

## Monatsthema Februar 2019

### Woher stammen gigantische Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher faszinieren das breite Publikum. Eine der am häufigsten gestellten Fragen von Laien an einen Astronomen lautet: Was sind Schwarze Löcher und gibt es sie überhaupt?



John Archibald Wheeler (1911 – 2008) prägte den Begriff „Black Hole“ (Schwarzes Loch) für einen Kollapsar. (University of Texas)

Um von einem Himmelskörper auf Nimmerwiedersehen zu entfliehen, bedarf es einer Mindestgeschwindigkeit. Beschleunigt eine Rakete auf eine Geschwindigkeit von mindestens 11,2 km/s, so verlässt sie die Erde für immer. Um die Astronauten vom Mond wieder zur Erde zurückzubringen, musste ihr Raumfahrzeug auf 2,4 km/s Geschwindigkeit beschleunigt werden. Mit dieser Geschwindigkeit konnten sie dem Schwerefeld des Mondes entkommen. Bei einer geringeren Geschwindigkeit wäre das Raumfahrzeug nach Erreichen einer bestimmten Höhe über dem Mondboden zum Stillstand gekommen und anschließend auf den Mond gestürzt. Zukünftige Raumfahrer einer Marsexpedition müssen ihr Raumschiff auf mindestens 5,0 km/s beschleunigen, um den Mars zu verlassen und zur Erde zurückzukehren. Gasmassen, die bei einer Sonneneruption mit 618 km/s oder mehr emporgeschleudert werden, verlassen die Sonne und dringen in den interplanetaren Raum vor, wo sie gelegentlich auch auf die Erde treffen und Polarlichter sowie Funkstörungen hervorrufen.

Diese Mindestgeschwindigkeit, um ein Gravitationszentrum zu verlassen und ins Unendliche zu reisen (rein theoretisch), nennt man Entweich- oder Fluchtgeschwindigkeit. Sie ist umso höher, je mehr Masse ein Himmelskörper besitzt und je kleiner sein Radius ist. Würde unsere Erde auf die Größe einer Kirsche schrumpfen, so wüchse die Entweichgeschwindigkeit auf 300.000 km/s an. Dies entspricht der Lichtgeschwindigkeit. Die Sonne müsste man auf sechs Kilometer Durchmesser zusammenquetschen, um eine Fluchtgeschwindigkeit von 300.000 km/s zu erzielen. Das Licht der Sonne könnte uns nicht mehr erreichen, denn die Photonen (Lichtquanten) könnten dem gewaltigen Schwerefeld nicht mehr enttrinnen. Die Sonne wäre somit unsichtbar.

Der Astrophysiker Karl Schwarzschild (1873-1916) hat als Erster den Radius einer Kugel berechnet, bei dem für eine bestimmte Masse die Entweichgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit wird. In Erinnerung an ihn spricht man vom Schwarzschild-Radius, der gelegentlich auch „Gravitationsradius“ genannt wird. Kollabiert ein Himmelskörper auf die Größe des Schwarzschild-Radius, dann kann kein Licht, ja überhaupt nichts mehr von seiner Oberfläche entfliehen. Das Gestirn wird unsichtbar. Ursprünglich als Kollapsar (vom Engl.: collapsing star) bezeichnet, hat John Archibald Wheeler (1911-2008), Nachfolger von Albert Einstein auf dem Lehrstuhl für Physik in Princeton (New Jersey, USA), im Jahre 1968 den einprägsamen Begriff „Black Hole“, zu Deutsch „Schwarzes Loch“ geprägt.

### Entscheidung am Ereignishorizont

Was im Inneren eines Schwarzen Loches passiert, weiß man (noch?) nicht. Denn es kann keine Information, kein Signal, rein gar nichts aus dem Bereich der Kugel mit dem Schwarzschild-Radius die Außenwelt erreichen. Was in das Schwarze Loch hineinfällt, ist für immer verschwunden. Daher der zutreffende Begriff „Loch“. Und absolut schwarz ist es auch, da kein Lichtstrahl nach außen dringt. Daher nennt man die Oberfläche eines Black Hole auch Ereignishorizont. Er ist gewissermaßen ein kosmischer Zensor. Der Ereignishorizont stellt keine feste Oberfläche dar, sondern ist schlicht leer. Er ist lediglich die Grenzfernung, bei der die Entweichgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit wird.

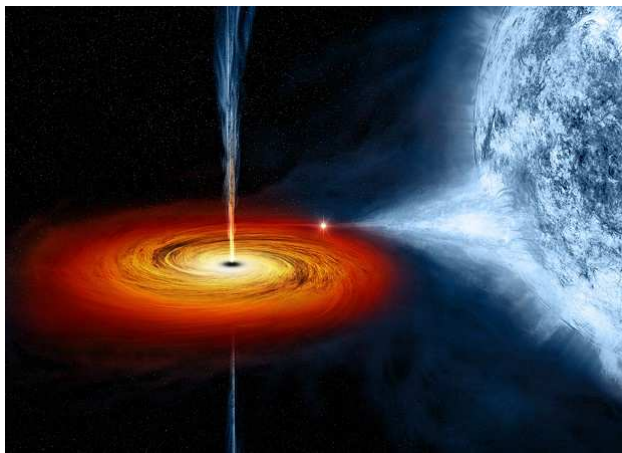


Schema eines Schwarzen Loches.

In der Regel sind Sterne während der meisten Zeit ihrer Existenz stabile Gebilde. Der innere Gas- und Strahlungsdruck bietet der Schwerkraft Paroli, die den Stern zusammenpressen möchte. Doch dieses fein abgestimmte Gleichgewicht wird gestört, wenn ein Stern im Zentrum ausgebrannt ist. Ist das Atomfeuer erloschen, fehlt der Strahlungsdruck und der Sternkern kollabiert bei massereichen Sonnen zu einem Neutronenstern. Dies passiert schlagartig in einer gewaltigen Explosion, wobei unter Abgabe gewaltiger Energiemengen die äußere Gashülle ins All geschleudert wird. Solche Explosionen massereicher Sterne werden als Supernovae bezeichnet. Für einige Tage werden sie so hell wie eine ganze Galaxie mit rund 100 Milliarden Sonnen. Supernovae sieht man weithin im Kosmos bis in Distanzen von Milliarden Lichtjahren. Man nutzt sie daher auch als Entfernungssindikatoren. Für Neutronensterne, die Reste von Supernova-Detonationen, gibt es allerdings eine Massenobergrenze. Hat der zusammenbrechende Sternkern mehr als drei Sonnenmassen, so kann auch der Druck des entarteten Neutronengases den Kollaps nicht stoppen, der Reststern stürzt immer weiter zusammen, bis er innerhalb seines Schwarzschild-Radius als Schwarzes Loch für die Außenwelt verschwindet. Nichts kann den finalen Kollaps mehr aufhalten - ein Sieg der Gravitation, der schwächsten der vier Naturkräfte. Dieses Szenario folgt aus der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Der beim Zusammenbruch auftretende enorme Druck fördert ab einem bestimmten Punkt sogar noch den Kollaps, statt sich ihm entgegenzustemmen. Denn Druck ist pure Energie, die gemäß der aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannten Formel  $E = mc^2$  die gravitativ wirkenden Massen noch verstärkt. Nach der ART schrumpft der Stern zu einem ausdehnungslosen Punkt unendlich hoher Dichte. Eine solche Singularität ist jedoch reine Fiktion. In der Natur kommen Singularitäten nicht vor, sie sind rein mathematische Objekte.

### Unsichtbar, aber nicht spurlos verschwunden

Schwarze Löcher kann man nicht sehen - sie senden kein Licht aus, überhaupt nichts kann ihnen entfliehen. Sie machen sich allerdings bemerkbar, wenn Materie in sie hineinstürzt. Dies passiert in Doppelsternsystemen, wenn sich der Partnerstern im Zuge seiner Entwicklung ausdehnt und dabei den Roche-Lobe (gravitative Stabilitätsgrenze) überschreitet. Dann reißt das Schwarze Loch mittels seiner Schwerkraft Masse an sich. Die Gasströme stürzen nicht senkrecht zum Ereignishorizont in das Black Hole, denn Stern und Schwarzes Loch kreisen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der Drehimpuls bleibt erhalten. Die Materieströme spiralisieren sich in das Schwarze Loch hinein, einem gewaltigen Strudel gleich. Um das Black Hole bildet sich eine riesige, rotierende Scheibe aus Gas und Staub, eine sogenannte Akkretionsscheibe. Kollisionen zwischen den ionisierten Gasatomen, gewissermaßen eine Art Reibung, heizen die Akkretionsscheibe auf mehrere Millionen Grad auf, wobei sie eine intensive Röntgenstrahlung aussendet. Dabei flackert die Röntgenquelle in Bruchteilen von Sekunden. Nur ein winziges, aber massereiches Objekt kann eine solche Strahlung aussenden. Paradebeispiel für ein solches Black Hole als Röntgenstrahler ist Cygnus X1 (X steht für X-ray, engl., Röntgenstrahlen). Auch im sichtbaren Bereich leuchtet eine solche Akkretionsscheibe.



Akkretionsscheibe um ein supermassereiches Schwarzes Loch mit zwei Jets (künstlerische Darstellung; NASA/CXC/M. Weiss).

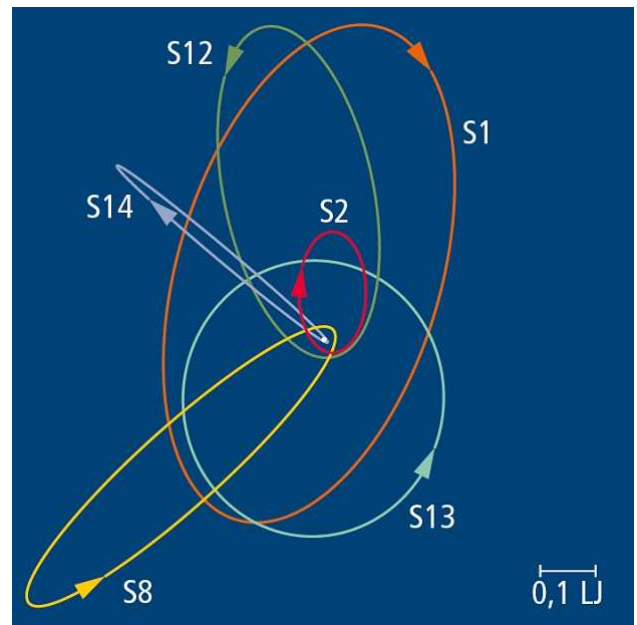
### Gigantische Gravitationsfallen ...

Die meisten Schwarzen Löcher weisen Massen zwischen drei und zehn Sonnenmassen auf. Manche Exemplare, vor allem aus der Frühzeit des Kosmos, sind bis zu 100 Sonnenmassen schwer. Man spricht von stellaren Schwarzen Löchern.

Doch außer stellaren Black Holes, Resten ausgebrannter Sterne, existieren Schwarze Löcher ganz anderer Kaliber mit millionenfacher Sonnenmasse. Solche wahren Monsterexemplare sitzen in den Zentren der meisten großen Milchstraßensysteme. Auch im Mittelpunkt unserer Milchstraße haust solch ein Monster von einem Black Hole. Seine Masse wurde zu vier Millionen Sonnenmassen bestimmt.

Die Vermutung, dass es Monster-Black-Holes mit millionenfacher, sogar milliardenfacher Sonnenmasse gibt, geht auf eine Entdeckung in den 1960er-Jahren zurück. Mit fortgeschrittener radioastronomischer Beobachtungstechnik entdeckte man punktförmige, also sternartige Radioquellen. Man bezeichnet sie als Quasare (Quasi stellar radio sources). Im sichtbaren Licht sehen die Quasare wie normale Sterne aus. Ihre Spektren gaben aber Rätsel auf, bis man erkannte, dass sie eine hohe Rotverschiebung aufweisen. Eine hohe Rotverschiebung im extragalaktischen Bereich bedeutet aber eine große Entfernung. Infolge der Expansion des Universums sind die Spektren der Galaxien und Quasare umso stärker nach dem roten Ende verschoben, je weiter sie entfernt sind. Ein Blick in die Ferne ist auch ein Blick in die Vergangenheit. Man beobachtet dabei Objekte in der Frühphase des Universums. Quasare strahlen in allen Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums, vom Röntgenbereich über Ultraviolett, sichtbares Licht und Infrarot bis zu Radiowellen, mit denen sie erstmals aufgespürt wurden. Die große Rotverschiebung bei den Quasaren ließ auf eine enorme Entfernung im intergalaktischen Raum schließen. Auf Grund der gemessenen scheinbaren Helligkeiten der Quasare und deren Entfernungen konnte man ihre wahre Leuchtkraft ermitteln. Und da begann das Dilemma: Quasare entpuppten sich als die leuchtkräftigsten Objekte im Weltall. Ihre durchschnittliche Helligkeit entspricht der von 100 großen Galaxien. Da ihre Strahlungs-

stärke sowohl im Röntgenbereich als auch im sichtbaren Licht in relativ kurzer Zeit von wenigen Tagen variiert, können sie nicht größer sein als maximal eine Lichtwoche im Durchmesser - eine Winzigkeit gegenüber dem Durchmesser einer Galaxie von 100.000 Lichtjahren.



Sterne nahe dem Monster-Black-Hole im Milchstraßenzentrum umrunden es auf Kepler-Bahnen. Aus ihrem Lauf ergibt sich eine Masse von vier Millionen Sonnenmassen für das zentrale Schwarze Loch.

### KOSMOLOGISCHE ROTVERSCHIEBUNG UND ENTFERNUNG

Rotverschiebung z	Lichtlaufzeit in Milliarden Jahren	Alter des Universums in Milliarden Jahren	Expansionsgeschwindigkeit in km/s
0	< 0,01	13,8	—
0,1	1,31	12,4	28 000
0,2	2,45	11,3	52 300
0,3	3,45	10,3	73 600
0,4	4,32	9,4	92 300
0,5	5,09	8,6	108 700
0,6	5,77	7,9	123 250
0,7	6,38	7,3	136 100
0,8	6,91	6,8	147 500
0,9	7,40	6,3	157 800
1,0	7,82	5,9	166 900
2,0	10,40	3,3	222 100
3,0	11,35	2,1	242 400
4,0	12,16	1,6	259 700
5,0	12,53	1,2	267 600
6,0	12,78	0,94	272 800
7,0	12,95	0,77	276 500
8,0	13,08	0,65	279 100
9,0	13,17	0,55	281 200
10,0	13,24	0,478	282 700
100,0	13,704	0,0166	292 600
1000,0	13,720	0,000434	292 900 = 0,98 c

Die Tabelle gilt für ein flaches Universum (euklidische Metrik) mit folgenden kosmologischen Parametern:  
 Hubble-Parameter:  $H_0 = 69,6 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$   
 Dichteparameter:  $\Omega = \rho_{\text{tot}}/\rho_{\text{crit}}$   
 Baryonische + Dunkle Materie:  $\Omega_{\text{b,m}} = 0,286/\text{Vakuumergie}; \Omega_{\Lambda} = 0,714$   
 Gesamtdichteparameter:  $\Omega = \Omega_{\text{b,m}} + \Omega_{\Lambda} = 1$   
 Vakuumlichtgeschwindigkeit:  $c = 299\,792,458 \text{ km/s}$   
 Rotverschiebung:  $z = \Delta\lambda = (\lambda_{\text{e}} - \lambda_{\text{o}})/\lambda_{\text{o}}$   
 $\lambda_{\text{e}}$  – beobachtete Wellenlänge  
 $\lambda_{\text{o}}$  – Laborwellenlänge (ruhende Strahlungsquelle relativ zum Beobachter)  
 Die Lichtlaufzeit gibt an, wie lange das Licht von einem Objekt (Stern, Galaxie, Quasar) mit der Rotverschiebung z zur Erde unterwegs war.  
 Das Alter des Universums vermerkt, wie alt das Universum war, als das Objekt sein Licht ausgesandt hat, das wir heute empfangen.

### ... in den Herzen von Galaxien

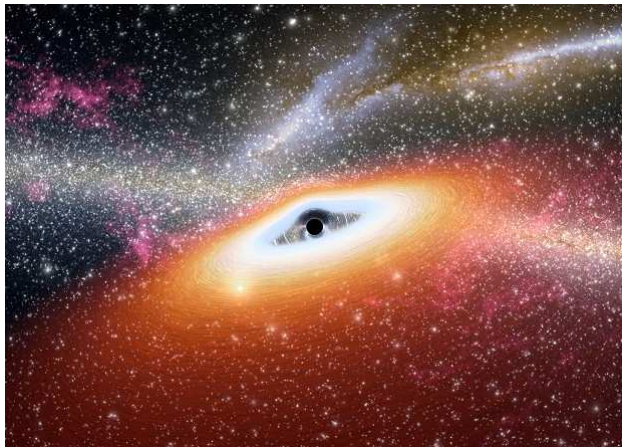
Wie aber kann in einem so kleinen Raumbereich eine solch gewaltige Energiemenge freigesetzt werden? Welche Objekte von bescheidener Größe können das sein? Die einzige plausible Lösung: Quasare sind Schwarze Löcher mit millionenfacher Sonnenmasse umgeben jeweils von einer gewaltigen, Millionen Grad heißen Akkretionsscheibe, die für enorme Leuchtkraft sorgt. Quasare sitzen in den Zentren von Galaxien in deren Jugendstadium. Wenn diese Monster-Black-Holes das Gas und die Sterne in ihrer Umgebung in einem gewaltigen Mahlstrom vollständig verschlungen haben, beginnen sie zu hungern - der Quasar leuchtet nicht mehr. Das Monster von einem Schwarzen Loch existiert aber weiterhin im Galaxienzentrum und flammt kurz auf, wenn Gaswolken oder Sterne ihm zu nahe kommen und gierig verschluckt werden.

Ein solch weitgehend verhungertes Monster-Black-Hole sitzt im Zentrum unseres Milchstraßensystems. Seine Masse von vier Millionen Sonnenmassen konnte nach dem 3. Kepler-Gesetz aus den Bahnen von Sternen bestimmt werden, die um das Monsterloch laufen. Im sichtbaren Licht ist der Blick auf zentrumsnahe Sterne durch interstellaren Staub in der Hauptebene der Galaxis versperrt. Aber im infraroten Spektralbereich kann man die Sterne in der Nähe unseres galaktischen Super-Black-Holes beobachten und ihre Raumgeschwindigkeiten messen.

Doch woher stammen diese riesigen Schwarzen Löcher? Sterne mit Millionen Sonnenmassen können nicht existieren und es gibt sie auch nicht. Vermutlich haben sich zunächst kleine Black Holes von rund 100 Sonnenmassen gebildet. Im Laufe der knapp 14 Milliarden Jahre langen Geschichte des Universums haben sich diese „Keime“ von Schwarzen Löchern so viel Gas und Sterne einverleibt, dass sie zu dicken Monstern von Schwarzen Löchern mit Millionen Sonnenmassen wurden.

### Neue Entdeckung, neue Fragen

Doch diese „Anfress-Hypothese“ stimmt wohl nicht, wie jüngste Beobachtungen erkennen lassen. Vor kurzem wurde im Gebiet der Sternbilder Bootes und Jungfrau ein Quasar (Katalog-Nummer: J1342+0928) mit einer Rotverschiebung von  $z = 7,54$  entdeckt. Er ist damit der fernste Quasar, der je beobachtet wurde. Über 13 Milliarden Jahre war sein Licht zur Erde unterwegs. Als ihn sein Licht verließ, das wir heute empfangen, war das Universum erst 690 Millionen Jahre alt, das sind fünf Prozent des heutigen Weltalters. Die Masse seines Schwarzen Loches wird auf 800 Millionen Sonnenmassen geschätzt. Selbst wenn das ursprüngliche Black Hole 1000 Sonnenmassen hatte, erklärt sich die Masse von 800 Millionen Sonnenmassen nicht durch Akkretion, also Aufsammeln von Gas und Sternen in der Nachbarschaft des Schwarzen Loches. Dazu reichte einfach die Zeit nicht aus. Die Hypothese des allmählichen Anfressens greift hier nicht.



Der Quasar J1342+0928 beherbergt ein Monster-Black-Hole von 800 Millionen Sonnenmassen (künstlerische Darstellung; NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)).

Das jugendliche Alter des Quasars J1342+0928 ergibt sich auch aus seinem Spektrum, das einen Anteil von zehn Prozent neutralen Wasserstoffs erkennen lässt.

Als das Universum 380.000 Jahre alt war, war die Temperatur des primordialen (ursprünglichen) Feuerballs vom Urknall so weit abgesunken (unter 3000 K), dass die Atomkerne Elektronen an sich fesseln konnten. Neutraler Wasserstoff und Helium bildeten sich. Das Weltall wurde durchsichtig, aber auch dunkel. Es begann das „dunkle Zeitalter“ des Kosmos ohne Sterne, ohne Galaxien und ohne Quasare.

Doch im Laufe der Zeit setzte die Reionisation ein. Die intensive UV-Strahlung der ersten Sterne, die 200 Millionen Jahre nach dem Big Bang, dem Urknall, aufleuchteten, entriss den Atomen ihre Elektronen. Heute ist der intergalaktische Wasserstoff praktisch vollkommen ionisiert.

### Verschiedene Wasserstoffanteile

Im Weltalter von 850 Millionen bis 1,2 Milliarden Jahren (dies entspricht einer Rotverschiebung von 6,5 bis 5) nahm der Anteil des neutralen Wasserstoffs rapide von 0,1 % auf 0,01 % ab, wie aus den Absorptionsspektren ferner Quasare abzulesen ist.

Beim Quasar J1342+0928 beträgt der Anteil von neutralem Wasserstoff zum ionisierten noch zehn Prozent, was einem Weltalter von 690 Millionen Jahren entspricht. Dies ist eine viel zu kurze

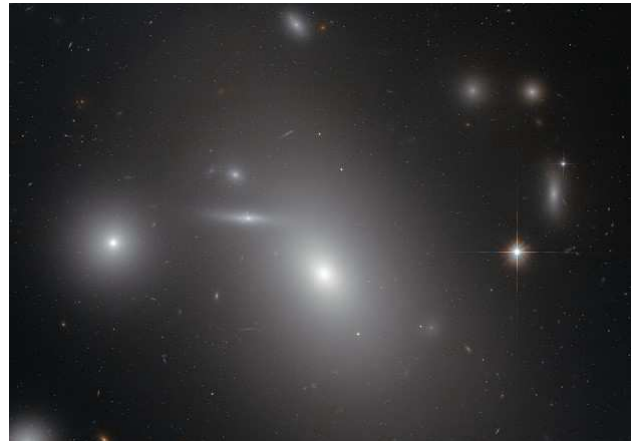
Zeit, um ein solches Monster-Black-Hole durch Akkretion entstehen zu lassen. Vielmehr ist davon auszugehen, dass dieses massereiche Schwarze Loch durch Kollaps großer Gaswolken entstanden ist, wobei die Dunkle Materie, die nicht elektromagnetisch wechselwirkt und daher auch keinen Gasdruck ausübt, durch ihren gravitativen Einfluss einen solchen Gravitationskollaps in recht kurzer Zeit ermöglichte. Damit wurde auch eine Fraktionierung der massereichen interstellaren Gaswolke verhindert.

Die Wachstumsrate durch Akkretion eines Black Hole hat eine Obergrenze, die Eddington-Limit genannt wird. Diese tritt in Kraft, wenn die Akkretion zu stark anschwillt. Dann nämlich verhindert der Strahlungsdruck der extrem heißen Akkretionsscheibe eine weitere Akkretion, indem er das einfallende Gas zurückdrängt. Somit konnten die primordialen Monster-Black-Holes nicht schnell genug wachsen und noch mehr Materiemengen in kürzester Zeit anzuhäufen.

Der Quasar J1342+0928 ist nicht der einzige Quasar aus der Jugendzeit des Kosmos, den man kennt. Schon 2011 wurde der Quasar J1120+0641 mit einer Rotverschiebung von  $z = 7,1$  aufgespürt. Er leuchtete bereits, als das Universum 770 Millionen Jahre alt war. Die Masse seines zentralen Black Hole wird auf zwei bis drei Milliarden Sonnenmassen geschätzt.

Die fernste Galaxie, die bisher aufgespürt wurden, zeigt eine Rotverschiebung von  $z = 11$ , dies entspricht einem Weltalter von nur 440 Millionen Jahren nach dem Urknall. Ihr Licht eilte 13,3 Milliarden Jahre durch das expandierende All, bis es vom Hubble-Weltraumteleskop eingefangen wurde.

Das bisher größte Schwarze Loch wurde im Zentrum der riesigen elliptischen Galaxie NGC 4889 im Sternbild Coma Berenices ausgemacht. Rund 300 Millionen Lichtjahre trennen die Galaxie NGC 4889 von uns. Seine Masse liegt bei Sonnenmassen. Mit 120 Milliarden ( $1,2 \times 10^{11}$ ) Kilometer (= 800 AE 20 Milliarden ( $2 \times 10^{10}$ )) Durchmesser ist es wesentlich größer als unser Planetensystem.

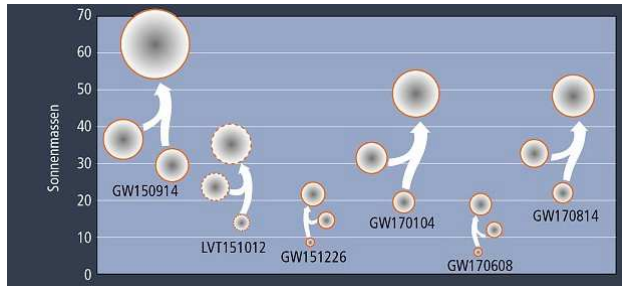


Die elliptische Riesengalaxie NGC 4889 (Coma B) im Sternbild Haar der Berenike beherbergt ein Black Hole von 20 Milliarden Sonnenmassen. Aufnahme: Hubble-Weltraumteleskop (NASA/ESA).

Die meisten Monster-Black-Holes sitzen in den Zentren von mehr oder minder großen Galaxien und verschlingen dann und wann wandernde Gaswolken oder Sterne, die ihnen zu nahe kommen. Einige triffen jedoch frei durchs All, anstatt sitzsaam im Zentrum einer Galaxie auszuharren. Solch vagabundierende Monster-Black-Holes sind beim Verschmelzen von Galaxien entstanden. Beim Verschmelzungsprozess zweier Galaxien mit großen Massendifferenzen (etwa 1 : 10) strandet das Schwarze Riesenloch der kleineren Galaxie. Einsam und allein, völlig unsichtbar zieht das gestrandete Monster-Black-Hole seine Bahn in den Außenbezirken der neuentstandenen großen Galaxie mit nur geringen Chancen, noch eine interstellare Gaswolke oder Sterne zu erschaffen. Manche Astronomen nennen sie marodierende Monster, da sie dann und wann dennoch Sterne verschlingen samt ihren Planeten. Träfe ein solch vagabundierendes Schwarzes Loch auf unser Sonnensystem, bräuchte man sich um den Klimawandel auf Erden keine Sorgen mehr zu machen.

In der Andromedagalaxie (M 31) fand man mit dem Röntgenteleskop „Chandra“ der NASA eine ungewöhnlich intensive Röntgenquelle. Mit dem Gemini-North-Spiegelteleskop auf dem Mauna Kea (Hawaii) hat man die Quelle im optischen Bereich als bedekungsveränderlichen Stern ausgemacht. Woher aber stammt die intensive Röntgenstrahlung? Zur großen Überraschung stellte sich heraus, dass die Röntgenquelle gar nicht in M 31 sitzt, sondern 1000-mal weiter als die Andromedagalaxie entfernt ist. In 2,6 Milli-

arden, also 2600 Millionen Lichtjahren Entfernung kreisen zwei Monster-Black-Holes mit einer Gesamtmasse von 200 Millionen Sonnenmassen umeinander. M 31 befindet sich nur rein zufällig im Vordergrund. Noch ist es nicht gelungen, dieses Monsterpaar in Einzelkomponenten aufzulösen. Man schätzt ihre gegenseitige Distanz auf etwa 100 AE (= 15 Milliarden Kilometer). Aus der Lichtkurve wurde ihre Umlaufzeit zu 80 Tagen bestimmt. Sie strahlen auch Gravitationswellen aus, die derzeit noch nicht messbar sind. Je nach der noch unbekannt genauen Distanz voneinander dürften sie in 360.000 Jahren miteinander kollidieren und anschließend verschmelzen - vielleicht aber schon in 350 Jahren - im kosmischen Maßstab betrachtet also im nächsten Augenblick.



Massen von stellaren Schwarzen Löchern vor und nach dem Verschmelzen, von denen Gravitationswellen empfangen wurden.

### Schwarze Löcher mit Mittelgewicht

Außer stellaren Black Holes sowie Schwarzen Löchern gibt es noch eine dritte Kategorie von Schwarzen Löchern, deren Massen zwischen 100 und 100.000 Sonnenmassen liegen. Man nennt sie intermediäre Black Holes (IMBH - Intermediate Mass Black Holes). So ein intermediäres Schwarzes Loch befindet sich im Zentrum des Kugelhaufens 47 Tucanae (NGC 104). Nach  $\omega$  Centauri ist 47 Tuc der zweitgrößte Kugelhaufen, den wir in unserer Milchstraße gefunden haben. Er erscheint als diffuses Sternchen 4. Größe. Mehr als eine Million Sterne drängen sich in einem Raumbereich von 120 Lichtjahren Durchmesser. Im Zentrum sind die Sterne voneinander im Schnitt nur ein Zehntellichtjahr entfernt. In der Nachbarschaft von 47 Tuc liegt auch die Kleine Magellansche Wolke. Sie ist aber mit 200.000 Lichtjahren erheblich weiter entfernt als der Kugelhaufen, dessen Distanz rund 14.000 Lichtjahre beträgt. Die Röntgenstrahlungsquelle 47 Tuc X9 dürfte ein massereiches Schwarzes Loch sein, um das in nur einer Million Kilometer Entfernung ein Weißer Zwerg mit einer Umlaufzeit von nur einer halben Stunde kreist. Man schließt daraus auf eine Masse des Black Hole von über 100 Sonnenmassen.



Im Zentrum des Kugelsternhaufens 47 Tucanae (NGC 104) sitzt ein intermediäres Schwarzes Loch von über 100 Sonnenmassen. (ESO/M.-R. Cioni/VISTA Magellanic Cloud survey)

Ein wesentlich schwereres intermediäres Schwarzes Loch wurde kürzlich nahe dem galaktischen Zentrum entdeckt. Man schätzt seine Masse auf 100.000 Sonnenmassen. Nur rund 200 Lichtjahre trennen dieses IMBH vom zentralen Black Hole im Mittelpunkt der Galaxis. Es sendet eine besonders intensive Röntgenstrahlung aus, woraus zu schließen ist, dass es von einer leuchtkräftigen Akkretionsscheibe umgeben ist. Eingebettet ist dieses intermediäre Schwarze Loch in eine relativ dichte Gaswolke von knapp 20 Lichtjahren Durchmesser. Vermutlich ist dieses Black-Hole der Mittelgewichtsklasse der Rest einer Zwerggalaxie, die sich unsere Milchstraße einverleibt hat. Über kurz oder lang wird es mit dem zentralen Schwergewichts-Black-Hole im Milchstraßenzentrum verschmelzen. Die dabei ausgesandten Gravitationswellen müssten dann von unseren gegenwärtigen Fabry-Pérot-Interferenzdetektoren registriert werden. Doch bis dahin gibt es sicher ganz andere Gravitationswellenempfänger oder überhaupt keine Beobachter mehr auf der Erde ... Mit dem für Frühjahr 2021 geplanten Start des James-Webb-Space-Telescope hofft man, bis zu 100 Monster-Schwarze-Löcher am Rande des beobachtbaren Universums zu entdecken und damit auch ihre rasche Entstehung kurz nach dem Urknall besser zu verstehen .