

# An der Grenze zur Ewigkeit

Schwarze Löcher sprengen die Vorstellungskraft eines jeden Menschen. An ihrer Grenze bleibt die Zeit stehen und verbiegt sich der Raum ins Grotteske. In ihrem Inneren ist die Masse vieler Sonnen zu einem Punkt ohne räumliche Ausdehnung konzentriert und sind die Gesetze der herkömmlichen Physik außer Kraft gesetzt

Text: Henning Engeln; Illustration: Jochen Stuhmann

**D**as Merkwürdigste an einem Loch ist der Rand. Er gehört noch zum Etwas, sieht aber beständig in das Nichts, eine Grenzfläche der Materie.“ So formulierte Kurt Tucholsky 1931 in seiner Glosse „Soziologische Psychologie der Löcher“.

Damit beschrieb der große Satiriker – wohl nicht bewusst, doch erstaunlich treffend – eine Eigenschaft jener mysteriösen Objekte, deren Existenz Wissenschaftler zu jener Zeit bereits vorausgesagt, aber noch nicht nachgewiesen hatten: der Schwarzen Löcher.

Denn diese Gebilde sind (so hatte bereits 1915 der deutsche Astronom Karl Schwarzschild geschlossen) von einem überaus seltsamen Rand begrenzt, den die Astronomen heute als „Ereignishorizont“ bezeichnen.

Dabei handelt es sich um keine feste, sichtbare oder fühlbare Oberfläche, sondern um eine schwarze, magische Grenze, hinter der es kein Zurück gibt. Ein Lichtstrahl oder ein Stück Materie verschwindet dort aus dem uns bekannten, beobachtbaren Universum.

Die Ursache dafür ist die ungeheure **Schwerkraft** eines Schwarzen Loches, die so gewaltig ist, dass ihr wohl nichts entkommen kann: Alles, was sich dem Loch zu weit nähert, stürzt in einen Punkt in dessen Zentrum.

Auf die Spur dieser wohl bizarrsten Gebilde im All war, 150 Jahre vor Tucholskys Feuilleton über das Wesen von Löchern, ein englischer Gelehrter gekommen – und zwar durch eine erstaunlich einfache Überlegung.

Der an der Universität von Cambridge beschäftigte Geologe und Astronom John Michell (1724–1793) wusste, dass die Anziehungskraft (Gravitation) eines Himmelskörpers jeden Gegenstand, den man von ihm weg wirft, wieder zu ihm zurückzieht – es sei denn, das geworfene Objekt überschreitet eine bestimmte Geschwindigkeit. Diese so genannte Fluchtgeschwindigkeit ist umso größer, je massereicher und kleiner der Himmelskörper, je stärker also dessen Anziehungskraft ist.

Nun war schon damals durch Messungen des dänischen Astronomen Ole Rømer (1676) und des Engländers James Bradley (1727) bekannt, dass die Geschwindigkeit des Lichtes etwa 300 000 Kilometer pro Sekunde beträgt. Michell folgerte in einem Aufsatz von 1783: Ein Stern mit einer genügend großen Masse könnte eine derart starke Anziehungskraft entwickeln, dass es nicht einmal dem Licht mit seiner hohen Geschwindigkeit gelänge, ihm zu entkommen. Der Stern müsse demnach vollkommen schwarz erscheinen.

Damit war die Idee des Schwarzen Loches geboren – auch wenn der Begriff selbst erst 1967 geprägt wurde. Wobei

eben kein „Loch“ im herkömmlichen Sinne gemeint ist, vielmehr eine unvorstellbar große Massenkonzentration.

**E**s war der Physiker und Astronom Karl Schwarzschild, der Ende 1915 erstmals eine Lösung für Albert Einsteins kompliziertes Formelwerk der Allgemeinen **Relativitätstheorie** vorlegte. Weil dieser zufolge Masse, Raum und Zeit zusammenhängen, markierte sie eine Revolution in der Physik: In der Relativitätstheorie treten vollkommen neue, äußerst seltsame Phänomene auf.

So verzerrt beispielsweise die Schwerkraft eines Schwarzen Lochs den Raum und die Zeit so stark, dass das Licht am Ereignishorizont unendlich lange unterwegs ist. Die Zeit bleibt stehen und wird quasi zur Ewigkeit – zumindest für den außen stehenden Betrachter.

Das Bild eines Astronauten, der in das Schwarze Loch hineinstürzt, würde von außen gesehen auf dem Ereignishorizont „einfrieren“. Für den Astronauten selbst jedoch würde die Zeit weitergehen, und er könnte in das Innere des Loches fallen.

Seltsame Eigenschaften hat auch das Innere des Schwarzen Loches. Dort konzentriert sich die gesamte Masse – zum Beispiel eines ehemaligen Sterns – auf einen unermesslich kleinen Punkt: eine Singularität. Darin wird die Krümmung von Raum und Zeit unendlich groß.

**In einem Schwarzen Loch**, einem Objekt von ungeheurer Dichte, ist die Masse so konzentriert, dass seiner Schwerkraft weder Teilchen noch Lichtstrahlen entkommen. Es ist also unsichtbar, zu erkennen jedoch an seiner Wirkung: Wenn etwa das Loch und ein Stern umeinander kreisen, kann es diesem aufgrund seiner extremen Anziehungskraft Materie entreißen

# Wenn ein Schwarzes Loch Materie verschluckt hat, kann diese so nie mehr in unsere Welt zurückkehren

Auch das überfordert die menschliche Vorstellungskraft. Mathematisch lässt sich das kuriose Objekt jedoch in den Griff bekommen, denn es sind lediglich drei Größen, die es der Theorie nach charakterisieren: seine Masse, sein **Drehimpuls** und seine elektrische Ladung. Astrophysiker unterscheiden dabei ruhende (statische) Schwarze Löcher von solchen, die sich drehen. Allein aus diesen Daten können sie die räumliche Ausdehnung des Gebildes berechnen.

**G**RUNDSÄTZLICH KANN jeder Körper zu einem Schwarzen Loch werden, wenn die Schwerkraft seine Materie nur genügend eng zusammenquetscht. Ein Himmelskörper mit der Masse der Erde etwa müsste dazu auf 0,9 Zentimeter Radius komprimiert werden: unser gesamter Planet, verdichtet auf die Größe einer Murre.

All dies hatten Astrophysiker zunächst theoretisch gefolgert. Doch gab es solche finsternen Schwergewichte überhaupt in der realen Welt? Und wie ließen sie sich nachweisen, wenn doch aus ihrem Anziehungsbereich weder Strahlung noch Materie entkommen können – und damit keinerlei Informationen?

Erste Hinweise auf die Existenz dieser geheimnisvollen Objekte fanden Astronomen zu Beginn der 1960er Jahre – freilich ohne es zunächst zu ahnen. Sie hatten die **Quasare** (Seite 138) entdeckt: unglaublich intensive kosmische Leuchtfeuer in den Zentren ferner Galaxien. Niemand konnte sich zunächst erklären, woher diese Leuchtgiganten ihre Energie nehmen.

Gegen Ende jenes Jahrzehnts aber fanden zwei Astrophysiker die Lösung: Es handelt sich bei den Quasaren um supermassive Schwarze Löcher – sie können mehrere Milliarden **Sonnenmassen** enthalten –, die dank ihrer Schwerkraft Materie aus der Umgebung anziehen und sie zum Teil in sich aufnehmen, zum Teil aber auch auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigen und als

Materiestrahlen (so genannte **Jets**) ins All hinausschießen.

Der extrem turbulente und heiße, auf das Loch einfallende Materiestrom sendet jene hochenergetische Strahlung aus, die für Quasare typisch ist. Die Jets entstehen dabei, wie die Forscher heute wissen, weil das sich drehende, supermassive Schwarze Loch wie ein Badewannenabfluss Materie anzieht, wobei sich Wirbel bilden: Die Teilchen reiben sich aneinander, erhitzen sich auf mehrere Millionen Grad und werden zu einem elektrisch geladenen **Plasma**, das spiralförmig auf den Schlund zustürzt.

Da die ungeheure Schwerkraft in der Nähe des rotierenden Gebildes auch das **Raum-Zeit-Gefüge** verdreht und dabei Magnetfelder wie ein Quirl verdrillt, wird die Energie der Felder zu einem Teil auf das Plasma übertragen. Diese Energie schleudert die Materie von den Polen des Schwarzen Loches weg ins Weltall hinaus.

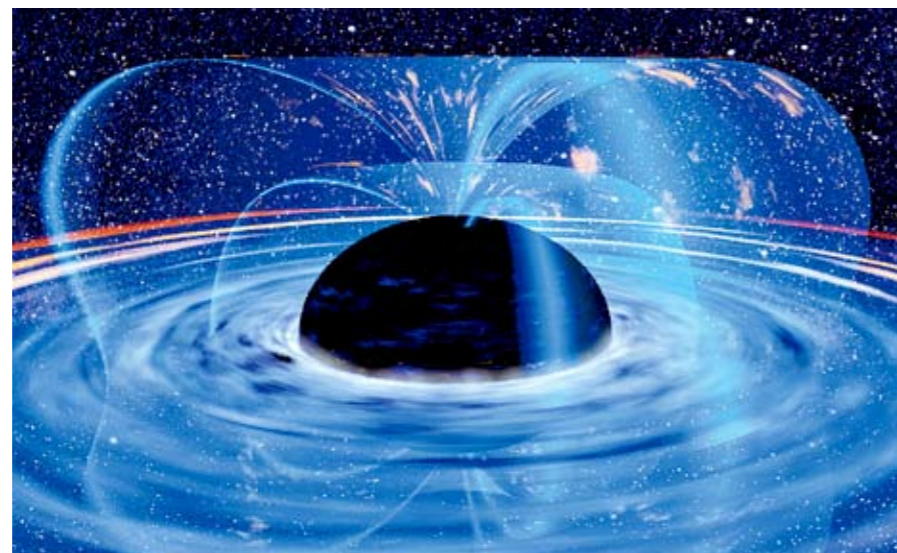
Die Jets können fast so schnell sein wie das Licht, und Magnetfelder be-

schleunigen und bündeln sie noch zusätzlich. Schließlich übertreffen sie an Länge sogar die Galaxie, in der sie entstanden sind, und geben typischerweise Radio-, aber auch Röntgenstrahlung ab.

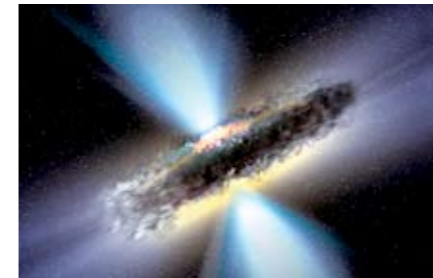
Dabei kommt es zur Freisetzung unfassbar großer Energiemengen. Anhand dieser Jets konnten Forscher einige der ansonsten unsichtbaren Massegiganten nachweisen.

**D**OCH ES GIBT auch kleinere Schwarze Löcher von drei bis etwa 100 Sonnenmassen. 1972 entdeckte ein kanadischer Astronom einen ersten Kandidaten: eine Quelle starker Röntgenstrahlung im Sternbild Schwan.

Bei diesem Objekt, so stellte sich heraus, handelt es sich um ein Doppelsystem. Eine riesige blaue Sonne, gut 20-mal schwerer als die unsrige, kreist gemeinsam mit einem unsichtbaren Partner von bis zu zehn Sonnenmassen, der offenbar Materie von seinem Begleiter abzieht. Diese sammelt sich in



**Gigantische Magnetfelder** umgeben manche Schwarzen Löcher. Sie bilden sich vermutlich, wenn Materieteilchen in den Schwerkraftsog des Himmelskörpers geraten, sich aneinander reiben, aufheizen und zu elektrisch geladenem Plasma werden. Ein Teil dieses Plasmas stürzt in das Loch, ein anderer wird beschleunigt und fliegt als gebündelter Materiestrom (Jet) mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ins All



**Quasare sind Kerne extrem leuchtstarker** Galaxien, in deren Zentrum sich ein Schwarzes Loch mit mehreren Milliarden Sonnenmassen befindet. Sie ziehen Materie aus ihrer Umgebung an und schleudern Millionen Grad heiße Plasma-Jets in den Weltraum

einer **Akkretionsscheibe** um das dunkle Zentrum, heizt sich stark auf und gibt dadurch Röntgenstrahlung ins All ab, deren Intensität die Leuchtkraft unserer Sonne um das 10 000fache übertrifft

Rund 100 solcher stellaren Schwarzen Löcher sind in unserer Galaxis bereits nachgewiesen – doch schätzen die Astrophysiker die Zahl der insgesamt vorhandenen auf etwa eine Milliarde.

Weil supermassive Schwarze Löcher in den Zentren vieler Galaxien entdeckt worden sind, kam schon früh der Verdacht auf, auch die Milchstraße könne ein solches Monstrum enthalten.

Vor einigen Jahren gelang Astronomen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching tatsächlich der Beweis: Im Sternbild Schütze, wo das Zentrum unserer **Galaxis** zu sehen ist, muss sich ein unsichtbares Objekt mit der Masse von etwa drei Millionen Sonnen befinden. Denn aus den Bahnen und Geschwindigkeiten der dort kreisenden Sterne ließen sich die Schwerkraftwirkung und damit die Masse des umrundeten, verborgenen Himmelskörpers errechnen.

Schwarze Löcher sind also anhand von Jets, Röntgenstrahlung und ihrer Anziehungskraft auf umliegende Sterne aufzuspüren. Es gibt aber noch eine weitere Methode: Liegen sie vor Galaxien, deren Licht aus sehr großer Entfernung kommt, wird dieses von der ungeheuren Masse der Schwarzen Löcher „verbogen“. Sie wirken, so glauben Astronomen, ebenso wie andere große Massen

als „Gravitationslinsen“ und verzerren das Bild der ferneren Objekte auf charakteristische Weise.

Die Forscher haben inzwischen so viele Erkenntnisse über die unsichtbaren Giganten gewonnen, dass sie zu verstehen glauben, wie sie sich bilden.

Stellare Schwarze Löcher entstehen zum Beispiel aus Riesensternen mit mehr als 40 Sonnenmassen: Haben die Riesen am Ende ihres Lebenslaufes einen Großteil ihres atomaren Brennstoffs verfeuert, explodieren sie als **Supernova**; zurück bleibt ein **Neutronenstern**, denn erst dieser aus extrem dicht gepackten Neutronen aufgebaute Himmelskörper kann der ungeheuren Schwerkraft standhalten (Seite 102).

Wenn dieser Zwerg jedoch mehr als 3,2 Sonnenmassen hat, können selbst die Neutronen der Schwerkraft nichts mehr entgegensetzen und kollabieren zum Schwarzen Loch. Wahrscheinlich entsendet der in sich zusammenstürzende Stern als „Todesschrei“ einen extrem hellen, nur wenige Sekunden andauernden Blitz aus **Gammastrahlung** – der elektromagnetischen Strahlung mit der höchsten Energie überhaupt.

Solche Gammastrahlen-Ausbrüche wurden in den 1960er Jahren erstmals zufällig von amerikanischen Spionagesatelliten aufgezeichnet, die Beweise für sowjetische Atombombentests aufspüren sollten. Das Geheimnis eines zweiten Typs dieser Blitze, der nur etwa 0,01 bis zwei Sekunden andauert, konnte erst vor kurzem gelöst werden: Sie

## memo | schwarze löcher

» **IHRE EXISTENZ** wurde bereits im 18. Jahrhundert vorausgesagt.

» **SCHWARZE LÖCHER** können durch Zusammenbruch eines ausgebrannten, extrem massereichen Sternes entstehen.

» **DIE ZENTREN VIELER GALAXIEN** enthalten supermassive Schwarze Löcher mit bis zu mehreren Milliarden Sonnenmassen.

werden vermutlich frei, wenn zwei Neutronensterne, oder auch ein Schwarzes Loch und ein Neutronenstern, miteinander verschmelzen – ein Vorgang von selbst für kosmische Maßstäbe immenser Gewalt, bei dem 30 Prozent der Materie zu Energie umgewandelt werden.

Aus solchen Verschmelzungen sind vielleicht auch manche der supermassiven Schwarzen Löcher in den Galaxien hervorgegangen. Und zwar bereits in einer frühen Entwicklungsphase der Galaxien, als die Materiedichte in ihren Zentren noch sehr hoch war. Immer mehr Materie und nahe Sterne könnten solch ein gigantisches Schwerkraftzentrum wie ein Staubsauger aufgesammelt haben, bis seine Umgebung „leer gefegt“ war.

Da supermassive Löcher inzwischen in sehr vielen Galaxien nachgewiesen wurden, glauben manche Astrophysiker, dass sie zur natürlichen Entwicklung dieser Sternensinseln gehören und möglicherweise sogar für ihre Entstehung von großer Bedeutung sind.

Doch nicht nur das: Bis heute, so zeigen neue Beobachtungen mithilfe des in der Erdumlaufbahn kreisenden Röntgenteleskops „Chandra“, formieren sich in der Nähe des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße immer wieder auch neue Sterne.

Möglicherweise wirkt dessen Gravitation also stimulierend auf Staubwolken, deren Materie sich dadurch zusammenballt. So verschlingen Schwarze Löcher nicht nur Sonnen, sondern wären genauso „Geburtshelfer“ für neue.

Auch von der Zukunft und vom Ende dieser so extremen und seltsamen Objekte haben die Forscher Vorstellungen. Der Astrophysiker Stephen Hawking stellte 1974 fest, dass es nach den Gesetzen der **Quantentheorie** einigen Elementarteilchen möglich sein sollte, dem Schwarzen Loch in winzigen Portionen Energie abzuzapfen, wodurch es im Laufe der Zeit „verdampft“. Berechnungen ergaben, dass dieser Prozess bei einem Objekt von mehreren Sonnenmassen etwa  $10^{66}$  Jahre dauert.

Das ist eine Eins mit 66 Nullen – und solch eine Zeitspanne ist nicht mehr vorstellbar: Denn sie übertrifft das gesamte Lebensalter des heutigen Universums (13,7 Milliarden Jahre) um mehr als das Trilliardenfache.

Und das wäre dann fast schon eine Ewigkeit. □

Wissenschaftliche Beratung: **Dr. Andreas Müller**, Abteilung Röntgenastronomie am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching.