

Massemonster im Blick: Das Bild ist der erste direkte visuelle Nachweis eines schwarzen Lochs. Dieses besonders massereiche Exemplar steckt im Zentrum der gewaltigen Galaxie Messier 87 und wurde mit dem Event Horizon Telescope (EHT) aufgenommen, einem Netzwerk von acht bodengebundenen, über den Globus verteilten Radioteleskopen.

Ein schwarzes Loch im Porträt

Schwarze Löcher verschlucken alles Licht und sind daher unsichtbar. Was plausibel klingt, ist in der Praxis zum Glück für die Astronomen doch ein wenig anders. Denn diese Objekte sind von leuchtenden Gasscheiben umgeben und heben sich daher vom dunklen Hintergrund ab, ähnlich wie eine schwarze Katze auf einem weißen Sofa. Und so ist es mit dem Event Horizon Telescope jetzt erstmals gelungen, ein schwarzes Loch zu fotografieren. An der Beobachtung beteiligt waren auch Forschende des **Max-Planck-Instituts für Radioastronomie** in Bonn und des **Instituts für Radioastronomie im Millimeterbereich (IRAM)** im französischen Grenoble.



TEXT **HELMUT HORNING**

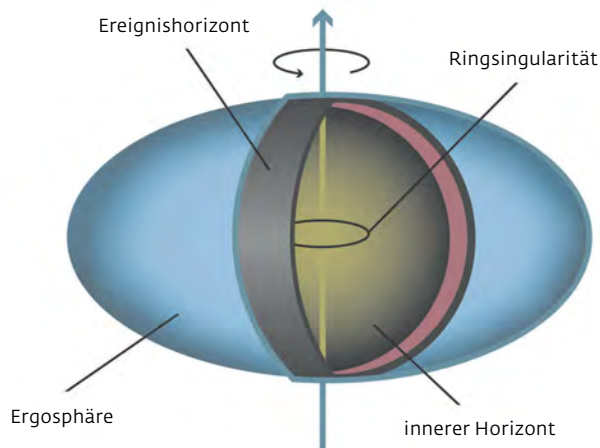
Im Frühjahr 2017 verlinkten die Wissenschaftler zum ersten Mal acht Teleskope auf einer Hälfte des Globus und bildeten so ein virtuelles Teleskop, dessen Öffnung nahezu dem Durchmesser der Erde entsprach. Very-Long-Baseline-Interferometrie (VLBI) heißt diese Technik, in der die Signale der Einzelantennen gleichsam überlagert werden. Diese Synchronisation geschieht mithilfe von hochpräzisen Atomuhren auf die milliardstel Sekunde genau. Dabei lässt

sich eine extreme Winkelauflösung von weniger als 20 Mikrobogensekunden erreichen. Hätten unsere Augen ein derartiges Leistungsvermögen, könnten wir die einzelnen Moleküle in unserer Hand sehen.

DIE MESSDATEN WERDEN IM SUPERCOMPUTER AUSGEWERTET

Zum Verbund dieses sogenannten Event Horizon Telescope (EHT) gehörten unter anderem der 30-Meter-Spiegel von

IRAM in Spanien sowie das APEX-Teleskop in Chile, an dem das Max-Planck-Institut für Radioastronomie beteiligt ist. Insgesamt haben die Teleskope allein bei den Beobachtungen im Jahr 2017 etwa vier Petabytes an Daten aufgenommen – eine solch große Menge, dass der Transport auf dem Postweg tatsächlich schneller und effektiver war als das Senden der Daten per Internet. Die Messdaten wurden am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in den USA sowie am Max-Planck-Institut



Links 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.

Rechte Seite Antenne fürs All: Die 30-Meter-Schüssel von IRAM ist das empfindlichste Einzelteleskop in dem weltumspannenden Verbund des Event Horizon Telescope.

für Radioastronomie mit Supercomputern, sogenannten Korrelatoren, kalibriert und ausgewertet.

„Die Ergebnisse geben uns zum ersten Mal einen klaren Blick auf ein supermassives schwarzes Loch, und sie markieren einen wichtigen Meilenstein für unser Verständnis der fundamentalen Prozesse, welche die Bildung und die Entwicklung von Galaxien im Universum bestimmen“, sagt Anton Zensus, Direktor am Bonner Max-Planck-Institut und Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats. Es sei bemerkenswert, dass in diesem Projekt astronomische Beobachtungen und theoretische Interpretation schneller als erwartet zum erhofften Resultat geführt hätten.

Nach den Worten von IRAM-Direktor Karl Schuster basierte der Erfolg auf einer „jahrzehntelangen europäischen Fachkompetenz“ in der Millimeterastronomie: „Schon in den 1990er-Jahren haben das Max-Planck-Institut für Radioastronomie und unser Institut mit seinen beiden Observatorien technisch und wissenschaftlich gezeigt, dass wir mit hochauflösenden Radiobeobach-

tungen eine einzigartige Methode besitzen, die unmittelbare Umgebung von supermassiven schwarzen Löchern zu analysieren.“

IRAM als eine von der Max-Planck-Gesellschaft mitfinanzierte Einrichtung nahm mit dem 30-Meter-Teleskop an der Kampagne aktiv teil. In 2800 Metern Höhe auf dem Berg Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada gelegen, ist es das empfindlichste Einzelteleskop des EHT-Verbundes. „Die Oberfläche unserer Antenne ist mit einer Genauigkeit justiert, die der Feinheit eines menschlichen Haares entspricht“, sagt der Astronom Pablo Torne.

IDEALE WETTERBEDINGUNGEN UND FUNKTIONIERENDE TECHNIK

An vier Tagen im April 2017 hatten Torne und seine IRAM-Kollegen ihr Teleskop im Gleichtakt mit den über den Globus verteilten anderen EHT-Stationen das erste Mal auf das Zentrum der Galaxie M 87 und ihr gigantisches schwarzes Loch gerichtet. „Wir hätten uns keine besseren Wetterbedingungen für die Jahreszeit wünschen können. Vor

allem aber hat die Technik am Observatorium von der hochpräzisen Atomuhr über die Empfangssysteme bis zu den Datenrekordern perfekt funktioniert“, sagt Torne. Insgesamt seien bei diesen Beobachtungen allein an der 30-Meter-Antenne mehr als 500 Terabytes an Daten aufgenommen worden.

Das Herz der außergewöhnlich massereichen Galaxie M 87 besitzt zwei spezielle Eigenschaften, die es zu einem geeigneten Kandidaten für das Projekt machen: Es ist zum einen dank seiner ungewöhnlichen Größe und zum anderen wegen seiner relativen Nähe zur Erde gut zu sehen und damit ein perfektes Studienobjekt für Wissenschaftler, die mit dem weltumspannenden Teleskopverbund nun endlich ein Instrument besitzen, um ein solch exotisches Objekt direkt ins Visier zu nehmen.

Die Regionen um supermassive schwarze Löcher unterliegen den extremsten Bedingungen, die wir im Weltall kennen. Schwarze Löcher sind faszinierende kosmische Objekte, die eine unglaubliche Gesamtmasse innerhalb eines winzigen Raumbereichs umfassen. Ihre Masse und damit ihre Anzie-



» Der Ereignishorizont selbst ist auf dem Bild nicht zu sehen, er ist kleiner und liegt innerhalb des dunklen Bereichs.

hungskraft sind so groß, dass selbst Licht ihnen nicht entkommen kann. Daher bleiben sie schwarz – und es ist unmöglich, sie direkt wahrzunehmen.

Wer diese kosmischen Schwarzkraftfallen tatsächlich sehen will, muss ihren „Schatten“ abbilden. Dieser entsteht durch die extrem starke Beugung des Lichts – und zwar kurz bevor es unwiderruflich im schwarzen Loch verschwindet. Äußerst präzise Radio- beobachtungen im Bereich von Millimeterwellen erlauben es den Astronomen, ungestört von dichten Staub- und Gaswolken bis an die Ränder von schwarzen Löchern vorzudringen.

Das jetzt veröffentlichte Bild wurde bei 1,3 Millimeter Wellenlänge (entsprechend einer Frequenz von 230 Gigahertz) gewonnen und zeigt klar eine ringförmige Struktur mit einer dunklen Zentralregion – eben den Schatten des schwarzen Lochs. Um dieses sehr

massereiche und kompakte Objekt bewegt sich mit hohen Geschwindigkeiten ein heißes Gasplasma. Die ringförmige Struktur auf dem Bild ist nichts anderes als die stark erhitzte Materie um das Massemonster, deren Licht von diesem wie durch eine Linse umgelenkt und verstärkt wird. Nach einer rund 55 Millionen Lichtjahre langen Reise traf es auf die Teleskope des EHT-Verbundes. Die unterschiedliche Helligkeit des Rings liegt an einem relativistischen Effekt: Da das Loch rotiert, erscheint Licht, das auf uns zukommt, heller als solches, das sich von uns entfernt. Der Ereignishorizont selbst ist auf dem Bild nicht zu sehen, er ist kleiner und liegt innerhalb des dunklen Bereichs.

Der Ursprungsort, M 87, ist eine elliptische Riesengalaxie nahe dem Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens. Der französische Astronom Charles

Messier trug im Jahr 1781 das Objekt unter der Nummer 87 in seinen Katalog ein. Die Galaxie ist auch als starke Radioquelle namens Virgo A bekannt und sehr aktiv. Aus ihrem Kern schießt ein mindestens 5000 Lichtjahre langer „Jet“ – Materie, die in der Akkretions- scheinbe des schwarzen Lochs im Zentrum beschleunigt wird und in Form eines stark gebündelten Strahls senkrecht zu dieser Scheibe mit hoher Geschwindigkeit ausströmt.

EINBLICK IN DIE ZENTRALE MASCHINERIE EINER GALAXIE

Der Schatten verrät den Forschenden eine Menge über die Natur der zentralen Maschinerie und ermöglicht es ihnen, die enorme Gesamtmasse des schwarzen Lochs von M 87 exakt zu bestimmen. Sie liegt bei 6,5 Milliarden Sonnenmassen. Dieser Wert deckt sich gut mit jenem,



Ein Gigant am Himmel:
Die Riesengalaxie Messier 87 war Ziel der Beobachtungskampagne des Event Horizon Telescope. Der in diesem optischen Bild des Galaxienkerns sichtbare Jet geht offenbar vom supermassiven schwarzen Loch im Zentrum des elliptischen Sternsystems aus.

Für Anton Zensus bedeutet der Erfolg eine Zäsur in der Astronomie. „In Zukunft werden sich Forscher weit über unser Arbeitsgebiet hinaus klar an eine Zeit vor und nach dieser Entdeckung erinnern“, sagt der Max-Planck-Forscher. Seiner Meinung nach werden die Astronomen die galaktischen Zentren besser verstehen und ein vollständiges Bild von Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien gewinnen. Zudem werde man Einsteins allgemeine Relativitätstheorie auf Herz und Nieren testen können. „Denn schwarze Löcher sind ein ideales Labor für Messungen unter starker Schwerkraft.“ ◀

der aus anderen zuvor gewonnenen Beobachtungen abgeleitet wurde.

„Über viele Jahrzehnte konnten wir schwarze Löcher nur indirekt nachweisen“, sagt Michael Kramer, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie. Dann haben Detektoren vor ein paar Jahren zum ersten Mal Gravitationswellen gemessen und die Auswirkungen von verschmelzenden schwarzen Löchern auf die Raumzeit gleichsam hörbar gemacht. „Nun können wir sie endlich auch sehen und haben die Möglichkeit, diese exotischen Objekte und ihre extreme Raumzeitkrümmung mit all ihrer Faszination auf einzigartige Weise zu untersuchen“, so der Wissenschaftler, einer der Hauptverantwortlichen von *BlackHoleCam*. Dieses Projekt ist Teil des Event Horizon Telescope, dem insgesamt rund 200 Forschende angehören.

DIE BEOBACHTUNG BEDEUTET EINE ZÄSUR IN DER ASTRONOMIE

Die Beobachtungen gehen weiter. Seit Ende 2018 ist auch NOEMA in den französischen Alpen Teil des weltweiten Verbundes. Mit seinen zwölf hochempfindlichen Antennen wird dieses zweite IRAM-Observatorium das leistungsfähigste des EHT auf der nördlichen He-

mispäre sein. „Dank NOEMA werden wir in einen neuen Empfindlichkeitsbereich vorstoßen und damit noch mehr faszinierende Erkenntnisse gewinnen“, sagt IRAM-Direktor Karl Schuster.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Zum ersten Mal ist es Astronomen gelungen, ein schwarzes Loch abzubilden. Es steckt im Zentrum der rund 55 Millionen Lichtjahre entfernten elliptischen Riesengalaxie M 87.
- Für die Beobachtungen im April 2017 wurden mehrere über die Erde verteilte Radioantennen zu einem virtuellen Teleskop zusammengeschaltet.
- Dabei kam die Technik der Very-Long-Baseline-Interferometrie (VLBI) zum Einsatz, bei der die Signale der Einzelantennen gleichsam überlagert werden.
- Zukünftig sollen Bilder von schwarzen Löchern dabei helfen, galaktische Zentren besser zu verstehen, und Einblicke in Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien vermitteln.

GLOSSAR

Akkretionsscheibe: Eine um ein zentrales Objekt – etwa ein schwarzes Loch – rotierende Scheibe, die Materie in Richtung des Zentrums transportiert (akkretiert). Sie kann aus atomarem Gas, aus Plasma (ionisiertes Gas) oder interstellarem Staub bestehen. Zum Zentrum hin steigen Rotationsgeschwindigkeit und Temperatur stark an.

Bogensekunde: Das Leistungsvermögen von Teleskopen wird oftmals in Bogensekunden ausgedrückt als dem Winkel, der gerade noch sichtbar gemacht werden kann. So entspricht eine Bogensekunde dem 3600. Teil eines Grads. Eine Mikrobogensekunde wiederum ist der millionste Teil einer Bogensekunde.

Charles Messier: Der französische Astronom (1730 bis 1817) arbeitete zunächst bei der Marine und später im Bureau des Longitudes. Er entdeckte 20 Kometen und erstellte einen Katalog von 103 astronomischen Objekten wie Gasnebel, Sternhaufen und Galaxien.

„Eine verblüffende Übereinstimmung mit der Theorie“

Max-Planck-Direktor Anton Zensus zur erstmaligen Beobachtung des Schattens eines schwarzen Lochs

Was paradox klingt, ist doch Realität: Schwarze Löcher haben einen Schatten! In der Galaxie Messier 87 konnten Astronomen mit dem Event Horizon Telescope (EHT) jetzt ein solches Phänomen erstmals beobachten. In der ersten Reihe mit dabei war das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Dort leitet Anton Zensus die Abteilung „Very-Long-Baseline Interferometry“. Sie befasst sich mit einer Technik, welche die Entdeckung überhaupt erst ermöglicht hat. Wir sprachen mit Anton Zensus, Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats, wie es zur erfolgreichen Beobachtung kam und wie er die Ergebnisse einschätzt.

Herr Zensus, wie lange läuft das Projekt Event Horizon Telescope schon?

Anton Zensus: Offiziell hat es vor zwei Jahren begonnen. Aber die Vorbereitungen dafür laufen seit einer Dekade. Und wenn man die methodischen Vorarbeiten und die Pionierarbeiten dazuzählt, dann sind es sogar 20 Jahre. Wir haben in dieser Zeit die Qualität unserer Messungen grundlegend verbessert und damit auch schon wichtige wissenschaftliche Fragen zu aktiven Galaxien wie M 87 – etwa zur Natur der gigantischen Materiejets aus deren Zentralbereichen – untersucht. So gesehen, haben wir jetzt den Höhepunkt einer langen Entwicklung erreicht.

Sie sagten, dass das EHT erst seit zwei Jahren beobachtet. Hat Sie der Erfolg nach dieser relativ kurzen Zeit überrascht?

Ja, durchaus! Erstaunlich war aber auch, dass so vieles gleich auf Anhieb geklappt hat. Schließlich besteht das Event Horizon Telescope aus einem Verbund von acht unterschiedlichen Teleskopen. Eines dieser Teleskope, ALMA genannt, befindet sich in 5000 Metern Höhe in der chilenischen Atacama-Wüste und umfasst 66 Einzelanten-

nen. Um diese Anlage in das EHT integrieren zu können, mussten wir alle Einzelantennen per Software zusammenschalten. Dieses „Phasing“ war für uns eine enorme technische Herausforderung und ganz essenziell für das EHT. Zudem haben uns die Wetterbedingungen in die Hände gespielt, die waren gleich zu Beginn recht gut.

Wie muss man sich eine Beobachtung mit acht Teleskopen vorstellen?

Das Stichwort heißt Interferometrie mit sehr langen Basislängen, im Englischen Very-Long-Baseline Interferometry, kurz VLBI, genannt. Dabei richten wir mehrere Radioteleskope, die weit voneinander entfernt stehen, gleichzeitig auf ein und das-

» Wir haben jetzt den Höhepunkt einer langen Entwicklung erreicht.



Anton Zensus, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie und Vorsitzender des EHT-Kollaborationsrats.

selbe Himmelsobjekt. Die aufgefangenen Signale werden in einem Spezialcomputer – dem Korrelator – zusammengeführt. Auf diese Weise ergibt sich ein virtuelles Teleskop. Dieses liefert eine Bildschärfe, welche der einer einzigen Antenne mit dem Durchmesser des Abstands der voneinander entferntesten Antennen entspricht, im Fall des Event Horizon Telescope sind das etwa 8000 Kilometer. Stellen Sie sich vor: Wären Ihre Augen so scharf wie das EHT, könnten Sie theoretisch von Bonn aus eine Zeitung in New York lesen. Allerdings sieht das EHT kein optisches Licht, sondern Radiostrahlung mit Wellenlängen von etwas mehr als einem Millimeter.

Wie ist Ihr Institut am Event Horizon Telescope beteiligt?

Zum EHT gehört das 12-Meter-Teleskop APEX, das unser Max-Planck-Institut für Radioastronomie zusammen mit der Europäischen Südsternwarte und dem schwedischen Onsala Space Observatory betreibt. Es befindet sich nahe am ALMA-Standort. Die Max-Planck-Gesellschaft ist auch mit der IRAM-30-Meter-Antenne auf dem Pico Veleta in der spanischen Sierra Nevada und zukünftig mit dem NOEMA-Teleskop bei Grenoble beteiligt. Insgesamt arbeiten beim EHT dreizehn Partnerorganisationen aus der ganzen Welt. Schließlich betreibt unser Institut einen Supercomputer, der die Daten kalibriert und auswertet. Tatsächlich fallen gewaltige Datenmengen an, jedes der EHT-Einzelteleskope liefert täglich etwa 350 Terabytes.

Sie wussten, wonach Sie suchen – nach dem Schatten eines schwarzen Lochs. Spielten theoretische Überlegungen eine große Rolle?

Ja, den theoretischen Hintergrund liefert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie von 1915. Ebenfalls vor ungefähr hundert Jahren haben Astronomen zum ersten Mal Jets beobachtet. Das sind Gasströme, die aus den Zentren aktiver Galaxien herausgeschossen und bei enorm hohen Energien erzeugt werden müssen. Seit den 1970er-Jahren vermuten wir, dass dahinter supermassereiche schwarze Löcher stecken. Die

Relativitätstheorie sagt voraus, dass ein massereiches Objekt Licht ablenken kann. Der englische Astronom Arthur Eddington hat dieses Phänomen während einer totalen Sonnenfinsternis gemessen, als er eine kleine Verschiebung der Sternpositionen nahe der Sonnenscheibe beobachtete. Das war übrigens am 29. Mai 1919, also vor hundert Jahren. So schließt sich der Kreis.

Das schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße ist wesentlich näher als jenes in der Galaxie Messier 87. Warum war das EHT trotzdem bei M 87 erfolgreich?

Unsere Milchstraße zielt sich eben, die letzten Geheimnisse preiszugeben (*lacht*). Aber Spaß beiseite, es gibt natürlich handfeste Gründe: Zum einen ist das Herz unserer Milchstraße in einem dichten Nebel aus geladenen Teilchen verborgen. Das führt zu einem Flimmern der Radiostrahlung und damit zu unscharfen Bildern des Milchstraßenzentrums. Aber ich bin zuversichtlich, dass wir dieses Problem auch noch lösen können. Andererseits ist die Galaxie M 87 zwar ungefähr 2000-mal weiter weg, aber das schwarze Loch in ihrem Zentrum auch 1000-mal massereicher als jenes in unserer Milchstraße. Die größere Masse macht die größere Entfernung wett, und der Schatten des schwarzen Lochs in M 87 erscheint uns daher noch etwa halb so groß wie derjenige aus der Schwerkraftfalle in unserer Milchstraße.

Was hat es mit dem Schatten eines schwarzen Lochs auf sich?

Ein schwarzes Loch lenkt das Licht noch weit mehr ab als unsere Sonne, und die Relativitätstheorie sagt voraus, dass man einen Strahlungsring um einen dunklen Flecken beobachten sollte. Eben dort, wo sich das schwarze Loch befindet. Manche nennen diesen dunklen Flecken – etwas salopp – den Schatten des schwarzen Lochs.

Aber woher kommt das Licht, schwarze Löcher sind doch schwarz?

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie besitzen schwarze Löcher einen sogenannten Ereignishorizont. Dieser beschreibt

jene Region, innerhalb derer nichts mehr dem schwarzen Loch entkommen kann. Deshalb sollten uns der Ereignishorizont, aber auch der Bereich innerhalb schwarz erscheinen. Der Theorie nach befindet sich, angezogen von der gewaltigen Masse, außerhalb des Ereignishorizonts eine gewaltige Menge an Gas, das in einer strudelartigen Scheibenstruktur mit ungeheurer hohen Geschwindigkeiten herumwirbelt. Dabei heizt sich das Gas auf und beginnt zu leuchten. Zudem setzen relativistische Teilchen – solche, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit in einem Magnetfeld bewegen – Synchrotronstrahlung frei. Um ein schwarzes Loch herum „leuchtet“ es also, während das Loch selbst, wie der Name sagt, schwarz erscheint. Diese Schwärze haben wir beobachtet.

Was haben Sie aus dem Schatten herausgelesen?

Wir waren, ehrlich gesagt, verblüfft, wie gut der beobachtete dunkle Fleck mit der aus unseren Computersimulationen vorhergesagten Struktur übereinstimmt. Aus dem Schatten selbst lassen sich etwa die Masse, die Rotation und das Magnetfeld des schwarzen Lochs ableiten. Dazu wurden am Computer 60000 verschiedene Simulationen von schwarzen Löchern vorgenommen und mit den EHT-Ergebnissen verglichen.

Wie wird diese erfolgreiche Beobachtung die Astronomie weiterbringen?

Schwarze Löcher sind ein ideales Labor für Messungen unter starker Schwerkraft. Daher stehen wir am Anfang einer Phase, in der viele neue Erkenntnisse auf uns warten. So werden wir alternative Erklärungen für schwarze Löcher – etwa Bosonen- oder Gravasterne – bald sicher ausschließen können. Wir werden die galaktischen Zentren besser verstehen und ein vollständiges Bild von Entstehung und Entwicklung aktiver Galaxien gewinnen. Und wir werden Pulsare in der Umgebung des schwarzen Lochs in unserer Milchstraße beobachten und damit die allgemeine Relativitätstheorie auf Herz und Nieren testen können.

Das Interview führte Helmut Hornung.

Das Geheimnis der dunklen Körper

Schwarze Löcher bestehen nicht aus Materie, obwohl sie eine große Masse besitzen. Daher ließen sie sich bis vor Kurzem auch nicht direkt beobachten, sondern nur über die Wirkung ihrer Schwerkraft auf die Umgebung: Sie krümmen Raum und Zeit und besitzen eine geradezu unwiderstehliche Anziehung. Mit dem Event Horizon Telescope wurde nun erstmals der Schatten eines schwarzen Lochs aufgespürt. Kaum zu glauben, dass die Idee hinter solchen exotischen Objekten schon mehr als 230 Jahre alt ist.

TEXT HELMUT HORNUNG

Die Wiege der schwarzen Löcher steht im beschaulichen Städtchen Thornhill in der englischen Grafschaft Yorkshire. Dort, neben der mittelalterlichen Kirche, lebte im 18. Jahrhundert John Michell. 26 Jahre lang war er hier Pfarrer und – wie man auf der Inschrift seines Denkmals in der Kirche lesen kann – auch als Gelehrter hoch angesehen. Tatsächlich hatte Michell in Cambridge nicht nur Theologie, Hebräisch und Griechisch studiert, sondern sich auch den Naturwissenschaften gewidmet.

Sein Hauptinteresse galt der Geologie. So behauptete er in einer Abhandlung, die nach dem Erdbeben von Lissabon im Jahr 1755 erschien, dass es unterirdische Wellen gebe, die ein solches Erdbeben verbreiten. Diese Theorie erregte in der wissenschaftlichen Welt einiges Aufsehen, und so wurde John Michell nicht zuletzt deswegen in die Royal Society in London aufgenommen.

Vor dieser renommierten Gesellschaft hielt er im Jahr 1783 einen Vortrag über die Schwerkraft von Sternen. Darin schilderte er in einem Gedankenexperiment, dass das Licht bei genü-

Kosmischer Strudel: Das schwarze Loch Cygnus X-1 verschlingt Materie eines benachbarten blauen Riesensterns und sendet dabei Röntgenstrahlung aus.

gend großer Gravitation die Oberfläche eines sehr massereichen Sterns nicht verlassen würde. Und er folgerte: „Wenn ein solches Objekt in der Natur wirklich existieren sollte, könnte uns sein Licht niemals erreichen.“

Ein gutes Jahrzehnt nach John Michell griff ein anderer Wissenschaftler das Thema auf: Der französische Mathematiker, Physiker und Astronom Pierre-Simon de Laplace beschrieb in



Links Höhere Mathematik: Karl Schwarzschild berechnete 1916 – auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie – die Größe und das Verhalten eines nicht rotierenden und nicht elektrisch geladenen statischen schwarzen Lochs.

Rechts Gedankenspiele: Der französische Mathematiker, Physiker und Astronom Pierre-Simon de Laplace beschrieb im Jahr 1796 die Idee schwerer Sterne, von denen Licht nicht entkommen könne.

seinem 1796 erschienenen Werk *Exposition du Système du Monde* die Idee schwerer Sterne, von denen Licht nicht entkommen könne; dieses Licht bestand nach der allgemein akzeptierten Theorie von Isaac Newton aus Korpuskeln, kleinsten Teilchen. Laplace nannte ein solches Objekt *corps obscur*, dunkler Körper.

Die physikalischen Gedankenspiele von John Michell und Pierre-Simon de Laplace fanden allerdings kaum Widerhall und gerieten schnell in Vergessenheit. Erst Albert Einstein ebnete mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie diesen „dunklen Körpern“ den Weg in die Wissenschaft – ohne es eigentlich zu wollen. Zwar ließ sich aus seinen im Jahr 1915 veröffentlichten Gleichungen die Existenz punktförmiger Singularitäten herleiten, in denen Materie und Strahlung aus unserer Welt einfach verschwinden.

Doch im Jahr 1939 veröffentlichte Einstein in der Zeitschrift *ANNALS OF MATHEMATICS* einen Artikel, mit dem er beweisen wollte, dass solche schwarzen Löcher unmöglich seien. Dabei hatte der Astronom Karl Schwarzschild schon 1916 – auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie – die Größe und das Verhalten eines nicht rotierenden und nicht elektrisch geladenen statischen schwarzen Lochs berechnet. Nach ihm ist der von der Masse eines solchen Ob-

jekts abhängige Radius benannt, innerhalb dessen nichts mehr nach außen dringen kann. Für die Erde würde dieser Radius etwa einen Zentimeter betragen, man müsste sie also auf die Größe einer Kirsche zusammendrücken.

EXAKTE LÖSUNGEN FÜR EINSTEINS FELDGLEICHUNGEN

Schwarzschild hatte in seinem kurzen Leben eine steile Karriere gemacht. Im Jahr 1873 als ältestes von sechs Kindern einer deutsch-jüdischen Familie in Frankfurt geboren, zeigte sich schon früh sein Talent. Als 16-Jähriger veröffentlichte er in einer renommierten Zeitschrift zwei Arbeiten zur Bahnbestimmung von Planeten und Doppelsternen. Später führte ihn seine astronomische Laufbahn über München, Wien und Göttingen nach Potsdam, wo er 1909 Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums wurde. Ein paar Jahre später, mitten im Ersten Weltkrieg – Karl Schwarzschild war Artillerie-Leutnant an der Ostfront in Russland –, fand er die exakten Lösungen für Einsteins Feldgleichungen. Er starb am 11. Mai 1916 an einer Autoimmunerkrankung der Haut.

Das Thema schwarze Löcher fand aber erst einmal nicht den Weg in die Wissenschaft. Überhaupt nahm das Interesse an dem Einstein'schen Gedan-

kengebäude nach dem anfänglichen Hype immer mehr ab. Diese Phase dauerte ungefähr von Mitte der 1920er- bis Mitte der 1950er-Jahre an. Dann erfolgte das, was der Physiker Clifford Will als „Renaissance der allgemeinen Relativitätstheorie“ bezeichnete.

Nun wurde diese wichtig für die Beschreibung von Objekten, mit denen sich zunächst nur die Theoretiker beschäftigten: weiße Zwerge etwa oder Neutronensterne, in denen die Materie in ganz extremen Zuständen vorliegt. Deren unerwartete Eigenschaften ließen sich mithilfe von neuen, der Theorie abgewonnenen Konzepten erklären. So rückten auch die schwarzen Löcher in den Fokus der Aufmerksamkeit. Und Wissenschaftler, die sich mit ihnen beschäftigten, avancierten zu Stars – wie der im Jahr 2018 gestorbene englische Physiker Stephen Hawking.

Anfang der 1970er-Jahre brach mit *Uhuru* eine neue Ära der beobachtenden Astronomie an. Denn der Satellit musterte das Weltall im Bereich der extrem kurzwelligen Röntgenstrahlung. *Uhuru* entdeckte Hunderte von Quellen, meist Neutronensterne. Aber darunter war auch ein besonderes Objekt im Sternbild Schwan. Es erhielt die Bezeichnung Cygnus X-1. Dahinter, so fanden die Forscher heraus, steckt ein blau leuchtender Riesenstern von etwa 30 Sonnenmassen. Ihn umläuft ein un-

» Die Astronomen schlossen, dass in einem Raumbereich von der Größe unseres Planetensystems rund 4,5 Millionen Sonnenmassen konzentriert sind.

sichtbares Objekt von rund 15 Sonnenmassen – offenbar ein schwarzes Loch.

So lässt sich auch die empfangene Röntgenstrahlung erklären: Die Schwerkraft des schwarzen Lochs zieht die Materie des Hauptsterns an. Diese sammelt sich in einer sogenannten Akkretionsscheibe um das Massemonster, strudelt mit unvorstellbar hoher Geschwindigkeit um dieses herum, erhitzt sich aufgrund der Reibung auf einige Millionen Grad – und sendet Röntgenstrahlung aus, bevor sie in dem Raumzeit-Schlund verschwindet.

Cygnus X-1 ist bei Weitem nicht das einzige schwarze Loch, das die Astronomen indirekt nachgewiesen haben. Bis heute kennen sie eine ganze Reihe mit 4 bis 16 Sonnenmassen. Aber es gibt noch ein deutlich schwergewichtigeres. Es sitzt im rund 26 000 Lichtjahre entfernten Herzen der Milchstraße und wurde Ende der 1990er-Jahre aufgespürt. Einer Gruppe um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik gelang im Jahr 2002 eine sensationelle Entdeckung: Am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) beobachteten die Wissenschaftler einen Stern, der sich dem galaktischen Zentrum bis auf eine Entfernung von nur 17 Lichtstunden (gut 18 Milliarden Kilometer) angenähert hatte.

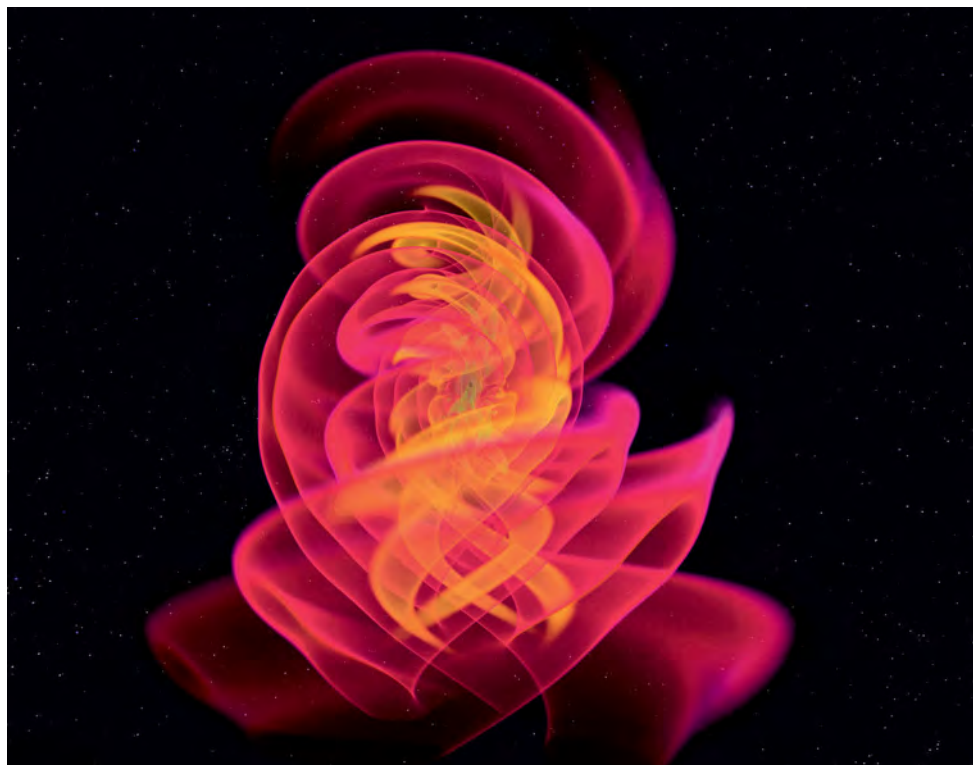
In den Monaten und Jahren darauf konnten sie die Bahnbewegung dieses S2 genannten Sterns verfolgen. Er umläuft das Zentrum der Galaxis (Sagittarius A*) mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 5000 Kilometern pro Sekunde einmal in 15,2 Jahren. Aus der Bewegung von S2 und anderen Sternen

schlossen die Astronomen, dass in einem Raumbereich von der Größe unseres Planetensystems rund 4,5 Millionen Sonnenmassen konzentriert sind. Für eine derartige Dichte gibt es praktisch nur eine plausible Erklärung: ein gigantisches schwarzes Loch.

Unsere Milchstraße ist keine Ausnahme: Die Wissenschaftler glauben, dass in den Zentren der meisten Galaxien solche Massemonster lauern – manche noch viel gewaltiger als das von Sagittarius A*. So etwa steckt in der Riesengalaxie Messier 87 ein schwarzes Loch von ungefähr 6,5 Milliarden Sonnenmassen! Auch dieses rund 55 Millionen Lichtjahre entfernte Sternsystem stand – ebenso wie Sagittarius A* – auf dem Beobachtungsprogramm des Event Horizon Telescope. Und tatsächlich

wurden die Astronomen in der elliptischen Riesengalaxie M 87 fündig: Die am 10. April 2019 veröffentlichte Beobachtung des „Schattens“ gilt als erster direkter Nachweis einer galaktischen Schwerkraftfalle.

Schwarze Löcher machten aber bereits ein paar Jahre zuvor von sich reden: Im September 2015 gingen den Forschern die von Einstein vorausgesagten Gravitationswellen ins Netz; Quelle waren zwei verschmelzende Löcher mit 36 und 29 Sonnenmassen. Die gut 230 Jahre alte Geschichte der schwarzen Löcher ist also noch lange nicht zu Ende. Im Gegenteil: Mit diesen Beobachtungen beginnt eine neue Ära der Astronomie, die Licht ins dunkle Universum bringen soll – und auch die rätselhaften Massemonster erhellen wird. ◀



Erschütterungen der Raumzeit: Im Jahr 2015 haben Astronomen zum ersten Mal Gravitationswellen aufgefangen – hier in einer numerisch-relativistischen Simulation. Tief im All waren zwei schwarze Löcher miteinander verschmolzen.