

Wirbel der Raumzeit

Die Astrophysik rotierender Schwarzer Löcher

VON ANDREAS MÜLLER

Rotation ist eine Eigenschaft nahezu aller Objekte im Universum. Heute verdichten sich die Indizien aus Beobachtungen, dass auch Schwarze Löcher rotieren [1]. Das supermassereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum ist ein Beispiel dafür. Auch andere Kandidaten für Schwarze Löcher scheinen zu rotieren. Dieser Beitrag geht der Frage nach, weshalb die Rotation Schwarzer Löcher von so großer Bedeutung ist.

Schwarze Löcher sind hoch verdichtete Massenkonzentrationen. In der Astrophysik ordnet man sie den kompakten, dunklen Objekten zu. Das Besondere an ihnen ist, dass ihre Masse ausschließlich in einer Singularität sitzt. Dort wird die Krümmung von Raum und Zeit unendlich groß. Krümmung kann man sich vorstellen wie eine Delle in einer Gummihaut. Dabei repräsentiert die Gummihaut den Raum, präzise gesagt die Raumzeit. Eine unendliche Krümmung entspricht gewissermaßen einem Loch in dieser Haut.

Diese geometrische Deutung der Gravitation geht zurück auf Albert Einstein (1915). Seine Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt, wie Masse und Energie die geometrische Struktur von in Raum und Zeit verformen. Nach dieser Theorie sind Schwarze Löcher eine mögliche Realisierung einer Raumzeit, die durch die Einsteinschen Feldgleichungen beschrieben wird.

Bereits 1916 fand der deutsche Astronom Karl Schwarzschild die erste Lösung der Feldgleichungen überhaupt. Es handelt sich um das Gravitationsfeld einer

Punktmasse. Heute bezeichnet man sie als (äußere) Schwarzschild-Lösung. Sie beschreibt kugelsymmetrische Schwarze Löcher, die statisch sind, also nicht rotieren.

Im Karussell der Raumzeit

Erst viel später, 1963, fand der neuseeländische Mathematiker Roy P. Kerr die verallgemeinerte Lösung für rotierende Schwarze Löcher, die achsensymmetrisch und stationär ist. Quelle dieses Gravitationsfeldes ist ein ringförmiger Massenstrom, eine Ringsingularität. Relativisten und Astrophysiker nennen diese Raumzeit die Kerr-Lösung.

Schwarze Löcher besitzen im Vergleich zu Sternen sehr wenige Eigenschaften. Sie haben »keine Haare«, wie es der Relativist John A. Wheeler formulierte. Die für die Astrophysik wesentlichen Schwarzen Löcher sind elektrisch neutral und werden allein durch ihre Masse und ihren Drehimpuls charakterisiert. Diese beiden Parameter reichen völlig aus, um

◀ Ein rotierendes Schwarzes Loch in Aktion. Aus dem gleißend hellen Kern der Galaxie M 87 schießt dieser spektakuläre Jet hervor. Er leuchtet bläulich im Synchrotron-Licht seiner relativistischen Elektronen, seine Länge beträgt im Sichtbaren etwa 12 Bogensekunden oder 3000 Lichtjahre.

▶ Abb. 1: Der Anblick eines rotierenden Schwarzen Lochs vor dem Hintergrund einer leuchtenden Gasscheibe.



die Eigenschaften der rotierenden Raumzeit eindeutig festzulegen.

Eine besondere Zone, die alle Schwarzen Löcher umgibt, ist der Ereignishorizont. Es handelt sich nicht um eine feste Oberfläche, sondern um eine das Schwarze Loch umgebende kritische Zone, von der aus keine Information mehr entkommen kann. Der Ereignishorizont umschließt die Krümmungssingularität im Inneren und trennt Beobachtbares von Unbeobachtbarem. Denn alle Ereignisse, die vom Blickwinkel eines außerhalb des Horizonts befindlichen Beobachters gesehen am und innerhalb des Horizonts ablaufen, lassen sich weder beobachten, noch beeinflussen. Alles, was hinter dem Ereignishorizont liegt, ist von der Außenwelt abgekoppelt.

Strahlung und Materie, die den Ereignishorizont von außen kommend überschreitet, sind verloren, stürzen in die Singularität und reichern das Loch mit noch mehr Masse an. Für den Beobachter stellt sich dieser Verlust von Strahlung so dar, dass er ein völlig schwarzes Gebiet um das Loch sieht. Dies gab den Schwarzen Löchern ihren Namen.

Der physikalische Effekt, der zu dieser Schwärze führt, heißt Gravitationsrotverschiebung. Die Lichtteilchen verlieren Energie, indem sie dem starken Gravitationsfeld zu entrinnen versuchen. Dieser gravitativ bedingte Energieverlust verschiebt ihre Wellenlänge zum energiearmen, langwelligen Ende des Spektrums. In der Praxis ist dieser Effekt schon weit vor dem Horizont relevant. Die Konsequenz ist eine ausgeprägte dunkle Region, die den völlig schwarzen Ereignishorizont umgibt. Vor dem Hintergrund einer leuchtenden Gasscheibe erscheint das Loch mit seiner Umgebung als ausgeprägter, großer, dunkler Fleck. Abb.1 zeigt ein schwarzes Gebiet rund um ein Schwarzes Loch vor dem Hintergrund einer leuchtenden, mäßig geneigten, rotierenden Gasscheibe. Der helle Fleck links

ist stark blauverschobene Strahlung aus einem Bereich, der sich mit hoher Geschwindigkeit dem Beobachter nähert. Auffallend ist die Nähe von Helligkeit und Dunkelheit. Dieses simulierte Bild eines Schwarzen Loches wurde mit der Ray-Tracing-Methode gewonnen.

Statische Schwarze Löcher haben einen einzigen Ereignishorizont, der die Punkt singularität abschirmt. Die rotierenden Kerr-Löcher haben hingegen zwei Ereignishorizonte: einen inneren, auch Cauchy-Horizont genannt, und einen äußeren Horizont. Der äußere Horizont ist entscheidend für die Astronomie, legt er doch die schwarze Zone fest. Die Ringsingularität befindet sich immer zwischen den beiden kugelsymmetrischen Horizonten.

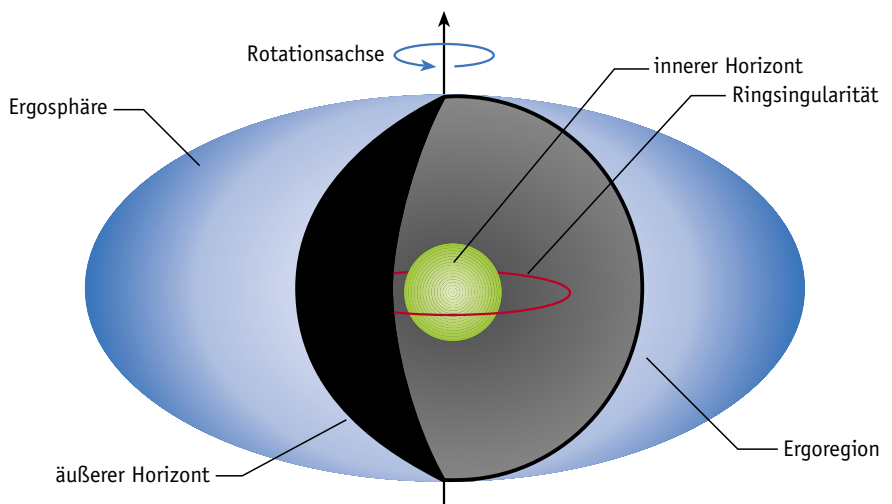
Die nächste Umgebung

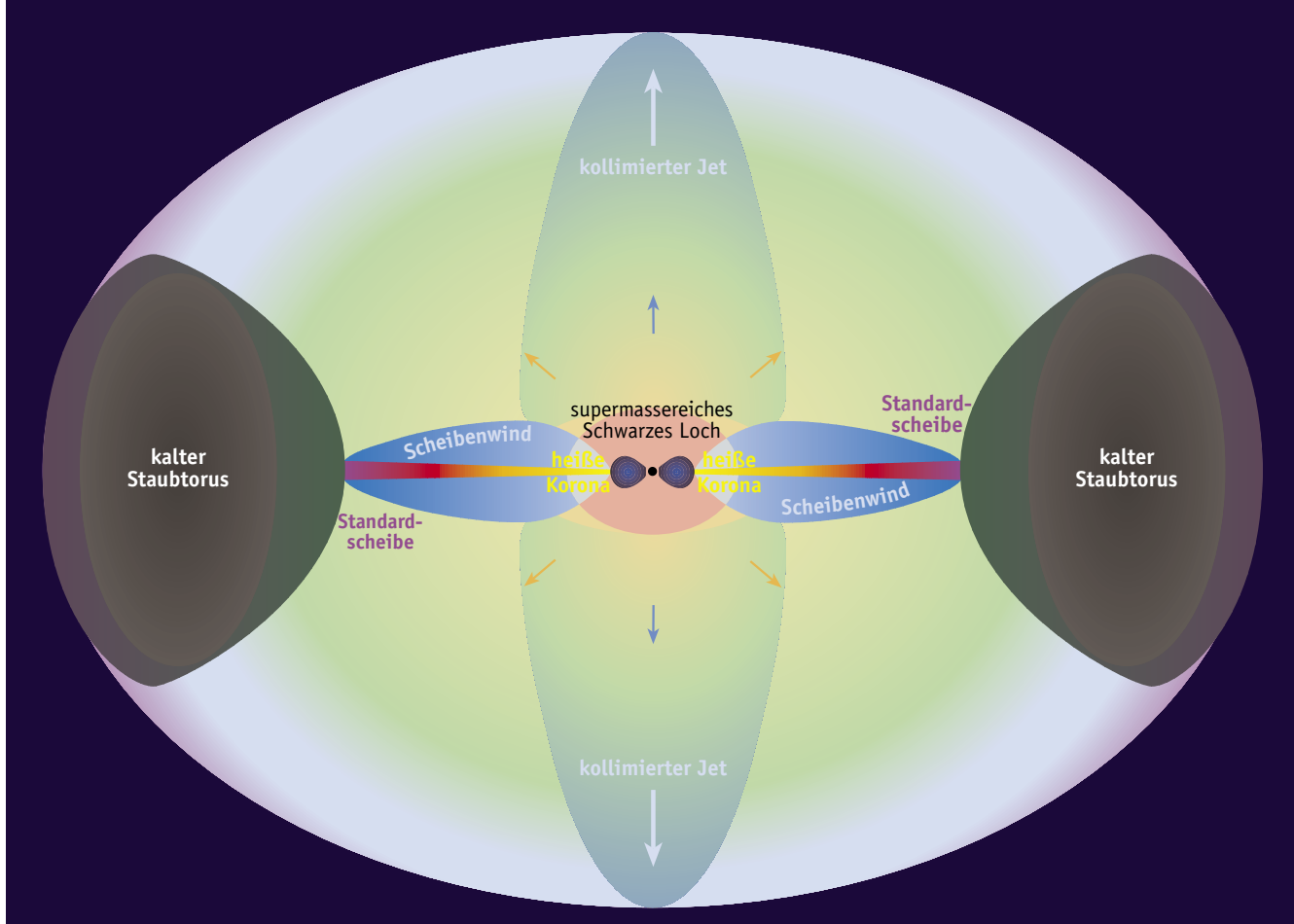
Eine besondere Zone in der Umgebung rotierender Schwarzer Löcher ist die Ergosphäre. Sie markiert die statische Grenze der Raumzeit, in deren Innerem alles mit dem Loch rotieren muss. Die Ergosphäre ist also ein exklusives Merkmal von Kerr-Löchern und fehlt bei statischen Schwarzschild-Löchern. Im Gegensatz zu den Horizonten ist die Ergosphäre an den Polen abgeplattet, ähnlich wie die ro-

tierende Erde. Das Gebiet zwischen Ergosphäre und äußerem Ereignishorizont des Kerr-Loches heißt Ergoregion. Sie ist am größten bei maximal rotierenden Löchern. In diesem Extremfall rotiert der Horizont am Äquator mit der Lichtgeschwindigkeit. Abb. 2 zeigt einen Blick in die aufgeschnittene Ergosphäre eines Kerr-Loches. Während die Horizonte exakte Kugelgestalt haben, ist die Ergosphäre an den Polen abgeplattet. Alle Komponenten rotieren um die Symmetrieachse.

Ein anderer charakteristischer Ort in der Umgebung Schwarzer Löcher ist die marginal stabile Bahn. Es handelt sich um die innerste Kreisbahn, auf der gerade noch eine stabile Rotation um das Loch möglich ist. Für kleinere Abstände bricht die stabile Rotation zusammen. Dann muss ein umlaufender Körper (Orbiter) entweder in das Loch fallen oder den Bereich um das Loch verlassen. Die marginal stabile Bahn hängt nur von der Masse und dem Drehimpuls des Kerr-Loches ab.

▼ Abb. 2: Blick in die aufgeschnittene Ergosphäre (blau) eines Kerr-Loches. Dargestellt sind der äußere Ereignishorizont (schwarz), der innere Horizont (grün) und die Ringsingularität (rot).





Für statische Löcher ist dieser Abstand relativ groß und liegt beim dreifachen Horizontradius; beim maximal rotierenden Loch stimmen marginal stabile Bahn und Ereignishorizont überein.

Flüssigkeit in der Schwerkraftfalle

Schwarze Löcher beeinflussen ihre Umgebung, indem sie Materie aus ihrer Umgebung auf sammeln. Dieser Mechanismus heißt Akkretion und ist mit den hellsten Strahlungserscheinungen verbunden, die im Universum bekannt sind. Akkretion sorgt für die enormen Leuchtkräfte der Aktiven Galaktischen Kerne (engl. Active Galactic Nuclei, AGN). Zu diesen enorm hellen Zentren von Galaxien gehören die Quasare, Blazare, Seyfert-Galaxien und Radiogalaxien. Trotz deutlicher Unterschiede zwischen diesen Typen von Galaxienkernen, lassen sie sich im Rahmen eines einheitlichen Standardmodells beschreiben.

Dieses Standardmodell ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Gezeigt ist ein vertikaler Schnitt durch eine komplette Aktive Galaxie. Ihre dreidimensionale Struktur denke man sich, indem um die vertikale Achse rotiert wird. Im Herzen des AGN befindet sich ein supermassereiches Schwarzes Loch, das Umgebungsmaterie der Galaxie auf sammelt. Bei dieser Akkretion bildet sich eine dünne Standardscheibe auf der Skala von wenigen bis hunderten von Lichtjahren aus. Nicht alle Materie verschwindet im Loch: Ein Bruch-

teil speist großskalige Plasmaströme, die relativistischen Jets, welche das System in Richtung der Pole des Loches verlassen. Auf der großen Längenskala von einigen zehntausend Lichtjahren gibt es einen kalten Staubtorus, ein schlauchförmiges Gebilde, das aus molekularer Materie besteht. Er sorgt für die charakteristische Zweiteilung der AGN in Typ 1 und 2, je nachdem, wie der Beobachter relativ zum Staubtorus orientiert ist. Bei Typ 1 ist der Blick ins Zentrum direkt möglich, bei Typ 2 versperrt der Gigant aus Staub die Sicht ins Zentrum des AGN. Eine ausführliche Diskussion der Beobachtungsgrundlagen dieses Standardmodells findet sich in [2].

Durch das Auf sammeln von Materie wird Strahlung noch effizienter erzeugt, als durch die thermonukleare Fusion im Innern von Sternen: Während bei der Fusion nur 0,7 Prozent der Ruhemasse in Strahlungsenergie umgewandelt werden, sind es bei der Akkretion bis zu 20 Prozent. Das Faszinierende an der Akkretion in AGN ist, dass hier auf kleinstem Raum das Hellste, was uns im Universum bekannt ist, mit dem Schwärzesten vereint ist – einem Schwarzen Loch. Die enormen Strahlungsprozesse finden allerdings außerhalb des Ereignishorizonts des Loches statt, deshalb sind sie beobachtbar.

In der Regel fällt das Material nicht auf direktem Wege ein, sondern es bewegt sich auf einer spiralförmigen Bahn in das Schwarze Loch. Das liegt daran, dass die Materie Drehimpuls besitzt. Deshalb bildet sich aus vielen einfallenden Teilchen

▲ Abb. 3: Standardmodell eines Aktiven Galaktischen Kerns (AGN)

ein abgeflachtes Gebilde um das Schwarze Loch aus: die Akkretionsscheibe. Sie wird durch Abstrahlung elektromagnetischer Wellen effizient gekühlt.

Ein Flüssigkeitsmodell

Die Bewegung der Materie in der Umgebung Schwarzer Löcher lässt sich mit einem Flüssigkeitsmodell beschreiben. Die Gleichungen der Hydrodynamik werden jedoch dadurch modifiziert, dass die Flüssigkeit geladen ist und magnetisiert werden kann. Dieser um magnetische Effekte erweiterte Zweig der Hydrodynamik heißt Magnetohydrodynamik (MHD). Die theoretischen Astrophysiker versuchen, auf der Grundlage der MHD-Gleichungen die Akkretionsphysik Schwarzer Löcher mit numerischen Modellen auf Hochleistungsrechnern zu simulieren.

Die Gleichungen müssen dazu vor dem Hintergrund der rotierenden Raumzeit behandelt werden. Diese Verknüpfung behandelt gerade die allgemein relativistische MHD, kurz GRMHD (engl. General Relativistic Magnetohydrodynamics). Die Gleichungen sind außerordentlich kompliziert und nur numerisch auf Computern lösbar: die nichtlinearen Gleichungen der Strömungsmechanik sind mit den nichtlinearen Gleichungen der Einsteinschen Theorie zu verknüpfen.

Eine zusätzliche Komplikation liegt darin, dass auch die Kühlung und Hei-

zung des Akkretionsflusses durch Strahlung relevant sind. Die Theorie stellt in dieser radiativen GRMHD noch keine bewährten Methoden bereit. Numerisch stabile Verfahren müssen erst entwickelt werden. Demzufolge erforschen die Theoretiker heute noch den nicht-radiativen Fall. Das bedeutet schlichtweg, dass der Einfluss durch Strahlung vernachlässigt wird – wohl wissend, dass dies eine grobe Vereinfachung darstellt. Bislang ist es nur möglich zu simulieren, wie eine magnetisierte Flüssigkeit mit einem rotierenden Schwarzen Loch ohne Strahlung wechselwirkt. Schon diese Modelle weisen jedoch einen grundsätzlichen Trend auf und zeigen einerseits erwartungsgemäß die Akkretion, und andererseits auch das Ausströmen von Materie in der unmittelbaren Umgebung Schwarzer Löcher, aber noch keine relativistischen Jets (vgl. Abb. 3). Die zukünftige theoretische Forschung wird sich den Herausforderungen der radiativen GRMHD stellen müssen.

Materie und Strahlung

Welche Strahlungsmechanismen sind in der Nähe Schwarzer Löcher von Belang? Zunächst wird das akkretierte Material extrem heiß und strahlt deshalb Wärmestrahlung ab. Bei den erreichten hohen Temperaturen liegt diese thermische Strahlung bereits im Röntgenbereich. Die Aufheizung der Materie bewirkt auch eine Ionisation, so dass in der Nähe des Schwarzen Loches ein Plasma entsteht. Das heißt Moleküle und neutrale Atome werden in negative und positive Ladungsträger aufgetrennt. Im Bereich der Magnetfelder, die durch die bewegten elektrischen Ladungen erzeugt werden, entsteht Synchrotronstrahlung. Daneben spielen weitere Strahlungsmechanismen eine Rolle: So senden abgebremste und abgelenkte elektrische Ladungen Bremsstrahlung aus.

Bei der Akkretion bilden sich Gebiete aus, in denen sich heißes Plasma sammelt, das für Strahlung teilweise besonders durchlässig (»optisch dünn«) ist. In diesen so genannten Koronen kann niederenergetische Strahlung aus der Umgebung (kosmische Hintergrundstrahlung, thermische Strahlung der Akkretionsscheibe) gestreut werden und Strahlungsenergie aufnehmen. Dieser Prozess heißt im Fachjargon Comptonisierung (inverse Compton-Streuung) und erzeugt charakteristische Röntgenspektren mit »zwei Buckeln«. Die so entstandene hochenergetische Strahlung regt wiederum das ionisierte Plasma der kalten Akkretionsscheibe zu Fluoreszenzstrahlung an. Es handelt sich dabei um eine Art Reflexion. Die Fluoreszenz erzeugt charakteristische Emissionslinien, die im Röntgen-

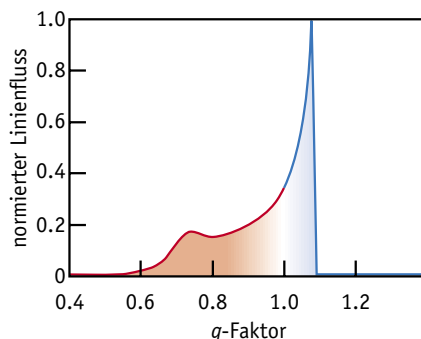
bereich bei einigen Seyfert-Galaxien und Quasaren, aber auch bei Röntgendoppelsternen zu beobachten sind.

Modellrechnungen

Für einfache Scheibengeometrien sind diese Linienspektren berechenbar. In Abb. 4 ist die Computersimulation eines typischen asymmetrischen und breiten Profils einer relativistischen Röntgenemissionslinie gezeigt, die aus der nahen Umgebung eines Schwarzen Loches kommt. Der (normierte) Strahlungsfluss wurde über dem relativistisch verallgemeinerten Dopplerfaktor (»g-Faktor«) aufgetragen. Bei $g = 1$ findet man den unverschobenen Anteil der Linie, $g < 1$ entspricht rot- und $g > 1$ blauverschobenen Anteilen. Das Liniensprofil eines bestimmten Elements erhält man, indem man die Ruheenergie der Linie mit dem g-Faktor multipliziert. Prominent sind Eisenlinien Fe Ka bei 6.4 keV.

In diesen Computermodellen verzichtet man auf die MHD und simuliert nur die Strahlenausbreitung in der gekrümmten Raumzeit des Loches. Diese Methode heißt relativistisches Ray Tracing (deutsch: Strahlenverfolgung). Die Liniensprofile sind ein wichtiges Diagnoseinstrument in Systemen aus Schwarzen Loch und Akkretionsscheibe. Leider findet man die Linie nicht in allen AGN. Aus dem Vergleich von gemessenen und simulierten Liniensformen folgen zum Beispiel die Neigung der Akkretionsscheibe, die Scheibengröße (Innenrand), die Bewegung des Plasmas und bis zu einem gewissen Grad auch der Drehimpuls des Schwarzen Loches.

Die Ergebnisse von GRMHD-Simulationen können nicht ohne Weiteres mit Beobachtungsdaten verglichen werden. Denn das Raumgebiet um das Schwarze Loch, das Gegenstand der Untersuchung der GRMHD ist, ist relativ klein. Aufgrund der großen Entfernung der Kandidaten



▲ Abb. 4: Computersimulation eines typischen asymmetrischen und breiten Profils einer relativistischen Röntgenemissionslinie, die aus der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Loches kommt.

für Schwarze Löcher ist es bislang leider nicht möglich, dieses Gebiet als astronomisches Bild aufzulösen. Teleskope vermögen nur die räumlich aufsummierten Spektren aus diesem Bereich zu vermessen. Diese gemessenen Spektren erlauben es jedoch, die Bewegung des Plasmas in der Nähe des Loches zu bestimmen. Außerdem folgen aus den Simulationen Kenngrößen (Akkretionsraten, Windgeschwindigkeiten, Lorentz-Faktoren, Säulendichten, Magnetfeldstärken, etc.), die auch der Beobachtung zugänglich sind. Im günstigen Fall passen Theorie und Praxis so gut zusammen, dass der Forscher aus den Modellrechnungen eine tiefere Einsicht in die Akkretionsphysik gewinnen kann. Bisher erscheinen viele simulierte Strukturen von Akkretionsflüssen und Materieausflüssen plausibel.

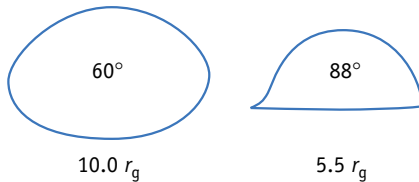
Identifikation Schwarzer Löcher

Mittlerweile gibt es zahlreiche Verfahren, um Schwarze Löcher indirekt, aber auch direkt nachzuweisen.

Die klassische, indirekte Methode ist der kinematische Nachweis [3]. Hier werden bewegte Objekte in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Loches analysiert. Ihre Bewegung verrät Eigenschaften des Loches. Mit den Kepler-Gesetzen lassen sich so dunkle Zentralmassen quantitativ bestimmen, obwohl sie nicht direkt sichtbar sind. Dieses Verfahren ist analog zur Ableitung der Masse der Sonne aus der beobachteten Bewegung der Planeten. Als Indikatoren für Schwarze Löcher können umlaufende Sterne, aber auch Strahlungsblitze (Flares) aus dem Akkretionsfluss dienen.

Die spektro-relativistische Methode nutzt relativistische Emissionslinien. Die Profile dieser Spektrallinien werden durch relativistische Effekte (Blauverschiebung, Gravitationsrotverschiebung) in charakteristischer Weise verzerrt und vor allem deutlich verbreitert (Abb. 4). Die Liniensprofile, die die Astronomen im Röntgenbereich messen, tragen wie ein Fingerabdruck die Eigenschaften von Schwarzen Loch und Akkretionsfluss in sich.

Die aberrative Methode beruht darauf, dass eine kompakte, große Masse auf Lichtstrahlen wie eine beugende Linse wirkt. Solche Gravitationslinsen können von kosmischen Objekten stark verzerrte Bilder produzieren. Eine klassische Kreis- oder Ellipsenbahn eines umlaufenden Körpers, wie die eines Sterns oder Planeten, kann deshalb stark deformiert werden, wenn die Objekte das Schwarze Loch nur hinreichend eng umkreisen. In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Simulation enger Kreisbahnen um ein zentrales Schwarzes Loch dargestellt. Das Loch sitzt etwa in der Mitte des jeweiligen Rings. Der Gra-



▲ Abb. 5: Simulation enger Kreisbahnen um ein zentrales Schwarzes Loch.

vitationslinseneffekt verzerrt vertraute Bahnellipsen zu exotischen Bahnformen. Der angegebene Winkel bezeichnet die Neigung der Bahnebene zum Beobachter: Bei 0° schaut er von oben auf die Bahnebene, bei 90° auf ihre Kante. Der Bahnradius wird in Einheiten des Gravitationsradius, $r_g = GM/c^2$, wobei G die Gravitationskonstante, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit und M die Masse des Loches sind. Es handelt sich bei diesem aberrativen Effekt um eine »optische Täuschung«, weil die deformierte Bahnform einem nur externen Beobachter so erscheint. Die tatsächliche Bahn ist kreis- oder ellipsenförmig.

Obskurative Verfahren sind direkte Methoden. Sie konnten bisher mangels räumlicher Auflösung nicht durchgeführt werden. Die Idee ist, den dunklen Bereich rund um den Ereignishorizont eines Schwarzen Loches direkt zu beobachten. Dieses Raumgebiet ist sehr klein und liegt selbst für sehr massereiche Schwarze Löcher an der aktuellen Beobachtungsgrenze. So liegt dieser Durchmesser für das superschwere Loch im Zentrum der Milchstraße im Bereich von Mikrobogensekunden (der 3,6 Milliardenste Teil eines Grades). Die größte Chance besteht darin, diesen »dunklen Fleck« im Bereich der Radiostrahlung nachzuweisen [4]. Die Radioastronomen erreichen mittels Interferometrie bereits Auflösungen bis in den Bereich von Mikrobogensekunden! Möglicherweise wird dieser direkte Nachweis bald gelingen.

Bei akkretiven Verfahren versuchen die Astrophysiker aus beobachteten Eigenschaften des Akkretionsflusses auf ein Schwarzes Loch zu schließen. Die Röntgenastronomen beobachten in den Lichtkurven von Kandidaten für stellare Schwarze Löcher fast periodisch sich wiederholende Muster. Diese so genannten quasi-periodischen Oszillationen (QPOs) werden mit einer räumlichen Schwingung der Akkretionsscheibe in Verbindung gebracht. Im weitesten Sinne kann man die QPO-Diagnostik zu den akkretiven Verfahren rechnen. Aber auch die Messung relativistischer Ausflüsse weist auf ein Loch hin, das einen Teil des Akkretionsflusses wieder frei gibt.

Unter eruptiven Verfahren kann man die Untersuchung von Strahlungsaus-

brüchen subsumieren, aus denen sich auf ein Schwarzes Loch schließen lässt. Dazu gehören die Supernovae (Typ 2), also Explosionen massereicher Sterne, die unter Umständen ein stellares Schwarzes Loch als kompaktes Relikt übrig lassen. Auch die damit verwandten, noch heftigeren Hypernovae stehen in Verdacht, in der Regel ein Schwarzes Loch zu bilden. Hypernovae sind mit einigen Sekunden andauernden hochenergetischen Ausbrüchen im Bereich der Gammastrahlung, den Gamma Ray Bursts (GRBs) assoziiert. Auch die kurzen GRBs, die deutlich weniger als etwa zwei Sekunden dauern, weisen auf die Bildung stellarer Schwarzer Löcher hin. Bevorzugte Erklärung ist hier die Verschmelzung kompakter Objekte, die sich umkreisen, zum Beispiel zwei Neutronensterne.

Auch Strahlungsblitze (Flares) dürfen zu den eruptiven Verfahren gezählt werden, welche die Existenz eines Loches verraten. Vor kurzem geriet eine unscheinbare Galaxie in die Schlagzeilen, weil sie als Röntgenquelle aufflammte. Die Erklärung war, dass im Zentrum dieser Galaxie ein Stern durch die Gezeitenkräfte eines massereichen Schwarzen Loches zerrissen wurde [5].

Alle diese Methoden dienen heutzutage zum Nachweis oder zumindest zur Auswahl von Kandidaten für Schwarze Löcher im Kosmos.

Schwarze Löcher in unserer Galaxis

Im Zentrum des Milchstraßensystems befindet sich ein besonders massereiches, ein supermassereiches Schwarzes Loch. Die Kompaktheit des Galaktischen Zentrums wurde früh aus Beobachtungen im Radiobereich erkannt [4]. Die entsprechende Radioquelle heißt Sagittarius A* und wird mit dem zentralen Schwarzen Loch assoziiert. Es ist sehr kompakt: Der äußere Horizont überschreitet nicht die Größe des Sonnensystems, obwohl es so massereich ist, wie etwa drei Millionen Sonnen! Dieser Wert für die Masse folgt aus Infrarotbeobachtungen an Sternen in unmittelbarer Umgebung des Loches [3].

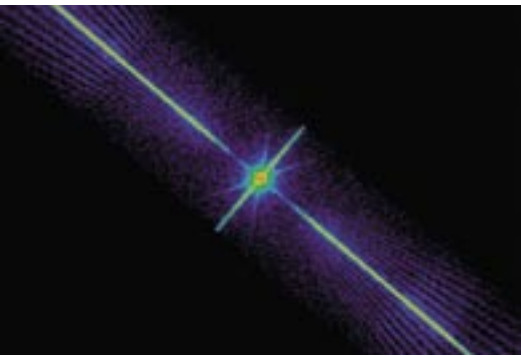
Auch Röntgenbeobachtungen bestätigen diese Ergebnisse und die schnelle Rotation des Loches.

Daneben gibt es zahlreiche kleinere Schwarze Löcher, die sämtliche Bereiche des Milchstraßensystems bevölkern und bezüglich der Masse mit Sternen vergleichbar sind. Diese stellaren Schwarzen Löcher entstehen beim Gravitationskollaps massereicher Sterne, die an das Ende ihrer Entwicklung gelangen. Ein großer Teil des Drehimpulses des Vorläufersterns überträgt sich auf das Schwarze Loch. Bei dessen Bildung kann ein gewisser Anteil des Drehimpulses durch Gravitationswellen abgestrahlt werden. Die stellaren Löcher sind deutlich kleiner, als die, die man in galaktischen Zentren findet. Ein (statisches) Schwarzes Loch mit der Masse unserer Sonne hat gerade mal einen Horizonsradius von drei Kilometern. Da Sterne häufig in Doppelsystemen anzutreffen sind, gibt es zahlreiche Binärsysteme, deren eine Komponente ein stellares Schwarzes Loch ist. Ist die andere Komponente ein Riesenstern, so kann in engen Systemen Materie von diesem Stern zur kompakten Komponente überfließen – der Riese füttert das Schwarze Loch.

Dieses Ereignis wird tatsächlich in Röntgendoppelsternen beobachtet. Die überfließende Materie kommt von einem rotierenden Stern. Deshalb besitzt sie Drehimpuls, kann also nicht auf direktem Wege auf das Schwarze Loch einfallen, sondern bildet eine charakteristische Akkretionsscheibe aus. In diesem abgeflachten Gebilde heizt sich die Sternmaterie auf und emittiert hochenergetische Strahlung im Röntgenbereich. Dabei bewegt sich das so erzeugte Plasma auf Spiralbahnen in das Schwarze Loch hinein und reichert es noch weiter mit Masse an. Auf diese Weise wächst das stellare Schwarze Loch durch Akkretion auch räumlich an. Ein Teil der Materie kann das System aus Schwarzen Loch und Scheibe verlassen: Zum einen »dampft« ständig ein Teilchenwind von der Scheibenoberfläche ab, zum anderen können Ausflüsse magnetisch aus der Ergoregion herausge-

Literaturhinweise

- [1] **Siegfried Falter:** Rotiert das Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum? SuW 3/2004, S. 19.
- [2] **Martin Haas, Klaus Meisenheimer:** Sind Radiogalaxien und Quasare dasselbe? SuW 11/2003, S. 24.
- [3] **Rainer Schödel, Reinhard Genzel, Thomas Ott:** Das dunkle Herz unserer Milchstraße. SuW 8/2003, S. 36.
- [4] **Heino Falcke, Karl L. Menten:** Ein Schwarzes Loch und seine Umgebung im Radiolicht. SuW 8/2003, S. 28.
- [5] **Stefanie Komossa:** Röntgenflares aus nahen Galaxien. SuW 4/2004, S. 14. Weitere Informationen zum Thema finden sich auf der Homepage des Autors: <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/amueller/>



▲ Abb. 6: Das Spektrum des GBHC XTE J1118+480, aufgenommen vom Röntgensatelliten CHANDRA. (Bild: NASA/Cfa/J. Mc Clintock/M. Garcia)

trieben werden. So entstehen gebündelte Plasmaströme, die Jets.

Die Kandidaten für stellare Schwarze Löcher in der Milchstraße subsumiert man unter dem Begriff GBHC, dem englischen Akronym für Galactic Black Hole Candidate. Sie gehören zur weit größeren Klasse der Röntgendoppelsterne. In Analogie zu den Quasaren, den Kernen von Galaxien, spricht man von Mikroquasaren, weil sich die Objekte nur durch ihre Größenskala unterscheiden, die Physik ist in beiden Fällen im Wesentlichen dieselbe.

Prominente GBHCs sind Cyg X-1 und XTE J1118+480 (Abb. 6). Letztgenannte Röntgenquelle steht von uns 1.8 Kiloparsec (6000 Lj) entfernt und ist damit das uns nächste kosmische Schwarze Loch überhaupt!

Schlüsselrolle der wirbelnden Raumzeit

Rotation ist eine Eigenschaft vieler kosmischer Objekte: Erde, Sonne, Mond, Planeten, selbst Galaxien und Galaxienhaufen rotieren. Aus dieser Perspektive ist die Rotation Schwarzer Löcher natürlich. Sie ist aber auch notwendig, um eine Reihe von astronomischen Phänomenen erklären zu können.

An erster Stelle steht dabei, die Herkunft der relativistischen Jets zu klären. Relativistische Jets sind gebündelte Plasmaausflüsse, die fast so schnell werden können, wie das Licht. Relativistische Jets beobachten Astronomen vor allem bei den Aktiven Galaxien. Im Standardmodell der AGN sieht man als Ursache dieser Aktivität die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch an, das gerade im Zentrum des AGN vermutet wird (Abb. 3). Die ausströmenden Materieflüsse sind eine Folge der Wechselwirkung des einfallenden Akkretionsflusses mit dem Schwarzen Loch. Aufgrund dieses Phänomens ist klar, dass Schwarze

Löcher nicht sämtliche Materie aus ihrer Umgebung ausnahmslos verschlingen, wie häufig behauptet wird.

Einen Ausfluss bezeichnet man in Analogie zur Sonnenphysik als (eng gebündelten) Teilchenwind. Die Magnetohydrodynamik beschreibt, wie die so genannten Poynting-Flüsse auf der Oberfläche der Sonne bzw. einer Akkretionsscheibe magnetisch erzeugt werden. Der relativ ungerichtete Ausfluss kann mit Hilfe weiterer Magnetfelder eine Vorzugsrichtung erhalten und gebündelt werden. Erst dann, wenn großräumige, gerichtete Materieausflüsse vorliegen, spricht man von Jets.

Den Magnetfeldern und der Rotation des Schwarzen Loches kommen bei der Jetbildung in AGN die Schlüsselrollen zu. Die Magnetfelder werden von der Akkretionsscheibe transportiert. Wie bei der Sonne sind die Felder in Flussröhren eingeschlossen. Bewegte Ladungen erzeugen immer Magnetfelder, die sich überlagern. Nähert sich der einfallende Plasmaström dem rotierenden Schwarzen Loch, so kommt es zu einem erstaunlichen Effekt: Die Raumzeit rotiert in der Nähe des Loches immer schneller und reißt alles mit sich. Selbst die Magnetfelder werden von der Rotation mitgeschleppt. Dieses Phänomen, dass alles mit der rotierenden Raumzeit mitrotieren muss und nicht statisch bleiben kann, heißt Frame-Dragging-Effekt (engl. frame: Bezugsrahmen, to drag: mitreißen). Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) zeigt eine faszinierende Analogie zur klassischen Elektrodynamik: Im so genannten Gravitomagnetismus erzeugen Massenströme in ihrer Umgebung gravitomagnetische Felder. Das ist genau wie in der Elektrodynamik, wo elektrische Ladungsströme magnetische Felder erzeugen. Generell erzeugt jeder rotierende Körper ein gravitomagnetisches Feld. Deshalb kann man sagen, dass Kreisel miteinander gravitomagnetisch wechselwirken: sie tauschen gravitomagnetische Kräfte aus, was ein reiner Effekt der ART ist. Dies führt zur Lense-Thirring-Präzession: Die Kreisel beeinflussen gegenseitig ihre Drehachsen und beginnen zu torkeln. Akkretionsscheibe und rotierendes Loch können als zwei solche Kreisel angesehen werden. Auf

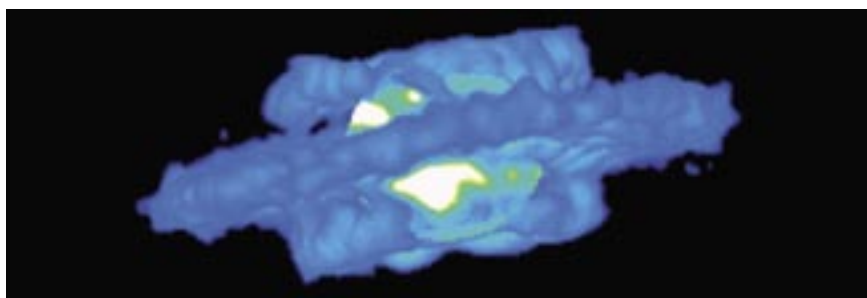
der Grundlage der Lense-Thirring-Präzession ist zu erwarten, dass eine Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch torkelt. Die Scheibe führt quasi-periodische Kippbewegungen aus. Eine favorisierte Ursache für die bereits erwähnten QPOs ist die Lense-Thirring-Präzession. Die QPO-Frequenzen sind nur in diesen stellaren Systemen von Bedeutung. In galaktischen Systemen, wie den AGNs, sind sie zu klein. Die gemessene QPO-Frequenz lässt Rückschlüsse auf die Akkretionsscheibe und das rotierende Schwarze Loch zu.

Neben der Torkelbewegung drücken die gravitomagnetischen Kräfte den rotierenden Akkretionsfluss in die Äquatorebene des Schwarzen Loches. Diesen Sachverhalt nennen Astrophysiker den Bardeen-Petterson-Effekt.

Der Lense-Thirring-Effekt ist eine der letzten Vorhersagen der ART, die bisher nicht experimentell verifiziert werden konnten. Gegenwärtig misst nach langer Planungsphase der Satellit GRAVITY PROBE-B der NASA genau diesen Effekt. Freie Kreisel (Gyroskope) an Bord des Satelliten werden durch die Erdrotation geringfügig gestört. Deshalb sollte im nächsten Jahr eine deutliche Verstellung ihrer Kreiselachsen gemessen werden können.

Das Wesentliche in der AGN-Physik ist das rotierende Schwarze Loch. Die Ergosphäre ist eingetaucht in die Magnetosphäre, die global vom ionisierten Akkretionsfluss erzeugt wird. Die Wechselwirkung zwischen rotierender Raumzeit und Magnetfeldlinien ist komplex. Die gravitomagnetischen Kräfte sorgen für die Verstärkung des Magnetfeldes und verdrillen es um das Schwarze Loch. Die rotierende Raumzeit reißt die Felder mit sich mit. Das führt zu einer Verstärkung der Magnetfelder, weil die Feldlinien enger geschnürt werden. Das Ergebnis ist ein dominant schlauchförmiges Magnet-

▽ Abb. 7: Magnetosphäre des Gasplaneten Jupiter, sichtbar gemacht mit Radiostrahlung bei 20 cm Wellenlänge. Es handelt sich um Synchrotronstrahlung von eingefangenen Elektronen, die in der Jupiter-Magnetosphäre emittiert wird. (Bild: VLA)



feld in unmittelbarer Nähe zum Schwarzen Loch. Die Morphologie der Magnetosphäre ist dabei vergleichbar mit derjenigen des Riesenplaneten Jupiter (Abb. 7).

Der Verstärkungsprozess heißt gravitomagnetischer Dynamo. Die Magnetfelder können jedoch nicht beliebig stark verdrillt werden, weil sich irgendwann Feldlinien entgegengesetzter Polarität zu nahe kommen. Dann findet Rekonnexion statt – die Feldstärke bricht zusammen, und die dabei freigesetzte magnetische Feldenergie wird auf das Umgebungsplasma übertragen.

Magnetische Feldenergie wird so in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt. Das Plasma »reitet« auf magneto-hydrodynamischen Wellen, die ebenfalls Folge der Dynamik der Raumzeit und der Magnetosphäre sind. Das mündet schließlich in einem Plasmastrom, der vorzugsweise entlang der Symmetrieachse ausfließt. Lorentz-Kräfte sorgen für eine zusätzliche Bündelung des Materieausflusses. Das ist gerade das Szenario magnetisch getriebener, relativistischer AGN-Jets.

Das Jetplasma besteht in konservativen Modellen aus Leptonen. Das leptonische Paarplasma aus Elektronen und deren Antiteilchen, den Positronen, entsteht vermutlich auch sehr nahe am Schwarzen Loch. Der folgende Vorgang beschreibt einen möglichen Bildungsprozess des Paarplasmas: Ein charakteristischer Abstand zum Loch heißt Photonensphäre. In dieser Kugelschale können Lichtteilchen in der Umgebung des Loches verharren ohne hineinzufallen. Die Orbits sind al-

lerdings instabil. Es ist nun denkbar, dass in der Photonensphäre hochenergetische Gammastrahlung gefangen ist. Trifft nun ebenfalls Gammastrahlung von außen auf das Strahlungsreservoir in der Photonensphäre, so kann bei einer Überschreitung der Ruheenergie von gut einem Megaelektronenvolt Paarbildung stattfinden: Die Gammaquanten wandeln sich in Materie um, nämlich in ein Paar aus einem Elektron und einem Positron. Das Paar materialisiert, wenn ein einfallendes Gammaquant ein in der Photonensphäre gefangenes Gammaquant trifft. Dabei werden die Gammaquanten vernichtet. Unter günstigen Verhältnissen entweicht das so gebildete Paarplasma nach außen und kann die Jets speisen (Abb. 8).

Die Ergosphäre ist Schauplatz vieler seltsamer Mechanismen: So gibt es den klassischen Penrose-Prozess, wo die Rotationsenergie des Schwarzen Loches als Energiereservoir für Teilchen genutzt werden kann. Dies stellen sich Astrophysiker folgendermaßen vor: Ein äußerer Beobachter im Unendlichen betrachte ein Teilchen, das in gegenläufigem Sinn zum Schwarzen Loch um dieses rotiert. Dieser Beobachter wird gemäß der Relativitätstheorie einen Zustand negativer Energie des Teilchens messen, weil er sich außerhalb der Ergosphäre befindet, das Teilchen aber innerhalb. Nun ist es denkbar, dass dem rotierenden Schwarzen Loch über Streuprozesse Energie entzogen werden könnte. Die Rotation des Loches würde abnehmen.

Bereits im Jahr 1977 schlugen die Astrophysiker Roger D. Blandford und Roman L. Znajek einen Prozess vor, der auf elektromagnetischem Wege dem sich drehenden Schwarzen Loch Rotationsenergie entziehen könnte. Dieser Blandford-Znajek-Mechanismus beruht dar-

auf, dass die Magnetfeldstärke deutlich erhöht wird, weil die rotierende Raumzeit die Felder »aufzieht«. Bei einer kritischen Feldstärke wird ein Paarplasma aus Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen, erzeugt. Weil die Rotation der Raumzeit in der Ergoregion besonders effizient ist, findet der Blandford-Znajek-Prozess dort statt, also unmittelbar vor dem Ereignishorizont. Die Teilchen des so erzeugten leptonischen Paarplasmas können einen »Kick« erhalten und die Ergoregion verlassen. Ein Außenbeobachter würde den Teilchen in der Ergoregion gegebenenfalls eine negative Energie beimessen. Verlässt nun ein solches Teilchen die Ergoregion, so kommt es dem Beobachter so vor, als hätte das Teilchen dem Schwarzen Loch Rotationsenergie entzogen. Auf diese Weise verlangsamt sich die Rotation des Schwarzen Lochs im Blandford-Znajek-Mechanismus.

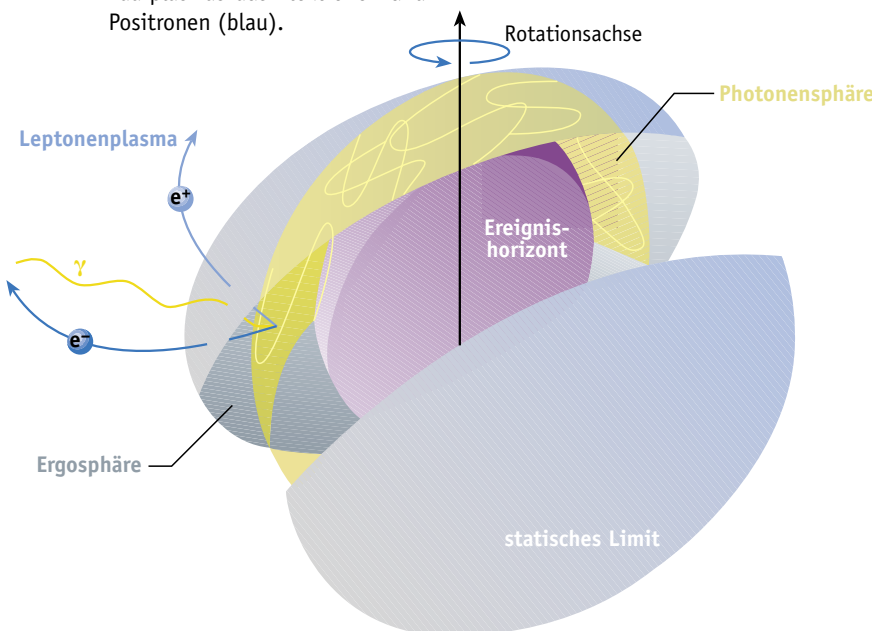
Ohne rotierende Raumzeit gerät die Astrophysik demnach in Erklärungsnot. Denn eine ganze Reihe von Prozessen würde nicht funktionieren. Gegenwärtig muss man diese Ansätze als vielversprechende Modelle werten. Doch ein endgültiger Beweis in Form einer robusten Computersimulation, die klar die Erzeugung relativistischer Jets untermauert, steht noch aus. Theoretiker stoßen auf eine Reihe von Herausforderungen: Nicht nur die Physik, auch die Numerik und die Programmierung sind in den Griff zu bekommen.

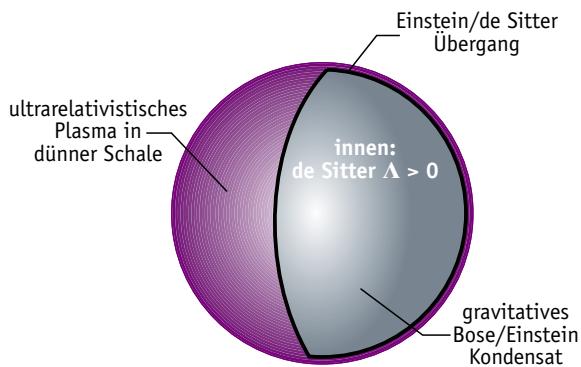
Vakuum-Krise Schwarzer Löcher

Neben der Akkretionstheorie gibt es heute eine noch grundsätzlichere Diskussion bezüglich der Schwarzen Löcher. Sie geht so weit, dass die Existenz klassischer Schwarzer Löcher in Frage gestellt wird! Schwarze Löcher sind globale Vakuumlösungen der Relativitätstheorie. Als solche weisen sie ein »relativistisches Vakuum« auf, das durch ein Verschwinden des Energie-Impuls-Tensors, der rechten Seite der Einsteinschen Feldgleichungen, gekennzeichnet ist. Im Zuge der Quantentheorie und der Stringtheorien haben sich neue Erkenntnisse über die Struktur des Vakuums ergeben: Es ist nicht leer, sondern auf subatomarer Ebene mit vielen Teilchen und Strings angefüllt. Dieser modernen Sichtweise werden klassische Schwarze Löcher nicht gerecht. Vermutlich haben sie gerade deshalb eine echte Krümmungssingularität in ihrem Innern verborgen, um diese Unzulänglichkeiten aufzufangen. Aus diesem Grund suchen Theoretiker schon lange nach Alternativen, die ohne Singularitäten auskommen.

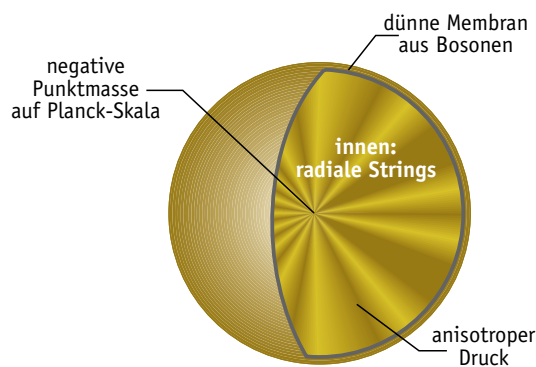
Mit dem neuen Jahrtausend wurden Alternativen zum nicht rotierenden

▼ Abb. 8: Illustration von Ereignishorizont (violett), Ergoregion (blau), Photonensphäre (gelb) und Erzeugung des leptonischen Paarplasmas aus Elektronen und Positronen (blau).





außen:
Schwarzschild
nicht rotierend



Schwarzen Loch gefunden: Sie heißen Gravasterne und Holosterne (Abb. 9). Beide Gebilde sind statische Alternativen zur Schwarzschild-Lösung. Im Unterschied zum Schwarzen Loch haben sie so etwas wie eine Oberfläche. Sie besteht aus einer hauchdünnen Materiehaut, die von einem inneren Druck stabilisiert wird. Beim Gravastern sorgt eine Form Dunkler Energie – eine de Sitter-Blase – für die Stabilität der Oberfläche. Die Dunkle Energie ist aus der Kosmologie bekannt. Dort sorgt sie für die Expansion des Universums, weil sie durch ihren negativen Druck »antigravitativ« wirkt. Beim Holostern hingegen sind es radiale Strings, die im Innern einen richtungsabhängigen, negativen Druck erzeugen. Gravastern und Holostern werden einer modernen Auffassung des physikalischen Vakuums mehr gerecht als Schwarze Löcher. Es handelt sich um neue Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die im neuen Millennium gefunden wurden. Die Schwierigkeit besteht darin, dass sie per astronomischer Beobachtung bisher nicht von Schwarzen Löchern zu unterscheiden sind!

Das Erstaunliche an diesen Lösungen sind nun zwei Eigenschaften: Sie haben weder eine Singularität, noch einen Ereignishorizont. Damit sind sie auch nicht absolut schwarz. Dennoch sind sie sehr kompakt und aufgrund der Gravitationsrotverschiebung extrem dunkel. Außerhalb der Oberfläche der Gravasterne und Holosterne liegen identische Bedingungen wie in der äußeren Schwarzschild-Lösung vor. Man kann also sagen, dass diese Vorschläge genau den modernen Vorstellungen des physikalischen Vakuums und der Vermeidung einer intrinsischen Singularität gerecht werden.

Die Physiker sind sich allerdings noch nicht einig, ob es in der Natur Singularitäten tatsächlich gibt. Stein des Anstoßes ist ein mathematisches Theorem, das die renommierten Forscher Stephen W. Hawking und Roger Penrose 1970 fanden. Gemäß dieses Singularitätentheorems ist die (mathematische!) Existenz von Singularitäten unvermeidlich. Es erscheint loh-

nend, dieses mehr als drei Jahrzehnte alte Theorem unter Gesichtspunkten der modernen Physik zu überarbeiten.

Die modernen Alternativen stürzen die Theorie Schwarzer Löcher in eine Krise. Denn es ist zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich, per Beobachtung (nicht rotierend!) Schwarze Löcher von Gravasternen und Holosternen zu unterscheiden. Aber auch von theoretischer Seite gibt es viele Fragen zu klären, die durch diese neuen Lösungen aufgeworfen werden: Wie bilden sie sich aus kollabierenden Sternen und anderen kosmischen Objekten? Wie erfolgt der Übergang ins Quantenvakuum? Wie akkretieren diese neuen Objekte Umgebungsmaterial? Sind sie dauerhaft stabil?

Es gibt Anlass zu Optimismus: Die Theoretiker verfügen nun über gleich drei Alternativen, die als Modelle für ein kompaktes, dunkles Objekt in Frage kommen. Nun müssen Tests für diese Hypothesen entwickelt werden, um möglicherweise eine davon langfristig bestätigen oder widerlegen zu können. Die astronomischen Beobachter sind gefordert, hochwertiges Datenmaterial in der direkten Umgebung von Kandidatenobjekten zu sammeln.

Die Modelle Gravastern und Holostern sind bislang statisch. Damit vermögen sie noch nicht, rotierende Schwarze Löcher zu ersetzen. Es ist anzunehmen, dass es rotierende Verallgemeinerungen der neuen Vakuum-Modelle gibt, doch sind diese bislang nicht gefunden worden. Dieser Sachverhalt motiviert weiterhin zur Erforschung der Kerr-Raumzeit mit klassischem, relativistischem Vakuum. Sie besitzt alle wesentlichen Eigenschaften, die in der Wechselwirkung mit einem Akkretionsfluss und magnetischen Feldern von Bedeutung sind. Das Innere hinter dem rotierenden Horizont nimmt eine weniger gewichtige Rolle ein, weil es aufgrund seiner Dunkelheit astronomisch kaum in Erscheinung tritt.

Zusammenfassung

Schwarze Löcher sind faszinierende und wichtige Objekte der Astrophysik. Viele Phänomene, die am Nachthimmel zu beobachten sind, lassen sich auf elegante

▲ Abb. 9: Gegenüberstellung von Gravastern (links) und Holostern (rechts), den Alternativmodellen zu den »klassischen« Schwarzen Löchern.

Weise durch die Existenz Schwarzer Löcher erklären. Es muss am Himmel Objekte geben, die so kompakt sind, dass sie selbst das Licht einfangen und daher extrem dunkel sind. Wie diese Objekte korrekt zu beschreiben sind, ist ein offenes Problem.

Mit den Mitteln der Relativitätstheorie fand man statische und rotierende Schwarze Löcher. Die Struktur des Vakuums ist bei ihnen allerdings trivial. Vermutlich führt gerade dieser Ansatz auf die Krümmungssingularitäten, die den Relativisten und Astrophysikern Kopferbrechen bereiten. Moderne Konzepte des physikalischen Vakuums führen auf reguläre (nichtsinguläre) Alternativen zu den Schwarzen Löchern.

Das Verständnis der Physik von Gravasternen und Holosternen steht allerdings erst am Anfang der Forschung. Besonders gravierend ist, dass sie bisher noch keine echte Alternative zum rotierenden Schwarzen Loch bieten, weil sie statisch sind. Die Rotation stellt sich jedoch für viele bei Schwarzen Löchern wirkende Mechanismen als wesentlich heraus: Ergosphärenphysik, Magnetosphärenphysik, Akkretionsphysik, Erzeugung relativistischer Jets – bisher gibt es keinerlei Ansätze, wie dies ohne die rotierende Raumzeit kompakter Objekte bewerkstelligt werden könnte. Rotierende Schwarze Löcher bleiben deshalb eine wichtige Zutat im Verständnis der modernen Astrophysik. □



Dipl.-Phys. **Andreas Müller** arbeitet an der Landessternwarte Heidelberg an seiner Dissertation über Akkretion auf rotierende Schwarze Löcher.