

Wie

SCHWARZE LÖCHER

beim Bau des UNIVERSUMS halfen

Ohne die Massemonster würden wir das Universum kaum wiedererkennen – vielleicht würden wir nicht einmal existieren

VON CHRISTOPHER WANJEK

Ihr Name deutet es schon an – Schwarze Löcher senden keinen einzigen Lichtstrahl aus. Dennoch stammt bis zu einem Fünftel der Strahlungsenergie im Universum aus ihrer unmittelbaren Umgebung. Der Mechanismus hinter diesem scheinbaren Widerspruch heißt Akkretion: Die von der extremen Schwerkraft eines Schwarzen Lochs angelockte Materie sammelt sich in einem abgeflachten Ring, der Akkretionsscheibe, um die kompakte Masse. Nahe dem Horizont des Schwarzen Lochs, dort, wo die Anziehungskraft am stärksten ist, wird das Gas in der Scheibe auf hunderte von Millionen Grad aufgeheizt und leuchtet hell auf, bevor es schließlich in seinem Schlund verschwindet.

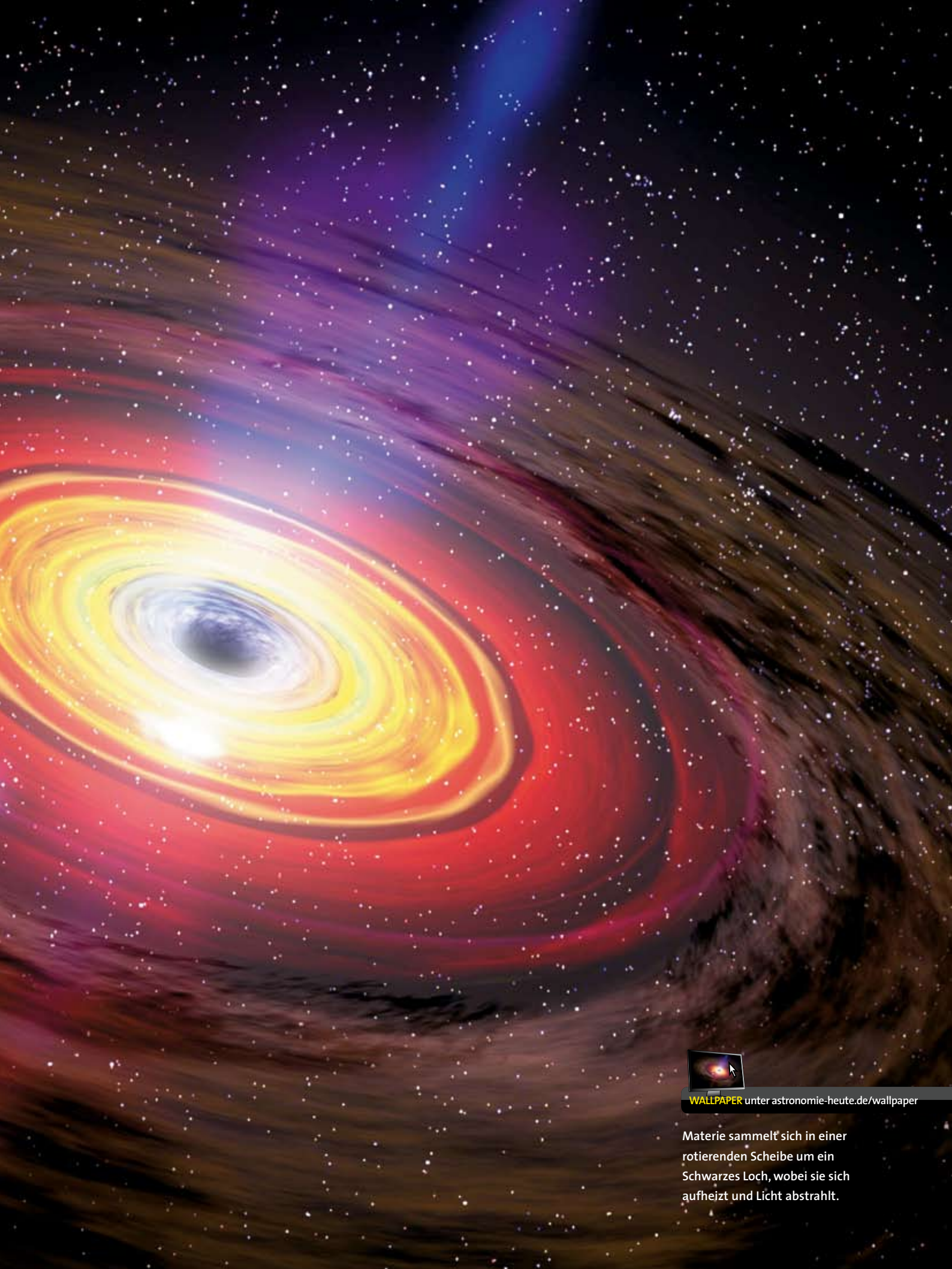
Die Akkretion ist allerdings alles andere als eine Einbahnstraße in die Unterwelt. Zwar strömt ein Teil der Materie unwiderstehlich in das Schwarze Loch – doch ein ebenso großer Teil wird mit enormen Geschwindigkeiten wieder aus der Scheibe herausgeschleudert. Durch ihre enorme Gravitation und die daraus resultierenden Prozesse werden die Massegiganten so etwas wie die Chefarchitekten des Weltalls. »Ohne Schwarze Löcher würde das Universum völlig anders aussehen«, erklärt Richard Mushotzki vom Goddard Space Flight Center der Nasa.

Obwohl Schwarze Löcher eine wichtige Quelle von Strahlung und Bewegung im Universum sind, besitzen die Astrophysi-

ker bislang nur ein äußerst rudimentäres Verständnis vom Akkretionsprozess: Materie strömt hinein und Energie kommt heraus. Das Problem beginnt mit unseren allzu simplen Vorstellungen über Schwarze Löcher als gefräßige Monster im All, die mit spielender Leichtigkeit alles aufsaugen, was ihnen zu nahe kommt.

»Tatsächlich ist es gar nicht so einfach, etwas in ein Schwarzes Loch fallen zu lassen«, klärt Mushotzki auf. Denn mit einfacher Physik lässt sich nicht einmal erklären, wie Materie jemals den Ereignishorizont erreichen kann. Diese theoretische Grenze um ein Schwarzes Loch markiert jenen Bereich, aus dem einmal hineingefallene Materie nie wieder entkommen kann. Die Situation ähnelt derjenigen in einem Karussell: Hält man sich dort nicht fest, so schleudert einen die Drehung nach außen. Auf Materie, die um ein Schwarzes Loch kreist, wirkt ebenfalls diese Zentrifugalkraft.

Dennoch scheinen Staub und Gas aus der galaktischen Umgebung ihren Weg in Richtung Höllenschlund zu finden. Besonders beeindruckend demonstrieren das die Giganten unter den Schwarzen Löchern: die Quasare. Bei ihnen handelt es sich um Galaxienkerne, angetrieben durch supermassereiche Schwarze Löcher, die heller als eine Billion Sonnen leuchten können. Damit durch Akkretion so viel Strahlungsenergie erzeugt werden kann, muss das



WALLPAPER unter astronomie-heute.de/wallpaper

Materie sammelt sich in einer rotierenden Scheibe um ein Schwarzes Loch, wobei sie sich aufheizt und Licht abstrahlt.

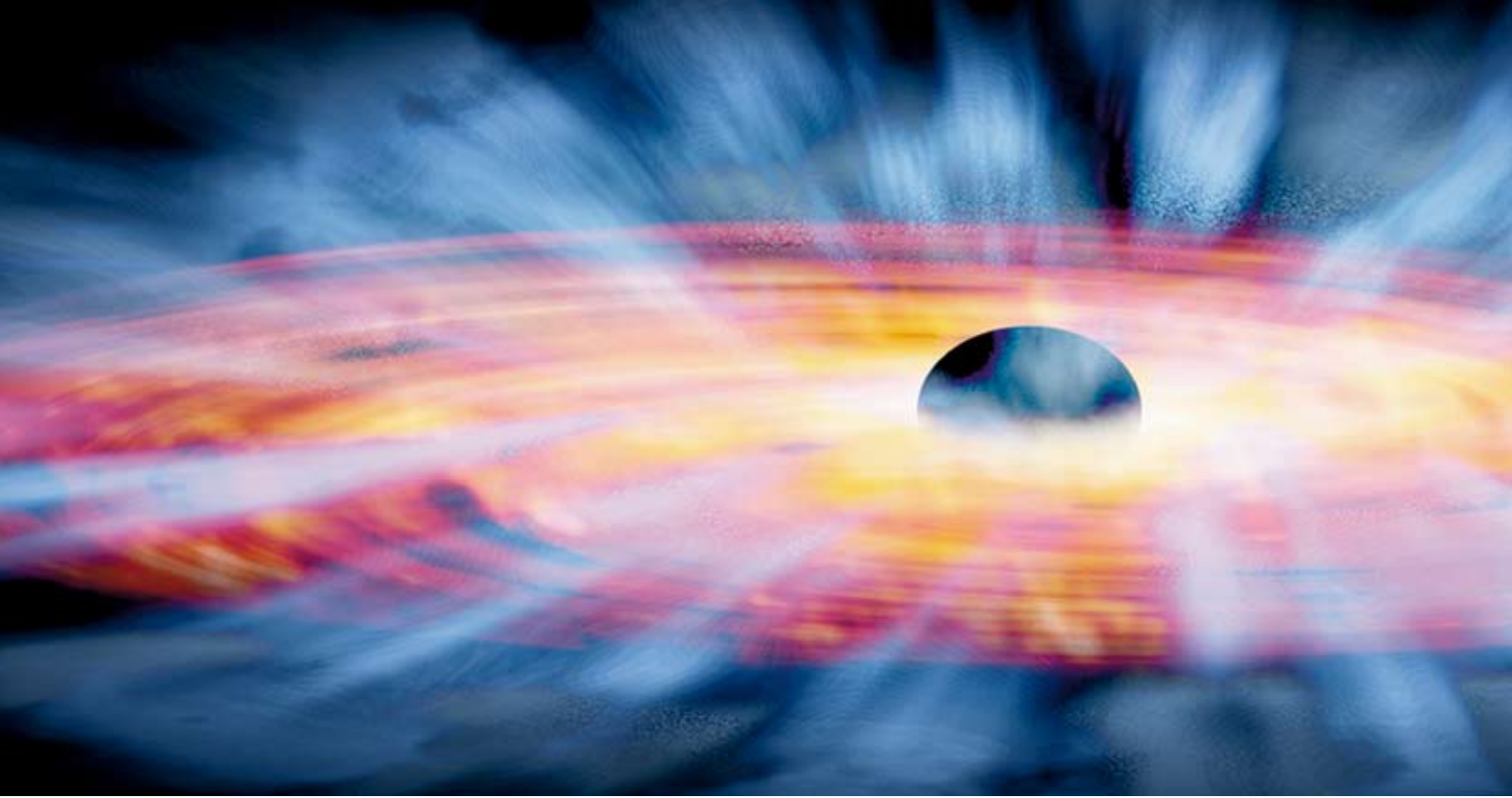


ILLUSTRATION: NASA / CXC, MELISSA WEISS

Gas eine Menge von seinem Drehimpuls abgeben. Nur dann kann es nahe genug an das Schwarze Loch herankommen, um ausreichend Energie freizusetzen. Die Schwerkraft des Schwarzen Lochs kann das nicht allein bewerkstelligen.

Wie die Akkretion die gewaltige Strahlung erzeugt, ist dagegen leichter nachzuvollziehen. Obwohl auch andere Prozesse involviert sind, spielt Reibung dabei die Hauptrolle. Elektronen und Ionen, elektrisch geladenen Atome, wirbeln mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in der Scheibe herum und senden dabei elektromagnetische Strahlung in vielen Wellenlängenbereichen aus.

Geradezu peinlich

Doch spätestens bei der Entstehung der Materieströme und Gaswinde, durch die Materie der Akkretionsscheibe zurück in den intergalaktischen Raum geblasen wird, müssen die Astronomen wieder passen. »Die Akkretion setzt eine gewaltige Menge an Energie frei«, sagt Christopher Reynolds von der University of Maryland. »Dass wir nicht verstehen, durch welchen Kanal diese Energie fließt, ist geradezu peinlich.«

Die ersten ernsthaften theoretischen Arbeiten zur Erklärung der Akkretion bei Schwarzen Löchern führten die sowjetischen Physiker Nikolaj Schakura und Raschid Sunjajew in den späten 1960er Jahren durch. In ihrer Theorie spielt Turbulenz

eine entscheidende Rolle. Fließt beispielsweise Wasser mit zu hoher Geschwindigkeit durch ein Rohr, so wird die Strömung turbulent und chaotisch. Dies könnte auch in einer Akkretionsscheibe passieren, argumentierten Schakura und Sunjajew, und die Turbulenz würde dann Reibung erzeugen, die Rotation des Gases abbremsen und das Gas so auf einer Spiralbahn näher an das Schwarze Loch heranbringen. Doch unglücklicherweise ist die zu erwartende Turbulenz um ein Vielfaches zu klein, um die gemessene Akkretionsenergie zu erklären.

In den nachfolgenden drei Jahrzehnten gab es weder in der Theorie noch in der Beobachtung der Akkretionsscheiben nennenswerte Fortschritte. Zu einem wichtigen Durchbruch kam es erst 1991, als Steve Balbus und John Hawley von der University of Virginia darauf stießen, dass ein Magnetfeld die Scheibe mit Energie aufladen könnte. »Selbst ein schwaches Magnetfeld reicht dafür aus«, so Hawley.

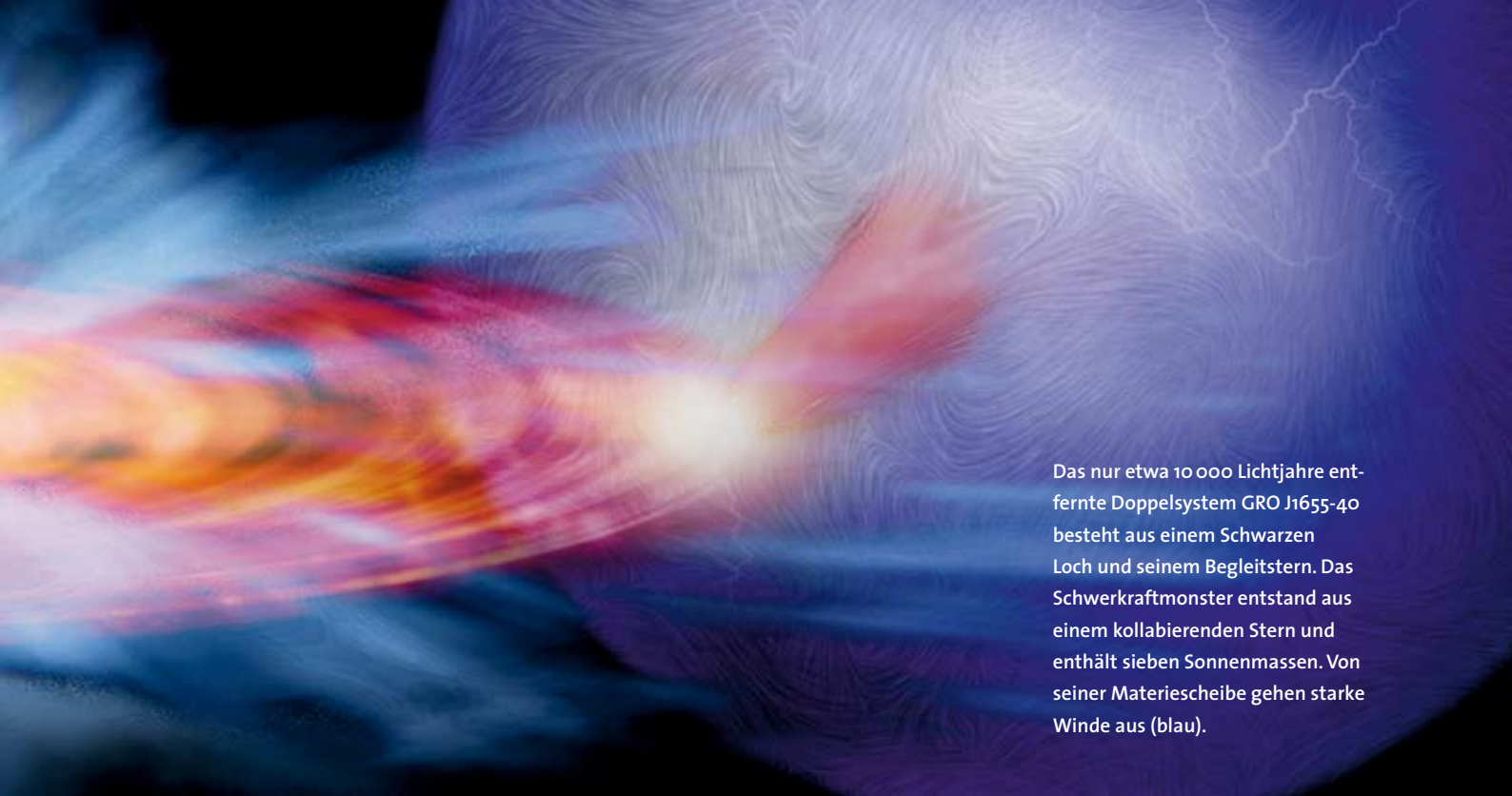
Ihre Theorie, die so genannte Magneto-rotations-Instabilität (MRI), geht davon aus, dass das in eine Akkretionsscheibe strömende Gas noch Reste des Magnetfelds enthält, das es besaß, als es noch Teil eines Sterns war. Obwohl dieses Magnetfeld relativ schwach ist, verursacht es eine Störung in der Scheibe und führt so zu einer Instabilität. Auf diese Weise verstärkt es das Magnetfeld darin und produziert so schließlich Turbulenzen in der von Schakura und



© EHT, JEAN-CHARLES CUILLIANDRE / COELUM

NAH UND FERN

Der uns nächste Kandidat für ein Schwarzes Loch liegt im etwa 1600 Lichtjahre entfernten Doppelsystem V4641 Sagittari. Die Riesengalaxie M 87 (Bild oben) ist rund 55 Millionen Lichtjahre weit weg und beherbergt ein supermassereiches Schwarzes Loch in ihrem Zentrum. Den Entfernungsrekord halten aber die Quasare – mit mehreren Milliarden Lichtjahren.



Das nur etwa 10 000 Lichtjahre entfernte Doppelsystem GRO J1655-40 besteht aus einem Schwarzen Loch und seinem Begleitstern. Das Schwarzkraftmonster entstand aus einem kollabierenden Stern und enthält sieben Sonnenmassen. Von seiner Materiescheibe gehen starke Winde aus (blau).

Sunjajew erhofften Stärke. »Diese Turbulenzen sorgen letztlich dafür, dass die Materie näher an das Schwarze Loch heranströmt«, erklärt Reynolds (AH 4/2005, S. 24).

Balbus und Hawley sind bis heute dabei, die Theorie mit Hilfe von Computersimulationen zu verbessern. Gemeinsam mit Jim Stone von der Princeton University und anderen versuchen die beiden Theoretiker, realistische Strömungen durch die gesamte Akkretionsscheibe in drei Dimensionen zu berechnen. Dass es sich dabei nicht nur um eine verschrobene Tüftelei handelt, sind sich die Forscher sicher. Einige von ihnen vergleichen die Entwicklung der MRI-Theorie sogar mit der Entdeckung der Kernfusion als Energiequelle der Sterne vor rund einem Jahrhundert.

Plausible Kraft

Die Physik der Akkretionsscheiben sollte für alle Schwarzen Löcher dieselbe sein, unabhängig von deren Größe. Die Wissenschaftler können ihre Ideen also sowohl an supermassereichen Exemplaren in weit entfernten Galaxienkernen als auch an nahen stellaren Schwarzen Löchern in unserer Milchstraße testen, die einst aus Sternen hervorgingen.

Ein Team um Jon Miller von der University of Michigan widmete sich aus diesem Grund GRO J1655-40, einem stellaren Schwarzen Loch in nur 10 000 Lichtjahren Entfernung (Bild oben). Mit Hilfe des Rönt-

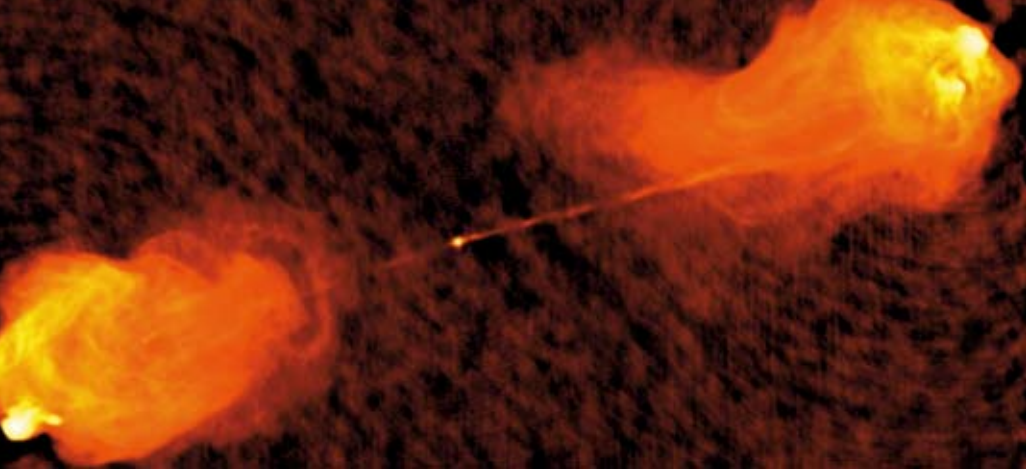
gensatelliten Chandra entdeckten Miller und seine Kollegen dort einen Wind aus heißem, ionisiertem Gas. Nachdem sie die aufgenommenen Spektren analysiert hatten, blieb nur der Magnetismus als plausible Kraft übrig, die Gas aus der Scheibe heraushebt und nach außen strömen lässt.

Blowing in the Wind

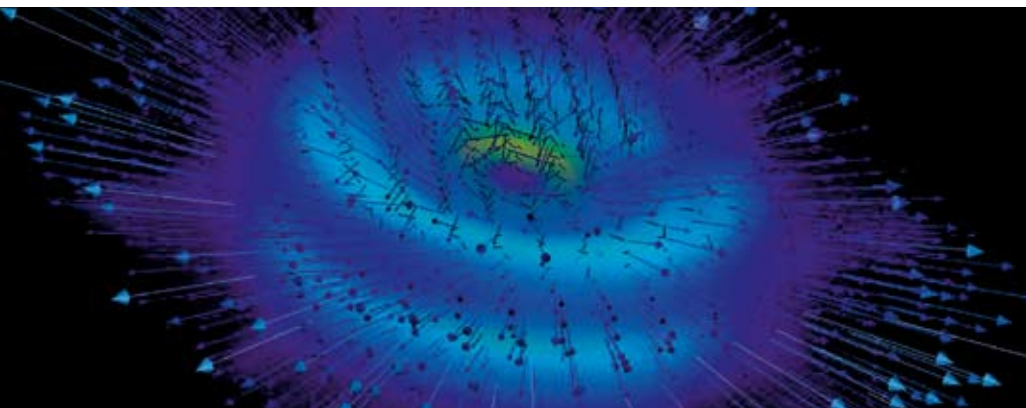
Diese Chandra-Beobachtungen sind der bislang beste Beleg für die Magnetorotations-Instabilität. Doch es gibt noch viel zu tun. Die Forscher fangen gerade erst damit an, die Einflüsse der Rotation des Schwarzen Lochs sowie der Teilchenwinde und Materieströme in der MRI-Theorie zu berücksichtigen.

Und dass Letztere nicht zu vernachlässigen sind, zeigt sich wieder am Beispiel der Quasare: Vermutlich fließt der Löwenanteil von deren Energie in so genannte Jets. Dabei handelt es sich um Teilchenströme, die senkrecht zur Akkretionsscheibe mit nahezu Lichtgeschwindigkeit herauschießen und sich über Zehntausende bis Hunderttausende von Lichtjahren erstrecken können (AH 10/2005, S. 14). Im April 2006 schätzte ein Team unter der Leitung von Steve Allen von der Stanford University und Chris Reynolds ab, dass Quasare mit einer Effizienz von zwanzig Prozent Materie in Energie konvertieren können. Zum Vergleich: Bei der Kernfusion beträgt diese Effizienz lediglich ein Prozent.

Erst jetzt beginnen
Wissenschaftler
zu verstehen, dass
Schwarze Löcher
die Chefarchitekten
des Universums sind



NRAO / AUI, R. A. FERLEY, C. L. CARILLI UND J. W. DREHER



SIMULATION: DANIEL PROGA, UNIV

Das massereiche Schwarze Loch in der Galaxie Cygnus A schießt zwei Materieströme ins All (oben). Eine Computersimulation zeigt, wie ein Teilchenwind aus der inneren Region einer Akkretionsscheibe austritt (unten).

Unabhängig von der MRI zeigen auch andere Modelle, dass Schwarze Löcher eine wichtige Rolle im Universum spielen. Eine Computersimulation von Simon White vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching (MPA) beginnt mit den neuesten Daten über das Nachglühen des Urknalls, der kosmischen Hintergrundstrahlung. Dann addieren die Forscher die Schwerkraft und beobachten, wie das Universum wächst. Mit der Gravitation als einziger Zutat entstehen in den Simulationen einhundertmal mehr Galaxien, als wir heute beobachten. »Zu viele, zu früh und zu groß«, fasst Mushotzky zusammen.

Zerreißende Segel

Und auch wenn die Theoretiker den Einfluss der Sternentstehung in die Simulationen einbeziehen, ändert sich nicht viel. Doch wenn sie die Akkretion auf Schwarze Löcher in ihr Modell einbinden, stimmen die Simulationen viel besser mit der beobachteten kosmischen Struktur überein. Dieser Zusammenhang deutet darauf hin, dass massereiche Schwarze Löcher keineswegs, wie lange geglaubt, nur Materie anziehen und so bei der Entstehung der Galaxien helfen, sondern dass sie durch die von ihnen ausgestoßenen Gasströme das Wachstum der Galaxien hemmen. Die von Akkretionsscheiben ausgehenden Winde

können, wie die Jets, Materie aus den Galaxienzentren herausblasen. Dadurch würden sie die Sternentstehung ab und unterbrechen zugleich ihren eigenen Nachschub. Sarah Gallagher von der University of California in Los Angeles konnte zeigen, dass einige Winde eine Geschwindigkeit von über zwanzig Prozent der Lichtgeschwindigkeit besitzen. Die Gaswinde enthalten Kohlenstoff, Stickstoff und Silizium. Sie könnten also einen effektiven Prozess darstellen, um solche Elemente in das intergalaktische Medium zu injizieren. Und das hätte ebenfalls wichtige Konsequenzen für die Galaxienentwicklung, die Sternentstehung und sogar für den Ursprung des Lebens.

Wie die Jets sind auch die Winde schwer zu erklären, insbesondere, wenn das Gas nicht elektrisch geladen ist. Denn dann lassen sich die Atome nicht einfach durch Magnetfelder beeinflussen. Daniel Proga von der University of Nevada in Las Vegas und seine Kollegen beschäftigen sich mit dem Druck, der von der Akkretionsscheibe ausgehenden Strahlung, als möglichem Antrieb für die Materie. In Computersimulationen konnten sie zeigen, dass dieser bei supermassereichen Schwarzen Löchern ausreicht, um elektrisch geladenes Gas auf hohe Geschwindigkeiten zu beschleunigen. Die Elektronen dienen dabei gewissermaßen als Segel. Ein zu großer Anteil an Röntgenstrahlung würde in diesem Bild jedoch die Segel zerreißen und es würde kein Wind entstehen. In der Nähe des Schwarzen Lochs absorbiert das Gas die Röntgenstrahlung allerdings und schirmt auf diese Weise das weiter entfernte Gas ab. Im Bereich der äußeren Scheibe kann der Wind also Geschwindigkeit aufnehmen.

Eine weitere Schlüsselfrage lautet: Warum funktioniert die Akkretion bei manchen Systemen besser als bei anderen? Das supermassereiche Schwarze Loch Sagittarius A* (Kasten S. 25) ist ein gutes Beispiel. Es besitzt nur ein Milliardstel der Leuchtkraft eines Quasars, obwohl sein Brennstoffvorrat lediglich um den Faktor tausend geringer ist. Da also genug Materie vorliegt, um das Schwarze Loch heller erstrahlen zu lassen, muss neben der MRI ein weiterer Mechanismus am Werk sein. Ramesh Narayan vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und andere stellen ein Modell auf, nach dem bei nur wenig Akkretion das Gas schnell in das Schwarze Loch hinein-

QUASARE

Trotz ihrer großen Entfernung sind Quasare (englisch: quasi-stellar radio sources) für Astronomen sichtbar und gehören zu den leuchtkräftigsten Objekten im Universum. Zunächst hielt man sie für Sterne, erkannte dann aber, dass es sich um die Kerne aktiver Galaxien handelt. Im Gegensatz zu gewöhnlichen Galaxien sammelt das Schwarze Loch in seinem Zentrum Staub und Gas um sich an und lässt dieses hell erstrahlen (AH 6/2007, S. 56).

fällt. Dabei wird es sehr heiß, hat aber keine Zeit sich abzukühlen. Die Wärmeenergie geht also fast vollständig im Schwarzen Loch verloren, die Leuchtkraft ist minimal. Das Modell funktioniert bei stellaren Schwarzen Löchern gut, doch einige Forscher bezweifeln, dass es auch auf die Masermonster in den Galaxienkernen zutrifft.

Schärfer als Hubble

Um die Zweifel auszuräumen oder zu bestätigen, sind die Astronomen auf der Jagd nach ersten Bildern einer Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch. Aber diese Scheiben besitzen nur eine geringe Winkelaußenweite und sind zudem in Staub, Gas und Sterne eingehüllt, was ihre Beobachtung extrem schwierig macht. Einige Scheiben enthalten jedoch Wasserdampf, und dieser Wasserdampf produziert eine »Maser« genannte, laserähnliche Mikrowellenstrahlung. Mit dem Very Large Baseline Array (VLBA), einem Netz von zehn über ganz Nordamerika verteilten Radioteleskopen, ist es gelungen, viele solcher Maser zu kartieren. Das VLBA besitzt eine Auflösung von 0,001 Bogensekunden – das ist einhundertmal besser als das Hubble Space Telescope.

Eine von Lincoln Greenhill vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics geleitete Gruppe hat zehn Jahre lang die Spiralgalaxie M 106 (NGC 4258) im Großen Bären beobachtet und die Positionen des Wasserdampfs in einer vermuteten Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch gemessen. Die Beobachtungen deuten auf eine dünne, verbogene und vermutlich klumpige Scheibe mit einem Durchmesser von eineinhalb Lichtjahren. Paul Kondratko, ein Student von Greenhill von der Harvard University, benutzte 2003 das VLBA, um die kühle äußere Kante einer etwa fünf Lichtjahre durchmessenden Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch in der Spiralgalaxie NGC 3079, ebenfalls im Großen Bären, abzubilden. Seine Beobachtungen lieferten die bislang besten Beweise für Verdichtungen in Akkretionsscheiben.

Aus Radioaufnahmen der Spiralgalaxie M 106 erstellten Astronomen ein Computermodell der Materiescheibe (Ausschnitt) um das zentrale Schwarze Loch, das vierzig Millionen Sonnenmassen in sich vereint.

Der 2005 gestartete japanische Röntgensatellit Suzaku liefert neue Informationen über heißes, gasförmiges Eisen, das um Schwarze Löcher herumwirbelt. Im Oktober vergangenen Jahres meldete ein Forscherteam, dass es mit Hilfe von Suzaku gelungen sei, die Neigung einer Akkretionsscheibe relativ zur Sichtlinie zu bestimmen. Darüber hinaus konnten die Wissenschaftler die Verzerrung der Raumzeit im inneren Bereich der Scheibe und die Geschwindigkeit des Gases in der Scheibe messen – über zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Mit dem Gamma-ray Large Area Space Telescope (Glast) der Nasa, das 2008 starten soll, wollen die Astronomen den Zusammenhang zwischen Akkretionsscheiben und Jets weiter untersuchen. Wie sich die Erforschung der Schwarzen Löcher danach entwickelt, steht noch in den Sternen. Bei der vorgeschlagenen Mission Constellation-X würde die nötige Auflösung erreicht, um die Rotation des Gases in der inneren Akkretionsscheibe zu filmen. Das würde uns einen direkten Blick auf jene Regionen erlauben, in denen Energien freigesetzt werden, die das ganze Universum beeinflussen haben. Doch das Budget der Nasa fordert nahezu die komplette Streichung der Hochenergie-Astronomie, zumindest bis zum Ende des nächsten Jahrzehnts. Damit fällt dieses Forschungsgebiet sprichwörtlich in ein Schwarzes Loch – zumindest steht die Forschung für lange Zeit still. <<

CHRISTOPHER WANJEK arbeitet bei einem Beratungsunternehmen und ist Vertragsautor der Nasa. Diesen und weitere Artikel zum Thema finden Sie unter [astronomie-heute.de/schwarzeloecher](http://www.astronomie-heute.de/schwarzeloecher).



Als Ergänzung zu diesem Beitrag finden Sie unter [wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) didaktisches Material. Bevor Materie von einem Schwarzen Loch verschluckt wird, umkreist sie es in leuchtenden Scheiben. Was geschieht dabei? Warum leuchten die Scheiben? Zu diesen Fragen werden Aufgaben zum Rechnen, Zeichnen und Beobachten angeboten.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH gefördert.

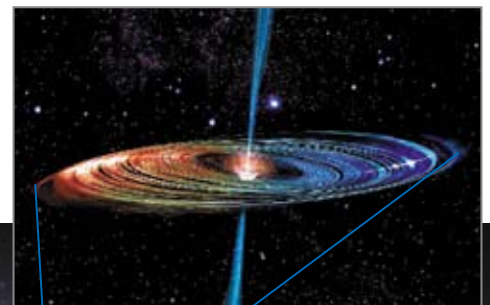


FOTO: RUSSELL CROMAN; SIMULATION: HARVARD-CFA LINCOLN GREENHILL ET AL.