

Ein infernalischer Mahlstrom: In der Illustration umfließt Materie in einer Scheibe ein supermassereiches schwarzes Loch von Millionen bis Milliarden Sonnenmassen und heizt sich dabei auf. In der Umgebung des schwarzen Lochs verdrillen sich Magnetfelder zu einem gebündelten Jet, der Materie nach außen beschleunigt und dabei hell aufleuchtet.

BILD: NASA/JPL-CALTECH

TANZ DER SCHWARZEN LÖCHER

*TEXT:
HELMUT HORNING*

Die aktiven Kerne von Galaxien gehören zu den stärksten Kraftwerken im Kosmos. Ihre Energie beziehen sie aus schwarzen Löchern in ihrem Zentrum, die gelegentlich im Doppelpack vorkommen. In einer groß angelegten Kampagne hat eine Gruppe um Stefanie Komossa vom Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie mit mehreren Teleskopen ins Herz einer solchen Energieschleuder geblickt.

Die Eidechse ist ein unscheinbares Sternbild am Nordhimmel, das wohl nur wenige Menschen jemals zu sehen bekommen. In dieser Konstellation spürte Cuno Hoffmeister im Jahr 1929 auf einer Fotoplatte ein schwach glimmendes Lichtpünktchen auf, das ohne erkennbaren Rhythmus flackerte. Der Astronom am Observatorium Sonneberg in Thüringen war genau auf solche Veränderliche spezialisiert – also Sterne, deren Helligkeit mehr oder weniger periodisch schwankt. So wanderte das Objekt unter dem Namen BL Lacertae (lateinisch für Eidechse) in Hoffmeisters Katalog und blieb über Jahrzehnte unbeachtet.

Mysteriöse Fackeln am Firmament

Die weitere Geschichte von BL Lac – so die Kurzform – ist eng mit dem Aufschwung einer neuen Technik verbunden: der Radioastronomie. Nachdem die Forschenden bisher nur im optischen Spektralbereich beobachtet hatten, musterten sie ab den 1940er-Jahren das Weltall mit großen Antennen. Dabei fanden sie im Laufe der Zeit jede Menge kosmische Radioquellen. Einige davon hatten dieselbe Position am Himmel wie bisher unerforschte Lichtpunkte, die in Sternkatalogen verzeichnet waren. So auch das Objekt 3C 273. Auf Fotos, die mit herkömmlichen Teleskopen im sichtbaren Licht gewonnen wurden, erschien es als sternartiger Punkt mit einem länglichen Anhängsel. Was verbarg sich dahinter? Das Erstaunen wuchs, als man das Licht dieses „Radiosterns“ zu einem kleinen Regenbogen zerlegte. In solchen astronomischen Spektren finden sich normalerweise charakteristische Linien, die auf chemische Elemente hindeuten. Auch im Spektrum von 3C 273 waren diese Fingerabdrücke vorhanden, sie ließen sich aber keinem der bekannten Stoffe zuordnen.

Das Rätsel löste der niederländische Astronom Maarten Schmidt im Jahr 1963: Die Linien gehören sehr wohl zu einem chemischen Element, dem Wasserstoff. Allerdings stehen sie nicht an der gewohnten Position, sondern sind in den roten Bereich des Spektrums verschoben, also hin zu längeren Wellenlängen. Das Objekt muss sich folglich von der Erde wegbewegen. Bei 3C 273 ergibt sich eine beachtliche Fluchtgeschwindigkeit von 45 000 Kilometern pro Sekunde – viel zu schnell für einen Stern, der innerhalb unserer Galaxie unterwegs ist. Der beobachtete Effekt lässt sich durch die kosmologische Rotverschiebung erklären. Weil das gesamte Weltall expandiert, bewegen sich die Galaxien wie Rosinen in einem aufgehenden Hefeteig. Das heißt: Es ist der Raum selbst, der sich ausdehnt. Dadurch werden die Wellen einer fernen Quelle „gelängt“ und deren Licht in den roten Bereich verschoben. So errechnete Maarten Schmidt für den mysteriösen Lichtpunkt 3C 273 eine Distanz von nicht weniger als zweieinhalb Milliarden Lichtjahren. Das Objekt kann

folglich kein normaler Stern sein, denn um über eine solch große Entfernung derart hell zu strahlen, muss seine Leuchtkraft jener einer ganzen Galaxie mit ihren Milliarden von Sonnen entsprechen. In weiser Voraussicht hatte man 3C 273 und ähnliche Radiosterne schon vor Schmidts Entdeckung „quasi-stellare Objekte“ genannt und daraus das Kunstwort Quasare abgeleitet.

Im Zuge weiterer Beobachtungen ließen sich immer mehr Radiosterne als solche Quasare identifizieren. So stellte sich im Jahr 1968 heraus, dass der von Cuno Hoffmeister aufgespürte Lichtpunkt BL Lacertae mit der Radioquelle VRO 42.22.01 identisch ist. Auf Fotografien gelang es schließlich, ein schwaches Nebelfleckchen abzubilden, das den „Stern“ umgibt. Davon wurden Spektren aufgenommen, die wiederum Rückschlüsse auf die Natur des Nebels zuließen. Dieser muss ein riesiges Milchstraßensystem sein, in dessen Zentrum BL Lacertae sitzt. Ein solcher aktiver Galaxienkern stößt auf relativ kleinem Raum eine ungeheure Energie aus. Aber BL Lac leuchtet noch heller als die meisten Quasare und zeigt zudem deutlichere Helligkeitsschwankungen. Aus einem Neologismus der Wörter BL Lacertae und Quasare werden solche Galaxienkerne Blazare genannt.

Woher aber stammt der Antrieb für diese kosmischen Kraftwerke? Die Astronominnen und Astronomen sind überzeugt davon, dass in den Zentren der meisten Galaxien gewichtige schwarze Löcher sitzen. „Diese Schwerkraftfallen sind in den Herzen von Quasaren

Kein Stern, sondern eine Galaxie: Das Hubble-Weltraumteleskop bildete den Quasar 3C 273 ab und mit ihm einen Jet, der als schwache Linie links oberhalb des zentralen Lichtflecks zu erkennen ist.

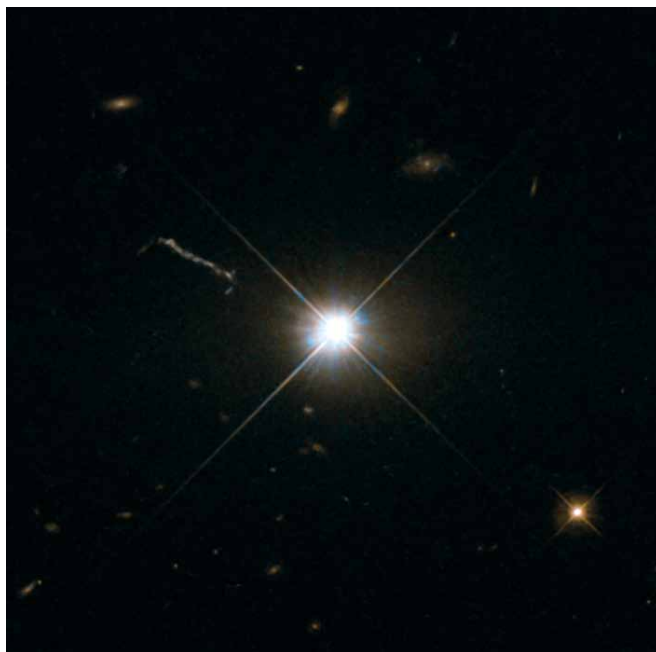


BILD: ESA/HUBBLE

und Blazaren besonders aktiv“, sagt Stefanie Komossa vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn. Durch ihre starke Gravitation sammelt sich jede Menge Materie in ihrer Umgebung. Dieses gasförmige Material strudelt auf Spiralbahnen um das schwarze Loch herum, und seine Teilchen stoßen aneinander. Das Gas erhitzt sich und wandert allmählich in Richtung des schwarzen Lochs. Und je näher es diesem kommt, desto turbulenter wird es. Ein solcher infernalischer Mahlstrom wird als Akkretionsscheibe bezeichnet.

Im Innenbereich der flachen Scheibe wird das Material durch die Reibung so heiß, dass es energiereiche Ultraviolett- und Röntgenstrahlung freisetzt. Das Gas rast in einem wilden Tanz mit hohem Tempo um den kosmischen Schlund und verschwindet schließlich darin. Ein Teil des Gases jedoch dehnt sich aus, wird gebündelt und strömt parallel zur Rotationsachse der Scheibe ins All. Das geschieht in zwei einander entgegengesetzten Jets, die bei manchen Galaxien eine Länge von vielen Tausend Lichtjahren erreichen. Damit messen sie das Millionenfache des schwarzen Lochs samt seiner Akkretionsscheibe.

Der Jet erweist sich unter anderem auch als die Quelle der Radiostrahlung, die solche Quasare aussenden. Denn die zentrale Maschine beschleunigt Partikel entlang verquirlter Magnetfelder, die an einen DNA-Strang erinnern, auf nahezu Lichtgeschwindigkeit. Dabei entsteht unter anderem Synchrotronstrahlung. Weitere Prozesse lassen die Jets im gesamten elektromagnetischen Spektrum aufleuchten und setzen unvorstellbare Energie-

mengen in der Größenordnung von Billionen Elektronenvolt frei – ähnlich wie in irdischen Teilchenbeschleunigern. Jets sind der Schlüssel zur Unterscheidung zwischen Quasaren und Blazaren: Letztere bilden eine Untergruppe der Quasare, bei denen einer dieser starken Scheinwerfer direkt auf die Erde zielt. Blicken wir direkt in den Maschinenraum eines Quasars, sehen wir einen Blazar. Ein solches Objekt ist also im wörtlichen Sinne Ansichtssache, je nachdem, unter welchem Winkel wir es betrachten.

Die turbulenten Jahre des Universums

Diese kosmischen Energieschleudern sind Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt, ihr Licht ist also Milliarden Jahre unterwegs, bevor es in irdische Teleskope fällt. Wir blicken damit in eine turbulente Anfangszeit des Universums zurück, in der die Energiemonster ihre Blüte erlebten. „Damals ist es besonders häufig zu Kollisionen zwischen den Galaxien gekommen“, erklärt Komossa. Der wilde Reigen zweier Galaxien spült dabei große Gasmengen in Richtung des Zentrums und sorgt für Nachschub im Herzen des dabei entstehenden Milchstraßensystems. Ein Quasar oder ein Blazar ist geboren. Damit nicht genug. Die meisten Galaxien besitzen zentrale schwarze Löcher, die beim Crash zweier Milchstraßen zu einem Paar werden können. Der auf diese Weise entstandene galaktische Kern ist ausgesprochen hell und dadurch weithin sichtbar.

39



Blick in einen aktiven Galaxienkern: Die Aufnahme des weltraumgestützten Teleskops Swift zeigt den Blazar OJ 287 im ultravioletten Licht (links). Weitere Beobachtungen legen nahe, dass es sich um ein System zweier schwarzer Löcher handelt, wie in der Illustration (rechts) gezeigt. Zudem entsteht in der Umgebung des zentralen schwarzen Lochs ein Jet.

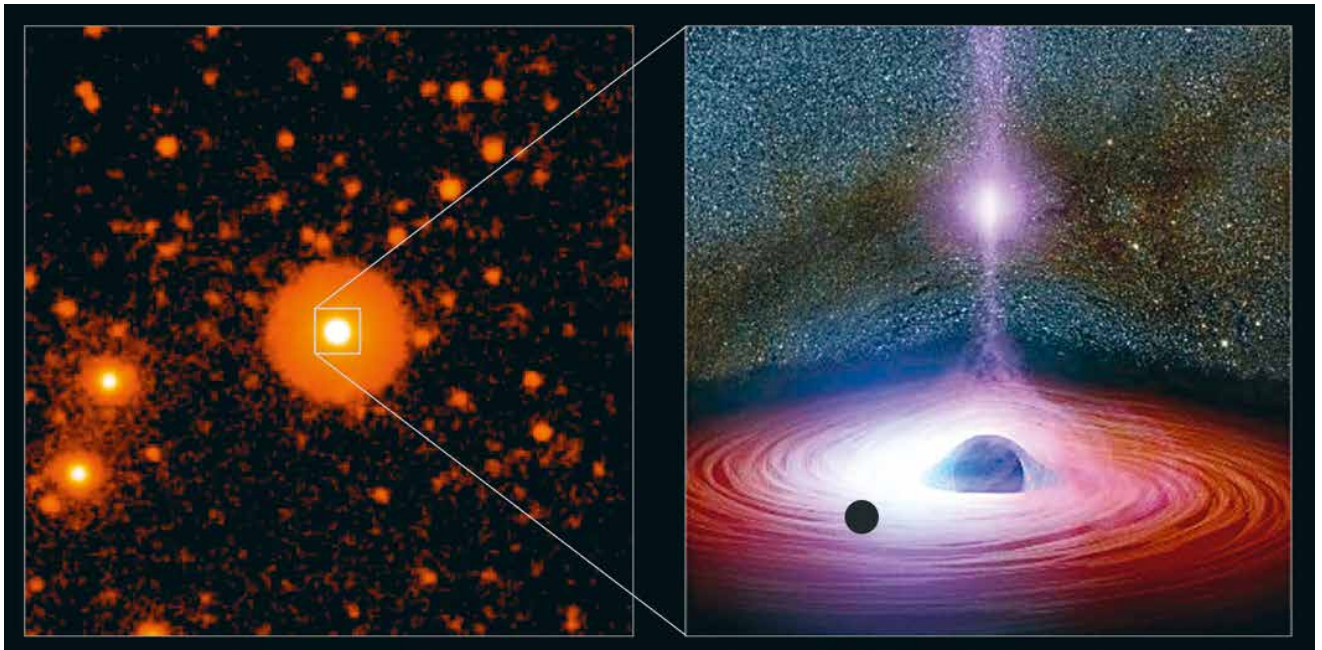
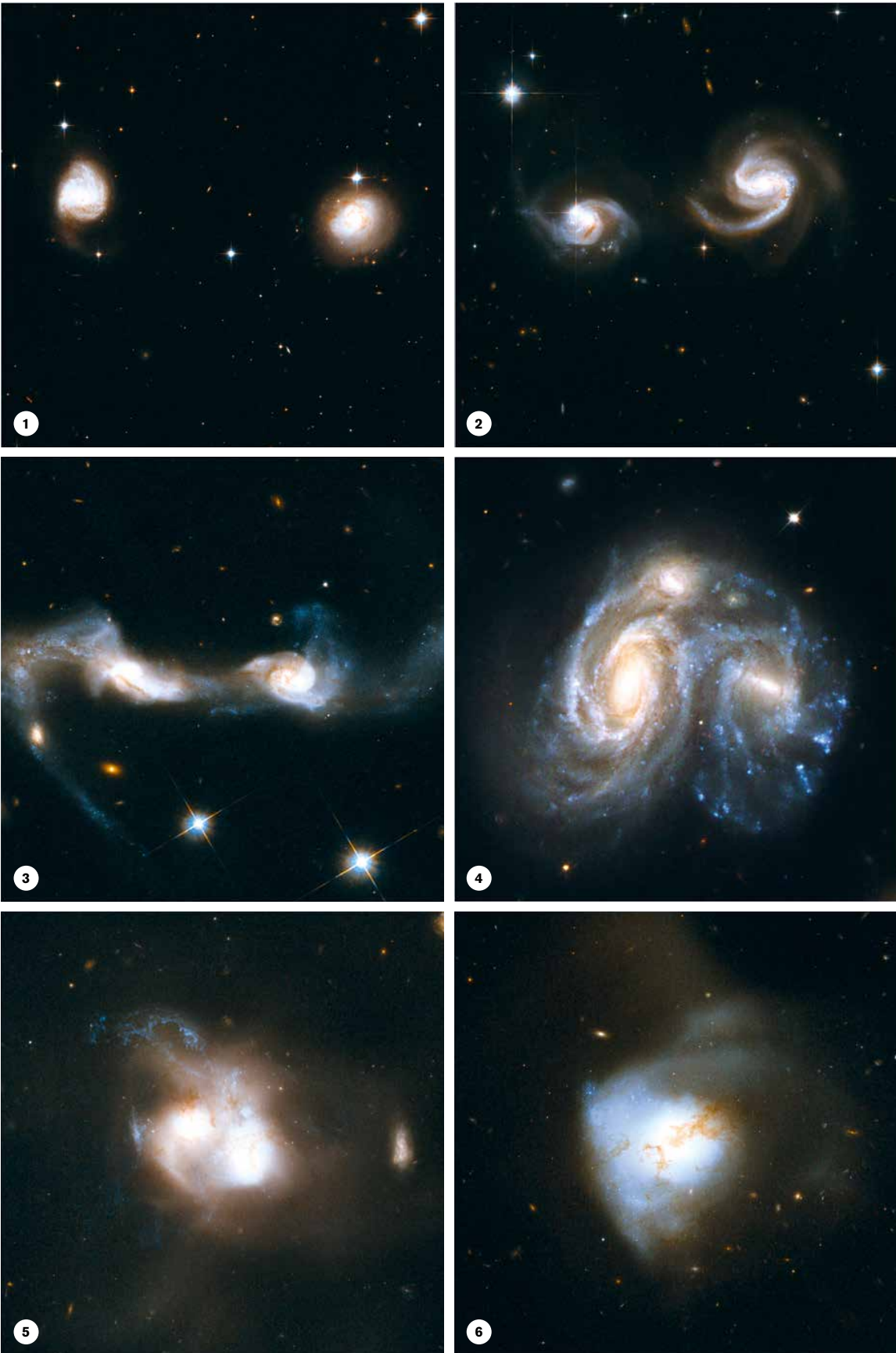


BILD: S. KOMOSSA ET AL. (LINKS); NASA/JPL-CALTECH (RECHTS)

BILD: S. KOMOSSA ET AL.



BILDER: NASA, ESA, THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/AURA)-ESA/HUBBLE COLLABORATION AND A. EVANS (UNIVERSITY OF VIRGINIA), CHARLOTTEVILLE/NRAO/STONY BROOK UNIVERSITY), K. NOLL (STSCI), AND J. WESTPHAL (CALTECH)

Kosmische Choreografie: Die Hubble-Aufnahmen zeigen sechs verschiedene Galaxienpaare im sichtbaren Licht. Jede der Aufnahmen steht exemplarisch für ein Stadium zweier miteinander verschmelzender Galaxien, von der ersten Annäherung (Bild 1) bis zur Vereinigung (Bild 6).

Doch wie realistisch ist das geschilderte Szenario? Um dieser Frage in der Praxis auf den Grund zu gehen, beobachten die Forschenden seit ein paar Jahren den rund fünf Milliarden Lichtjahre entfernten Blazar OJ 287 im Sternbild Krebs. Dieses Objekt gilt als heißer Kandidat für die Existenz eines Doppelsystems schwarzer Löcher. So hat ein internationales Team OJ 287 mit der sogenannten Very Long Baseline Interferometry (VLBI) unter die Lupe genommen. Mit dieser Technik wurden die

Signale von zwölf Radioantennen – davon eine an Bord des russischen Satelliten Spektr-R – miteinander kombiniert. Das dadurch entstandene virtuelle Teleskop spannt sich 193 000 Kilometer weit auf und liefert damit ein Auflösungsvermögen von zwölf Mikrobogensekunden; damit könnte man eine 20-Cent-Münze auf dem Mond erkennen.

Ziel der Kampagne war es, die Jets bis zu ihrem Ursprung im Maschinenraum des Blazers zurückzuverfolgen. Die interferometrischen Aufnahmen zeigen einen Strahl mit mehreren hellen Knoten und einer Krümmung, die in Richtung des Ursprungs immer weiter zunimmt. Das stützt die Annahme, dass die Jets durch die beiden zentralen schwarzen Löcher beeinflusst werden. Zudem hat das Team die Schwingungsrichtung der Radiowellen untersucht. Daraus lässt sich auf ein schraubenförmiges Magnetfeld schließen, das die Jets durchzieht – ganz im Einklang mit astrophysikalischen Modellen von der Bündelung der Jets.

Die beobachteten Eigenschaften von OJ 287 deuten tatsächlich auf zwei umeinander kreisende supermassereiche schwarze Löcher hin. Dabei könnte das leichtere auf einer sehr engen elliptischen Umlaufbahn die Akkretions-

scheibe des schwereren etwa alle zwölf Jahre im Abstand von einem Jahr zweimal durchschlagen und so die Materie in der Scheibe gleichsam aufwühlen. Dabei tritt jeweils ein Flare auf. Diese starken Strahlungsausbrüche machen OJ 287 zeitweise zum hellsten Blazar am Himmel.

Wie aber sieht das Binärsystem genau aus? Bis vor Kurzem herrschte die Meinung vor, dass das schwerere (primäre) der beiden schwarzen Löcher eine Masse von ungefähr zehn Milliarden Sonnen besitzt. In der Literatur finden sich sogar Werte von 18 Milliarden Sonnenmassen. Doch dann kam Momo ins Spiel. Momo steht für Multiwavelength Observations and Modelling of OJ 287. Im Rahmen dieses internationalen Projekts wird der Blazar laufend und über viele Jahre hinweg mit mehreren leis-

tungsstarken boden- und weltraumgestützten Teleskopen überwacht. Dabei betrachten die Forschenden das Beobachtungsfenster vom Radio- bis zum Röntgenbereich und gewinnen auf diese Weise Einblicke ins Herz des Blazers. So können sie etwa die Frage klären, welches theoretische Szenario die Verhältnisse darin am besten beschreibt. Die Modelle unterscheiden sich beispielsweise durch die Masse der beteiligten schwarzen Löcher.

Im Rahmen von Momo spielen die 100-Meter-Antenne des Observatoriums Effelsberg sowie die Satellitenmission Swift eine zentrale Rolle. „Wir haben die Masse des primären schwarzen Lochs bestimmt und den Anteil der Materie in der umgebenden Akkretionsscheibe abgeschätzt“, sagt Komossa. Aber: „Das vermeintliche System aus zwei schwarzen Löchern lässt sich räumlich auch mit Momo nicht auflösen.“ So mussten die Astronomen und Astronomen nach indirekten Hinweisen suchen. Und das taten sie mit Erfolg, nahmen sie doch den Helligkeitsverlauf der Lichtkurve mit bisher unerreichter Genauigkeit unter die Lupe. „Dadurch konnten wir zwischen verschiedenen Modellen von Binärsystemen unterscheiden – das führende, wonach das primäre schwarze Loch eine grosse Masse besitzt, haben wir widerlegt“, so Komossa.

Die elektromagnetische Strahlung, die uns von OJ 287 erreicht, wird normalerweise vom Jet dominiert. Dieser stellt das Licht der Akkretionsscheibe förmlich in den Schatten. Das ist ähnlich wie bei einer Taschenlampe: Blicken wir direkt in deren hellen Strahl, blendet uns das Licht, und wir können die unmittelbare Umgebung der Lampe nicht sehen. Weil die Momo-Teleskope die Lichtkurve nahezu kontinuierlich verfolgten, entdeckten sie jedoch „deep fades“ – Zeiten, zu denen das Licht des Jets dunkler wird. In unserem Beispiel entspricht das einem kurzen Flackern der Taschenlampe. Dadurch ließ sich der Anteil der Strahlung aus der Umgebung, also der Akkretionsscheibe, eingrenzen. Das Ergebnis dieser Messungen überraschte: Die Materie um das primäre schwarze Loch leuchtet mindestens um den Faktor zehn schwächer als bisher angenommen, entspricht aber immer noch dem Fünfbillionenfachen der Leuchtkraft unserer Sonne.

Massemonster – leichter als gedacht

Aus der geringeren Helligkeit folgerten die Forschenden schließlich, dass auch die Masse des zugehörigen schwarzen Lochs deutlich geringer ist. „Am ausführlichsten untersucht war bisher jenes Binärmodell, das eine Masse von zehn Milliarden Sonnenmassen benötigt“, sagt Stefanie Komossa. „Dieses Modell können wir mit unseren neuen Beobachtungen ganz sicher ausschließen.“ Denn Momo ergibt eine Masse in der Größenordnung von hundert Millionen Sonnenmassen, also ein Hundertstel des bisher angenommenen Wertes.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Blazare gehören zu den aktiven galaktischen Kernen und sind wahre Energieschleudern. Sie beherbergen in ihren Zentren aktive schwarze Löcher.

Im Herzen des Blazers OJ 287 wurde lange Zeit ein schwarzes Loch mit mindestens zehn Milliarden Sonnenmassen vermutet.

Neue Beobachtungen mit einem Projekt namens Momo zeigen, dass sich in OJ 287 vermutlich ein Paar schwarzer Löcher verbirgt, deren schwereres in der Größenordnung von hundert Millionen Sonnenmassen liegt, also ein Hundertstel der bislang angenommenen Masse hat.

Beobachtungen mit dem Event Horizon Telescope und dem Square Kilometre Array sollen weiteren Aufschluss über das Innenleben von OJ 287 geben.



Untermauert wird dieses Resultat durch eine weitere Messung der Lichtkurve. Nach dem alten Modell hätte im Oktober 2022 bei OJ 287 ein heller Ausbruch beobachtet werden sollen. In diesem Zeitraum wurde aber kein solcher registriert. Vielmehr fanden die Forschenden mit Momo heraus, dass sich die letzten beiden Flares in den Jahren 2016/2017 ereignet hatten. Und: Radiobeobachtungen mit dem 100-Meter-Teleskop in Effelsberg zeigen, dass diese Ausbrüche nicht auf erhitzte Materie zurückgehen. Das bedeutet, dass andere Prozesse in den Jets – etwa Synchrotronstrahlung – als Energiequelle im Spiel sind. Thomas Krichbaum, Komossas Kollege am Bonner Max-Planck-Institut, fasst zusammen: „Alle unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass für das primäre schwarze Loch zehn Milliarden Sonnenmassen nicht erforderlich sind. Ebenso wenig braucht es eine besonders leuchtkräftige Materie-scheibe.“

Neue Erkenntnisse durch Gravitationswellen

Wie aber sieht es nun im Zentrum des Blazars genau aus?

Die Teammitglieder von Momo möchten sich nicht auf ein definitives Modell festlegen, dies sei noch „work in progress“, wie Komossa es formuliert. Auf jeden Fall ist sich die Wissenschaftlerin sicher, dass nur Modelle mit deutlich geringerer Masse des primären schwarzen Lochs infrage kommen. Außerdem wiegt die kleinere Schwerkraftfälle wohl nur ein Hundertstel des primären schwarzen Lochs im Zentrum. Demnach hätte das sekundäre schwarze Loch lediglich eine Million Sonnenmassen. Zudem handelt es sich bei OJ 287 wohl um ein sehr enges Paar schwarzer Löcher, die sich immer näher gekommen sind, seitdem die ursprünglichen Galaxien miteinander kollidiert waren. Die Entfernung der schwarzen Löcher voneinander könnte mittlerweile deutlich unter drei Lichtjahren liegen. Dafür spricht unter anderem das vergleichsweise schnelle Flackern des Blazars.

Die enge Nachbarschaft der beiden Massemonster ist es auch, woraus die Gruppe um Stefanie Komossa ihre Schlüsse für Beobachtungen zieht, die nichts mit dem elektromagnetischen Spektrum zu tun haben und ein recht neuer Zweig der Astrophysik sind: die Messung von Gravitationswellen. Diese entstehen zum Beispiel dann, wenn schwarze Löcher umeinander tanzen und schließlich verschmelzen. Dazu gibt es derzeit zwei Messmethoden: Hightech-Detektoren auf der Erde – oder Pulsare im Universum. Letztere sind rasch rotierende Neutronensterne, die Strahlungskegel in den Weltraum schicken. Wenn diese die Erde überstreichen, scheint der Stern aufzublitzen wie ein Leuchtturm. Die Pulse kommen mit erstaunlicher Genauigkeit auf der Erde an. Wenn jedoch Gravitationswellen die Raumzeit kräuseln, geraten diese hochpräzisen Uhren aus dem Takt. Die Signale verändern sich. Mit

einem solchen „pulsar timing array“ lassen sich die kosmischen Beben einander umtanzender schwarzer Löcher nachweisen. „Jetzt haben wir herausgefunden, dass diese Methode bei OJ 287 nicht funktionieren wird, weil die Masse des primären schwarzen Lochs dafür zu gering ist“, erklärt Stefanie Komossa. „Und das schiebt den Blazar in den Empfindlichkeitsbereich von Detektoren wie Lisa.“ Dieses Laserinterferometer – bestehend aus drei Satelliten, die ein Dreieck mit zweieinhalb Millionen Kilometer Kantenlänge aufspannen – soll in etwa 15 Jahren vom Weltraum aus nach Gravitationswellen fahnden und eine höhere Empfindlichkeit als erdgebundene Detektoren besitzen. Allerdings könnte Lisa nur das finale Verschmelzen der schwarzen Löcher registrieren. Und das passiert im Fall von OJ 287 wohl erst in einigen Hunderttausend Jahren.

Doch schon in absehbarer Zeit könnten die Astronominen und Astronomen neue Erkenntnisse gewinnen. Sie haben ein mächtiges Instrument auf das kosmische Kraftwerk gerichtet: das Event Horizon Telescope, das bisher die spektakulären Bilder der schwarzen Löcher in der fernen Galaxie M 87 und im Zentrum unserer Milchstraße gewonnen hat. Zudem steht der Blazar OJ 287 auf der Liste des Square Kilometre Array – eines Netzwerks aus Hunderten von Radioteleskopen und Hunderttausenden von Antennen, das sich eines Tages über Südafrika und Australien erstrecken soll. „Diese Beobachtungen werden ein großer Schritt sein hin zu einem Verständnis binärer schwarzer Löcher und ihrer Entwicklung“, sagt Komossa. Der Radiostern im Krebs, der 1968 als Blazar erkannt wurde, hat für die Forschung jedenfalls auch nach 55 Jahren nichts an Attraktivität verloren.

www.mpg.de/podcasts/universum

GLOSSAR

GRAVITATIONSWELLEN

entstehen im Weltall immer dann, wenn sich große Massen beschleunigt bewegen – wenn etwa zwei schwarze Löcher umeinander tanzen und schließlich verschmelzen. Gravitationswellen ergeben sich aus der Relativitätstheorie, sie wurden vor mehr als einem Jahrhundert vorausgesagt und im September 2015 erstmals gemessen.

KOSMOLOGISCHE ROTVERSCHIEBUNG

heißt das Phänomen, wonach das Licht einer weit entfernten Quelle aufgrund der Expansion des Universums und damit des gesamten Raums gleichsam gedehnt und in den langwelligen (roten) Bereich des Spektrums verschoben wird.

SYNCHROTRONSTRAHLUNG

wird von geladenen Teilchen wie Elektronen ausgesendet, die in einem Magnetfeld beschleunigt werden. Bei astronomischen Objekten erreichen die Partikel dabei Geschwindigkeiten nahe jener des Lichts.
