

SCHWARZE LÖCHER

Schwerkraftmonster
im Universum



Kollisionen

Bilder aus dem Strudel
der Raumzeit

Galaxienentwicklung

Giganten
im All

Modellierung

Feuertaufe fürs
Äquivalenzprinzip



Antje Findeklee
E-Mail: findeklee@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
Giganten, Gravitationsmonster, supermassereich – beim Thema Schwarze Löcher purzeln die Superlative nur so daher. Durchaus zu Recht: Nur wenige andere astronomische Objekte können mit ähnlichen Rekordphänomenen aufwarten, und sicher noch weniger faszinieren die Menschen so sehr wie diese geheimnisvollen hungrigen Schlunde im All, denen nicht einmal Licht mehr entkommen kann. Der schaurige Ruf weckt daher auch bei so manchen die (unbegründete) Furcht, Schwarze Löcher im Labormaßstab könnten zur Gefahr werden.

In unserem Kompakt geben wir Ihnen eine Einführung, was genau sich hinter Schwarzen Löchern verbirgt, stellen Ihnen ein paar besonders rekordverdächtige Exemplare vor, erklären, was mit einem Astronauten passiert, sollte er den Ereignishorizont tatsächlich passieren – und werfen auch einen Blick auf Modellierungen rund um die schwarzen Giganten.

Eine ereignisreiche Lektüre wünscht Ihnen

FOLGEN SIE UNS:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLINTER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PAID-CONTENT-MANAGERIN: Antje Findeklee
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

04

BASISWISSEN

Schwarze Löcher sind keine Staubsauger

Schwarze Löcher können Materie nicht zu sich hinsaugen – wohl aber Astronauten zu Spaghetti verarbeiten.

NASA / DANA BERRY / SKYWORKS DIGITAL

28

REKORDMASSE

Schwarzes Loch sprengt alle Dimensionen

Im Zentrum der Galaxie SAGE0536AGN tobt ein echtes Schwerkraftmonster

AURORE SIMONNET / SONOMA STATE UNIVERSITY / NASA

37

ZENTRUM DER MILCHSTRASSE

Unbeschadet am Schwarzen Loch vorbei

Aufnahmen zeigen intakte Gaswolke nahe Sagittarius A*

FOTOLIA / PITRIS

48

SINGULARITÄT

»Es gibt keine Schwarzen Löcher«

Der Ereignishorizont lässt sich nicht mit der Quantentheorie vereinen



NASA / JPL / CALTECH

FOTOLIA / KAALIMIES

09

GALAXIENENTWICKLUNG

Giganten im All

Astronomen erforschen, wie stark die Gravitationsmonster Entstehung und Schicksal ihrer Galaxien beeinflussen und steuern



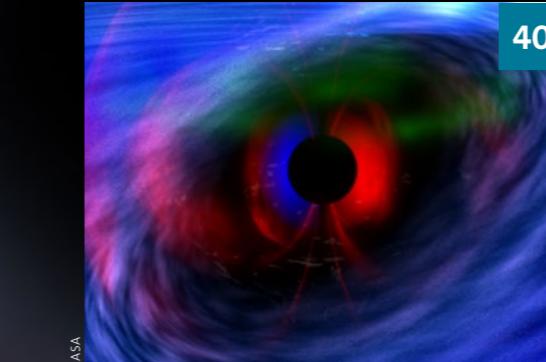
ESO / MARTIN KORNMESSER / CC-BY-3.0 (CC BY)

30

RÄTSELHAFTE JETS

Schwarze Löcher mit Energieüberschuss

Supermassereiche Schwarze Löcher bleiben dunkel und geheimnisvoll



NASA

40

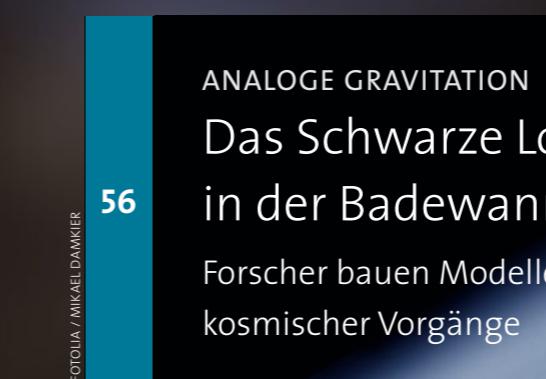
MODELLIERUNG

Feuertaufe fürs Äquivalenzprinzip

Was passiert mit einem Menschen, der in ein Schwarzes Loch fällt?



FOTOLIA / PITRIS



FOTOLIA / MIKAEL DAMKIER

56

ANALOGE GRAVITATION

Das Schwarze Loch in der Badewanne

Forscher bauen Modelle kosmischer Vorgänge



A black hole at the center of a galaxy, with a bright accretion disk and a jet of particles.

BASISWISSEN

Schwarze Löcher sind keine Staubsauger

Die extrem massereichen Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien sind zwar gefräßig, funktionieren jedoch nicht wie Staubsauger – eine Einführung.

Vier Grundkräfte beeinflussen, wie Materiateilchen miteinander wechselwirken. Nur auf kurze – atomare – Distanzen greifen die schwache und die starke Kraft. Die weitaus stärkere elektromagnetische Kraft hat hingegen eine unbegrenzt große Reichweite, die zu Grunde liegenden Ladungen kompensieren sich jedoch meist bereits in kleinen Räumen.

Die Schwerkraft ist zwar die schwächste dieses Quartetts, sie bestimmt jedoch das Universum als Ganzes in seiner großräumigen Struktur. Übersteigt die Dichte eines Körpers gegebener Masse eine bestimmte Grenze, dann gewinnt die Schwerkraft die Oberhand, und der Körper schrumpft über alle Maßen zu einem mathematischen Punkt.

Sterne sind große Materieansammlungen mit einer hohen Masse. Sie stürzen allein deswegen nicht sofort unter dem Einfluss ihrer eigenen Schwerewirkung in sich zusammen, weil der elektromagnetische Druck in ihrem Innern dies verhindert. Dieser Druck baut sich auf bei der Verschmelzung von Atomen. Dabei wird Energie in Form von Photonen freigesetzt,

den Überträgern der elektromagnetischen Kraft.

Allerdings hat dieses Gleichgewicht aus Schwerkraft und Strahlungsdruck ein Ende, wenn im Stern der Brennstoff zur Neige geht. Dann gewinnt die Schwerkraft die Oberhand, und der Stern beginnt zu kollabieren. Ist seine Masse dabei größer als rund acht Sonnenmassen, gibt es kein Halten mehr. Er schrumpft und schrumpft, bis sogar die letzte Barriere, das quantenmechanische Pauli-Verbot, unwirksam wird. In der Folge steigt die Dichte des ausgebrannten kollabierenden Sterns über jedes Maß.

Fluchtgeschwindigkeit

Um das Schwerkfeld der Erde zu verlassen, ist bereits eine Geschwindigkeit von 11,2 Kilometern pro Sekunde erforderlich. Bei Neutronensternen, jenen kompakten Sternenresten, deren Ausgangsmasse niedriger als acht Sonnenmassen ist, liegt sie bereits in der Größenordnung von 100 000 Kilometern pro Sekunde, einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit.

Oberhalb der Acht-Sonnenmassen-Grenze kollabieren ausgebrannte Sonnen immer weiter und unterschreiten im Verlauf eine bestimmte Grenze, den so ge-

nannten Schwarzschildradius. Bei solchen Objekten ist die Dichte derart hoch, dass die Fluchtgeschwindigkeit 300 000 Kilometer pro Sekunde erreicht, also Lichtgeschwindigkeit. Kein Licht kann dem Stern nun mehr entkommen, denn es ist trotz seiner hohen Geschwindigkeit zu langsam – ein Schwarzes Loch ist entstanden.

Der Radius, an dem die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, bleibt konstant, obwohl die kollabierende Masse sich immer noch weiter ihrem Mittelpunkt nähert. Man nennt diese Kugelfläche um den kollabierenden Stern Ereignishorizont, sein Radius trägt den Namen Schwarzschildradius. Er bildet eine nicht-materielle Grenze zwischen zwei Raumregionen. Gerät Materie über die Grenze hinweg in den inneren Bereich, so ist sie für den äußeren Bereich für immer verloren. Keine wie auch immer geartete Information kann von innen kommend den äußeren Raumbereich erreichen.

Die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins lehrt uns, dass Massen den Raum krümmen und die Zeit dehnen. Masse, Raum und Zeit sind in dieser Beschreibung der Wirklichkeit nicht mehr als unabhängig voneinander zu betrachten. Vielmehr

CYGNUS X-1 - SCHWARZES LOCH

MIT AKKRETIONSSCHEIBE

Die Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch von Cygnus X-1 ist so heiß, dass sie sogar Röntgenstrahlung aussendet (künstlerische Darstellung). Das Schwarze Loch hat eine Masse von rund 15 Sonnen und bildet mit einem blauen massereichen Stern (rechts) ein Doppelsternsystem.



bilden sie eine Einheit: die so genannte Raumzeit. Weil keine bekannte Kraft den weiteren Einsturz jenseits des Ereignishorizonts abbremsen könnte, fällt die kollabierende Materie zu einem mathematischen Punkt zusammen. Sehr zum Leidwesen der Astrophysiker, denn es gibt keine physikalische Beschreibung dieser Extremsituation: Im Zentrum herrscht eine unendlich hohe Dichte.

Beobachter im äußeren Raumbereich, also im normalen Universum, stellen fest, dass der Kollaps bei Annäherung an den Ereignishorizont immer langsamer verläuft und schließlich zum Stillstand kommt. Dies ist eine Folge der relativistischen Zeitdehnung. Für uns bleibt dieser Zusammenbruch auf einen Punkt daher unbeobachtbar.

Könnte man nicht eine Raumsonde zu einem Schwarzen Loch entsenden, um es zu beobachten? Oder würde sie, wie gelegentlich behauptet, gleichsam wie von einem Staubsauger angezogen und verschlucht? Solange die Sonde den Ereignishorizont nicht passiert, kann sie ohne Weiteres in einer Umlaufbahn um das Schwarze Loch verbleiben. Es gibt keinen Saugeffekt! Kann man sogar hineinfliegen?

Auch das gelingt – jedoch ohne Rückfahrkarte. Insbesondere die extrem massereichen Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien sind in dieser Hinsicht absolut harmlos. Das Schwarze Loch im Zentrum unseres Milchstraßensystems hat eine Masse von rund vier Millionen Sonnenmassen. Sein Schwarzschildradius beträgt daher immerhin rund acht Prozent des Abstands Erde–Sonne, etwa zwölf Millionen Kilometer. Die den Ereignishorizont durchdringende Sonde würde dabei nichts Außergewöhnliches messen.

Spagettisierung

Masseärmere Schwarze Löcher sind in dieser Hinsicht nicht so ungefährlich. Bei Annäherung an ein stellares Schwarzes Loch, wie es bei manchen Supernova-Explosionen entsteht, beginnt die Gezeitenkraft immer stärker zu wirken und der so genannte Spaghetti-Effekt tritt ein. Die Gezeitenkraft beschreibt die unterschiedliche Wirkung der Anziehungskraft etwa auf einen Astronauten, dessen Füße näher beim Schwarzen Loch sind als sein Kopf. Die Differenz in der Anziehungskraft ist in dem Fall so groß, dass er unaufhaltsam in die Länge gezogen und zu einem Spagettifa-

den wird – mit Sicherheit ein schrecklicher Tod.

Die Existenz Schwarzer Löcher lässt sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgern, doch woher wissen wir eigentlich, dass es sie wirklich gibt? Wie können wir sie beobachten, wenn sie doch eigentlich im besten Sinn des Worts schwarz sind? Die Lösung liegt darin, ihren Einfluss auf ihre Umgebung zu erkunden. Am Schwarzen Loch vorbeiziehende Sterne zeigen Bahnänderungen, die auf eine große unsichtbare Masse hinweisen. Ein anderer Effekt tritt auf, wenn ein Stern bei zu großer Annäherung von den Gezeitenkräften zerrissen wird und bei der Aufheizung Röntgenstrahlung aussendet. Ebenfalls nachweisbar ist eine so genannte Akkretionsscheibe, die um ein Schwarzes Loch entsteht, wenn Materie in seine Richtung fällt und der Drehimpuls sie in eine Umlaufbahn zwingt. Dabei heizt sich die Materie äußerst stark auf.

Einen Hinweis auf extrem massereiche Schwarze Löcher von mehreren Milliarden Sonnenmassen zeigen die Quasare. Das sind die Kerne junger Galaxien zu Beginn unseres Universums. Sie sind so hell, dass nur die beinahe vollständige Umwandlung



CYGNUS X-1 IM STERNBILD SCHWAN

Die helle Röntgenquelle Cygnus X-1 befindet sich im Sternbild Schwan in rund 6000 Lichtjahren Abstand zur Erde. In der ersten Nachthälfte des Oktobers steht sie nahe des Zenits.

von Materie in Energie die Ursache sein kann. Genau dies steht auf dem Steckbrief der Schwarzen Löcher. Bezuglich des ein- gangs erwähnten Teilchenbeschleunigers LHC ging zeitweise die Furcht um, er könne mikroskopisch kleine Schwarze Löcher er- zeugen, welche schließlich die ganze Erde verschlingen. Selbst wenn das Erzeugen ge-

länge: Diese Miniaturausgaben können nicht wachsen, sondern zerstrahlen in kürzester Zeit komplett. Ihr Schwarzschildradius wäre winzig, die Gezeitenkraft hoch. Bei- des zusammen führt dazu, dass virtuelle Teilchenpaare, die sonst sofort wieder ver- schwänden, getrennt werden. Es entsteht die nach ihrem Entdecker benannte

Hawking-Strahlung. Sie ist umso heftiger, je kleiner das Schwarze Loch ist. Miniaturausgaben, wie sie beim LHC diskutiert wurden, verdampfen explosionsartig – noch lange bevor sie Schaden anrichten können. ↗

(Spektrum.de, 13. Juni 2014)

GALAXIENENTWICKLUNG

GIGANTEN IM ALL

von Gerhard Börner

Seit in der Milchstraße ein supermassereiches Schwarzes Loch entdeckt wurde, haben Astronomen solche Objekte in fast allen aktiven Galaxien aufgespürt. Heute erforschen sie, wie stark die Gravitationsmonster Entstehung und Schicksal ihrer Galaxien beeinflussen und steuern.

Sie sitzen im Zentrum fast jeder Galaxie, wo sie nichts tun außer fressen und wachsen: die supermassereichen Schwarzen Löcher. Millionen bis Milliarden von Sonnenmassen sind sie schwer, aber ihr Appetit ist weiterhin ungestillt. Manche sind bereits auf Diät gesetzt, weil sie ihre Umgebung schon ziemlich leer gefegt haben, wie etwa das vier Millionen Sonnenmassen schwere Objekt im Zentrum der Milchstraße. Andere dagegen verschlingen weiterhin Sterne und Gas in riesigen Mengen, soweit der Nachschub es eben erlaubt.

Direkt beobachten lässt sich keines dieser Objekte. Nur Strahlung lässt sich registrieren, die entsteht, wenn sich Materie beim Absturz in das Schwarze Loch aufheizt. Ihr Energieausstoß ist enorm, und so treten die Schwerkraftmonster trotz ihres Namens als die leuchtkräftigsten Objekte am Himmel in Erscheinung. Laut Beobachtungen entspringen enorme Energiemengen aus sehr kleinen Raumbereichen in der Mitte von Galaxien, wo sich die Materie offenbar mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Alles deutet darauf hin, dass dort jeweils ein Objekt großer Masse sitzen muss.

Auflange Sicht kann das nur ein Schwarzes Loch sein, sagt die Theorie. Alternative Kandidaten, wie ein sehr dichter Sternhaufen oder ein besonders schwerer Stern, würden bald gleichfalls zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Seit ihrer Entdeckung vor 50 Jahren faszinieren die »supermassereichen Schwarzen Löcher« (SMSL) Physiker und Astronomen. SMSL können Teilchen auf ultrarelativistische Energien beschleunigen (auf über 20 Teraelektronvolt, TeV), sie verursachen Ströme von fast lichtschnellen Teilchen. Die Forscher sehen in ihnen eine Quelle der energiereichsten kosmischen Strahlen. Verschmelzen sie mit anderen Objekten, werden nach Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie Gravitationswellen emittiert, deren Nachweis ein neues Fenster für die Astronomie und den Zugang zu direkten Tests der einsteinschen Theorie im Bereich starker Gravitationsfelder eröffnen könnte.

In vielen Fällen konnten diese Gebilde in galaktischen Zentren aufgespürt werden. Wenn also, was Beobachtungen nahelegen, fast jede größere Galaxie ihr eigenes Schwarzes Superloch im Zentrum besitzt, dann besteht wahrscheinlich auch

AUF EINEN BLICK

Suche nach dem Ereignishorizont

- 1 Erst seit wenigen Jahren gilt die Existenz großer Schwarzer Löcher mit Millionen und Milliarden Sonnenmassen als gesichert.
- 2 Entdeckt wurden sie im Zentrum der Milchstraße sowie vor allem in der Mitte junger, aktiver Galaxien. Die Astronomen rätseln heute darüber, wie ihre Existenz und ihr Wachstum mit der Entwicklung ihrer jeweiligen Heimatgalaxie verwoben sind.
- 3 Künftige Beobachtungen sollen das Geschehen direkt am »Ereignishorizont« der Gravitationsmonster entschlüsseln. Das könnte klären, ob ihre fundamentalen Eigenschaften tatsächlich der Vorhersage von Einsteins Gravitationstheorie entsprechen.

eine enge Verbindung zwischen diesem und der Entstehung und Entwicklung der Galaxie.

Aktive Galaxien und Quasare strahlen riesige Energiemengen ab, die das Licht aller ihrer Sterne noch um ein Vielfaches übertreffen. Die meisten Astronomen glauben, dass die Quelle dahinter stets ein Schwarzes Loch mit hoher Masse ist. Das jeweilige SMSL saugt durch sein starkes Gravitationsfeld Materie aus der Umgebung an. Diese stürzt aber nicht geradlinig auf das Schwarze Loch zu, sondern bewegt sich auf spiralförmigen Bahnen und sammelt sich vor dem endgültigen Absturz in einer rotierenden Akkretionsscheibe.

Bei der Annäherung bewegt sich die Materie auf ihren Umläufen immer rasanter mit mehr als zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit und erhitzt sich dabei so sehr, dass der innere Teil der Scheibe das Objekt schließlich als heiße Kugel nahezu einhüllt. Diese Zone emittiert intensive Röntgenstrahlung, die von einer ganzen Reihe Hochenergiesatelliten registriert wird. Zusätzlich entsteht in diesem Nahbereich entlang der Rotationsachse des Schwarzen Lochs ein gerichteter, eng begrenzter Teilchenstrahl – ein so genannter

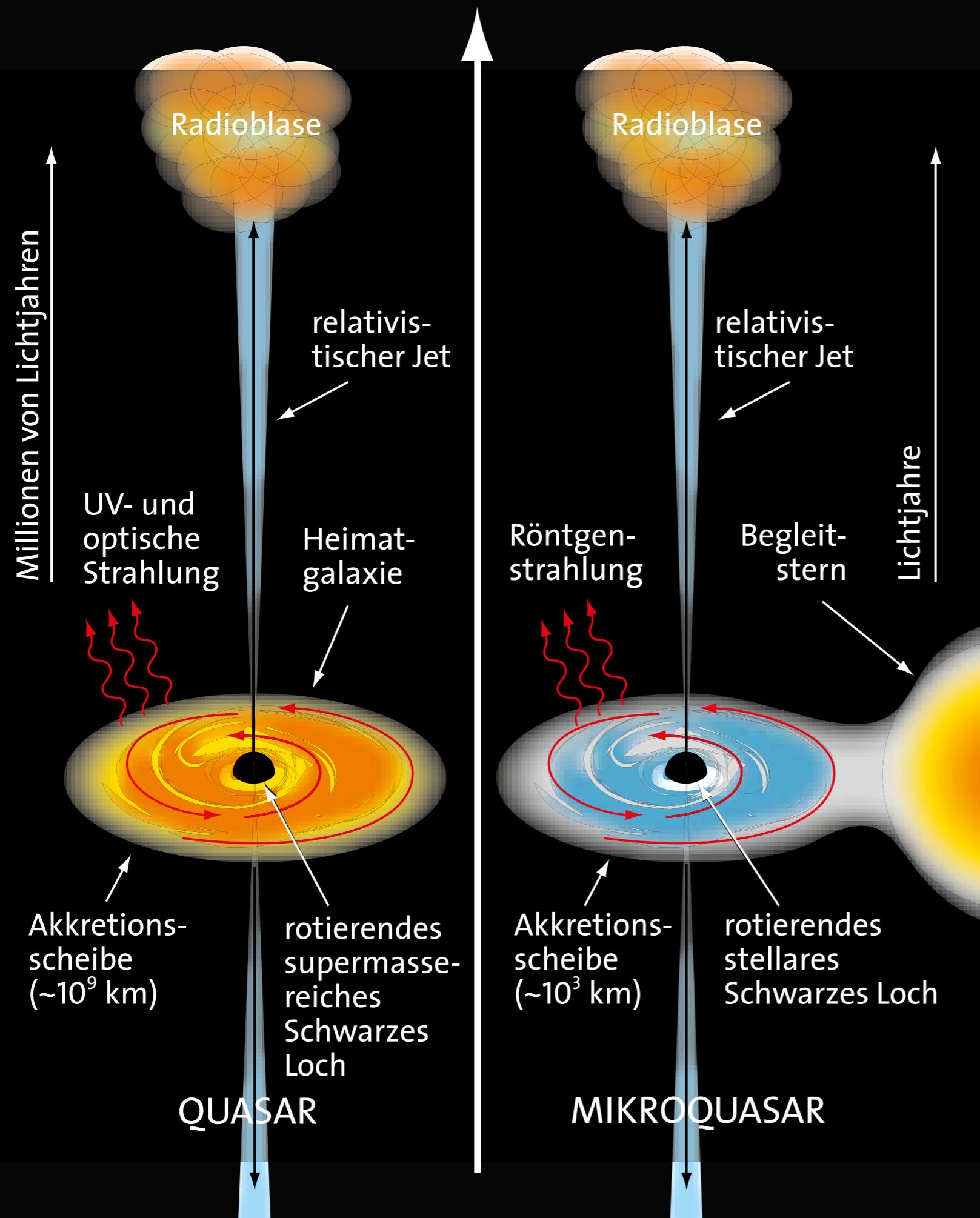
Jet, in dem Materie annähernd mit Lichtgeschwindigkeit nach außen rast.

Weiter entfernt vom Zentralkörper, wo es schon etwas kühler zugeht, sendet die Materie nur noch optische und Radiostrahlung aus, die sich auf der Erde und etwa vom Weltraumteleskop Hubble (HST) einfangen lässt. So erhält man ein recht detailliertes Bild der Materiebewegungen.

Ein typisches Beispiel ist M 87, eine aktive Galaxie in 54 Millionen Lichtjahren Entfernung im Sternbild Jungfrau. Mit dem Faint Object Spectrograph auf dem HST gelang es, die Dopplerverschiebung des abgestrahlten Lichts im Zentralgebiet zu messen: Die Materie bewegt sich in einer rotierenden Scheibe teils auf uns zu, was die Spektrallinien ins Blaue verschiebt, und teils von uns weg, was sie ins Rote verschiebt. Die Bahngeschwindigkeiten in der Akkretionsscheibe erreichen bis zu 550 Kilometer pro Sekunde, fast zwei Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Derart hohe Werte können nicht durch Sternhaufen verursacht werden, vielmehr muss es dort eine zentrale Masse geben. Die Beobachtungen zeigen: In einem Bereich von der Größe des Sonnensystems sind drei Milliarden Sonnenmassen konzentriert.

Ähnlich ist die Situation in anderen Sternsystemen. So stößt die Galaxie NGC 4261 gewaltige Jets aus, die vom Zentrum aus symmetrisch in beide Richtungen 88 000 Lichtjahre weit in den umgebenden Weltraum eindringen. Die intensive Radiostrahlung, die das Phänomen sichtbar macht, zeigt, dass in dem Jet elektrisch geladene Teilchen und Magnetfelder ins All geschleudert werden. Die Kraftmaschine im Zentrum könnte wiederum ein Schwarzes Loch sein, mit etwa 400 Millionen Sonnenmassen. Gespeist wird es von einer dicken Scheibe mit einem Durchmesser von 800 Lichtjahren. Astronomen haben derartige Gebilde bereits in vielen aktiven Galaxien geortet. Es scheint, als seien Jets eine charakteristische Signatur für die Aktivität eines zentralen Schwarzen Lochs.

M 87 heißt diese aktive Galaxie, 54 Millionen Lichtjahre entfernt und das größte Objekt im Virgo-Galaxienhaufen (hier eine Aufnahme des Röntgenteleskops Chandra). In ihrem Zentrum verbirgt sich ein Schwarzes Loch mit drei Milliarden Sonnenmassen, das einen 5000 Lichtjahre langen Jet ausstößt. Umkreist wird es von einer Scheibe, die rasend schnell rotiert – teilweise mit 550 Kilometern pro Sekunde. Die



QUASARE

Quasare werden durch Materie angetrieben, die in Schwarze Löcher stürzt und dabei Jets ausstößt. In Mikroquasaren spielt sich Ähnliches, nur in Doppelsternen, ab. De- ren Akkretionsscheibe ist heißer, so dass Röntgenstrahlung frei wird.

Sombrero-Galaxie (M 104) im Sternbild Jungfrau, in 30 Millionen Lichtjahren Entfernung, erscheint zwar im optischen Licht relativ unauffällig, sendet dafür aber kräftige Röntgenstrahlung aus, besitzt also offenbar einen aktiven Kernbereich. Entsprechend registrierten Astronomen für Sterne nahe dem Zentrum sehr hohe Geschwindigkeiten. Dies nährte den Verdacht, dass auch in der Mitte des »Sombreros« ein SMSL residiert, und zwar sogar mit einer Milliarde Sonnenmassen.

Es existieren also reichlich Hinweise auf Schwarze Löcher im Zentrum aktiver Galaxien. Die Beobachtungen belegen genau genommen aber nur, dass sich dort in einem kleinen Volumen jeweils eine große Masse zusammenballt. Nur indirekt folgt daraus die Existenz eines Schwarzen Lochs, nämlich aus der Überlegung, dass keine physikalisch plausiblen Alternativen bekannt sind – weder Sternhaufen noch ein einzelner Riesenstern.

Während die Forscher zunächst vor allem die Existenz der SMSL als kompakte Schwerkraftzentren nachweisen wollten, geht es ihnen inzwischen darum, die Physik zu enträtseln, die hinter den Erscheinungen steht: Wie entstehen die aktiven

Galaxien? Und wie hängt ihre Entwicklung mit den supermassereichen Schwarzen Löchern zusammen? Gibt es Eigenschaften, die solche Objekte eindeutig identifizieren? Bis jetzt sind keine bekannt. Die Astronomen hoffen, durch noch präzisere und umfassendere Beobachtungen einem direkten Nachweis näher zu kommen. Die besten Chancen dazu bietet wohl unser »hauseigenes« Gravitationsmonster im Zentrum der Milchstraße, einfach weil es das nächstgelegene ist. Die Vorgeschichte: Im Jahr 1974 entdeckten Astronomen im Sternbild Schütze die Radioquelle Sagittarius A*, abgekürzt Sgr A*. Deren besondere Eigenschaften nährten gleich den Verdacht, dort könnte ein größeres Schwarzes Loch verborgen sein. Allerdings ist diese Himmelsgegend von der Erde aus notorisch schwer zu beobachten. Denn quer durch die galaktische Scheibe, in der auch wir sitzen, wird fast alle Art von Strahlung durch Gas, Staub und Sterne blockiert. Allein Radio- und Infrarotwellen erlauben Blicke ins Innere der Milchstraße.

Es dauerte einige Jahre, bis Infrarotkameras mit genügender Trennschärfe von Satelliten aus die Gegend ins Visier nehmen konnten. Das Team von Reinhard

Genzel am Max-Planck-Institut für extra-terrestrische Physik in Garching bei München leistete Pionierarbeit auf diesem Gebiet. Die Forschergruppe ist bis heute führend bei der Analyse der Sternbewegungen um Sagittarius A*. Demnach umkreisen offenbar ein Dutzend Sterne mit hoher Geschwindigkeit ein unsichtbares zentrales Objekt innerhalb eines Radius, der etwa dem dreifachen Abstand zwischen Sonne und Neptun entspricht. Für einen dieser Sterne (S2) wurde eine Umlaufperiode von 16 Jahren und eine Geschwindigkeit von etwa 5000 Kilometer pro Sekunde bestimmt. Zum Vergleich: Die Sonne bewegt sich auf ihrer eher randständigen Bahn um das galaktische Zentrum mit rund 220 Kilometer pro Sekunde. Interferometrische Radiobeobachtungen zeigten zudem, dass Sgr A* in Bezug auf die Galaxis mit einer Relativgeschwindigkeit von höchstens einem Kilometer pro Sekunde fast stillsteht.

Mit diesen Fakten konnten die Theoretiker für das zentrale SMSL der Milchstraße eine Masse von 4,1 Millionen Sonnenmassen errechnen. Sgr A* ist nach heutigem Wissen also ein Schwarzes Loch – zwar riesig, aber nicht so gigantisch wie die in

SAGITTARIUS A*

Im Zentrum unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, sitzt die Radioquelle Sagittarius A*. In deren Mitte eingebettet ist ein großes Schwarzes Loch mit 4,1 Milliarden Sonnenmassen. Es wird von etwa einem Dutzend Sternen umkreist (blaue Linien). Das gezeigte Raumgebiet entspricht dem dreifachen Abstand Sonne-Neptun. Das Schwarze Loch hat einen Durchmesser von zwölf Millionen Kilometern, rund ein Fünftel der Merkurbahn.



manch anderen Galaxien. Außerdem scheint dieses Objekt sozusagen auf Sparflamme zu köcheln, denn es emittiert nur wenig Röntgenstrahlung, erhält also nur einen geringen Materiezufuss.

Womöglich könnte sich dies innerhalb der nächsten zehn Jahre ändern. Denn die Astronomen entdeckten eine Gaswolke (G2 genannt), die dann auf ihrer Umlaufbahn in den Einzugsbereich von Sgr A* kommen wird. Sie bewegt sich zwar nicht direkt auf Kollisionskurs, wird aber dem Zentrum doch so nahe kommen, dass ein Teil der Wolke ins Schwarze Loch stürzen dürfte. Die Forscher erwarten einen spektakulären Ausbruch an Röntgenstrahlung sowie detaillierte Daten darüber, wie die Wolke in der Nähe des SMSL durch Gezeitenkräfte verzerrt und zerrissen wird.

Möglichst nahe an das Schwarze Loch vordringen möchten Wissenschaftler mit dem geplanten Event Horizon Telescope (Ereignishorizont-Teleskop, EHT), einer Zusammenschaltung von Radioteleskopen, die um den ganzen Erdball verteilt sind. Das multinationale Gerät soll 2022 in Betrieb gehen. Das dahinterstehende Verfahren der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist so mächtig, dass sich das galakti-

sche Zentrum prinzipiell mit einer Winkelauflösung von einigen millionstel Bogensekunden beobachten ließe.

Damit könnte man auch einen Apfel auf dem Mond erkennen. Mit dem Event Horizon Telescope könnten die Astronomen die Radiostrahlung mit einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern nutzen, um Strukturen innerhalb des zehnfachen Radius des Schwarzen Lochs von Sgr A* abzubilden. So könnten sie die Region erforschen, in der relativistische Effekte wichtig werden. Wichtigster Punkt auf der Agenda: die Überprüfung der Physik eines Schwarzen Lochs, wie es von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt wurde. Auch das zentrale Objekt von M 87 ließe sich mit dem EHT wesentlich detaillierter untersuchen.

Kurz nachdem Einstein Ende 1915 seine Gravitationstheorie veröffentlicht hatte, fand der deutsche Astronom Karl Schwarzschild eine exakte Lösung der einsteinischen Feldgleichungen. Diese »Schwarzschild-Geometrie« gilt als Prototyp eines Schwarzen Lochs, zugleich ist es die einfachste Beschreibung eines extremen Endzustands der Materie. Dazu stellen sich die Theoretiker vor, wie sich ein kugelförmiger Materieklopfen, etwa die Sonne, in einem

immer kleineren Volumen konzentriert, so wie dies in der newtonschen Theorie bis hin zur idealisierten punktförmigen Masse möglich ist.

Hinter dem Ereignishorizont wird Raum zur Zeit und Zeit zum Raum

Stets gilt dann im leeren Außenraum, also dem Gravitationsvakuum, welches das Schwarze Loch umgibt, die Schwarzschild-Lösung der Feldgleichungen, für die Schwarzschild mathematisch übliche »statische Koordinaten« für Zeit, Radius und Winkel verwendete. Unterschreitet man aber bei diesem Kollaps einen bestimmten Radius, verlieren diese Koordinaten ihre übliche Bedeutung; sie vertauschen ihre physikalische Bedeutung: Raum wird zur Zeit, Zeit wird zum Raum. Dort »vergeht« der Raum, so wie in der wirklichen Welt die Zeit. Wir erreichen in diesem Gedankenexperiment dann jedoch nicht das Äquivalent der newtonschen Punktmasse. Vielmehr verschwindet die Masse innerhalb der Grenzfläche, die durch den Schwarzschild-Radius gekennzeichnet ist: des Ereignishorizonts.

Was sich im Inneren dieses Volumens abspielt, bleibt uns als außen stehenden

Beobachtern zunächst verborgen. Anhand der Wege, die das Licht in der Umgebung des Objekts nehmen kann, lässt sich jedoch die Struktur der gesamten Raumzeit analysieren, in deren Mittelpunkt das Schwarze Loch sitzt. Es ist von leerem Raum umgeben sowie einem Schwerefeld, das mit der Entfernung immer mehr abklingt bis zum Grenzfall der »flachen« Raumzeit, in der die Gravitation kaum mehr eine Rolle spielt. Weit außerhalb liegen demnach praktisch die gleichen Verhältnisse vor wie im flachen – für uns normalen – Raum, wo sich Lichtstrahlen stets entlang gerader Linien ausbreiten.

Doch je näher am Ereignishorizont ein Lichtstrahl verläuft, desto stärker krümmt das Schwerefeld seine Bahn. Direkt am Schwarzschild-Radius wird Licht – gleich in welche Richtung – dann so weit abgelenkt, dass es nicht mehr nach außen entweichen kann, sondern innerhalb einer Kugel mit diesem Radius gefangen bleibt. Das gibt es sonst nirgends im All: Lichtstrahlen, die am Ereignishorizont radial nach außen gerichtet sind, bleiben an diesem Ort stehen, obwohl sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Strahlen, die innerhalb dieses Radius emittiert werden, können der Raum-

zeitkrümmung nicht entgehen, sondern enden in einer zentralen Singularität (einem Punkt mit theoretisch unendlich großer Gravitation) beim Radius null.

Licht aus dem Außenraum kann freilich auch weiterhin in den Bereich innerhalb des Schwarzschild-Radius eindringen, aber kein Lichtstrahl ihm jemals entkommen. Der Radius legt somit eine »Struktur in der Raumzeit« fest, einen Horizont, der unausweichlich außen und innen voneinander trennt. Da sich jede Art von Information höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermitteln lässt, wirkt der Horizont wie eine unsichtbare Membran, die nur in einer Richtung – nach innen – Energie und Information durchlässt. Diese endet schließlich in einer Singularität. Tatsächlich besagt die allgemeine Relativitätstheorie, dass jede Masse innerhalb des Horizonts als singuläre Punktmasse endet, wobei die Materiedichte gegen unendlich und die Ausdehnung gegen null geht.

Solche Singularitäten sind physikalisch sinnlos – würden sie doch bedeuten, dass die bekannten Naturgesetze dort ihre Gültigkeit verlieren. Weil die Physiker auf Grund ihrer Erfahrungen davon überzeugt sind, dass alle in der Natur vorkommenden

Größen endlich und genau bestimmbar sind, betrachten sie Singularitäten als Folge einer unzureichenden mathematischen Formulierung oder als Ausdruck einer inneren Unvollständigkeit der Theorie. In diesem Sinn muss die allgemeine Relativitätstheorie noch verbessert werden, wohl durch eine Verknüpfung mit der Quantentheorie.

Der Kollaps innerhalb des Schwarzschild-Radius in die Singularität hat eine verblüffende Konsequenz: Die Raumzeit der Schwarzschild-Geometrie ist ein reines Gravitationsvakuum – außerhalb und innerhalb des Horizonts befindet sich keine Materie, bis auf eine Punktmasse im Zentrum. Ein Beobachter im Außenraum registriert lediglich die Gravitationswirkung der Punktmasse. Dieses Gebilde, von den Astrophysikern Schwarzes Loch genannt, ist also weder ein materieller Körper noch besteht es aus Strahlung – es ist buchstäblich ein Loch in der Raumzeit.

Große Massen erleiden ein katastrophales Schicksal

Gewöhnliche Sterne, Planeten oder andere Alltagsdinge sind freilich weit größer als ihr Schwarzschild-Radius. Für die Sonne



M 87

M 87 heißt diese aktive Galaxie, 54 Millionen Lichtjahre entfernt und das größte Objekt im Virgo-Galaxienhaufen (hier eine Aufnahme des Röntgenteleskops Chandra). In ihrem Zentrum verbirgt sich ein Schwarzes Loch mit drei Milliarden Sonnenmassen, das einen 5000 Lichtjahre langen Jet ausstößt. Umkreist wird es von einer Scheibe, die rasend schnell rotiert – teilweise mit 550 Kilometern pro Sekunde.

beträgt sein Wert drei Kilometer, für die Erde nur 0,9 Zentimeter. Er wächst proportional zur Masse, deshalb erreicht er für ein Objekt von einer Milliarde Sonnenmassen etwa drei Milliarden Kilometer; das Schwarze Loch der Milchstraße hat einen Schwarzschild-Radius von zwölf Millionen Kilometern.

Einsteins Gravitationstheorie sagt vorher, dass als extremer Endzustand der Materie Schwarze Löcher entstehen können. Auch intuitiv führt kein Weg daran vorbei, dass große Massen ein katastrophales Schicksal erleiden müssen. Denn die Gravitation zieht alle Materie in gleicher Weise an. Außerdem reicht diese Kraft unbegrenzt weit, denn sie klingt nur umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ab. Wird von einer beliebigen Masse immer mehr Materie angehäuft, so wächst die Gravitation quadratisch mit der Teilchenzahl an. Irgendwann gewinnt sie die Oberhand über alle Druckkräfte, die sich ihr entgegenstemmen könnten – sei es der thermonukleare Druck im Inneren eines Sterns, die abstoßende Kraft zwischen den positiven Ladungen im Inneren der Atomkerne oder der so genannte Fermidruck, wie ihn Gase quantenphysikalisch »entarteter«

Elektronen oder Neutronen zeigen und wie er in Weißen Zwergen oder Neutronensternen herrscht.

Hinzu kommt, dass auch die Energie gravitativ wirkt und selbst der Schwerkraft unterliegt. Deshalb kann ein riesiger innerer Druck zwar eine große Masse bis zu einer gewissen Grenze im Gleichgewicht halten, aber der Druck trägt selbst zur Schwerkraft bei. So wird er schließlich mitverantwortlich für den Gravitationskollaps. Für große Massen gibt es kein Gleichgewicht mehr; das Gleiche gilt für rotierende Objekte – sie alle müssen zusammenbrechen und als Schwarzes Loch enden. Es ist erstaunlich, dass trotz der reichhaltigen Formen und Strukturen, in denen gravitative Massen auftreten, ihnen ein derart einfaches Endstadium gemein ist.

In den letzten Jahren haben Astronomen immer mehr Hinweise darauf gefunden, dass es eine enge Verbindung der Galaxie mit dem Schwarzen Loch, das sie beherbergt, gibt. Diese Beziehung zeigt sich in der so genannten M-Sigma-Relation. Sie gibt Hinweise, wie sich in einer Galaxie ein zentraler Wulst (»bulge«) entwickelt, der häufig ein Schwarzes Loch enthält. Möglicherweise wird Materie durch Akkretion

laufend ins galaktische Zentrum nachgefüttert, was sowohl die Masse des Wulstes als auch das SMSL ziemlich gleichmäßig vergrößern würde.

Allerdings ist das womöglich nur ein Teil der Wahrheit. Das Wachsen und Werden einer jungen Galaxie zeigt sich an der Menge der Sterne, die laufend durch kollabierendes kaltes Gas neu entstehen. Und das supermassereiche Schwarze Loch produziert mächtige Jets und jede Menge hochenergetische Strahlung. Sind diese Prozesse zwangsläufige Folge der Dinge, die sich beim Kollaps des kalten Gases in der Galaxie abspielen? Selbstverständlich kann das SMSL, wenn es Materie verschlingt und aktiv Strahlung und Teilchen emittiert, das Gas stark beeinflussen, es sogar aus der Galaxie hinausschleudern. Dort, wo es dann fehlt, wird die Sternbildung zurückgefahren. Gleichzeitig stellt das SMSL auch seine eigene Aktivität auf Sparflamme, weil dadurch die Akkretion von Materie ebenfalls eingeschränkt wird.

Dunkle Materie – Geburtshelfer der Galaxien

Wie aber könnte ein zentrales Schwarzes Loch überhaupt das Schicksal der Galaxie

direkt beeinflussen? Stellen wir uns vor, wir könnten einige Prozent der Masseenergie des SMSL in der Milchstraße auf die Teilchen (Baryonen, hauptsächlich Neutronen und Protonen) der Milchstraße umverteilen – eine Energiemenge, wie sie das Schwarze Loch in der Akkretionsphase als Strahlung ausstößt. Daraufhin könnten diese Baryonen das galaktische Schwerefeld überwinden und aus der Galaxis geschleudert werden. Wenn sich also mit vergleichsweise wenig Energie schon die ganze Galaxie beeinflussen ließe, dann wäre es nicht überraschend, wenn das SMSL tatsächlich ihr Schicksal mitgestalten würde.

Die gängigen Modelle zur Galaxienbildung nehmen an, dass zunächst kleine Verdichtungen des kosmischen Substrats im Lauf der kosmischen Expansion immer mehr anwachsen. Das geht so lange, bis schließlich ein überdichter Bereich sich vom kosmischen Gas abtrennt, kollabiert und allmählich zu einer Galaxie anwächst. Dieser Prozess wird komplizierter, sobald verschiedene, anfangs getrennte Verdichtungen miteinander verschmelzen, weiterhin Gas in das junge Gebilde einstürzt und laufend neue Sterne entstehen. Das kosmi-

sche Substrat selbst ist auch nicht so einfach aufgebaut, wie es die Theoretiker gerne hätten. Nur zu einem kleinen Teil (etwa fünf Prozent) enthält es die uns vertraute normale baryonische Materie. Rätselhafter sind zwei weitere Komponenten: die Dunkle Materie (mit 21 Prozent), ein stoßfreies Gas nichtbaryonischer Elementarteilchen, sowie die Dunkle Energie, von der wir nichts wissen, außer dass sie 74 Prozent der kosmischen Substanz ausmacht und äußerst gleichmäßig verteilt ist.

Wie kleine Dichteschwankungen anwachsen und schließlich zu Galaxien werden, muss man vor diesem Hintergrund betrachten. Denn lange vor den Galaxien bilden sich Schwerkraftzentren in der Dunklen Materie aus, in denen sich dann das Gas aus normaler Materie ansammelt. Warum das so kompliziert ablaufen muss, verrät eine andere Beobachtung: die kosmische Hintergrundstrahlung. Die winzigen Fluktuationen und Anisotropien in dieser Reststrahlung des Urknalls zeigen ziemlich direkt, dass die anfänglichen Dichteschwankungen in der kosmischen Frühzeit relativ klein gewesen sein müssen. Das erforderte den Umweg über die Dunkle Materie als Geburtshelfer der Galaxien.

Die prägalaktischen Gasklumpen, eingebettet in Dunkle Materie, kühlen sich ab und beginnen Sterne zu bilden. Schließlich entwickeln sie sich zu den Galaxien, wie wir sie kennen. In dieser Phase treten offenbar die Schwarzen Löcher auf die Bühne. Wie und wann genau, ist den Forschern noch immer ein Rätsel.

Zwei Varianten sind denkbar:

- Die Schwerkraftzentren bilden sich in der kosmischen Materie um Schwarze Löcher aus, die von Anfang an vorhanden waren,
- oder sie entstehen erst später durch den Gravitationskollaps einer großen Gasmasse.

Das Problem bei der ersten Variante ist, dass im frühen Universum in einem relativ diffusen Medium sich kaum große Massen in einem kleinen Bereich konzentrierten und daraus Schwarze Löcher produzierten. Nachvollziehbarer wäre es, wenn zuerst ein massereicher Stern zum Schwarzen Loch kollabiert und dieses Objekt dann durch Zufütterung zu einem supermassereichen Objekt anschwillt.

Aber das wirft wieder die Frage auf, wie in einer so frühen kosmischen Epoche ein

solcher Stern überhaupt entstehen kann. Die Geburtsfrage bleibt hier offen, und so beginnen fast alle Modelle gleich mit einem kleineren oder mittelgroßen Schwarzen Loch, das durch Akkretion von Materie allmählich anwächst.

Immerhin lassen sich die theoretischen Überlegungen heute durch astronomische Beobachtungen mit Satellitenspähern – wie HST, Spitzer oder Herschel – sowie bodengebundenen Teleskopen im nahen Infrarotbereich des Spektrums überprüfen und erweitern. Damit können Astronomen Galaxien bereits in einem sehr frühen Stadium ihrer Entwicklungsgeschichte entdecken.

Gegenwärtig entstehen in Scheibengalaxien wie der Milchstraße neue Sterne in ziemlicher Regelmäßigkeit. Kaltes interstellares Gas wird verbraucht und zu Sternen verarbeitet – ein Vorgang, der die zentralen Schwarzen Löcher auf Diät setzt und nur wenig zu ihrem Wachstum beiträgt. Offensichtlich verlief die Sternproduktion in der Vergangenheit aber deutlich aktiver. Die Astronomen stoßen immer wieder auf massereiche »rote und tote« Galaxien bei einer Rotverschiebung von $z \sim 2$, das heißt zu einer Zeit, als das Universum gerade ein Drittel seiner jetzigen Größe hatte.

Diese Gebilde enthalten inzwischen viele rote Sterne und produzieren nur wenig neue. Sie sind die Vorläufer der großen elliptischen Galaxien, wie sie den Kosmos heute dominieren, aber noch wesentlich kompakter. Offenbar erfordert ihre Entstehung das schnelle Verschmelzen sehr gasreicher Vorgänger, in denen Gas sich rasch abkühlt und zu hoher Dichte komprimiert wird. In der Situation könnten auch große Schwarze Löcher durch Akkretion stark anschwellen.

Astronomen haben oft nichtthermische Radio- und Röntgenstrahlung – ein Markenzeichen für das große zentrale Schwarze Loch – in aktiven Galaxien beobachtet, in denen zugleich besonders viele neue Sterne aufleuchten. Nicht nur, so scheint es, sind beide Prozesse eng miteinander verwoben, die SMSL könnten außerdem die Sternbildung deutlich beflügeln. Wie sollte sich das genau abspielen? Noch reichen die Daten nicht für ein klares Bild, aber Astronomen haben sich dafür bereits ein Szenario ausgedacht. Erster Akt: Wenn das zentrale Schwarze Loch zu kräftig Strahlung und Teilchen ausschleudert, dann bremst oder blockiert diese Rückkopplung im Wulst den weiteren Gaszustrom aus den ferneren Be-

reichen der Galaxie, so dass kaum mehr neue Sterne entstehen können.

Im zweiten Akt könnte kaltes Gas, das anfänglich aus dem Halo einer Galaxie entweicht – der Hülle Dunkler Materie, die jede Galaxie unsichtbar umgibt –, im Schwerefeld eines größeren Halo gebunden bleiben, der wie eine äußere Wolke sogar mehrere Galaxien einhüllt. Dritter Akt: Wenn dieser Superhalo später kollabiert, strömt das Gas in die Ausgangsgalaxie zurück, angereichert mit zusätzlichen Teilchenwolken, die in dem größeren Halo enthalten waren. Das würde dann nicht nur die Sternbildung wieder anfachen, sondern auch den Sturz von Gas und Materie in das zentrale Schwarze Loch.

Um dieses Szenario zu erhärten, müssten die Astronomen zuerst alle drei Akte über die gesamte kosmische Entwicklung hinweg verfolgen können. Das verlangt Daten bei hohen Rotverschiebungen, also tief in der Vergangenheit des Universums. Es könnte gut sein, dass der Vorrat an kaltem Gas, der einer Galaxie zur Sternbildung zur Verfügung steht, auch durch ein SMSL reduziert wird, das meistens ziemlich passiv ist, aber immer wieder reaktiviert wird. Ebenso könnte ein zentrales Schwarzes

Loch auf Diät, das nur wenig Materie einfängt, in einen Sparmodus übergehen, in dem die Energie hauptsächlich in einem Teilchenstrahl als Bewegungsenergie statt als Strahlung emittiert wird. Lange ging es den Astronomen nur darum, in den Zentren von Galaxien die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher nachzuweisen. Denn es schien ihnen einfach zu fantastisch, dass solche extremen Gravitationsmonster in Raum und Zeit tatsächlich existieren sollten. Mittlerweile haben sie sich daran gewöhnt; sogar in Filmen, Büchern und Popsongs sind Schwarze Löcher zu alltäglichen Erscheinungen geworden.

Inzwischen geht es um andere Fragen:

- Wie beeinflussen Geburt und Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher die Entwicklung der Galaxien?
- Was sind die fundamentalen Eigenschaften Schwarzer Löcher? Wird es gelingen, den Ereignishorizont direkt zu vermessen? Lässt sich seine Symmetrie erkennen und damit die wirkliche Natur dieser Objekte bestätigen, als Lösung der einsteinischen Gravitationstheorie? Und was wäre, wenn Abweichungen davon gefunden würden?

Am besten lässt sich die zentrale Kraftmaschine im inneren Bereich aktiver Galaxien mittels der »harten« Röntgenstrahlung untersuchen. Dort, wo ihre Energien Kilelektronvolt überschreiten, stammt die Strahlung aus unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs. Das ist vorläufig jedoch Zukunftsmusik, denn empfindliche Detektoren für harte Röntgenstrahlung sind schwer zu konstruieren.

Nur mit mehr Daten über die Gase nahe beim Schwarzen Loch und weit entfernt im Halo der Galaxie, über das Ausströmen von Materie aus der galaktischen Scheibe sowie die Sternbildung werden die Kosmologen das Zusammenspiel von Schwarzen Loch und Galaxie durchschauen.



(Spektrum der Wissenschaft, 5/2013)

Dambeck, T.: Beherrscht vom Schwarzen Loch.

In: Spektrum der Wissenschaft 4/2013, S. 13-14

Genzel, R. et al.: The GC Massive Black Hole and Nuclear Star Clusters. In: Reviews in Modern Physics 82, S. 3121-3195, 2010

Der ganze Kosmos:
Auf Ihrem Bildschirm.



DAS STERNE
UND WELTRAUM
DIGITALABO

Erfahren Sie alles über Astronomie und Raumfahrt – direkt aus den Forschungslaboren der Welt. Jahrespreis (12 x im Jahr) € 60,–; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,–

HIER ABONNIEREN



FRÜHES UNIVERSUM

EIN RIESE aus alten Zeiten

von Bram Venemans

Astronomen haben ein extrem massereiches Schwarzes Loch aus einer Zeit entdeckt, als das Universum weniger als 900 Millionen Jahre alt war.

Die Ergebnisse ermöglichen Einblicke in das Wachstum von Schwarzen Löchern und Galaxien im jungen Universum.

Es wird allgemein angenommen, dass jede massereiche Galaxie ein extrem massereiches Schwarzes Loch im Zentrum trägt. All diese Schwarzen Löcher mit ihren anfänglich zwischen 100 und 100 000 Sonnenmassen bildeten sich wohl im jungen Universum. Erst mit der Zeit sammelten einige von ihnen dann immer mehr interstellare Materie aus ihrer Umgebung oder verschmolzen mit anderen Schwarzen Löchern – und wuchsen so deutlich auf ihre heutige Größe an. Die massereichsten Schwarzen Löcher, die im näheren Universum entdeckt wurden, enthalten mehr als zehn Milliarden Sonnenmassen. Zum Vergleich: Das Pendant in unserem eigenen Milchstraßensystem bringt es auf vier bis fünf Millionen Sonnenmassen. Xue-Bing Wu und seine Kollegen beschreiben ein bemerkenswert junges Schwarzes Loch, das aber bereits zwölf Milliarden Sonnenmassen vereint: Das Objekt »SDSS J010013.02+280225.8« stammt aus einer Zeit, als das Universum nur 875

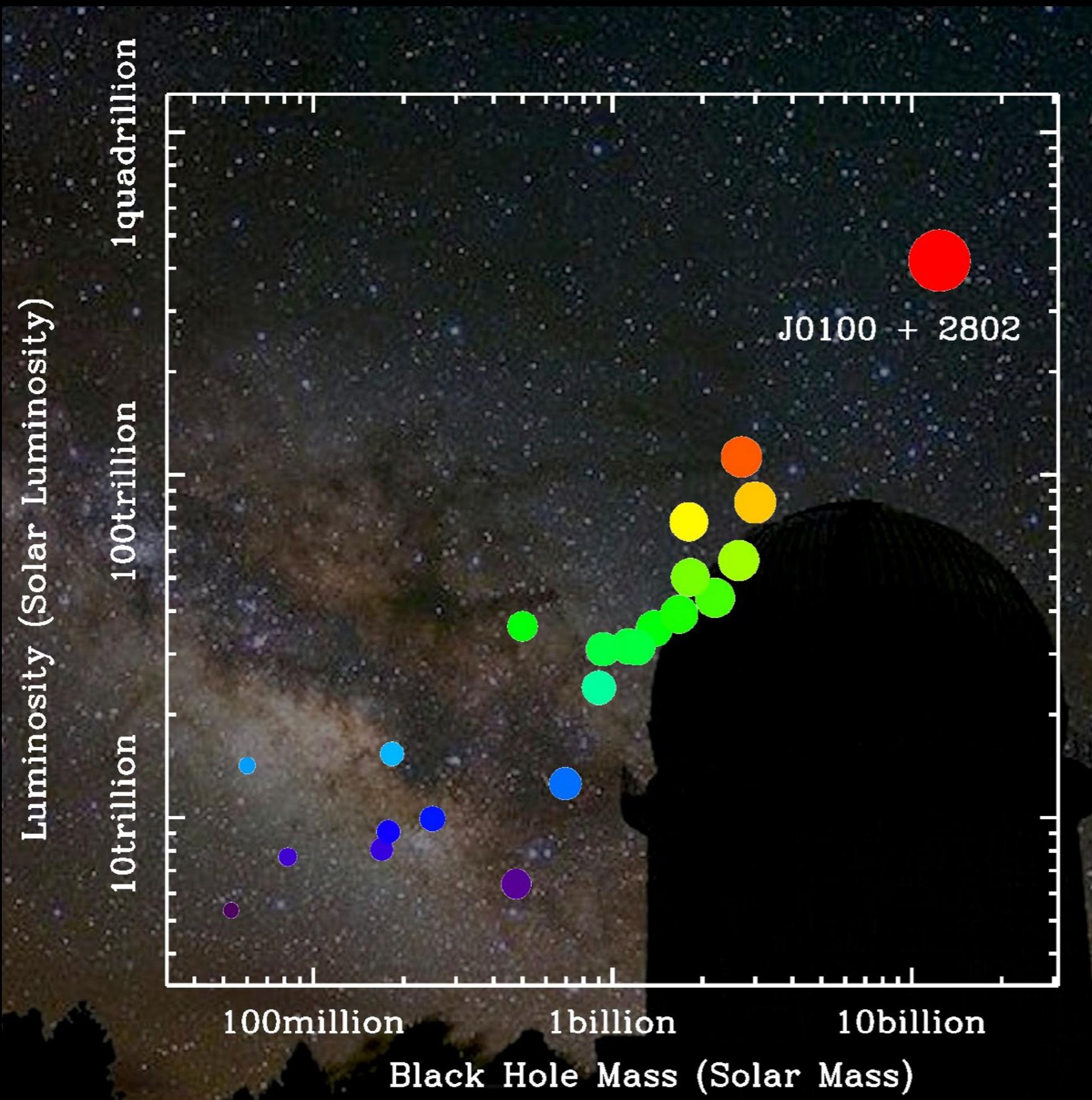
Millionen Jahre alt war, sechs Prozent des heutigen Alters.

Die Astronomen fanden dieses Monster in Bilddaten aus dem optischen und nah-infraroten Spektralbereich, weil es Gas in großer Menge akkretiert: Das Gas wird zum Schwarzen Loch durch die Schwerkraft gezogen und kann einen Teil seiner potenziellen Energie effizient abstrahlen. Materie aufsammelnde Schwarze Löcher können daher sehr hell sein und erscheinen über das Universum hinweg als leuchtstarke Quellen, die als Quasare bezeichnet werden. Da das Licht von einem sehr weit entfernten Quasar Milliarden Jahre benötigt, um die Erde zu erreichen, beobachten die Astronomen solche akkretierenden Schwarzen Löcher, wie sie zu Zeiten des jungen Universums erschienen.

Es war überraschend – wenn auch längst theoretisch vorstellbar –, ein so massereiches Schwarzes Loch im frühen Universum aufzuspüren. Denn dafür muss das Objekt in seiner vergleichsweisen kurzen Existenz Gas mit annähernd maximalem Tempo

akkretiert haben, wobei das Geschwindigkeitslimit durch den Strahlungsdruck der einfallenden Materie gesetzt wird. Die Astronomen sind überrascht, wie lange die annähernd maximale Materieaufnahme angehalten haben muss: Eigentlich hätte die starke Strahlung des Quasars die Akkretion früher stoppen können.

Wu und seine Koautoren hoffen nun, durch die weitere Untersuchung des Schwarzen Lochs auch mehr über die Entstehung von massereichen Galaxien im frühen Universum herausfinden zu können. Denn im Allgemeinen besteht eine enge Beziehung zwischen der Masse Schwarzer Löcher und der Gesamtmasse der Galaxie, in der sie sich befinden: Typischerweise ist die Masse des Schwarzen Lochs höher, wenn es sich in einer massereicheren Galaxie aufhält. Dabei liegt das Verhältnis der Massen des Schwarzen Lochs zu derjenigen der Galaxie zwischen 0,14 und 0,5 Prozent [6,7]. Wenn sich dieses typische Verhältnis auch im jungen Universum bestätigt, so brächten es die Sterne der



SDSS J0100+2802 IM VERGLEICH ZU ANDEREN QUASAREN

Der neu entdeckte Quasar SDSS J0100+2802 enthält das massereichste bekannte Schwarze Loch und weist die größte Helligkeit aller fernen Quasare auf. Im Diagramm wird links die Leuchtkraft in Sonnenleuchtstärken angegeben, unten die Masse des jeweiligen Schwarzen Lochs in Sonnenmassen.

Galaxie um SDSS J010013.02+280225.8 auf beeindruckende vier bis neun Billionen Sonnenmassen – ebenso viel wie die massereichsten Galaxien im heutigen Universum.

Faszinierenderweise ist das von Wu und seinen Koautoren entdeckte Schwarze Loch nicht nur das massereichste im jungen Universum, es ist auch durch die hohe Akretionsrate das bei Weitem hellste Objekt aus dieser kosmischen Epoche. Der Quasar lässt sich dazu nutzen, mehr über den fernen Kosmos zu erfahren. Auf dem Weg, den das Licht des Quasars zu den Beobachtern auf der Erde zurücklegt, passiert es das intergalaktische Medium, dessen Elemente das Spektrum bei spezifischen Wellenlängen verändern. Die extreme Helligkeit des neu entdeckten Quasars erlaubt es nun, die Metallgehalte im intergalaktischen Medium des jungen Universums genauer als je zuvor zu messen. Das sollte Astronomen neue Informationen über die Sternentstehungsprozesse kurz nach dem Urknall verschaffen, welche diese Metalle erzeugten.

Nach SDSS J010013.02+280225.8 hoffen Astronomen bei den nächsten Himmelsdurchmusterungen [8] schon auf ähnlich helle Quasare in noch größerer Entfernung.

Zwar werden akkretierende Schwarze Löcher in noch früheren kosmischen Epochen immer seltener – diese kosmischen Riesen sind aber ideale Objekte, um mehr über das Universum während der ersten wenigen hundert Millionen Jahre nach dem Urknall zu erfahren. ↪

(Spektrum.de, 25. Februar 2015)

- [1] Astron. Astrophys. Rev. 18, 279–315 (2010)
- [2] Astrophys. J. 756, 179 (2012)
- [3] Nature 491, 729–731 (2012)
- [4] Science 338, 84–87 (2012)
- [5] Nature 518, 512–515 (2015)
- [6] Annu. Rev. Astron. Astrophys. 51, 511–653 (2013)
- [7] Astrophys. J. 604, L89–L92 (2004)
- [8] Astron. J. 139, 906–918 (2010)

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
KOMPAKT



FÜR NUR
€ 4,99

DUNKLE MATERIE

Die verborgene Seite
unseres Universums

- > Ein fast perfektes Modell vom Universum
- > Woraus besteht Dunkle Materie?
- > Wie kommen Forscher ihr auf die Spur?

HIER DOWNLOADEN

SCHWARZES LOCH EN MINIATURE

Verblüffend winziger GIGANT IM ALL

von Jan Dönges

Gerade einmal 50 000 Sonnenmassen enthält das kleinste je gefundene supermassereiche Schwarze Loch. Es könnte nun verraten, wie seine monströsen Cousins entstanden.

Mit Hilfe des Röntgen-satelliten Chandra und dem Clay-Teleskop in Chile haben Astronominnen das bislang zwerghafteste Massenmonster im All ausfindig gemacht. Es befindet sich rund 340 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt in der Galaxie RGG 118. Mit nur 50 000 Sonnenmassen ist es rund hundertmal masseärmer als das

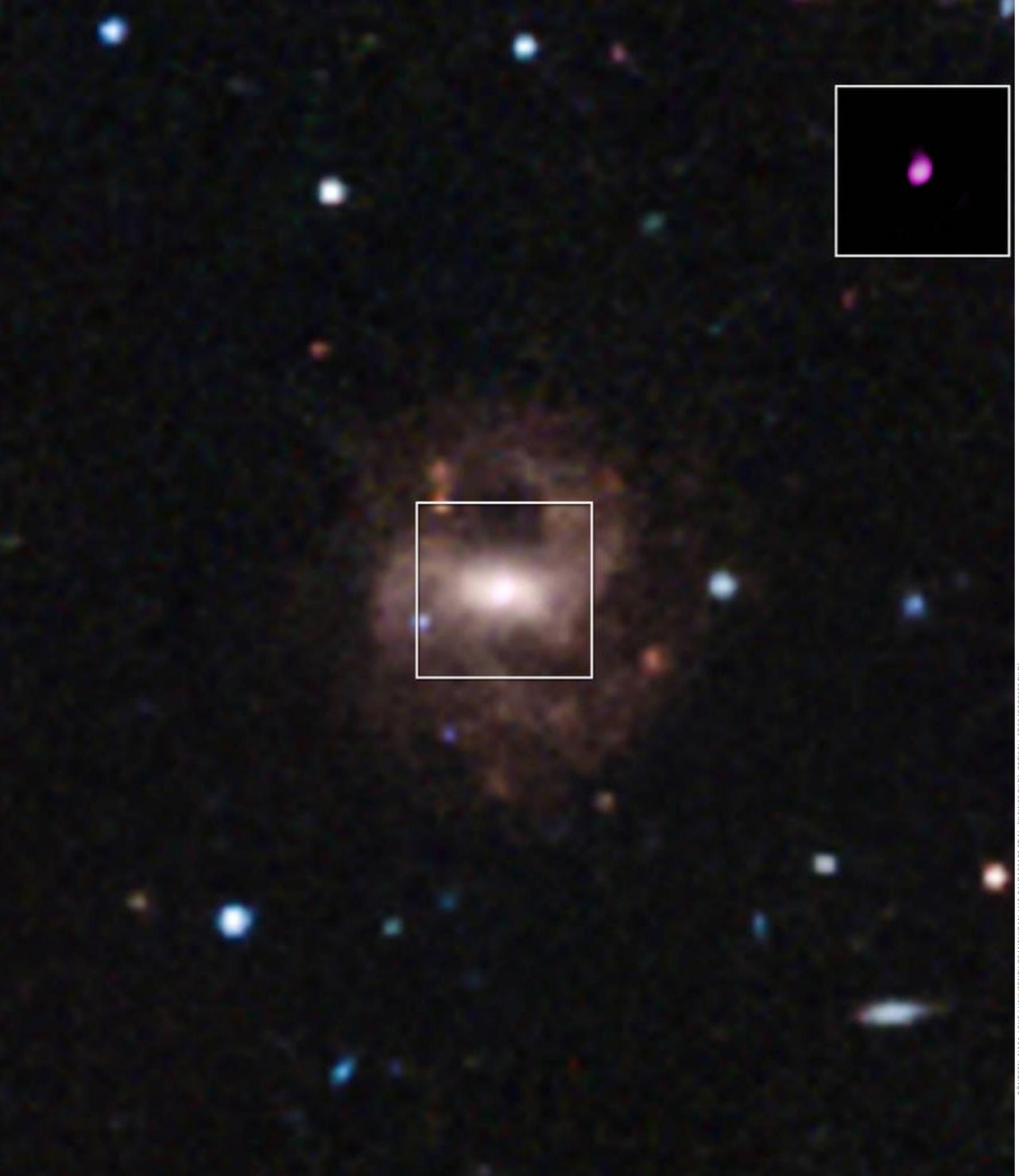
Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. Die Schwerstgewichte dieser Kategorie bringen es sogar auf die 200 000-fache Masse.

Das Team um Amy Reines und Elena Gallo von der University of Michigan erhofft sich von dem neu entdeckten kosmischen Objekt Auskünfte über die Entstehung der großen Cousins. Offen ist, ob diese durch den Kollaps einer Gaswolke von 10 000 bis 100 000 Sonnenmassen ent-

standen oder aber ob sie sich um Keime aus Sternen von rund 100 Sonnenmassen herum bildeten, erläutern die Forscherinnen in einer [Mitteilung der NASA](#). Das Schwarze Loch in RGG 118 könnte dabei helfen, sich für eine der beiden Theorien zu entscheiden.

Warum das Schwarze Loch im Zentrum von RGG 118 so sehr aus der Reihe tanzt, ist ungewiss. Seine Masse ermittelten die Wissenschaftlerinnen, indem sie mit dem





DAS SCHWARZE LOCH IN RGG 118

Das Loch an sich ist unsichtbar, verrät sich aber durch umliegende Mengen an Gas, die beim Sturz in das zentrale Loch aufgeheizt werden und dabei auch im Röntgenbereich strahlen (kleines Bild). Die Aufnahmen der Galaxie im sichtbaren Licht entstammen dem Sloan Digital Sky Survey.

Clay-Teleskop die Bewegung kühlen Gases um das Objekt herum im sichtbaren Licht vermaßen. Röntgendifferenzdaten von Chandra gaben zudem Auskunft über heiße Gase, die ins Schwarze Loch hineinstürzen. Der Vergleich mit ähnlichen Objekten zeigt, dass sich das Schwarze Loch im Zentrum von RGG 118 wie die »echten« Giganten verhält. So beträgt der Strahlungsdruck, den das aufgeheizte Gas erzeugt, auch bei diesem Winzling rund ein Hundertstel der Gravitationskraft, die das Schwarze Loch auf die Umgebung ausübt. Darum könnte es nach Meinung der Forscherinnen als Modell für supermassereiche Schwarze Löcher aus der Frühzeit des Kosmos dienen. ↵

(Spektrum.de, 12. August 2015)

A black hole with a bright accretion disk and a blue, swirling background.

REKORDMASSE

SCHWARZES LOCH

sprengt alle Dimensionen

von Daniel Lingenhöhl

Im Zentrum der Galaxie SAGE0536AGN tobt ein Schwerkraftmonster, das allen gängigen kosmologischen Theorien widerspricht. Wie ist das möglich?

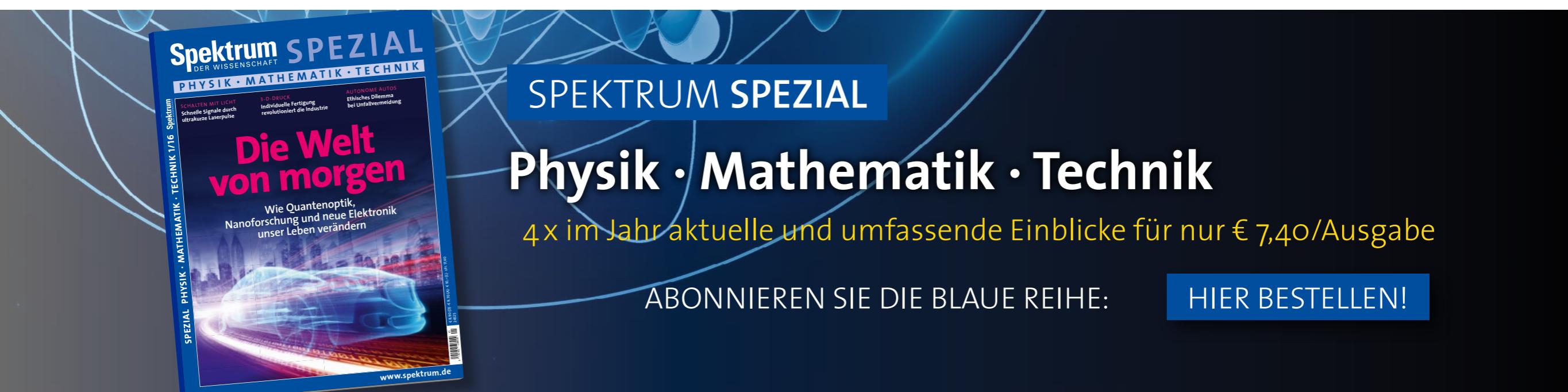
Im Zentrum der neun Milliarden Jahre alten Galaxie SAGE0536AGN befindet sich offensichtlich ein Schwarzes Loch, das das Vorstellungsvermögen der Astronomen sprengt: Es ist viel massereicher, als es gegenwärtige Theorien zur Entwicklung von Sternensystemen erlauben. Dies ergab eine Datenanalyse von Jacco van Loon von der Keele University und seinem Team. Die Forscher hatten mit Hilfe des Southern African Large Telescopes die Geschwindigkeit vermessen, mit der Gasströme um das Schwerkraftmonster rasen. Dabei werden die Moleküle so stark beschleunigt, dass sie Licht abstrahlen, das mit speziellen

Detektoren auf der Erde oder mit Welt- raumteleskopen erfasst werden kann. Je breiter die gemessenen Emissionslinien ausfallen, desto massereicher ist auch das verantwortliche Schwarze Loch. Im Fall von SAGE0536AGN entspricht die Masse demnach 350 Millionen Mal derjenigen unserer Sonne.

Die Gesamtmasse aller Sterne dieser Galaxie geben die Forscher mit 25 Milliarden Sonnenmassen an: Sie ist also 70 Mal massereicher als ihr zentrales Schwarzes Loch, doch reiche das nicht aus, um das Phänomen in ihrem Mittelpunkt zu erklären. Das Schwarze Loch ist 30 Mal größer, als es für eine derartige Galaxie eigentlich möglich

sein sollte, so van Loon und Co. »Es ist viel zu groß für seine Stiefel«, sagte van Loon. Normalerweise wachsen Schwarze Löcher im gleichen Maß wie ihre Galaxien, wenn diese an Masse zulegen, etwa weil sie Gase aus dem All anziehen und aufnehmen. In diesem Fall nahm das Schwarze Loch entweder deutlich schneller und stärker zu – oder das Sternensystem stellte vorzeitig sein Wachstum ein. »SAGE0536AGN wurde eher zufällig entdeckt. Wir wissen also nicht, ob es ein skurriler Einzelfall ist – oder die erste Galaxie einer völlig neuen Klasse«, meinen die Forscher. ↗

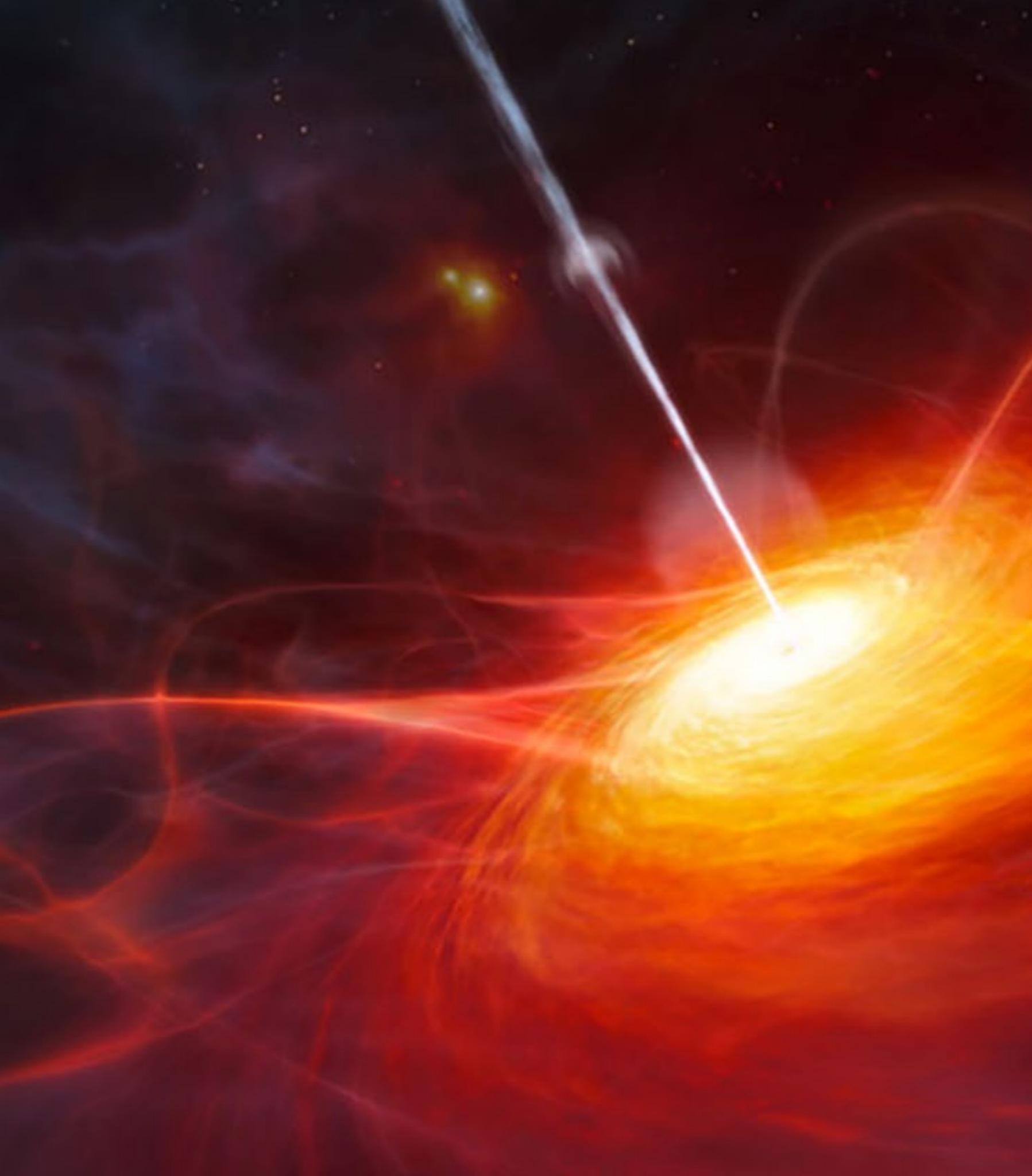
(Spektrum.de, 25. September 2015)



SPEKTRUM SPEZIAL
Physik · Mathematik · Technik
4x im Jahr aktuelle und umfassende Einblicke für nur € 7,40/Ausgabe

ABONNIEREN SIE DIE BLAUE REIHE:

HIER BESTELLEN!



RÄTSELHAFTE JETS

SCHWARZE LÖCHER MIT ENERGIE- ÜBERSCHUSS

von Ron Cowen

Auch 50 Jahre nach ihrer Entdeckung geben supermassereiche Schwarze Löcher Rätsel auf: Die gigantischen Jets, die sie ins Weltall schießen, tragen mitunter viel zu viel Energie. Jetzt diskutieren Forscher eine Lösung, die auch etwas über die Entstehung der Schwarzen Löcher verraten könnte.

Viele der Astronomen und Physiker, die damals zur Konferenz eingeladen waren, fürchteten um ihre Sicherheit. Andere hätten sie am liebsten gleich ausfallen lassen. Eine Konferenz in Dallas – nur wenige Wochen, nachdem US-Präsident John F. Kennedy dort ermordet worden war? Das schien einfach respektlos.

Letzten Endes aber fand das erste *Texas Symposium on Relativistic Astrophysics* wie geplant ab dem 16. Dezember 1963 statt. Und die meisten der eingeladenen Wissenschaftler erschienen – nachdem der Bürgermeister von Dallas sie in einem Telegramm um ihre Teilnahme gebeten hatte. Kennedys Tod warf dennoch seinen Schatten auf die Konferenz und überlagerete sich mit der ohnehin surrealen Stimmung dort – beschäftigte man sich doch mit einem schier unergründlich scheinenden Phänomen.

In jenem Jahr hatten Astronomen entdeckt, dass es sich bei einigen geheimnis-

vollen »quasistellaren« Objekten, so genannten Quasaren, nicht einfach nur um eine sonderbare Variante von gewöhnlichen Sternen handelte. Stattdessen waren sie offenbar unfassbar weit entfernt, denn ihr Licht brauchte Milliarden von Jahren, um die Erde zu erreichen. Zudem leuchteten sie ungewöhnlich hell – selbst hundert Galaxien mit Milliarden normalen Sternen schafften es nicht, sie zu überstrahlen. Gleichzeitig waren sie erstaunlich klein – nicht größer als unser Sonnensystem. Derart viel Energie in einem vergleichsweise winzigen Volumen sollte die Raumzeit stark krümmen, so wie von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben. Die Materie könnte dort sogar zu einem gigantischen Schwarzen Loch kollabieren – ein exotisches Szenario, das damals wie reine Sciencefiction anmutete.

»Quasare veränderten wirklich alles«, berichtet Michael Turner von der University of Chicago in Illinois. Im Dezember 2013 hielt der Kosmologe auf dem 27. Texas-Symposium, wieder in Dallas, einen Vor-

trag anlässlich des fünfzigjährigen Jubiläums der ersten Konferenz. Einsteins Theorie über die Existenz Schwarzer Löcher geriet hier auf einmal ins Blickfeld der Forscher – bis zu den 1960er Jahren galt sie dagegen eher als Nischenidee, die wenig mit praktischer Astronomie zu tun hatte. »Das öffnete Tür und Tor«, so Turner: Beobachtungen bestätigten bald, dass das Universum bizarrer und schonungsloser war, als es sich die Astronomen je vorstellten. Explosionen und Ausbrüche ereigneten sich am laufenden Band. Und Schwarze Löcher so groß wie unser Sonnensystem, aber mit der Masse von Millionen oder Milliarden Sonnen, fanden sich nicht nur innerhalb von Quasaren, sondern inmitten einer jeden großen Galaxie im Weltall – einschließlich unserer eigenen.

Quasare bleiben ein großes Rätsel

Das Symposium im vergangenen Jahr machte deutlich, dass supermassereiche Schwarze Löcher den Forschern immer noch große Rätsel aufgeben – angefangen

bei der Frage, wie sie solche enormen Energiemengen produzieren und freisetzen, bis hin zu der, wie sie im frühen Universum so schnell anwuchsen. Entscheidende Hinweise erhoffen sich die Forscher von Instrumenten wie dem Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) der NASA, das Mitte 2012 ins All startete.

Die Grundlagen der Energieerzeugung um Schwarze Löcher sind inzwischen gut verstanden. Sterne, Gas und Staub, die sich durch den Galaxienkern bewegen, werden durch die enorme Schwerkraft des Schwarzen Lochs angezogen und verdichtet. Anschließend trudelt die Materie auf spiralförmigen Bahnen weiter nach innen und bildet eine so genannte Akkretionsscheibe um den Schlund, wobei sie immer heißer wird. Nähert sich das überhitzte Material schließlich dem Ereignishorizont des Schwarzen Lochs – dem Punkt ohne Wiederkehr, ab dem selbst Licht nicht mehr entweichen kann – wurde bis zu 42 Prozent seiner Masse in Energie umgewandelt.

Diese Energie wird in Form von Wärme, Licht und oftmals gebündelten Materiestrahlen frei, in denen Teilchen senkrecht zur Akkretionsscheibe mit nahezu Licht-

geschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen schießen. Diese so genannten Jets können sich über Tausende oder sogar Millionen von Parsecs erstrecken. Ist ein solcher Teilchenstrahl direkt auf die Erde gerichtet, sprechen Astronomen von einem Quasar. Weisen die Jets dagegen seitwärts, wird die Galaxie als »aktiver galaktischer Kern« bezeichnet. Mangelt es dem Schwarzen Loch indes an Futter, so dass nur sehr wenig Gas und Staub um seinen Schlund herumwirbelt, ist es faktisch unsichtbar.

Einige Details in diesem groben Bild verunsichern allerdings. Ab 2006 zeigten beispielsweise mehrere Himmelsdurchmusterungen, dass die Jets ihre Schwarzen Löcher mit dreimal mehr Energie verlassen, als die vereinnahmte Materie überhaupt enthielt – eine grobe Verletzung der Energieerhaltung.

Lösung für das Jetproblem

Auf einer Konferenz in Dallas stellte Roger Blandford von der Stanford University in Kalifornien eine mögliche Lösung für das Problem vor. Der Physiker und seine Kollegen hatten im Computer simuliert, wie die Materiestrahlen entstehen [1,2]. Dabei gingen sie von einem schnell rotierenden

Die Jets der Schwarzen Löcher haben dreimal mehr Energie als die vereinnahmte Materie – eine grobe Verletzung der Energieerhaltung.

Schwarzen Loch mit einem starken Magnetfeld aus – Eigenschaften, die sich zwar nur schwer direkt messen lassen, aber theoretisch plausibel erscheinen. Die Magnetfeldlinien reichen in ihrem Modell weit ins All hinaus und drehen sich gemeinsam mit dem Schwarzen Loch. Da sie die Akkretionsscheibe wie starre Drähte durchbohren, reißen sie das Gas in der Scheibe mit sich. Unter bestimmten Umständen kann das Magnetfeld ausreichend Rotationsenergie vom Schwarzen Loch auf die Materiescheibe übertragen und die ungewöhnlich intensiven Jets mit Energie versorgen, so das Ergebnis der Simulationen.

Mit Beobachtungsdaten von NuSTAR konnten Astronomen zeigen, dass sich ein supermassereiches Schwarzes Loch tatsächlich sehr schnell dreht. Ausschlaggebend waren auch hier Computersimulationen: Denen zufolge ließe sich anhand von Röntgenstrahlen, die nahe dem Ereignishorizont emittiert werden, auf die Rotation eines Schwarzen Lochs schließen. Denn schnell rotierende Schwarze Löcher sollten die Materie näher an diesen Horizont heranziehen und sie damit einer enormen Schwerkraft aussetzen – infolgedessen würden von dort ausgehende Röntgen-

strahlen zu röteren, weniger energiereichen Wellenlängen verschoben.

Mit früheren Röntgenteleskopen hatten Astronomen zwar bereits Hinweise auf einen solchen gravitativen Fingerabdruck aufgespürt, doch war nie auszuschließen, dass Gaswolken die Akkretionsscheibe überlagern und das Ergebnis verfälschen. Verglichen mit seinen Vorgängern kann NuSTAR auch Röntgenstrahlen mit bis zu zehnmal höheren Energien beobachten, und die durchdringen solche Wolken problemlos. Und tatsächlich fand man in den Spektren der verhältnismäßig nahen Spiralgalaxie NGC 1365 eindeutige Signaturen von rotverschobenen Röntgenstrahlen, wie die wissenschaftliche Leiterin der NuSTAR-Mission Fiona Harrison vom California Institute of Technology in Pasadena auf der Konferenz im Dezember berichtete. Zusätzlich zogen die Forscher auch Messungen des europäischen Weltraumteleskops XMM-Newton heran, das den Himmel bei geringeren Röntgenenergien aufnimmt. Die zusammengefügten Daten deuten darauf hin, dass sich das zentrale Schwarze Loch von NGC 1365 nahezu mit der – gemäß Einsteins Theorie – maximal möglichen Geschwindigkeit dreht [3]. Es

besäße damit genügend Rotationsenergie, um seine gesamte Heimatgalaxie zu zerreißen, wenn diese Energie irgendwie entfesselt werden könnte.

Immer weiter entfernte Schwarze Löcher

Womöglich ist NGC 1365 keine typische Galaxie. NuSTAR und zukünftige Weltraumteleskope werden bald die Rotation von immer weiter entfernten Schwarzen Löchern messen, sagt Harrison. Da Astronomen auf diese Weise schrittweise in der Geschichte des Universums zurückgehen, könnten sie diese Daten auch bei einem weiteren großen Rätsel voranbringen. Man spürte nämlich Quasare auf, deren Schwarze Löcher offenbar schon rund 750 Millionen Jahre nach dem Urknall existierten – das Universum hatte damals weniger als sechs Prozent seines heutigen Alters erreicht – und Milliarden von Sonnenmassen in sich vereinen. Wie konnten sie so schnell so riesig werden?

Die Rotationsgeschwindigkeit eines Schwarzen Lochs sagt möglicherweise auch etwas über seine Entstehung aus, erklärt Harrison. Supermassereiche Schwarze Löcher sind einfach zu riesig, als dass sie aus einem einzigen Stern hätten hervorgehen



QUASAR

Künstlerische Darstellung eines der am weitesten entfernten und hellsten Quasaren, die Astronomen bislang entdeckt haben. Er entstand eine Milliarde Jahre nach dem Urknall.

können. Das unterscheidet sie von stellaren Schwarzen Löchern, bei denen der Vorfürst unter seiner eigenen Schwerkraft kollabierte. Vielleicht fügten sich die gigantischen Schwarzen Löcher aus vielen kleineren zusammen, wobei jeweils Exemplare mit beliebigen Rotationsrichtungen miteinander verschmolzen. Fanden solche Fusionen über Millionen oder Milliarden von Jahren statt, dürfte sich das ausgewachsene Schwerkraftmonster unterm Strich so gut wie gar nicht mehr drehen. Verschmolzen aber nur wenige mittelgroße Objekte zu einem supermassereichen Schwarzen Loch, liefe das Wachstum nicht nur schneller ab, auch die Drehbewegung der einzelnen Mitglieder hätte sich nicht unbedingt aufgehoben – und die resultierende Rotationsgeschwindigkeit könnte recht hoch ausfallen.

Die extrem hohe Drehgeschwindigkeit des Schwarzen Lochs in NGC 1365 legt nahe,

dass zumindest einige supermassereiche Schwarze Löcher auf diese Weise entstanden – auch wenn in diesem Szenario unklar bleibt, woher die erforderlichen mittelschweren Schwarzen Löcher kommen.

Schnelle Rotation, langsames Wachstum

Für das Wachstum der Schwarzen Löcher im frühen Universum könnte eine schnelle Rotation hingegen problematisch sein, sagt Avi Loeb vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge, Massachusetts. Denn ein schnell rotierendes Schwarzes Loch schleift den inneren Rand der Akkretionsscheibe oft mit sich und zieht diesen nach innen. Um den Ereignishorizont zu erreichen, muss die einfallende Materie hier also einer längeren Spiralbahn folgen – verglichen mit einem Schwarzen Loch, das sich nur langsam dreht. Der zusätzliche Weg kostet mehr Zeit und so wandelt sich weitere Masse in Strahlung um, anstatt der Masse des Schwarzen Lochs zugutezukommen.

Möglicherweise bringen starke Magnetfelder die Sache wieder in Ordnung, spekuliert Loeb. Indem sie Rotationsenergie vom Schwarzen Loch auf die äußere Scheibe übertragen, würde sich dieses bereits nach kur-

zer Zeit langsamer drehen. Auf diese Weise kann mehr Materie nach innen strömen und die ersten Schwarzen Löcher im Universum anwachsen lassen. Zukünftige Messungen sollten also zeigen – wenn Loeb denn richtig liegt –, dass sich supermassereiche Schwarze Löcher relativ gemächlich drehen.

Loeb favorisiert jedoch ein anderes Modell. Schwarze Löcher konnten demnach so rasch an Masse gewinnen, weil sie zeitweise einen überaus dichten und undurchsichtigen Materiestrom in sich hineinschlangen. Den Photonen blieb hierin nicht genügend Zeit, um aus dem Gas auszutreten, bevor es auf Nimmerwiedersehen in den Schlund stürzte. Die Strahlung wandert also ins Innere, anstatt zu türmen, und das Schwarze Loch vertilgt seine Energie als zusätzliche Masse [4].

Sagittarius A* im Herzen der Milchstraße

Manchmal kann ein starkes Magnetfeld ein Schwarzes Loch sogar im Wachstum hemmen, anstatt es dabei zu unterstützen. Genau das passierte womöglich mit dem uns nächsten supermassereichen Schwarzen Loch – Sagittarius A* –, das nur 8300 Parsec von der Erde entfernt im Herzen der Milchstraße liegt. Verglichen mit

anderen wirkt das hiesige Exemplar mit einer Masse von nur vier Millionen Sonnen geradezu winzig. Auch geht von ihm nur wenig Strahlung aus.

Die Frage ist, warum? Möglicherweise gibt es nicht viel Gas und Staub im Milchstraßenzentrum und damit wenig Futter für das Schwarze Loch. Vielleicht ist aber auch etwas anderes am Werk, sagt Mitchell Begelman von der University of Colorado in Boulder. »Man spekuliert darüber, ob manche Akkretionsströme ›magnetisch festgehalten‹ werden«, so der Astrophysiker.

2013 entdeckte NuSTAR beispielsweise einen stark magnetisierten Neutronenstern in einer Umlaufbahn um Sagittarius A*, einen so genannten Magnetar. Dieser befand sich nahe genug am Schwarzen Loch, um den Astronomen als Sonde für dessen Magnetfeld zu dienen. Indem sie die Radioemissionen des Magnetars genau analysierten, fanden sie heraus, dass das Magnetfeld von Sagittarius A* sowohl beträchtlich und als auch in hohem Maße geordnet sein muss [5] – vielleicht war es also in der Lage, den Futternachschub für das Schwarze Loch abzuschneiden und es auf eine Hungerkur zu setzen.

So oder so sollten Astronomen mehr darüber erfahren, was wirklich mit Materie passiert, wenn sie in ein riesiges Schwarzes Loch fällt. Und in den nächsten Monaten könnte es schon eine Art Vorpremiere geben. Auf der Konferenz in Dallas wurden Aufnahmen von NuSTAR präsentiert, denen zufolge die Nachbarschaft von Sagittarius A* eine Reihe von kleinen, stellaren Schwarzen Löchern und Neutronensternen umfasst.

Mit neuen Beobachtungstechniken lassen sich Sagittarius A* wohl noch mehr Geheimnisse entlocken. In den kommenden Jahren wollen Astronomen beispielsweise alle 64 Radioantennen des Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array im Norden Chiles mit anderen Radioteleskopen auf der Welt zusammenschalten und so ein erdumspannendes Netzwerk schaffen. Mit dem Teleskopverbund gelingt vielleicht eine ultrahoch aufgelöste Momentaufnahme von einem dünnen Ring, oder Schatten, um Sagittarius A* – das Schwarze Loch beugt das Licht von Objekten auf der gegenüberliegenden Seite in diese Form. Das Schattengebilde sollte mit den Vorhersagen von Einsteins Theorie übereinstimmen. Ist das jedoch nicht der Fall – be-

schreibt die allgemeine Relativitätstheorie die Raumzeit um ein Schwarzes Loch also nicht korrekt – könnten die Radioteleskope entscheidende Hinweise darauf liefern, welche alternative Theorie sie ersetzen sollte.

»Das ist die große Frage«, sagt Jonathan McKinney von der University of Maryland in College Park. Auch 50 Jahre nach dem ersten Texas-Symposium, »wollen alle wissen, ob Einstein recht hatte«.



(Spektrum.de, 5. Februar 2014)

- [1] McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A. & Blandford, R. D. Mon. Not. R. Astron. Soc. 423, S. 3083–3117, 2012
- [2] Sikora, M. & Begelman, M. C. Astrophys. J. Lett. 764, L24, 2013
- [3] Risaliti, G. et al. Nature 494, S. 449–451, 2013
- [4] Wyithe, J. S. B. & Loeb, A. Mon. Not. R. Astron. Soc. 425, S. 2892–2902, 2012
- [5] Eatough, R. P. et al. Nature 501, S. 391–394, 2013

Alles, was Sie wissen müssen.
Auf Ihrem Bildschirm



DAS SPEKTRUM
DER WISSENSCHAFT
DIGITALABO

Wissenschaftler berichten über die aktuellen Erkenntnisse ihrer Fachgebiete.
Jahrespreis (12 x im Jahr) € 60,–; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,–

HIER ABONNIEREN

ZENTRUM DER MILCHSTRASSE

UNBESCHADET

am Schwarzen Loch vorbei

von Jan Dönges

Ein Schwarzes Loch saugt alles in sich auf?
Irrtum, zeigen nun die bislang besten Aufnahmen
einer Gaswolke, die dem Massemonster im
Zentrum unserer Milchstraße gefährlich nahe kam.

Im Zentrum der Milchstraße sitzt ein extrem massereiches Schwarzes Loch, genannt Sagittarius A*, dessen Existenz sich allerdings nur indirekt erschließen lässt. Denn sichtbar wird ein solches Objekt nur während seiner Mahlzeiten. Dabei bringt es Materie, die es sich einverleibt, zum Aufleuchten. Im Fall von Sagittarius A* ließ sich dieser Prozess bislang leider noch nicht beobachten.

Auch nicht im Jahr 2014. Damals hatten Wissenschaftler auf eine regelrechte »Fressattacke« gehofft, nachdem sich abgezeichnet hatte, dass eine Gaswolke in die unmittelbare Nähe des Objekts geraten würde. Simulationen zeigten, dass die Wolke mit dem Namen G2 spektakulär zerrissen wer-

den würde und Teile ihrer Materie im Schwarzen Loch verschwänden.

Doch das von den Astronomen herbeigesehnte Spektakel blieb aus. Nun zeigen die bislang besten Aufnahmen von G2 sogar, dass die Wolke die Passage praktisch unverändert überstanden hat. Ein vielköpfiges Team um Andreas Eckart von der Universität zu Köln hat dazu die Region mit dem Very Large Telescope (VLT) der ESO über viele Jahre hinweg beobachtet.

Verborgener Stern sorgt für inneren Zusammenhalt

Die Aufnahmen im infraroten Licht, das vom leuchtenden Wasserstoff stammt, belegen, dass die Wolke sowohl vor als auch nach ihrer größten Annäherung an das Schwarze

Loch kompakt war. Sie wurde weder sichtbar auseinandergezogen noch verteilen sich die gemessenen Geschwindigkeiten breiter, heißt es in einer Pressemitteilung der Europäischen Südsternwarte (ESO).

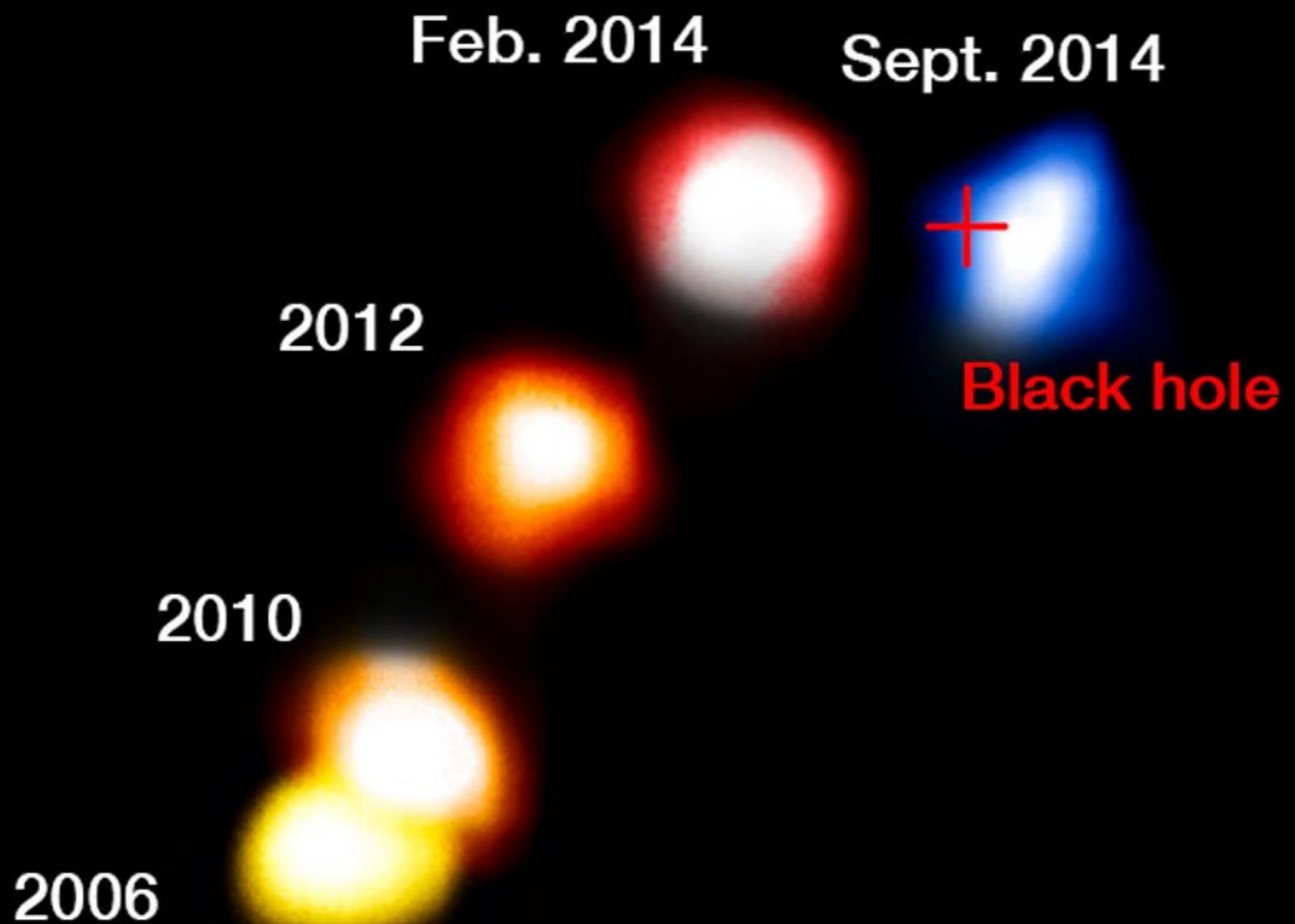
Über die Gründe für dieses Verhalten ließ sich zunächst nur mutmaßen. Als wahrscheinlichste Erklärung gilt, dass man sich offenbar bei den Simulationen über den inneren Aufbau der Wolke getäuscht hat. Anders als angenommen, dürfte es sich bei G2 nicht um eine locker verbundene Ansammlung von Gas handeln, sondern um ein Objekt mit massereichem Kern, der seine Hülle an sich bindet. »Wir gehen davon aus, dass es sich um einen jungen Stern handelt, der in Staub eingehüllt ist«, erklärt Eckart. Dessen Anziehungskraft genügte demnach, um sich gegen die Gezeitenkräfte des vier Millionen Sonnenmassen großen Schwarzen Lochs zur Wehr zu setzen.

Dass es sich bei Sagittarius A* tatsächlich um ein Schwarzes Loch handelt, haben

SAGITTARIUS A*

Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße aufgenommen im Röntgenlicht durch das NASA-Weltraumteleskop Chandra.





DIE WOLKE AUF KURS UM SGR A*

Diese beschriftete Collage zeigt die Bewegung der staubhaltigen Wolke G2, wie sie sich annähert und dann schließlich am supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße vorbeizieht. Die einzelnen Bilder der Wolke wurden farbig dargestellt, um die Bewegung der Wolke deutlich zu machen. Hierbei bedeutet rot, dass sie sich entfernt, und blau, dass sie sich der Erde annähert. Die Position des supermassereichen Schwarzen Lochs ist mit einem Kreuz markiert.

schon die Bahnbewegungen benachbarter Sterne gezeigt, die allesamt auf die Gravitationswirkung eines zentralen, unsichtbaren und sehr massereichen Objekts hinweisen. Auch die Bahn der Wolke (Video) belegt nun dessen Existenz: Geschwindigkeitsmessungen des Teams um Eckart zeigen, dass sich die Wolke vor der größten Annäherung mit etwa zehn Millionen Kilometern pro Stunde von der Erde weg bewegte. Dann machte sie eine harte Kehrtwendung und bewegte sich laut Messungen mit etwa zwölf Millionen Kilometern pro Stunde auf die Erde zu. ↵

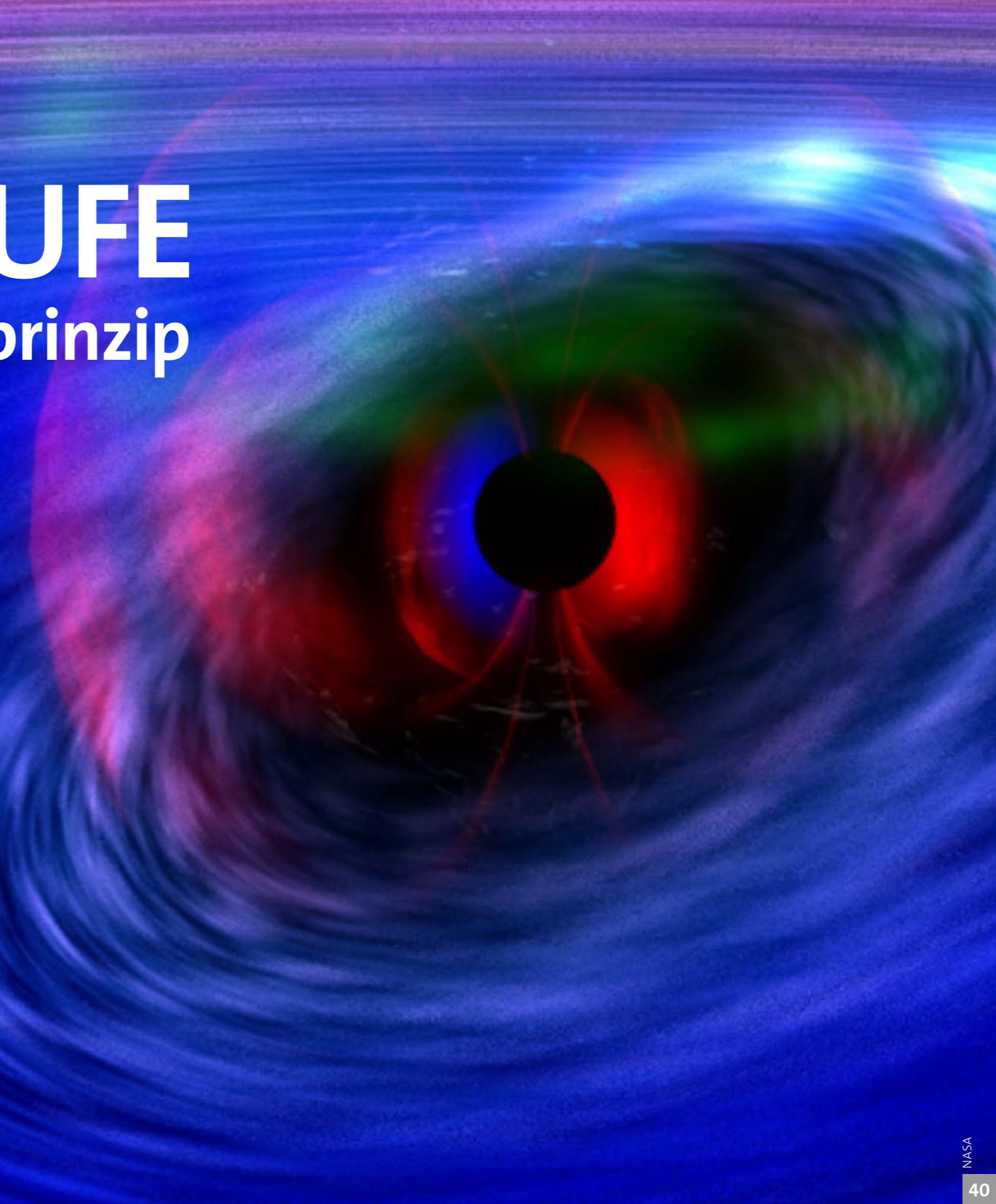
(Spektrum.de, 26. März 2015)

MODELLIERUNG

FEUERTAUFFE fürs Äquivalenzprinzip

von Zeeya Merali

Was passiert mit einem Astronauten, der in ein Schwarzes Loch fällt? Wird er bis zum Zerreißen in die Länge gezogen oder in einer unvorstellbaren Feuersbrunst geröstet? Theoretische Modelle halten bislang beides für möglich – und das könnte schwer wiegende Folgen für die Physik haben.



Im März 2012 begann Joseph Polchinski erstmals über Suizid nachzudenken – zumindest in mathematischer Form. Der Stringtheoretiker am Kavli Institute for Theoretical Physics im kalifornischen Santa Barbara grübelte darüber, was mit einem Astronauten passieren würde, wenn er in ein Schwarzes Loch fiele. Offensichtlich würde er sterben. Aber wie?

Nach den damals akzeptierten Modellen fiele dem Raumfahrer zunächst nichts Besonderes auf. Nicht einmal dann, wenn er den Ereignishorizont durchquerte – eine unsichtbare Grenze, jenseits derer nichts mehr aus dem Schwarzen Loch entweichen kann. Erst Stunden, Tage oder sogar Wochen später, abhängig von der Masse des Schwarzen Lochs, würde er plötzlich bemerken, dass die Schwerkraft stärker an seinen Füßen zieht als an seinem Kopf. Dieser Kraftunterschied wüchse schnell an, während er unaufhaltsam in die Tiefe rast, und risse ihn schließlich auseinander. Letztlich rasten seine Überreste dann in den unendlich dichten Kern des Schwarzen Lochs.

Doch die von Polchinski mit zwei seiner Studenten – Ahmed Almheiri und James Sully – sowie dem Stringtheoretiker Donald Marolf von der University of California in Santa Barbara (UCSB) durchgeführten Berechnungen erzählten eine andere Geschichte [1]. In ihrem Modell würden Quanteneffekte den Ereignishorizont in einen brodelnden Teilchenstrudel verwandeln. Fiele jemand dort hinein, stieße er gegen eine Wand aus Feuer und würde augenblicklich verkohlen.

Feuerwände im All?

Die im Juli 2012 veröffentlichte Studie erschütterte die Physikergemeinde. Denn solche Feuerwände würden das Äquivalenzprinzip und damit ein grundlegendes Prinzip der Physik verletzen. So gründete Albert Einstein vor fast einem Jahrhundert seine Theorie der Schwerkraft, die allgemeine Relativitätstheorie, darauf. Das Äquivalenzprinzip besagt unter anderem, dass ein Beobachter, der in ein Gravitationsfeld fällt – also auch in das eines Schwarzen Lochs –, genau die gleichen Phänomene sehen müsste wie ein Beobachter, der

durch den leeren Raum treibt. Ohne dieses Prinzip bröckelte Einsteins Theoriegerüst.

Sich über die Folgen ihrer Behauptung bewusst, boten Polchinski und seine Koautoren auch eine Version ihrer Geschichte an, in der letztlich keine Feuerwand auftaucht. Das alternative Ende hat jedoch einen hohen Preis: Physiker müssten dafür die andere tragende Säule ihrer Wissenschaft, die Quantenmechanik, opfern. Letztere beschreibt die Wechselwirkungen zwischen subatomaren Teilchen. Ihre provokante These löste eine wahre Flut an Forschungsarbeiten aus – alle mit dem Ziel, einen Ausweg aus dieser verfahrenen Lage zu finden. Eine für alle Seiten zufrieden stellende Lösung brachte allerdings niemand hervor. Steve Giddings, Quantenphysiker an der UCSB, beschreibt die Situation als »eine Krise in der Grundlagenphysik, die vielleicht einer Revolution bedarf, um sie zu überwinden«.

Mit diesem Gedanken im Hinterkopf kamen vergangenen Monat zahlreiche Experten auf dem Gebiet am Forschungszentrum CERN nahe Genf zusammen. Dabei hofften sie nicht zuletzt, den Weg für eine

einheitliche Theorie der Quantengravitation frei zu machen, die alle Grundkräfte der Natur in sich vereinigt – ein Vorhaben, dem Physiker bereits seit Jahrzehnten nachjagen. Das Konzept von Feuerwänden »erschüttert das Fundament von dem, was die meisten von uns über Schwarze Löcher annahmen«, eröffnet Stringtheoretiker Raphael Bousso von der University of California in Berkeley seinen Vortrag auf dem Treffen. »Es spielt Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie gegeneinander aus, ohne uns auch nur irgendeinen Hinweis darauf zu geben, in welche Richtung wir als Nächstes gehen sollen.«

Die Brandursache

Die Ursachen des Feuerwandproblems reichen zurück bis ins Jahr 1974. Damals zeigte der Physiker Stephen Hawking von der University of Cambridge, dass sich Schwarzen Löchern auf Grund von Quanteneffekten eine Temperatur zuordnen lässt [2]. In absoluter Isolation würden die Schwerkraftgiganten tatsächlich Wärmestrahlung freisetzen – Photonen und andere Teilchen – und dadurch allmählich an Masse verlieren, bis sie schließlich vollständig verdampfen. Die »ausgespuckten« Teil-

chen bilden dabei jedoch keine Feuerwand. Denn die Feinheiten der Relativitätstheorie sorgen dafür, dass ein Astronaut diese Strahlung nicht einmal bemerken würde, wenn er den Ereignishorizont durchquerte. Dennoch erstaunte Hawkings Ergebnis – nicht zuletzt, weil die Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eigentlich besagen, dass Schwarze Löcher ausschließlich Masse vertilgen und dadurch anwachsen, nicht aber verdampfen.

Hawkings Erkenntnisse fußen vor allem auf der Beobachtung, dass der »leere« Raum in der Quantenwelt gar nicht leer ist. In diesen subsubmikroskopischen Dimensionen herrscht nämlich ein ständiges Ge- wusel: Laufend entstehen Paare aus Teilchen und ihren entsprechenden Antiteilchen, die gleich darauf wieder rekombinieren und verschwinden. Nur in sehr aus- geklügelten Laborexperimenten hinterlässt dieses submikroskopische Chaos beobachtbare Spuren.

Bildet sich so ein Teilchen-Antiteilchen-Paar jedoch nahe dem Ereignishorizont, erkannte Hawking, könnte eines der Partikel vor der Rekombination in das Schwarze Loch fallen. Der überlebende Partner würde dann als so genannte Hawkingstrahlung

»Das ist eine Krise in der Grundlagenphysik, die vielleicht einer Revolution bedarf, um sie zu überwinden«

[Steve Giddings]

entweichen. In diesem Fall müsste das verschluckte Teilchen die positive Energie des davonfliegenden Teilchens ausgleichen, indem es negative Energie nach innen trägt – die seltsamen Gesetze der Quantenwelt machen es möglich. Die negative Energie würde dann von der Masse des Schwarzen Lochs abgezogen, wodurch der Schwerkraftgigant allmählich zusammenschrumpft.

Hawkings ursprüngliche Arbeit wurde seither von vielen Forschern verfeinert und erweitert; sein Fazit gilt inzwischen als nahezu allgemein akzeptiert. Damit einher geht jedoch ein beunruhigendes Paradoxon, das die Quantentheorie herausfordert. Denn der Quantenmechanik zufolge lässt sich Information nicht zerstören. Prinzipiell sollte es also möglich sein, alle wissenswerten Daten über die ins Schwarze Loch gefallenen Objekte wiederherzustellen, indem man den Quantenzustand der freigesetzten Strahlung misst. So einfach funktioniert das allerdings nicht, zeigte Hawking, denn die entweichende Strahlung besitzt einen zufälligen Charakter. Ob man also einen Stein oder eine gleich schwere Menge an Computerchips hineinwirft – das Ergebnis fällt gleich aus. Selbst wenn Astronomen das Schwarze Loch bis

an sein Lebensende beobachten würden, wüssten sie letztlich nicht, wie es entstand oder was hineinfiel.

Das Informationsparadoxon

Dieses als Informationsparadoxon bekannte Problem spaltete Physiker in zwei Lager. Einige, darunter Hawking, behaupteten, die Information ginge beim Tod des Schwarzen Lochs tatsächlich verloren. Und wenn das den Quantengesetzen widerspreche, dann müsse man eben bessere Gesetze finden. Andere, wie John Preskill vom California Institute of Technology in Pasadena, hängen dagegen an der Quantenmechanik. »Eine Zeit lang habe ich ernsthaft versucht, eine alternative Theorie zu entwickeln und darin den Informationsverlust zu berücksichtigen«, so der Quantenphysiker, »aber ich konnte keine Theorie finden, die irgendeinen Sinn ergeben hätte – niemand konnte das.« Die Pattsituation hielt zwei Jahrzehnte an und führte 1997 zur einer populären Wette: Preskill setzte öffentlich gegen Hawking, dass Information nicht verloren gehe. Der Gewinner sollte eine Enzyklopädie seiner Wahl erhalten.

Noch im selben Jahr beendete eine Entdeckung des Physikers Juan Maldacena von

der Harvard University in Cambridge den Stillstand. Maldacena stützte sich dabei auf einen früheren Ansatz, nach dem sich jede dreidimensionale Region des Universums durch Informationen beschreiben ließe, die auf seiner zweidimensionalen Grenzfläche kodiert sind [3, 5]. Das sei vergleichbar mit einem 2-D-Hologramm, in dem man per Laserlicht eine 3-D-Szene abbilden kann. »Wir benutzen das Wort Hologramm als Metapher«, sagt Leonard Susskind von der Stanford University in Kalifornien, der zusammen mit anderen den Ansatz entwickelte [4]. »Nachdem wir mehr Mathematik betrieben, schien es buchstäblich einen Sinn zu ergeben, dass es sich beim Universum um eine Projektion der Information auf die Grenzfläche handelt«, so der Stringtheoretiker.

Maldacena präsentierte eine handfeste mathematische Formulierung der Hologrammidee, wobei er Ansätze aus der Superstringtheorie verwendete [6]. Gemäß der Stringtheorie bestehen alle Elementarteilchen aus winzigen, vibrierenden Fäden. Sein Modell beschreibt ein 3-D-Universum aus Strings und Schwarzen Löchern, die einzig durch die Schwerkraft beeinflusst werden. Auf der 2-D-Oberfläche, die beide

»Der Ereignishorizont wäre buchstäblich ein Ring aus Feuer, in dem jeder verbrennt, der hindurchfällt«

[Joseph Polchinski]

begrenzt, gehorchen die Elementarteilchen und Felder hingegen den gewöhnlichen Quantengesetzen, ohne Schwerkraft. Hypothetische Bewohner des 3-D-Raums würden diese Grenzfläche allerdings nie sehen, weil sie unendlich weit entfernt ist. Das spielte aber keine Rolle: Alles, was im 3-D-Universum geschieht, ließe sich ebenso gut durch Gleichungen im 2-D-Universum beschreiben, und umgekehrt. »Es gibt ein mathematisches Wörterbuch, mit dem man zwischen den Sprachen dieser beiden Welten hin- und herwechseln kann«, erklärt Maldacena.

Demnach ließe sich sogar das Verdampfen eines Schwarzen Lochs im 3-D-Universum in der 2-D-Welt beschreiben, in der Gravitation nicht existiert, Quantengesetze herrschen und Information nie verloren geht. Und wenn Informationen dort erhalten bleiben, dann müssten sie das auch in der 3-D-Welt. Auf irgendeine Weise entweicht die Information also offenbar von den Schwarzen Löchern.

Eine für alle

Einige Jahre später bewies Marolf, dass alle Modelle der Quantengravitation denselben Regeln gehorchen – gleich ob sie auf

der Stringtheorie basieren oder auch nicht [7]. »Mich stimmte letztlich eine Kombination aus den Arbeiten von Maldacena und Marolf um«, erklärt Ted Jacobson, Quantenphysiker an der University of Maryland in Baltimore und langjähriger Befürworter des Informationsverlustes. 2004 gab Hawking dann öffentlich zu, sich geirrt zu haben, und löste seine Wettschuld ein: Er überreichte Preskill wie gewünscht eine Baseball-Enzyklopädie.

Durch Maldacenas Ansatz sahen die meisten Physiker das Paradox als aufgelöst an, obwohl niemand bisher erklären konnte, wie die Hawkingstrahlung eigentlich Informationen aus dem Schwarzen Loch schmuggelt. »Wir gingen wohl alle davon aus, es gäbe darauf eine einfache Antwort«, erinnert sich Polchinski. Doch die gab es nicht. Anfang 2012 nahmen sich Polchinski und sein Team der Sache an und stießen schon bald auf ein weiteres Paradoxon – und zwar auf jenes, das sie schließlich zur verhängnisvollen Feuerwand führen sollte.

Hawking hatte bereits gezeigt, dass der Quantenzustand von Teilchen, die dem Schwarzen Loch entkommen, zufällig ist. Somit kann es keine nützlichen Informationen mit sich tragen. Allerdings, so stellten

Susskind und Kollegen in den 1990er Jahren fest, könnte die Information im Quantenzustand der gesamten Strahlung kodiert sein. Dafür müssten die Teilchenzustände aber irgendwie miteinander verschränkt sein: Hierbei würde die Messung an einem der Teilchen sich augenblicklich auf seine Partner auswirken, egal wie weit diese voneinander entfernt sind. Die Wissenschaftler um Polchinski fragten sich, wie das angehen könne. Damit ein Teilchen überhaupt dem Schwarzen Loch entkommen kann, muss es mit seinem verschollenen Zwilling verschränkt sein. Liegen Susskind und seine Kollegen nun richtig, müsste es zudem auch mit aller Hawkingstrahlung verschränkt sein, die zuvor emittiert wurde. Gegen diese Annahme spricht die so genannte »Monogamie der Verschränkung«, eine strikte Vorschrift der Quantenmechanik, nach der ein Quantensystem nicht vollständig mit zwei voneinander unabhängigen Systemen auf einmal verschränkt sein darf.

Um diesem Widerspruch zu entgehen, schlugen Polchinski und seine Mitarbeiter vor, eine der beiden Verbindungen einfach zu kappen. Sie entschieden sich für die Verschränkung zwischen einem davonflie-

genden Hawkingteilchen und seinem verschluckten Zwilling. Schließlich wird die andere benötigt, um Informationen in der Hawkingstrahlung zu kodieren. Ihr Entschluss hatte allerdings seinen Preis. »Es ist ein gewaltsamer Prozess – in etwa so, als würde man die Bindungen eines Moleküls aufbrechen –, und es wird Energie freigesetzt«, erläutert Polchinski. Durch das Trennen vieler Teilchenpaare würden enorme Energiemengen erzeugt. »Der Ereignishorizont wäre buchstäblich ein Ring aus Feuer, in dem jeder verbrennt, der hindurchfällt«, sagt er.

Aufruhr in der Physikergemeinde

Dieses Szenario lässt sich wiederum nicht mit dem Äquivalenzprinzip vereinbaren und dessen Aussage, dass sich der freie Fall genauso anfühlt wie das Schweben im leeren Raum – unmöglich, wenn man während des freien Falls auch verkohlen kann. Also veröffentlichten die Physiker einen Artikel auf dem Dokumentenserver arXiv und stellten Physiker vor eine harte Wahl: Entweder müsse man akzeptieren, dass Feuerwände existieren und die allgemeine Relativitätstheorie versagt hat, oder aber man geht davon aus, dass die Information

in Schwarzen Löchern verloren geht und die Quantenmechanik falschliegt. »Bei der Auswahl erschienen uns Feuerwände als die weniger verrückte Option«, berichtet Marolf.

Der Artikel mischte die Physikergemeinde gehörig auf. »Zu behaupten, Einsteins Äquivalenzprinzip aufzugeben sei die bessere Wahl, war einfach unverschämt«, sagt Jacobson. Bousso stimmt zu und meint: »Eine Feuerwand kann nicht einfach im leeren Raum auftauchen, ebenso wenig wie eine Backsteinmauer plötzlich aus dem Nichts kommt und einem ins Gesicht schlägt. Wenn Einsteins Theorie am Ereignishorizont nicht gilt, dann müssen sich Kosmologen eher fragen, ob sie überall in vollem Umfang gilt.«

Polchinski hielt es sogar für möglich, dass er und sein Team einen dummen Fehler gemacht hatten. Also wandte er sich an Susskind, einen der Väter der Holografie, um ihn zu finden. »Meine erste Antwort lautete, sie liegen falsch«, erinnert sich Susskind. Er publizierte einen entsprechenden Artikel, zog diesen – nach weiterem Nachdenken – allerdings schnell wieder zurück [8]. »Meine zweite Antwort lautete, sie haben Recht, meine dritte, sie

liegen doch falsch, und meine vierte, sie haben Recht«, sagt er lachend. »Das brachte mir zwar den Spitznamen ›das Jo-Jo‹ ein, aber eigentlich ähnelt meine Reaktion ziemlich der der meisten Physiker.«

Seitdem erschienen mehr als 40 Aufsätze zum Thema auf arXiv – doch bislang fand noch niemand einen Fehler in der Logik des Teams. »Es ist eine wirklich schöne Herangehensweise, wenn man beweist, dass in unserem Verständnis von Schwarzen Löchern etwas inkonsistent ist«, sagt Don Page, ein Mitarbeiter von Hawking in den 1970er Jahren und inzwischen an der University of Alberta in Edmonton, Kanada. Immerhin boten Wissenschaftler eine Reihe von erfinderischen Lösungen an.

Effekte auf die reale Welt

Einer der vielversprechendsten Ansätze nach Susskind stammt von Daniel Harlow, einem Quantenphysiker an der Princeton University in New Jersey, und Patrick Hayden, einem Informatiker an der McGill University in Montreal. Die beiden prüften, ob ein Astronaut jemals in der Lage wäre, das Paradox mit Hilfe von Messungen in der realen Welt nachzuweisen. Dazu müsste er zunächst eine erhebliche Menge an ausge-

hender Hawkingstrahlung entschlüsseln und dann in das Schwarze Loch eintauen, um dort die einfallenden Teilchen zu untersuchen. Die Berechnungen der beiden zeigen, dass sich die Strahlung extrem schwer entschlüsseln lässt. Tatsächlich wäre der Astronaut erst fertig mit dieser Aufgabe, wenn das Schwarze Loch bereits verdampft ist – zu spät also, um noch hineinzuspringen [9]. »Kein fundamentales Gesetz hindert jemanden daran, das Paradox zu messen«, fasst Harlow zusammen, »aber in der Praxis ist es unmöglich.«

Giddings spricht sich dagegen für eine radikale Lösung aus und berechnete, wie sich eine Feuerwand vermeiden ließe. Demnach dürfte man die Verschränkung zwischen der Hawkingstrahlung und dem einfallenden Zwillingsteilchen erst dann unterbrechen, wenn sich das entweichende Teilchen bereits in einiger Distanz zum Ereignishorizont befindet. Denn so würde die freigesetzte Energie deutlich geringer ausfallen [10]. Diese Idee rettet zwar das Äquivalenzprinzip, doch einige Quantengesetze müssten geändert werden.

Auf dem Treffen am CERN beeindruckte die Teilnehmer vor allem, dass sich Giddings Modell vielleicht sogar testen ließe:

»Kein fundamentales Gesetz hindert jemanden daran, das Paradox zu messen, aber in der Praxis ist es unmöglich«

[Daniel Harlow]

Verschmelzen zwei Schwarze Löcher miteinander, sollen sie charakteristische Wellen in der Raumzeit erzeugen, die Gravitationswellendetektoren auf der Erde nachweisen könnten. Es gibt noch eine andere Möglichkeit, das Äquivalenzprinzip zu bewahren. Allerdings ist sie so umstritten, dass nur wenige es wagen, sie zu verfechten: Möglicherweise lag Hawking vor all den Jahren doch richtig, und Informationen gehen in Schwarzen Löchern verloren. Ironischerweise brachte ausgerechnet Preskill, der Mann, der gegen Hawking wettete, diese Alternative vergangenes Jahr auf einem Workshop über Feuerwände auf. »Es ist erstaunlich, dass man nicht ernsthaft über diese Option nachdenkt – schließlich wirkt sie nicht verrückter als Feuerwände«, sagt er. Sein Gefühl sagt ihm aber immer noch, dass die Information erhalten bleibt.

Dass Physiker sich davor scheuen, Hawkings alte Idee noch einmal zu überdenken, zeigt ihren immensen Respekt vor Maldacenas Werk: Sein Wörterbuch, das Gravitations- und Quantentheorie miteinander verknüpft, widerlegt offenbar den Informationsverlust. »Dies erlaubt den bislang tiefsten Einblick in die Gravitation, weil es sie mit Quantenfeldern verbindet«,

sagt Polchinski. Der Physiker vergleicht Maldacenas Resultat – das inzwischen knapp 9000-mal zitiert wurde – mit der Entdeckung im 19. Jahrhundert, dass eine einzige Theorie Licht, Elektrizität und Magnetismus verknüpft. »Wäre die Idee mit der Feuerwand in den frühen 1990er Jahren aufgekommen, ich glaube, sie wäre ein starkes Argument für den Informationsverlust gewesen«, sagt Bousso. »Aber inzwischen spielt niemand mehr mit dem Gedanken, dass Maldacena falschliegt.«

Die meisten Physiker würden ihm also in einer direkten Konfrontation mit Einstein den Rücken stärken. Maldacena fühlt sich dadurch geschmeichelt, glaubt aber nicht, dass es jemals dazu kommen wird. »Um das Feuerwand-Paradox vollständig zu verstehen, müssen wir das Wörterbuch vielleicht weiter ausarbeiten«, sagt er, »aber verwerfen müssen wir es nicht.« Dieses Problem dürfte auch in absehbarer Zeit nicht gelöst werden, nur darin sind sich bisher alle einig. Mit verschiedenen Strategien wollen sich Wissenschaftler der Feuerwand entledigen, doch in seinem Vortrag wies Polchinski bei allen Ansätzen auf Schwächen hin. »Ich bedaure es sehr, dass niemand die Feuerwand loswird«, bemerkt

er, »doch bitte versuchen Sie es auch weiterhin.« ↗

(Spektrum.de, 29. April 2013)

- [1] Almheiri, A. et al.: Black Holes: Complementarity or Firewalls?. arXiv:1207.3123, 2012
- [2] Hawking, S.W.: Black hole explosions? In: Nature 248, S. 30–31, 1974
- [3] Bekenstein, J.D.: Black Holes and Entropy. In: Phys. Rev. D 7, S. 2333–2346, 1973
- [4] Susskind, L.J.: The world as a hologram. In: Math. Phys. 36, 6377, 1995
- [5] Stephens, C.R. et al.: Black hole evaporation without information loss. In: Class. Quant. Grav. 11, S. 621–647, 1994
- [6] Maldacena, J.M.: The Large N limit of superconformal field theories and supergravity. In: Adv. Theor. Math. Phys. 2, S. 231–252, 1998
- [7] Marolf, D.: Unitarity and holography in gravitational physics. In: Phys. Rev. D 79, 044010, 2009
- [8] Susskind, L.: Complementarity And Firewalls. arXiv:1207.4090, 2012
- [9] Harlow, D., Hayden, P.: Quantum Computation vs. Firewalls. arXiv:1301.4504, 2013
- [10] Giddings, S.B.: Nonviolent information transfer from black holes: a field theory parameterization. arXiv:1302.2613, 2013



SINGULARITÄT

»ES GIBT KEINE SCHWARZEN LÖCHER«

von Zeeya Merali

Die Vorstellung eines »Ereignishorizonts«, ab dem nichts und niemand mehr den Schwerkraftgiganten entkommen kann, lässt sich Stephen Hawking zufolge nicht mit der Quantentheorie vereinen.

Die meisten Physiker würden vermutlich als Spinner abgetan, wenn sie in einer Publikation tollkühn behaupten: »Es gibt keine Schwarze Löcher« – zumindest nicht in der Form, wie wir sie uns für gewöhnlich vorstellen. Stammt so ein Entwurf für eine Neudefinition der Schwerkraftgiganten allerdings von Stephen Hawking, sieht die Sache schon anders aus, und man sollte einen Blick darauf werfen. In einem [online veröffentlichten Aufsatz](#) spricht sich der Physiker von der University of Cambridge in Großbritannien und einer der Schöpfer der modernen Theorie für Schwarze Löcher gegen die Vorstellung eines Ereignishorizonts aus. Hinter dieser unsichtbaren Grenze um jedes Schwarze Loch sollte nicht einmal Licht entweichen können.

Hawking schlägt stattdessen einen deutlich harmloseren »scheinbaren Horizont« vor, der Materie und Energie nur vorübergehend gefangen hält, bevor er sie – wenn auch in entstellter Form – schließlich wieder freigibt.

»In der klassischen Theorie gibt es kein Entrinnen aus einem Schwarzen Loch«,

sagte Hawking gegenüber der Zeitschrift »Nature«. Gemäß der Quantentheorie jedoch »können Energie und Informationen einem Schwarzen Loch entkommen«. Wollte man diesen Vorgang vollständig beschreiben, räumt der Physiker ein, bräuchte man eine Theorie, welche die Gravitationskraft erfolgreich mit den anderen drei Grundkräften vereinigt. Seit fast einem Jahrhundert suchen Physiker nun schon nach einer solchen Theorie, bisher erfolglos. »Der richtige Ansatz«, so Hawking, »bleibt ein Geheimnis.«

Am 22. Januar 2014 veröffentlichte Hawking seine Studie mit dem skurrilen Titel »Informationserhaltung und Wettervorhersage für Schwarze Löcher« auf dem Preprint-Server arXiv. Die Arbeit basiert auf einem Vortrag, den der Physiker im August 2013 [via Skype auf einer Konferenz am Kavli Institute for Theoretical Physics in Santa Barbara gehalten hatte](#).

Feuerbekämpfung

In seinem neuen Werk versucht Hawking das so genannte Feuerwand-Paradoxon zu lösen, mit dem sich Physiker seit fast zwei Jahren herumärgern. Entdeckt hatten es

der theoretische Physiker Joseph Polchinski vom Kavli Institute und seine Kollegen. In einem Gedankenexperiment waren die Forscher der Frage nachgegangen, was mit einem Astronauten passierte, wenn dieser in ein Schwarzes Loch stürzt.

Ereignishorizonte lassen sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie ableiten, was erstmals dem deutschen Astronom Karl Schwarzschild gelang. Ende 1915 berichtete er Einstein darüber in einem Brief – weniger als einen Monat nachdem dieser seine Theorie veröffentlicht hatte. In diesem Verständnis nahmen Physiker lange Zeit an, ein Astronaut würde den Ereignishorizont unbemerkt passieren, ohne etwas von seinem bevorstehenden Unglück zu ahnen. Dann zöge es ihn immer weiter ins Innere hinein – wobei er wie eine Spaghetti in die Länge gestreckt würde – und schließlich an der »Singularität« zerschmetterte, dem theoretisch unendlich dichten Kern eines Schwarzen Lochs.

Als Polchinski und sein Team diese Szene allerdings noch einmal ganz genau analysierten, kamen sie zu einer überraschenden Erkenntnis: Im Rahmen der Quantentheorie, die Teilchen im mikroskopischen

und subatomaren Größenbereich beschreibt, stellt sich die Situation völlig anders dar. Den Gesetzen der Quantenmechanik zufolge müsste sich der Ereignishorizont in ein äußerst energiereiches Gebiet – eine ›Feuerwand‹ – verwandeln, in dem der Astronaut förmlich geröstet würde.

Das Ergebnis beunruhigte. Denn auch wenn die Feuerwand den Quantenregeln gehorchte, widersprach sie doch der allgemeinen Relativitätstheorie: Laut dieser Theorie sollten die Gesetze der Physik für einen Menschen im freien Fall überall im Universum die gleichen sein – egal ob er in ein Schwarzes Loch fällt oder im leeren intergalaktischen Raum umherschwebt. Aus diesem Grund müsste es sich beim Ereignishorizont eigentlich um einen recht unscheinbaren Ort handeln.

Jenseits des Horizonts

Hawking schlägt nun eine dritte und verlockend einfache Variante vor: Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie blieben beide unangetastet, wenn Schwarze Löcher schlicht keinen Ereignishorizont besitzen würden, der Feuer fängt. Diese These basiert auf der Annahme, dass Quanteneffekte um das Schwarze Loch zu hefti-

gen Fluktuationen in der Raumzeit führen und infolgedessen keine scharfe Grenzfläche existieren kann.

An die Stelle eines Ereignishorizonts tritt bei Hawking ein »scheinbarer Horizont«. Entlang dessen Fläche werden Lichtstrahlen, die dem Kern des Schwarzen Lochs entrinnen wollen, gewissermaßen angehalten. In der allgemeinen Relativitätstheorie fallen diese beiden Horizonte für ein statisches Schwarzes Loch zusammen. Denn versucht Licht aus dem Inneren eines Schwarzen Lochs zu entkommen, kann es nur bis zum Ereignishorizont vordringen und kommt dann nicht mehr voran – so als würde es gegen ein Laufband ankämpfen. Grundsätzlich lassen sich die beiden Horizonte aber unterscheiden. Verschluckt das Schwarze Loch weitere Materie, schwollt sein Ereignishorizont an und wächst über den scheinbaren Horizont hinaus.

Auf der anderen Seite zeigte Hawking in den 1970er Jahren, dass Schwarze Löcher auch langsam schrumpfen können, indem sie »Hawkingstrahlung« aussenden. In diesem Fall sollte der Ereignishorizont theoretisch kleiner werden als der scheinbare Horizont. Die eigentliche Grenze stellt aber der scheinbare Horizont dar, so Hawkings

neue Idee. »Der Wegfall von Ereignishorizonten bedeutet, dass es keine Schwarzen Löcher gibt – im Sinn von Systemen, aus denen Licht nicht ins Unendliche entkommen kann«, schreibt Hawking.

»Das von Hawking gezeichnete Bild hört sich plausibel an«, sagt Don Page von der University of Alberta in Edmonton, Kanada. Der Physiker und Experte für Schwarze Löcher arbeitete in den 1970er Jahren mit Hawking zusammen. »Für manche mag die Annahme, dass es keinen Ereignishorizont gibt, vielleicht radikal klingen. Doch wir haben es hier mit extremen Quantenbedingungen zu tun – und man weiß noch nicht einmal genau, was Raumzeit überhaupt ist, geschweige denn, ob eine klar abgegrenzte Region existiert, die man als Ereignishorizont ansehen könnte.«

Page stimmt zwar zu, dass es ein Schwarzes Loch ohne Ereignishorizont geben könnte. Doch bezweifelt er, ob das allein ausreicht, um das Feuerwand-Paradoxon zu überwinden. Selbst die Präsenz eines flüchtigen scheinbaren Horizonts, gibt er zu bedenken, könnte zu denselben Problemen führen wie ein Ereignishorizont.

Anders als der Ereignishorizont kann der scheinbare Horizont eines Tages ver-

schwinden. Hawking ermöglicht damit ein Szenario, in dem »prinzipiell alles aus einem Schwarzen Loch entkommen kann«, betont Page. In seiner Publikation geht Hawking allerdings nicht genauer darauf ein, wie sich ein scheinbarer Horizont verflüchtigen würde. Ist er auf eine gewisse Größe zusammengeschrumpft, spekuliert Page, vereinigen sich Quanten- und Gravitationseffekte und es scheint durchaus plausibel, dass sich der scheinbare Horizont dann auflösen könnte. In diesem Augenblick würde alles, was einst im Schwarzen Loch gefangen war, freigegeben (wenn auch in keinem guten Zustand).

Liegt Hawking richtig, gibt es möglicherweise noch nicht einmal eine Singularität im Kern des Schwarzen Lochs. Stattdessen würde Materie nur vorübergehend hinter dem scheinbaren Horizont festgehalten, sich dort auf Grund der Anziehungskraft des Schwarzen Lochs zwar allmählich nach innen bewegen, aber nie im Zentrum zerstört werden. Informationen über diese Materie würden somit nicht zerstört, wären aber dennoch ziemlich entstellt. Würden sie irgendwann durch Hawkingstrahlung wieder freigesetzt, lägen sie also in einer sehr zerhackten Form vor – und

herauszufinden, worum es sich bei den verschluckten Objekten einst handelte, wäre so gut wie unmöglich.

»Es wäre einfacher, ein verbranntes Buch anhand seiner Asche zu rekonstruieren«, erläutert Page. In seinem Paper vergleicht Hawking die Situation mit dem Versuch, das Wetter frühzeitig vorherzusagen: Theoretisch ist es möglich, doch in der Praxis ist es viel zu schwierig, als dass es mit hoher Genauigkeit gelingt.

Polchinski zweifelt daran, dass tatsächlich Schwarze Löcher ohne Ereignishorizont im Weltall existieren könnten. Denn die heftigen Fluktuationen, die den Horizont laut Hawking vernichten, würden zu selten im Universum auftreten. »In Einsteins Gravitationstheorie unterscheidet sich der Horizont eines Schwarzen Lochs nicht so sehr von jedem anderen Teil des Weltraums«, so Polchinski. »In unserer eigenen Nachbarschaft lassen sich aber keine Raumzeitfluktuationen beobachten: Sie ereignen sich einfach zu selten auf großen Skalen.«

Für Raphael Bousso von der University of California in Berkeley zeigt der neue Ansatz, wie »abscheulich« Physiker die mögliche Existenz von Feuerwänden finden. Der

theoretische Physiker und ehemalige Student von Hawking gibt sich allerdings zurückhaltend, was die neue Lösung betrifft. »Dass es keine Punkte gibt, von denen man einem Schwarzen Loch nicht mehr entkommen kann – diese Idee ist in mancher Hinsicht noch radikaler und problematischer als die Existenz von Feuerwänden«, meint Bousso. »Doch die Tatsache, dass wir auch 40 Jahre nach Hawkings erster Publikation über Schwarze Löcher und Informationen immer noch solche Fragen diskutieren, demonstriert ihre enorme Bedeutung.« ↗

Der Artikel ist unter »[Stephen Hawking: 'There are no black holes'](#)« auf Nature News erschienen.

(Spektrum.de, 31. Januar 2014)

Preprint arxiv.org/abs/1401.5761, 2014.

The background of the image is a dark blue space filled with numerous small white stars. Overlaid on this are several concentric, glowing blue lines that curve and overlap, creating a sense of depth and motion, reminiscent of light bending around mass or a black hole's event horizon.

KOLLISIONEN

Bilder aus dem **STRUDEL DER RAUMZEIT**

von Dirk Eidemüller

Doppelsysteme Schwarzer Löcher
verwirbeln Raum und Zeit und damit auch
die Wege des Lichts. Eine Simulation
zeigt nun, welchen Anblick sie einem
Beobachter in der Nähe böten.

Nichts kann der enormen Schwerkraft von Schwarzen Löchern entkommen, nicht einmal Licht – dieser Eigenschaft verdanken sie schließlich ihren Namen. Auch in ihrer Umgebung verzerren Schwarze Löcher Raum und Zeit extrem und können dadurch Licht beliebig stark ablenken. Astronomen machen sich diesen Effekt zu Nutze: Bei so genannten Gravitationslinsen bündeln Schwarze Löcher das Licht von hinter ihnen liegenden Objekten und verstärken es so. Wenn ein helles Objekt wie etwa eine Galaxie exakt in Sichtlinie hinter einem Schwarzen Loch steht, kann es sogar zur Ausbildung von »Einsteinringen« kommen, bei denen rund um das Schwarze Loch ein Ring zu sehen ist, dessen Licht von der entfernten Galaxie stammt.

Mit irdischen Teleskopen lassen sich diese Effekte allerdings nur aus galaktischen Distanzen betrachten. Um sich vorstellen zu können, wie sie aus der Nähe aussehen, haben Wissenschaftler schon eine Reihe von Computersimulationen entwickelt. Darauf waren bislang aber vor allem die Umgebungen einzelner Schwarzer Löcher abgebildet. Doch Schwarze Löcher

tauchen nicht immer allein auf, sondern hin und wieder auch im Doppelpack.

Die Gleichungen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, mit denen die Physiker die Verzerrungen der Raumzeit um solche exotischen Gebilde beschreiben, sind jedoch sehr komplex. Sie lassen sich nur mit Hilfe unrealistisch einfacher Annahmen sauber lösen – oder mit der brutalen Rechenkraft von Supercomputern annähernd bestimmen.

Simulierte Raumzeitkrümmung

Forscher um Andy Bohn von der Cornell University haben nun zwei verschiedene Methoden kombiniert, um einen realistischen Nahblick auf solche Doppelsysteme Schwarzer Löcher zu generieren. Sie nutzten dazu Raumzeit-Simulationsdaten, die ursprünglich von der Suche nach Gravitationswellen stammen. Solche Experimente wollen Kräuselungen der Raumzeit nachweisen, die entstehen, wenn zwei Schwarze Löcher einander immer enger umkreisen und schließlich verschmelzen.

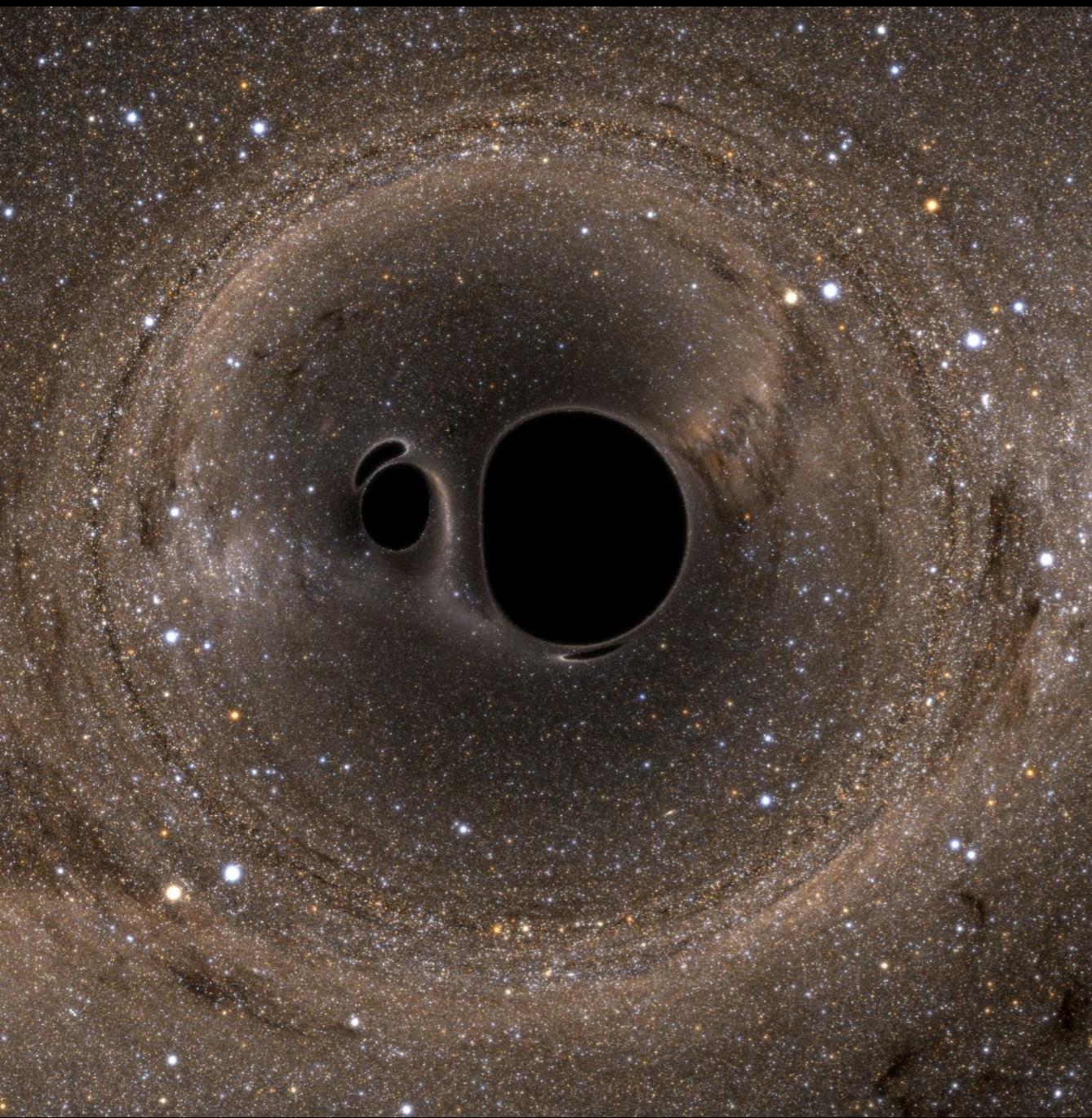
Aus der Ferne sieht ein solches Doppelsystem leicht wie ein einzelnes Schwarzes Loch aus, doch in seiner Nähe verwirbelt es die Raumzeit enorm, [zeigte auch ihre Stu-](#)

[die](#). Denn die beiden Schwarzen Löcher können umeinander mit Geschwindigkeiten rotieren, die einen guten Teil der Lichtgeschwindigkeit ausmachen. Dabei ziehen sie Raum und Zeit mit und sorgen so für einen kräftigen Raumzeitstrudel.

Lichtstrahlen von dahinterliegenden Objekten können deshalb sehr vielfältige Pfade um die beiden Schwarzen Löcher nehmen. Weiter außen vorbeilaufendes Licht wird nur leicht abgelenkt, wie bei einer normalen Gravitationslinse. Doch bereits um ein einzelnes Schwarzes Loch kann Licht mehrfach herumlaufen. Bei Doppelsystemen und dem Raumzeitstrudel, der sie umgibt, sind noch sehr viel komplexere Erscheinungen möglich.

Zwei schwarze Löcher erzeugen fraktale Strukturen

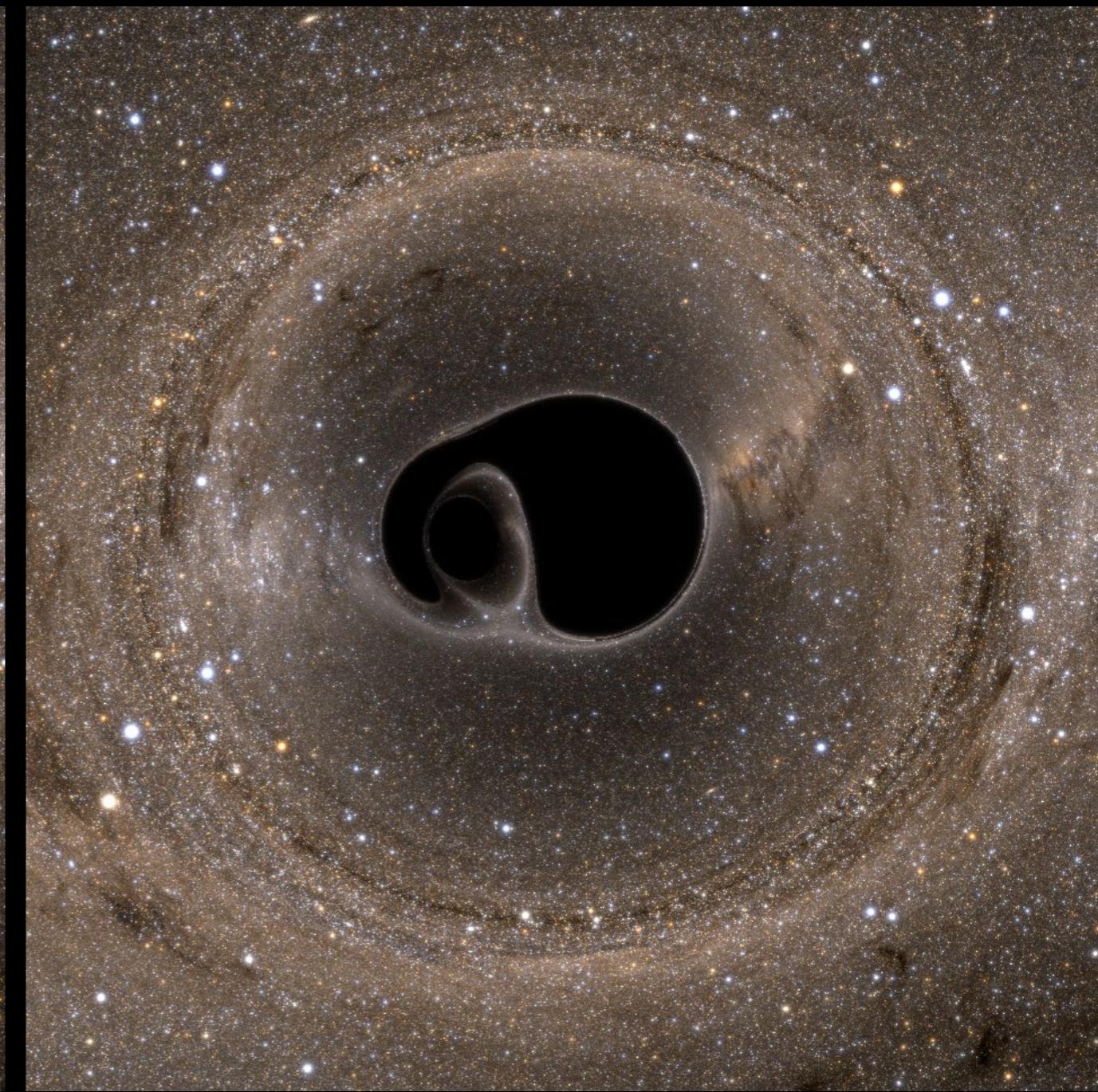
Um diese Pfade realistisch und mit vertretbarem Aufwand berechnen zu können, bedienten sich die Wissenschaftler deshalb auch einer Methode aus der Computergrafik namens Raycasting. Ausgehend von der Kamera verfolgt man hierbei Lichtstrahlen zurück in der Zeit, entlang der verschlungenen Pfade um das Doppelsystem, bis zu einer hypothetischen Lichtquelle im Hin-



SIMULATING EXTREME SPACETIMES, ANDY BOHN, FRANÇOIS HÉBERT, WILLIAM THROWE, DARIUS BUNANDAR, KATHERINE HENRIKSSON, MARK A. SCHEEL UND NICHOLAS W. TAYLOR

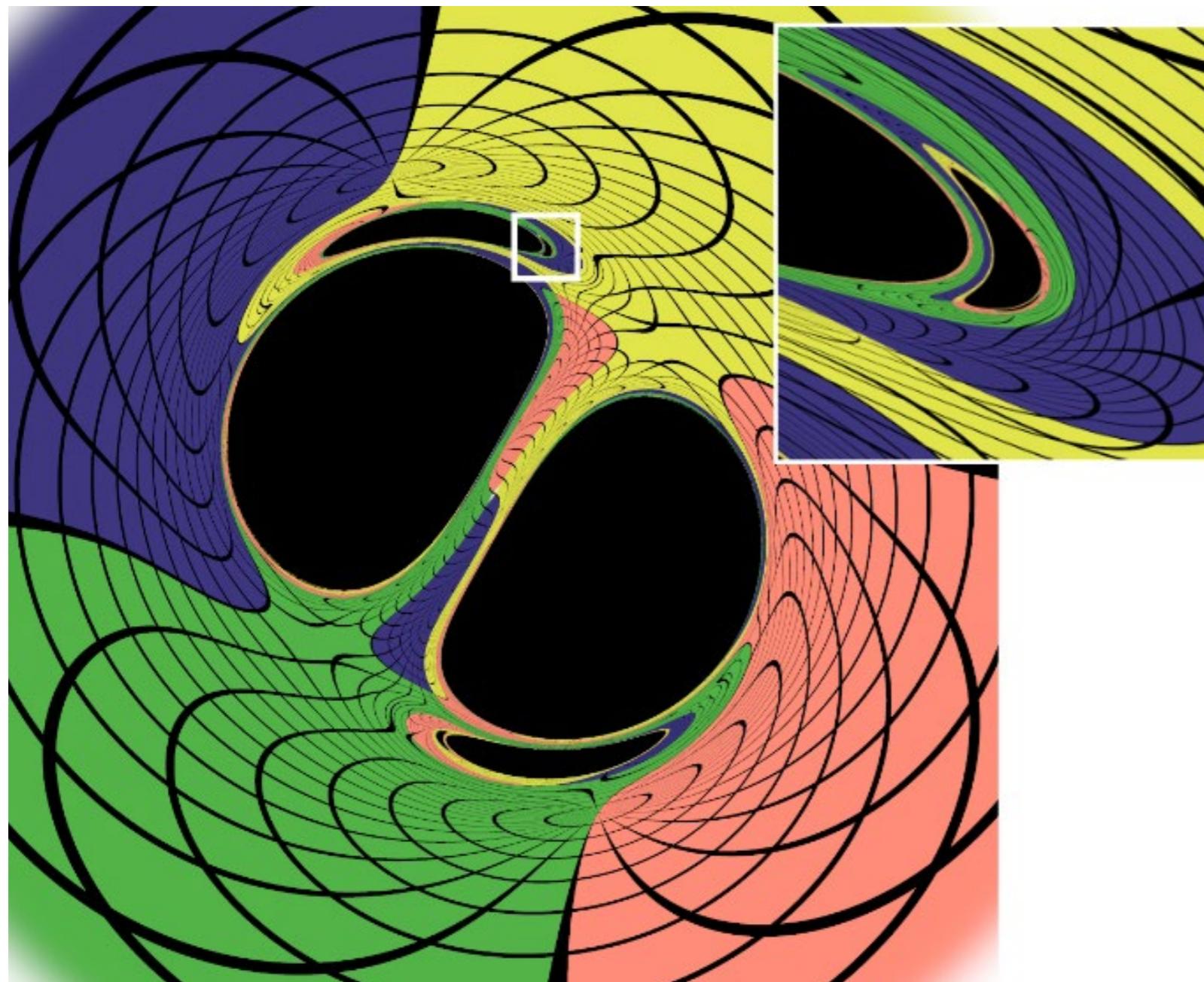
DOPPELSYSTEM IN DER DRAUFSICHT

Zwei Schwarze Löcher mit einem Massenverhältnis von drei zu eins kreisen umeinander. Den Hintergrund bildet eine Aufnahme der Milchstraße.



DAS DOPPELSYSTEM VON DER SEITE

Hier sind die unterschiedlich massereichen Schwarzen Löcher so dargestellt, dass die Blickrichtung senkrecht zur Drehachse des Doppelsystems steht. Je nach Abstand und Verdeckung ergeben sich unterschiedliche Ansichten.



FRAKTALE VERZERRUNG

Wählt man einen abstrakten Hintergrund, lässt sich die Verzerrung der Raumzeit noch besser nachvollziehen. So wird der linke obere Quadrant nochmals rechts unterhalb der Löcher dargestellt. Auch die fraktalen »Augenbrauen« sind deutlich zu sehen.

tergrund. Die Forscher wählten einmal farbliche Muster, um die Lichtwege möglichst deutlich zu machen, und einmal unsere Milchstraße, um darzustellen, was ein Astronaut aus der Nähe sehen könnte. Dabei mussten die Forscher die zeitliche Entwicklung der schnell rotierenden Schwarzen Löcher berücksichtigen, um zu realistischen Bildern zu gelangen.

In der Simulation zeigten sich eigenständliche Effekte wie so genannte »Augenbrauen«, wenn ein Schwarzes Loch etwa das andere als Gravitationslinse abbildet. Da Licht mehrfach um diese Gebilde laufen kann, bildeten sich sogar fraktale Strukturen heraus: Als die Forscher in die Simulation hineinzoomten, wurden am Rand der Augenbrauen weitere kleinere Augenbrauen sichtbar.

Noch ist die Teleskoptechnik nicht so weit, solche Strukturen von der Erde aus auflösen zu können. Künftigen Raumfahrern oder Computerspielproduzenten liefern diese Simulationen jedoch einen interessanten Vorgeschmack auf das, was im Strudel der Raumzeit passiert. ↗

ANALOGE GRAVITATION

Das **SCHWARZE LOCH** in der **BADEWANNE**

von Franziska Konitzer

Sind Schwarze Löcher wirklich schwarz? Wie bildeten sich Galaxien? Erste Antworten auf solche Fragen liefern jetzt raffinierte Nachbauten: Mini-Universen auf dem Labortisch.



Sperrige Dimensionen sind das große Problem der Astrophysik und Kosmologie. Schließlich ist es kaum möglich, am Rand eines Schwarzen Lochs herumzustochern, den Urknall nachzubauen oder die Raumzeit ein wenig zu verbiegen. So sind viele kosmologische Phänomene zwar theoretisch sehr gut beschrieben, ihre experimentelle Überprüfung gestaltet sich aber schwierig.

Forscher müssen sich etwas einfallen lassen – so wie Jeff Steinhauer von der Technischen Universität Israels in Haifa. In einem im Fachmagazin »Nature Physics« erschienenen Artikel beschreibt er die Erzeugung und den Nachweis von Hawking-Strahlung im Labor – derjenigen Strahlung, die ein Schwarzes Loch eben doch nicht völlig schwarz sein lässt.

Dafür baute Steinhauer ein Schwarzes Loch nach, das mit lediglich 100 Mikrometer Länge und vier Mikrometer Breite selbst dann noch bequem auf einem Labortisch Platz hat, wenn man die komplette Versuchsapparatur mit einrechnet. Freilich handelt es sich nicht wirklich um ein echtes Schwarzes Loch. Statt aus den Überresten eines massereichen Sterns besteht es aus

einer Flüssigkeit ultrakalter Atome, und statt Licht und Materie schluckt es Schall, ist also eher »still« und nicht »schwarz«.

Trotzdem verhält es sich in einigen zentralen Aspekten genau wie ein echtes Schwarzes Loch und ist somit ein Analogon, ein Beispiel aus dem noch recht jungen Forschungsfeld der analogen Gravitation: Wissenschaftler erschaffen meist mit Hilfe von Festkörpersystemen eine Umgebung, die die gekrümmte Raumzeit nachahmt. So erhalten sie Einblicke in Vorgänge in unserem Universum, die sonst kaum möglich wären – wie eben in die Entstehung von Hawking-Strahlung.

Warum Schwarze Löcher nicht völlig schwarz sind

Dabei handelt es sich um ein mysteriöses Strahlungsphänomen, das laut Berechnungen von Stephen Hawking aus dem Jahr 1974 im Umfeld Schwarzer Löcher auftreten müsste – ob es das wirklich tut, ist allerdings immer noch unklar. Grundlage des Effekts sind winzige Energiefluktuationen im Vakuum, durch die spontan Teilchen-Antiteilchen-Paare aus dem Nichts entstehen können. Normalerweise vernichten sich solche Paare sofort wieder – nicht je-

doch, wenn sie am Rand eines Schwarzen Lochs entstehen. Dann nämlich fällt mitunter eines der Teilchen in das Schwarze Loch hinein, während das andere entkommt. Im Ergebnis gibt das Schwarze Loch Wärmestrahlung ab. Der Haken dabei: Die Hawking-Strahlung ist so schwach, dass sie völlig in der Strahlung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds untergeht; ein direkter Nachweis gilt als aussichtslos. 1981 allerdings hatte der theoretische Physiker William Unruh [eine zündende Idee](#). Er bemerkte, dass die Hawking-Strahlung an sich kein Phänomen aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie sei. Stattdessen ist sie ein Quanteneffekt, der in der Nähe einer stark gekrümmten Geometrie auftritt – wie eben am Rand eines Schwarzen Lochs, auch Ereignishorizont genannt, wo Raum und Zeit auf Grund der starken Anziehungskraft des Schwarzen Lochs extrem stark gekrümmmt sind. Sollte es also gelingen, eine ähnliche Geometrie im Labor nachzuahmen, müsste auch dort eine Art Hawking-Strahlung entstehen. Eine solche Geometrie schafft das »stille Loch« auf dem Labortisch. Es besteht aus einem Bose-Einstein-Kondensat, also aus ultrakalten Ato-

men, die sich wie eine Superflüssigkeit ohne innere Reibung verhalten. »Das fließende Kondensat ist wie das Feld der Schwerkraft«, erklärt Jeff Steinhauer. Statt Licht schickte Steinhauer Schallwellen in dieses Feld und erzeugte mit Hilfe von Laserlicht einen akustischen Ereignishorizont: »Die Grenze des Laserlichts ist wie ein Wasserfall. Die Atome fließen diesen Wasserfall hinunter und werden so auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigt. Deshalb kann sich Schall nicht gegen diesen Strom ausbreiten.« Steinhauer vergleicht die Situation mit einem Menschen, der in einem Fluss gegen den Strom schwimmt, aber nicht schnell genug ist: Er wird nicht vorankommen und sogar zurückgetrieben. Ganz ähnlich wie der Schwimmer kommen auch Schallwellen, die sich entgegen der Fließrichtung des Kondensats bewegen, nicht weiter und werden so im »stillen Loch« gefangen. »Das ist ähnlich, wie wenn Licht aus einem Schwarzen Loch nicht herauskommen kann.«

Der erste Nachweis scheint gelungen

Bildete sich am akustischen Ereignishorizont nun ein Paar von Schallwellen, wurde eine der Schallwellen im »stillen Loch« ge-

fangen und bewegte sich in der Region, die im Kondensat durch das Laserlicht begrenzt wurde, hin und her. Dadurch wurden weitere Schallwellenpaare erzeugt und verstärkten die Strahlung so lange, bis die Messgeräte anschlugen: Es ist der erste direkte Nachweis von im Labor erzeugter Hawkingstrahlung überhaupt.

Schon einmal stand diese Behauptung im Raum: Im Jahr 2010 [berichteten Wissenschaftler um Daniele Faccio](#), inzwischen an der Heriot-Watt University im schottischen Edinburgh, dass sie Hawkingstrahlung im Labor erzeugt hätten. Dazu verwendeten sie gepulstes Laserlicht, das innerhalb eines Glasblocks den Brechungsindex des Lichts veränderte und so einen Ereignishorizont erzeugte, an dessen Rändern sich laut den Forschern Hawking-Strahlung beobachten ließ. Doch inzwischen haben die Forscher ihr Ergebnis zurückgezogen – auch wenn sie immer noch nicht genau wissen, welchen Effekt sie damals eigentlich beobachtet haben. Auch bei Jeff Steinhauers Experiment gibt es einen Wermutstropfen: Die Verstärkung der Schallwellen, die schließlich den Nachweis der Hawkingstrahlung ermöglichte, war nur für eine einzige Schallfrequenz möglich. Daher gibt es noch eini-

ges zu tun: »Im nächsten Schritt geht es darum, das gesamte Spektrum der Hawking-Strahlung nachzuweisen, nicht nur eine einzige Frequenz«, so Steinhauer.

Ein Wassertank mit Ereignishorizont

Hinweise auf dieses Spektrum der Wärmestrahlung fanden Silke Weinfurtner von der britischen University of Nottingham und Kollegen bereits vor einigen Jahren: [Sie bauten ein Schwarzes Loch in einer Badewanne nach](#) – beziehungsweise in einem Wassertank, sechs Meter lang und einen halben Meter tief. Ein speziell geformtes Hindernis im Tank veränderte die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers so, dass diese höher war als die Geschwindigkeit, mit der sich kleine Oberflächenwellen auf dem Wasser ausbreiteten.

»Wir haben diese Wasserwellen gegen einen effektiven weißen Horizont geschickt«, erklärt Weinfurtner. »Im Gegensatz zu einem schwarzen Horizont, aus dem nichts entkommen kann, kann in einen weißen Horizont nichts eindringen, aber alles aus ihm entweichen.« Der Horizont in diesem Fall war das Hindernis, das die Oberflächenwellen nicht überschreiten konnten. »Wenn man Wasserwellen ver-

schiedener Frequenzen zu diesem Horizont schickt, werden sie in zwei Wellen aufgeteilt«, sagt Weinfurtner. »Hawkingstrahlung ist die Aufteilung der Energie auf diese beiden Wellen.« Zwischen diesem Verhältnis und der Temperatur des weißen Horizonts besteht ein Zusammenhang. Und tatsächlich ähnelte das Intensitätsverhältnis dem eines extrem kalten Objekts mit einer Temperatur von Bruchteilen über dem absoluten Nullpunkt.

Überraschend gute Übereinstimmung

»Wir waren erstaunt, wie gut sich dieser Effekt beobachten ließ«, gibt Weinfurtner zu. »Um die Analogie herzustellen, haben wir nämlich sehr viele Annäherungen gemacht.« Denn natürlich spielen im Wasser Quantenprozesse keine Rolle: Die Hawkingstrahlung in Weinfurtners Experiment war angeregt und trat nicht spontan auf wie in der Nähe eines echten Schwarzen Lochs oder im »stillen Loch«, das aus einem Bose-Einstein-Kondensat bestand.

Trotzdem funktionieren diese und andere Modellsysteme der analogen Gravitation gut – erstaunlich gut. Laut Weinfurtner liegt der Trick in den Annäherungen, die Physiker gerne verwenden, um ihre Systeme und

die zu Grunde liegende Mathematik zu vereinfachen: »Wir nehmen an, dass sich bei der Ausbreitung von Oberflächenwellen der Wasserfluss selbst nicht ändert. Dann kann man nämlich die Navier-Stokes-Gleichungen, die den Wasserfluss beschreiben, vereinfachen. Und wenn ich diese vereinfachten Gleichungen herleite, schauen sie genauso aus wie die Gleichungen, die beschreiben, wie sich Teilchen in einer gekrümmten Raumzeit verhalten.« Aber auch andere Effekte und Phänomene wollen Forscher im Labor nachstellen. Silke Weinfurtner und ihre Kollegen interessieren sich beispielsweise derzeit für die kosmische Teilchenproduktion, von der Kosmologen annehmen, dass sie für die großräumigen Strukturen in unserem Universum verantwortlich ist. Demnach gab es kurz nach dem Urknall Quantenfluktuationen. Diese winzigen Dichteschwankungen sollen dann in der inflationären Phase, in der sich das Universum extrem schnell ausdehnte, vergrößert worden sein. Sie bildeten somit eine Art Gerüst, auf dem sich mit der Zeit Galaxien und Galaxienhaufen bildeten. Silke Weinfurtner will dafür ein Bose-Einstein-Kondensat verwenden: »Wenn ich die Schallgeschwindigkeit im Kondensat ändere, kann

»Wir waren erstaunt,
wie gut sich dieser
Effekt beobachten ließ«

[Silke Weinfurtner]

ich darin Fluktuationen anregen. Man kann auch existierende Fluktuationen im Kondensat verstärken. Dieser Mechanismus ist äquivalent zu dem, wie in unserem Universum in der inflationären Phase Teilchen erzeugt wurden.«

Galaxienentstehung im extremen Miniaturmaßstab

Diese winzigen Quantenfluktuationen nachzuweisen, dürfte allerdings nicht leicht werden, denn laut Weinfurtner gibt es in so einem Kondensat auch immer thermische Fluktuationen. Diese entstehen selbst dann, wenn Wissenschaftler ihre Bose-Einstein-Kondensate bis auf unter ein milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt kühlen. Der letzte Bruchteil an Temperatur sorgt trotzdem für winzige thermische Schwanungen. Diese von den Quantenfluktuationen zu unterscheiden, ist schwierig, so Weinfurtner: »Wenn ich das expandierende Universum nachstellen möchte, habe ich das Problem, dass diese thermischen Fluktuationen auch verstärkt werden.« Gelingt das Experiment aber, eröffnen sich spannende Möglichkeiten: »Eine Frage in der Kosmologie ist, wie die Quantenfluktuationen kurz nach dem Urknall in den klassischen Be-

reich, also in Dichteschwankungen, übergehen konnten. Das kann man in dem Kondensat testen.« Nikodem Szpak von der Universität Duisburg-Essen hingegen gibt sich nicht nur mit unserem herkömmlichen Standarduniversum zufrieden. [In einem Artikel](#) beschreibt er, wie man viele verschiedenartige Universen mit unterschiedlichen Eigenschaften erzeugen könnte. Sein Vorschlag sieht vor, ultrakalte Atome in mit Laserlicht erzeugten optischen Gittern zu fangen. Die Atome darin können manchmal von einem Punkt des Gitters zu einem anderen hüpfen. Betrachtet man dieses Hüpfen nicht nur für einzelne Atome, sondern auf großen Skalen, gleicht es dem Verhalten von Teilchen in einer flachen Raumzeit. Das bedeutet auch: Verändert sich das optische Gitter – ist es also nicht mehr komplett gleichmäßig –, sollten sich die hüpfenden Atome so wie Teilchen in einer gekrümmten Raumzeit verhalten.

Gravitationswellen in Gittern ultrakalter Atome?

Indem das optische Gitter schrumpft oder wächst, sollte es sogar möglich sein, ein Universum nachzustellen, das expandiert oder sich zusammenzieht. Szpak hält es so-

gar für möglich, dass man mit einem solchen Versuchsaufbau analoge Gravitationswellen erzeugen könnte, also jene Wellen, die Einstein in der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben hat und die Wellen des Raums selbst darstellen. Gravitationswellen sollten bei der Entstehung von Schwarzen Löchern oder anderen extremen gravitativen Ereignissen im Universum entstehen, ihr direkter Nachweis ist aber bislang noch nicht gelungen.

Trotzdem können natürlich auch Szpaks Analogien nicht beschreiben, in welcher Art von Raumzeit wir uns wirklich befinden und ob sie tatsächlich so flach ist, wie Kosmologen derzeit annehmen. »Wir können auch nicht beweisen, dass Schwarze Löcher wirklich strahlen«, fügt Silke Weinfurtner hinzu. Trotzdem ist sie optimistisch, schließlich bewegt sich die analoge Gravitation auf einem Gebiet, in dem guter experimenteller Rat oft teuer ist und die Physiker sich auf Theorie und Computersimulationen verlassen müssen. »Wir können diesem Feld eine experimentelle Komponente hinzufügen. Wir können lernen, was es heißt, solche Effekte wirklich zu sehen.« ↗

(Spektrum.de, 9. Januar 2015)

Jetzt als Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.

