sehr wahrscheinlich ein extrem massereiches, rasch rotierendes schwarzes Loch“, so die Max-Planck-Forscherin.

Um diese Phänomene richtig interpretieren zu können, versuchen die Forscher, das Verhalten rotierender schwarzer Löcher und die physikalischen Prozesse in ihrer nächsten Umgebung nach den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie zu berechnen. Analytisch ist ihnen das zunächst nur für sehr langsam rotierende schwarze Löcher gelungen. Maria Rodriguez interessiert sich aber für das Gegenstück: Objekte, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit um sich selbst drehen. >



Höhere Mathematik: Während ihrer Postdoc-Zeit am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI) hat Maria Rodriguez mögliche Flächenkonfigurationen von Ereignishorizonten schwarzer Löcher in mehr als drei Raumdimensionen berechnet. Das Diagramm zeigt analytische Lösungen für fünf Dimensionen. Ihre Formen hängen von Masse und Rotation (Drehimpuls) ab. Gezeigt sind die Projektionen der Konfigurationen von fünf auf zwei und drei Dimensionen.

Dazu löst sie die Gleichungen der Elektrodynamik und zugleich die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie auf der Grundlage ein und desselben Formalismus. „Man kann die Lösung entweder durch Probieren finden, oder man geht systematisch vor“, sagt Rodriguez. „Wir haben eine Methodik aus der Stringtheorie angewandt.“

Diese Theorie hat ihren Ursprung in den 1960er-Jahren. Damals entdeckten die Teilchenphysiker, dass sich die Bausteine (Nukleonen) eines Atomkerns ihrerseits aus den Quarks zusammensetzen. Mit der Stringtheorie versuchten die Wissenschaftler, die starke Wechselwirkung, welche die Quarks zu Protonen und Neutronen zusammenhält, mit der schwachen und der elektromagnetischen zu vereinen. Als geeigneter zur Beschreibung der starken Kraft erwies sich schließlich die Quantenchromodynamik.

Später griff man allerdings auf die Stringtheorie zurück, um auch noch die Gravitation mit den übrigen drei Grund-

kräften zu vereinen. Zusätzlich zu den vier Dimensionen der Raumzeit führt sie sechs weitere räumliche Dimensionen ein. „Das ist durchaus mit dem Konzept der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar. Denn diese schreibt die Anzahl der Raumdimensionen keineswegs vor. Die vier Dimensionen der Raumzeit bilden eine rein heuristische Grundlage“, sagt Maria Rodriguez.

### EINE AMEISE IM KABEL KENNT NUR EINE DIMENSION

Dass wir diese zusätzlichen Dimensionen – sollten sie wirklich existieren – nicht wahrnehmen, könnte daran liegen, dass diese entweder besonders winzig oder besonders groß sind. „Eine Ameise etwa, die durch ein Kabel krabbeln und ihre Welt als eindimensional erleben“, sagt Rodriguez. Als lange, dünne (biegsame) Röhre beschreiben lässt sich das Kabel allerdings nur mit zwei zusätzlichen Dimensionen.

Mit dieser Erweiterung lassen sich die unterschiedlichen Energieregimes, in denen die vier Grundkräfte wirksam sind, aber auch ihre verschiedenen Abstandsgesetze in einem Formalismus erfassen. Rodriguez' Modell zur Erzeugung von Jets bei rotierenden schwarzen Löchern ist unabhängig von Masse und Drehimpuls. Es lässt sich sowohl auf extrem massereiche kosmische Schwergewichte anwenden, wie sie vermutlich in allen Spiralgalaxien vorkommen, als auch auf ihre massearmen Gegenspieler, die bei einer Sternexplosion entstanden sind.

Den Berechnungen der Forscherin zufolge können sich die Jets in Form und Energieumsatz deutlich voneinander unterscheiden: So können sie etwa extrem stark gebündelt oder weit aufgefächert sein. „Wir müssen aber noch herausfinden, welche der Lösungen die Natur unter welchen Voraussetzungen bevorzugt“, sagt Maria Rodriguez. Darunter gebe es auch Fälle, die überhaupt keine Jets generieren.

Ein Beispiel hierfür ist etwa das Objekt im Herzen unserer Milchstraße. Seine Umgebung leuchtet im Radiolicht, energiereiche Jets lässt es jedoch vermissen. In jahrelanger Fleißarbeit haben Reinhard Genzel und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik die Orbits einzelner Sterne um die Radioquelle Sagittarius A\* im galaktischen Zentrum beobachtet.

Der Durchbruch gelang 2002, als die Astronomen mit Interferometern am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile beobachteten, wie sich der Stern S2 der Quelle Sagittarius A\* bis auf zwölf Millibogensekunden näherte. Das entspricht einer Entfernung von nur 17 Lichtstunden. Zum Vergleich: Von der Sonne bis zu Pluto braucht das Licht etwa fünf Stunden. Anhand früherer Aufnahmen haben unter anderem Genzel und seine Kollegen die extrem elliptische Umlaufbahn mit einer Dauer von 15,2 Jahren des Sterns S2 um die kompakte Radioquelle komplett rekonstruiert.

Mithilfe des 3. keplerschen Gesetzes schätzten die Forscher die Masse des zentralen Objekts auf ungefähr 3,7 Millionen Sonnenmassen. Auf ein solch enges Raumgebiet begrenzt, könnte es sich nur um ein schwarzes Loch handeln. Dank genauerer Messungen an weiteren Sternorbits gehen die Astronomen heute von etwa 4,5 Millionen Sonnenmassen aus.

Vielleicht könnten sich schwarze Löcher aber noch auf ganz andere Weise bemerkbar machen. Denn vielleicht ist die klassische Sichtweise, nach der diesen kompakten Objekten nur Informationen über sehr wenige Eigenschaften wie Masse und – gegebenenfalls – Drehimpuls und Ladung zu entlocken sind, unvollständig. Bereits Mitte der 1970er-Jahre schlug Stephen Hawking vor, dass schwarze Löcher eben doch eine bestimmte Form von Strahlung aussenden könnten, die nach ihm benannte Hawking-Strahlung. Der Theoretiker Jacob Bekenstein

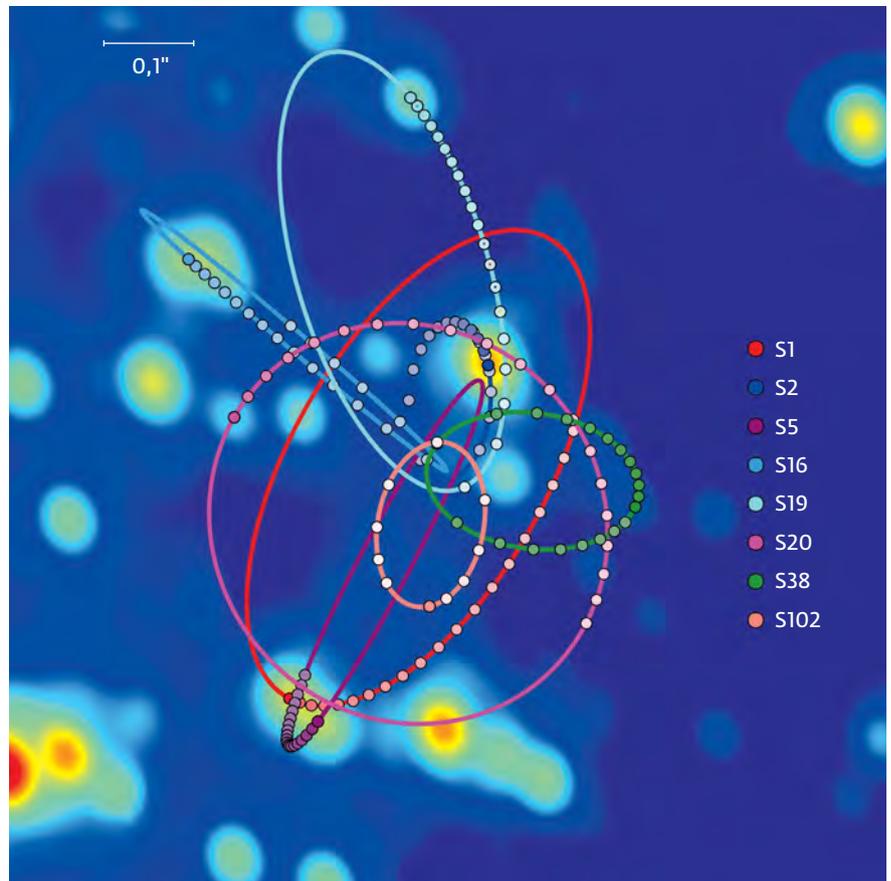
hatte kurz davor spekuliert, dass die Fläche des Ereignishorizonts ein Maß für die thermodynamische Entropie darstellen könnte.

### INFORMATION BLEIBT MÖGLICHERWEISE ERHALTEN

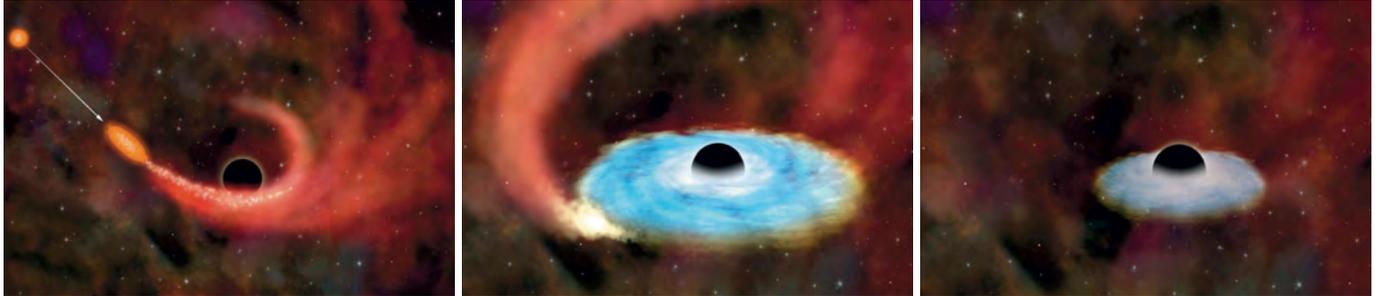
Die Entropie lässt sich als Maß für den Informationsgehalt eines Systems ansehen: Je höher die Entropie, umso mehr Information steckt in dem System. Bekenstein und Hawking berechneten erstmals die Entropie eines schwarzen Lochs. Aber diese passte gar nicht zu derjenigen des Vorläufer-

sterns, aus dem das Loch entstand. Bis heute ist nicht abschließend geklärt, was mit Entropie und Information in einem schwarzen Loch geschieht. Im Rahmen der Relativitätstheorie könnte Information im Loch vernichtet werden; dem widersprechen aber die Konzepte der Quantenphysik. Auch die Stringtheorie nimmt sich des Entropierätsels an und liefert Lösungen für einen endlichen Entropiegehalt. Damit würde die Information vom Ereignishorizont für einen außen stehenden Beobachter möglicherweise verfügbar.

In diesem Zusammenhang könnten auch frühere Arbeiten von Maria Rod-



Rund ums Zentrum: Im Herzen der Milchstraße lauert ein schwarzes Loch mit rund 4,5 Millionen Sonnenmassen. Die Gravitation des Objekts zwingt benachbarte Sterne auf mehr oder weniger elliptische Bahnen. Mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii haben Astronomen diese Bewegungen zwischen 1995 und 2014 genau vermessen.



Drama in drei Akten: Ein Stern wird durch die Gezeitenwirkung eines schwarzen Lochs zerrissen (links). Dieses verschlingt dann einen Teil der stellaren Trümmer und heizt sich dabei stark auf (Mitte). Das wiederum führt zu einem gigantischen Strahlungsausbruch, der mit der Zeit wieder abklingt (rechts).

riguez noch einmal interessant werden, die sie bereits während ihrer Postdoc-Phase am Golmer Max-Planck-Institut in der Arbeitsgruppe von Direktor Hermann Nicolai angefertigt hat. Damals entwickelte sie auf Basis der Stringtheorie einen ganzen Katalog von Lösungen für schwarze Löcher in höheren Dimensionen. In der uns vertrauten dreidimensionalen Darstellung sehen diese aus wie eine Kugel, ein donutartiger Ring, allein stehend oder eine Kugel umlaufend, ähnlich wie der Ringplanet Saturn; oder auch wie zwei Ringe, die ineinandergreifen. In den höheren Dimensionen hängen all diese Flächen für eine Lösung zusammen.

Sollten schwarze Löcher tatsächlich eine bestimmte Art der Strahlung aussenden, dürfte es jedoch extrem schwierig werden, diese einmal zu messen. Vielleicht werden sich aber schon bald bestimmte Effekte aus Rodriguez' Modellen für klassische schwarze Löcher anhand von Beobachtungen überprüfen lassen.

Derzeit entsteht ein Verbund aus über den ganzen Erdball verteilten Radioteleskopen, das sogenannte Event Horizon Telescope. Mit ihm sowie mit dem Very Long Baseline Array wollen die Astronomen das galaktische Zentrum mit deutlich besserer Auflösung also zuvor ablichten. Zudem wollen sie das Herz der aktiven Galaxie M 87, die einen energiereichen Jet besitzt, genauer unter die Lupe nehmen. Dort ruht vermutlich ein extrem schweres schwarzes Loch von 6,6 Milliarden Son-

nenmassen. So hoffen die Forscher herauszufinden, ob Jets tatsächlich in der Ergosphäre eines schwarzen Lochs entstehen oder doch in einer Materiescheibe weiter außerhalb.

Bestimmte Effekte der Quantengravitation dürften sich hingegen auf die Gravitationswellensignale von schwarzen Löchern auswirken. Jüngste Ab-

schätzungen haben ergeben, dass die Empfindlichkeit der LIGO-Detektoren während der kürzlich angelaufenen Messkampagne hoch genug sein dürfte, um diese entweder zu bestätigen oder auszuschließen. So wird die Gravitationswellenastronomie eines Tages wohl auch die Natur der schwarzen Löcher weiter erhellen. ◀

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- In einem schwarzen Loch ist die Gravitation unendlich groß, die Raumzeit unendlich stark gekrümmt. Diese mathematische Singularität besitzt physikalisch gesehen jedoch keine Aussagekraft.
- Entscheidend ist vielmehr jener Abstand von der Punktmasse, ab dem die Gravitation so stark wird, dass ihr nichts mehr entweichen kann. Diese Grenze wird durch den Ereignishorizont markiert. Für nicht rotierende und nicht elektrisch geladene schwarze Löcher ist dieser eine perfekte Sphäre.
- In der Natur aber kommen statische schwarze Löcher kaum vor. So versuchen die Forscher, das Verhalten rotierender schwarzer Löcher und die physikalischen Prozesse in ihrer nächsten Umgebung nach den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie zu berechnen.
- Analytisch sind solche Rechnungen nur für sehr langsam rotierende schwarze Löcher geglückt. Maria Rodriguez dagegen untersucht Objekte, die sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit um sich selbst drehen. Dafür wendet sie die Methodik der Stringtheorie an.

### GLOSSAR

**LIGO:** Das Laser Interferometer Gravitation Wave Observatory besteht aus zwei Detektoren in den US-Bundesstaaten Louisiana und Washington. Dort wurden am 14. September 2015 erstmals Gravitationswellen entdeckt. Obwohl die in ihrer jetzigen Ausbaustufe Advanced LIGO genannte Anlage in den USA steht, hatten Max-Planck-Forscher über Hardware, Computerprogramme und Modelle einen erheblichen Anteil an dem Fund.

**Riemannscher Raum:** Ein Objekt aus dem mathematischen Teilgebiet der riemannschen Geometrie mit besonderen Eigenschaften. So etwa sind die kürzesten Strecken zwischen unterschiedlichen Punkten nicht unbedingt Geradenstücke, sondern können gekrümmte Kurven sein. Und die Winkelsumme von Dreiecken kann größer oder kleiner als 180 Grad sein.



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



# Forschung voll abgedreht

Als DVD



oder auch auf [www.max-wissen.de/videos](http://www.max-wissen.de/videos)