



**C**erro Paranal, 2635 Meter über Normalnull. Der Raum liegt im Halbdunkel. Auf den Bildschirmen flimmern Zahlen und Kurven. Ähnlich Piloten in der Kanzel einer Düsenmaschine tauschen die Menschen vor den Monitoren routiniert Informationen aus, raunen sich gelegentlich Nummern oder Buchstabenkürzel zu. Hinter den Scheiben des „Cockpits“ spähen unterdessen vier gigantische Spiegelteleskope zum pechscharzen Himmel über den chilenischen Anden und sammeln Photonen von den entlegendsten Winkeln des Weltalls. Seit Stunden überträgt eines der Fernrohre Bilder aus dem Herzen der Milchstraße auf den Beobachtungsmontitor. Weit nach Mitternacht reißt ein Ausruf

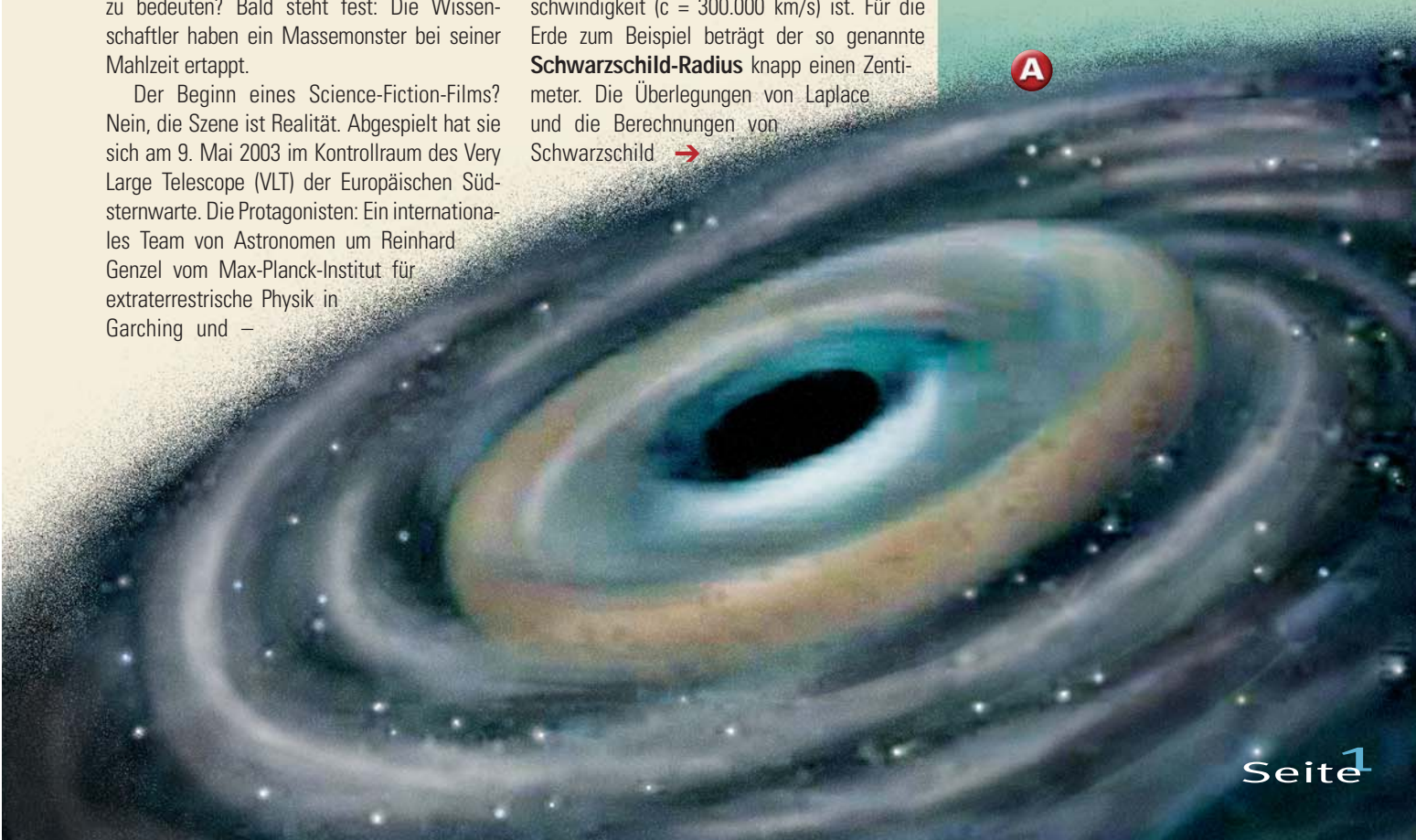
ein Schwarzes Loch. Was verbirgt sich hinter einem solchen kosmischen Exoten? Schon der französische Mathematiker Pierre Simon de Laplace vermutete Ende des 18. Jahrhunderts, dass diese Objekte tatsächlich existieren. In Gedanken ließ er eine Materiekugel bei gleich bleibender Masse solange schrumpfen, bis die Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche so weit anwuchs, dass die „Fluchtgeschwindigkeit“ ( $v_f$ ) – auf der Erde beträgt sie 11,2 Kilometer pro Sekunde – den Wert der Lichtgeschwindigkeit erreichte. Dann entkommen nicht einmal Photonen den Schwerkraftfesseln dieses Körpers. Er wird für den Betrachter unsichtbar: Ein Schwarzes Loch ist geboren (**Abb. A**).

## Massemonster im All – Forscher bringen Licht in Schwarze Löcher

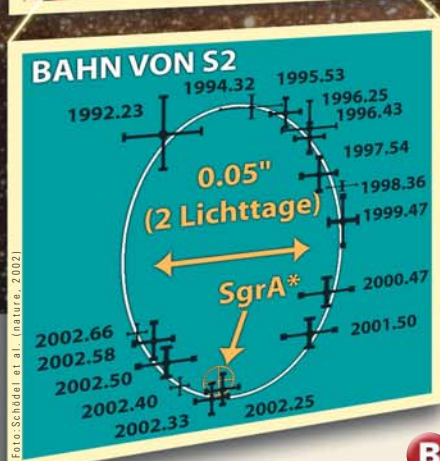
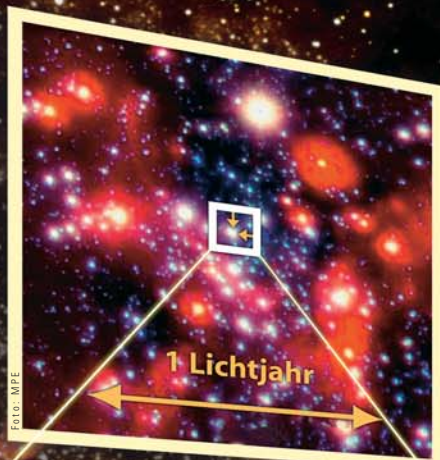
des Erstaunens die Astronomen aus ihrem Alltag. „Was macht der Stern denn da!“ Ein Lichtpunkt war aus dem Nichts aufgetaucht und wenig später spurlos verschwunden. Was hat das zu bedeuten? Bald steht fest: Die Wissenschaftler haben ein Massemonster bei seiner Mahlzeit ertappt.

Der Beginn eines Science-Fiction-Films? Nein, die Szene ist Realität. Abgespielt hat sie sich am 9. Mai 2003 im Kontrollraum des Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte. Die Protagonisten: Ein internationales Team von Astronomen um Reinhard Genzel vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching und –

Karl Schwarzschild hat als Erster den Radius einer Kugel berechnet, die das oben genannte Kriterium erfüllt, auf deren Oberfläche also die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ( $c = 300.000 \text{ km/s}$ ) ist. Für die Erde zum Beispiel beträgt der so genannte **Schwarzschild-Radius** knapp einen Zentimeter. Die Überlegungen von Laplace und die Berechnungen von Schwarzschild →







blieben zunächst theoretisch. Erst als die Wissenschaftler in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts die Physik der Sterne zu verstehen begannen, rückten die Schwarzen Löcher allmählich ins Blickfeld.

Der Astronom Fritz Zwicky prägte den Begriff **Neutronenstern**. Ein solches Gebilde entsteht, wenn ein Stern mit 8- bis 30facher Sonnenmasse das Ende seines Lebens erreicht. Bei Temperaturen von einer Milliarde Grad produziert der zentrale Fusionsreaktor immer komplexere Elemente wie Sauerstoff und Silizium. Beim Eisen ist Schluss – seine Atome lassen sich nicht weiter „verbrennen“. Erlischt der stellare Ofen, gerät die Gaskugel aus dem Gleichgewicht: Sie kann den hydrostatischen Druck nicht länger aufrechterhalten und der Kern bricht unter seinem eigenen Gewicht in sich zusammen; die äußere Hülle dagegen schießt ins All und leuchtet als **Supernova** hell auf.

Bei einem Druck von einer Million Tonnen pro Quadratcentimeter im Inneren des Kerns gerät das Spiel der atomaren Kräfte in Unordnung: Die Teilchen überwinden die **Potenzialbarriere** – Elektronen werden in Protonen hineingequetscht, Neutronen entstehen. Ein Teelöffel dieser Materie würde auf der Erde etwa 10 Milliarden Tonnen wiegen. Weil der **Drehimpuls** (das Produkt aus Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit) nicht verloren geht, beschleunigt sich die eher gemächliche Rotation des vormals „gesunden“ Sterns in dem Maße, wie sich sein kollabierter Kern verdichtet und schrumpft. Wegen der immensen Fliehkräfte verlassen ständig Teilchen die Oberfläche, werden in dem

starken, dipolartigen Magnetfeld beschleunigt und senden **Synchrotronstrahlung** aus. Die Emission erfolgt in zwei Kegeln mit jeweils 10 bis 15 Grad Öffnungswinkel. Überstreicht dieser kosmische „Leuchtturm“ die Erde, blinkt der Stern im Millisekundentakt: Die Astronomen beobachten einen **Pulsar**.

Die Kugel eines Neutronensterns misst nur 10 bis 20 Kilometer im Durchmesser und hat maximal 1,4 Sonnenmassen. Keiner der bisher bekannten Neutronensterne überschreitet diese **Chandrasekhar-Grenze**. Was aber passiert, wenn gewichtigere Sterne mit mehr als der 30fachen Sonnenmasse sterben? Dann ist der totale Kollaps nicht mehr aufzuhalten. Die ausgebrannte Kugel zieht sich völlig in sich zusammen – bis das exotische Gebilde die Größe des doppelten Schwarzschild-Radius erreicht. Bei diesem Prozess gehen alle Strukturen verloren. Lediglich zwei Parameter charakterisieren ein solches Schwarzes Loch: Masse und Drehimpuls. Elektrische Ladung, die von der Theorie geforderte dritte Größe, kann vernachlässigt werden, weil die Materie im Weltall neutral ist und es daher wohl auch keine elektrisch geladenen Schwarzen Löcher gibt.

### EIN RÜHRWERK KNETET DIE RAUM-ZEIT

Ähnlich einem Schlafenden, der eine weiche Matratze eindellt, krümmen nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie Massen den Raum. Die extrem starken Gravitationsfelder eines Schwarzen Lochs sollten den Raum so verbiegen, dass er sich schließt und dabei gleichsam abkapselt. Karl Schwarzschild selbst hat die Metrik des Raums um ein ruhendes Schwarzes Loch beschrieben – das es in der Natur wegen der Erhaltung des Drehimpulses nicht geben dürfte. Ein Teil des Drehimpulses wird zwar in Form von **Gravitationswellen** abgestrahlt (siehe Kasten), gleichwohl sollte das Schwarze Loch rotieren. Erst Ende der sechziger Jahre gelang es den Theoretikern, die Metrik eines solchen Objekts in Formeln zu fassen.

Die Rechnungen ergeben, dass ein rotierendes Schwarzes Loch den Raum nicht nur krümmt, sondern mitreißt wie ein Rührwerk den Teig. Außerdem zieht es alle Materie an, die ihm zu nahe kommt – und verschluckt sie auch noch. Da Schwarze Löcher unsichtbar sind, bieten diese Eigenschaften die einzige Chance für Beobachter. Aber nach welchen Effekten sollen die Astronomen suchen?

Antwort auf diese Frage gibt die Geometrie einer solchen Schwerkraftfalle. Ein rotierendes Schwarzes Loch umschließt eine Kugel mit dem Schwarzschild-Radius. Im Zentrum sitzt die

▲ Zoom: Als leuchtendes Band zieht sich die Milchstraße über den Himmel. In Richtung der hellsten Region in diesem Meer aus Sternen, Gas und Staub liegt der Kern unserer Galaxis (a). Mit einer Infrarotkamera am Very Large Telescope blicken Astronomen ins Herz der Milchstraße; die gelben Pfeile in der Mitte markieren die Position der Radioquelle SgrA\* (b). Darunter erscheint das Gebiet um SgrA\* in einer Detailauflösung von wenigen Lichttagen (c). Die Bahn des Sterns S2 (d) lässt sich durch eine Ellipse mit der Exzentrizität 0,87 beschreiben, in deren einem Brennpunkt das supermassive Schwarze Loch sitzt.



**Singularität**, die sich mit den Gesetzen unserer Physik nicht beschreiben lässt. Die Oberfläche der Kugel heißt „innerer Ereignishorizont“. Was jenseits von ihm geschieht, bleibt verborgen – ebenso wie Materie, die hinter dem Ereignishorizont aus unserer Welt verschwindet. Umhüllt wird diese Schale von einem Ellipsoid, dessen Oberfläche den „äußeren Horizont“ bildet. Hinter ihm beginnt die Ergosphäre. Dringen Teilchen mit entsprechend hoher Geschwindigkeit in sie ein, gibt es durchaus ein Entrinnen: Die Partikel nehmen sogar noch Energie auf. Überschreiten dagegen langsamere Teilchen diese magische Grenze, landen sie auf spiralförmigen Bahnen und ziehen innerhalb der Ergosphäre immer engere Kreise. Die Gravitationsenergie wächst, während das Schwarze Loch seinerseits Drehimpuls einbüßt. Fällt Materie von außen auf ein Schwarzes Loch, heizt sie sich durch diesen Mechanismus sehr stark auf. Am heißesten ist sie auf der letzten stabilen Umlaufbahn („last stable orbit“) – und im nächsten Moment hinter dem inneren Ereignishorizont verschwunden. Wie also lassen sich Schwarze Löcher beobachten?

- Durch das Verschlucken von Materie erzeugen sie Strahlungsenergie, die sich mit Teleskopen oder Satelliten nachweisen lässt. Innerhalb unseres Milchstraßensystems (**Galaxis**) haben die Astronomen mittlerweile eine ganze Reihe solcher verdächtiger Strahlungsquellen ausgemacht. Ein derartiges Schwarzes Loch saugt offenbar von einem Begleitstern Materie ab, die sich zunächst in einer **Akkretionsscheibe** sammelt und danach auf die beschriebene Weise aus unserer Welt verschwindet.

- Schwarze Löcher wirken als unsichtbare Schwerkraftzentren. Würde sich zum Beispiel die Sonne in ein Schwarzes Loch verwandeln – was sie wegen ihrer zu geringen Masse niemals tut –, dann würden die Planeten weiterhin auf ihren Bahnen dahinziehen. Aus der Umlaufbahn eines Planeten lässt sich nach den **Keplerschen Gesetzen** und dem **Newtonschen Gravitationsgesetz** die Masse des zentralen Körpers berechnen. Nun gehören ungefähr die Hälfte aller Sterne in der Galaxis zu den Doppelsternsystemen, in denen sich zwei Sonnen auf gravitativ gebundenen Bahnen umlaufen. Die Astronomen können daraus also die Massen der Sterne ableiten. In einigen Systemen scheint es jeweils einen unsichtbaren und außergewöhnlich massereichen Partner zu geben – sehr wahrscheinlich ein Schwarzes Loch.

Bei der Suche nach Schwarzen Löchern rückte vor gut zwei Jahrzehnten auch das etwa

26.000 Lichtjahre entfernte Herz der Galaxis ins Blickfeld (**Abb. B**). Das Zentrum der Milchstraße ist das uns nächst gelegene Herz einer Galaxie und gestattet daher die genauesten Aussagen über die mögliche Existenz eines Schwarzen Lochs. Tatsächlich fanden die Astronomen einen dichten Sternhaufen mit einer sehr kompakten, sehr hellen zentralen Radioquelle. Nach der lateinischen Bezeichnung des Sternbilds Schütze, in dem der Mittelpunkt des Milchstraßensystems von der Erde aus gesehen liegt, heißt die Quelle „Sagittarius A Stern“ (SgrA\*). Bemerkenswert ist ihr Durchmesser: Er beträgt weniger als 300 Millionen Kilometer und ist damit kleiner als der Durchmesser der Erdbahn um die Sonne. Um das Geheimnis zu entschlüsseln, nahm die Forschergruppe um Reinhard Genzel SgrA\* unter die Lupe – mit Fernrohren wie dem Very Large Telescope. Auf diese Weise gelang es in den vergangenen zehn Jahren, die Geschwindigkeit von 1000 Sternen bis zum Abstand von unter einer Lichtwoche (180 Milliarden Kilometer) zu ermitteln.

Aus dem Vergleich von mehreren, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gewonnenen scharfen Aufnahmen mit neuen Beobachtungstechniken bestimmten die Forscher die Eigenbewegungen

der Sterne sowie – mittels des **Doppler-Effekts** – deren Radialgeschwindigkeiten. Erste bezeichnet die Winkelgeschwindigkeit am Himmel, letztere die Geschwindigkeit entlang der Sichtlinie zur Erde. Die Analyse beider Komponenten ergab die wahren Bewegungen der Sterne im Raum: Danach umliefen sie eine unsichtbare Masse, die auf eine Region von weniger als zwei Lichtwochen konzentriert sein musste und etwa drei Millionen Sonnenmassen besitzen sollte. Was verbarg sich dahinter? Ein dunkler, extrem kompakter Haufen schwach strahlender Sonnen? Eine Ansammlung von Neutronensternen? Substellare Objekte wie Felsbrocken? Materie aus hypothetischen, schweren Elementarteilchen? Ein Schwarzes Loch?

### TIEFER BLICK INS HERZ DER MILCHSTRASSE

Um die unterschiedlichen Erklärungsmöglichkeiten zu überprüfen, waren noch detailliertere Beobachtungen notwendig. Der Durchbruch gelang im Frühjahr 2002 mit einer von den beiden Max-Planck-Instituten für Astronomie in Heidelberg und extraterrestrische Physik in Garching entwickelten Kamera und der in Frankreich konstruierten **adaptiven Optik** zur Eliminierung der

### KOLLISIONEN SCHLAGEN WELLEN

Sie kräuseln den Raum wie ein ins Wasser geworfener Stein und dehnen sich nach allen Richtungen mit Lichtgeschwindigkeit aus: Albert Einstein beschreibt in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie ein Phänomen, von dem er glaubte, dass man es niemals werde nachweisen können – Gravitationswellen. Nahezu neun Jahrzehnte später wandelt sich die Gravitationsphysik zu einer experimentellen Wissenschaft. Bereits 1974 gelang Joseph Taylor und Russell Hulse der indirekte Nachweis von Gravitationswellen. Die amerikanischen Astrophysiker (Nobelpreis 1993) hatten zwei umeinander kreisende Pulsare beobachtet und herausgefunden, dass sie sich einander annähern. Die Erklärung: Beide Sterne strahlen Gravitationswellen ab und verlieren dadurch Energie. Der beobachtete Betrag deckt sich hervorragend mit den theoretischen Voraussagen.

Auch Supernovae oder verschmelzende Neutronensterne gelten als Quellen für Gravitationswellen – ebenso wie Schwarze Löcher. Was bei deren Zusammenstoß passiert, berechnen Forscher am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik. Mit solchen aufwändigen Computersimulationen (Bild) bereiten sich die Wissenschaftler auf den Ernstfall vor. Denn in den nächsten Jahren wollen sie mit speziellen Detektoren die Gravitationswellen dingfest machen. Eine derartige Anlage steht bei Hannover: GEO 600. Ein kompliziertes optisches System in zwei jeweils 600 Meter langen, evakuierten Röhren soll eines Tages die Botschaften aus dem Kosmos empfangen.

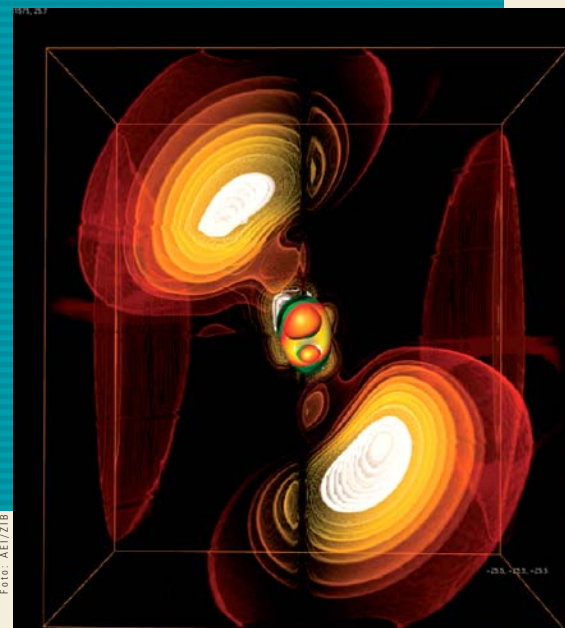


Foto: AEI/ZIB



→ störenden Luftunruhe. Das System lieferte an einem der vier 8,2-Meter-Spiegel des Very Large Telescope die bisher schärfsten Bilder des galaktischen Zentrums. Als „Star“ auf den Infrarotfotos entpuppte sich der Stern S2: Er nähert sich der Radioquelle SgrA\* bis auf etwa 12 Millibogensekunden (tausendstel Bogensekunden) – entsprechend 17 Lichtstunden oder der dreifachen Distanz zwischen Sonne und Pluto. S2 läuft auf seiner hoch elliptischen Keplerbahn mit einer maximalen Geschwindigkeit von 29 Millionen Kilometern pro Stunde; für die Umrundung des Schwarzkraftzentrums benötigt er 15 Jahre.

## INFRAROTE LICHTBLITZE AM EREIGNISHORIZONT

Eine einfache Rechnung zeigt, dass innerhalb eines sphärischen Raumbereichs von 17 Lichtstunden Radius nicht weniger als 3,6 plus/minus 0,4 Millionen Sonnenmassen liegen müssen. Daraus lässt sich die Dichte ableiten: Sie ist mindestens elf Größenordnungen höher als die der dichtesten bekannten Sternhaufen. Abgesehen davon wäre ein solcher Haufen instabil und hätte eine Lebensdauer von nur 100.000 Jahren – wesentlich weniger als das Alter der Sterne in der Umgebung von SgrA\*. Wegen der immensen Dichte scheiden auch substellare Objekte aus. Und ein Ball aus hypothetischen Elementarteilchen (Bosonen) wäre ebenfalls nicht stabil. Die einzige Erklärung: ein Schwarzes Loch.

Ein solches „Gravitationsmonster“ kann unmöglich das Resultat einer einzigen Sternexplosion gewesen sein. Daher sprechen die Astronomen nicht von einem stellaren, sondern von einem supermassiven Schwarzen Loch. Dennoch sollte ein solches Schwergewicht dieselben charakteristischen Eigenschaften aufweisen wie sie die Leichtgewichte besitzen – zum Beispiel sollte es rotieren.

Am 9. Mai 2003 beobachteten die Forscher genau das: Bei dem Lichtpunkt, der auf dem Monitor aufgeflackert war, handelte es sich um einen Infrarotflare. Dieser Blitz stammt offenbar von Gas, das auf einer Spiralbahn in das Schwarze Loch strudelt. Unmittelbar bevor die Materie hinter dem Ereignishorizont verschwindet, erreicht sie ihre größte Hitze und leuchtet hell auf. In dieser nur wenige Lichtstunden kleinen Region herrschen chaotische Verhältnisse ähnlich wie in irdischen Gewittern oder Strahlungsausbrüchen auf der Sonne. Tatsächlich flackert das Infrarotlicht innerhalb weniger Minuten. Und zwei der beobachteten Flares zeigten eine 17-minütige Periode. Das gilt als stärkster Hinweis für die Rotation des Schwarzen Lochs mit der Hälfte des von der Allgemeinen Relativitätstheorie zugelassenen Tempolimits.



◀ **Kommandozentrale:** Von diesem Kontrollraum aus steuern Wissenschaftler das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) auf dem Paranal in Chile.

Das Massemonster in der Milchstraße ist ein Modellfall: Auch in den Zentren der meisten anderen Spiralgalaxien mit stellarem Kernbereich („Bulge“) sowie in elliptischen Galaxien verbergen sich Schwarze Löcher. Dabei wächst deren Masse in etwa linear mit der **absoluten Leuchtkraft** und der Geschwindigkeit aller Sterne im Bulge. Das heißt: je massereicher der Kern, desto massereicher das Schwarze Loch. Diese enge Korrelation zwischen Schwarzen Löchern und Galaxien deutet auf eine gemeinsame Genese hin. Doch über die Geburt der Galaxien rätseln die Forscher noch. Und welche Rolle spielten die Schwarzen Löcher?

## KOSMISCHE UNFÄLLE ALS GALAKTISCHE GEBURTSHELFER

Ein Szenario sieht so aus: Schon wenige 100 Millionen Jahre nach dem **Urknall** existierten Sternigiganten mit bis zu 1000 Sonnenmassen. Sie explodierten als „Meganovae“ und hinterließen entsprechend massereiche Schwarze Löcher. Diese sammelten sich in Energiemulden, verschmolzen miteinander und legten durch das Verschlucken von Gas weiter an Gewicht zu, wuchsen also zu supermassiven Schwarzen Löchern heran. Die Milliarden Lichtjahre entfernten Quasare („quasi-stellar radio sources“) zeugen von diesen Ungetümen im frühen Universum. In solchen Objekten emittiert ein Gebiet von nur wenigen Lichtjahren Ausdehnung bis zu 100.000-mal mehr elektromagnetische Strahlung als ganze Galaxien. Aus den Kernen schießen gebündelte Jets relativistischer Elektronen heraus, außerdem registrieren die Astronomen zeitlich schnell variierende Röntgen- und Gammastrahlung – Prozesse, wie sie innerhalb von Akkretionsscheiben in der unmittelbaren Umgebung supermassiver Schwarzer Löcher ablaufen.

Bei der Entwicklung von Galaxien scheinen auch kosmische Kollisionen eine Rolle zu spielen. Forscher um Günther Hasinger und Stefanie Komossa vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik haben vor kurzem im Zentrum

der etwa 400 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie NGC 6240 zwei aktive Schwarze Löcher aufgespürt. NGC 6240 kündigt vom Zusammenstoß zweier Milchstraßensysteme. Der Satellit Chandra lieferte nicht nur ein scharfes Bild des Zentrums, sondern erlaubte auch eine detaillierte Röntgenanalyse. Die Schwarzen Löcher verrieten sich durch einen Überschuss hoch energetischer Strahlung von herumwirbelndem heißen Gas in der Akkretionsscheibe sowie eine charakteristische Fluoreszenzstrahlung von Eisenatomen. Die beiden Schwarzen Löcher sind derzeit noch etwa 3000 Lichtjahre voneinander entfernt. Im Lauf von etlichen 100 Millionen Jahren werden sie sich – auf Spiralbahnen umeinander tanzend – immer stärker annähern und schließlich zu einem noch größeren Schwarzen Loch verschmelzen. Dann werden Gravitationswellen den Raum erzittern lassen.

Jahrhundertlang galten Schwarze Löcher als theoretische Spielerei. Doch aus „Fiction“ ist jetzt „Science“ geworden. Die Ära der Beobachtung hat gerade erst begonnen. Die Astronomen im Kontrollraum auf dem Paranal (**Abb. C**) haben wohl noch manche aufregende Nacht vor sich ...

**Schlagwörter:** absolute Leuchtkraft, adaptive Optik, Akkretionsscheibe, Chandrasekhar-Grenze, Doppler-Effekt, Drehimpuls, Galaxis, Gravitationswellen, Keplersche Gesetze, Neutronenstern, Newtonsches Gravitationsgesetz, Potenzialbarriere, Pulsar, Schwarzschild-Radius, Singularität, Supernova, Synchrotronstrahlung, Urknall

**Lesetipps:** Mitchell Begelman, Martin Rees, Schwarze Löcher im Kosmos, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2000; Helmut Hornung, Schwarze Löcher und Kometen, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1999

**Internet:** [www.mpe.mpg.de/www\\_ir/GC/gc.html](http://www.mpe.mpg.de/www_ir/GC/gc.html)

## DIE „MAX“-REIHE

auch unter [www.max-reihe.mpg.de](http://www.max-reihe.mpg.de)

BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX erscheinen jeweils zweimal im Jahr und berichten über aktuelle Forschungsergebnisse aus den Max-Planck-Instituten vor allem für Lehrer und Schüler. Weitere Exemplare können unter folgender Adresse kostenlos bestellt werden: