



Komplexe Objekte des Himmels

von Dr. Andreas Müller

April 2007

- ◊ Einleitung
- ◊ Sternentwicklung
- ◊ Gravitation formt einen neuen Stern
- ◊ Das Ende von Sternen
- ◊ Auswahl kompakter Objekte
- ◊ Buchtipp

1 Einleitung

Als kompakte Objekte bezeichnet man in der Astrophysik sternartige Objekte, die **ungewöhnlich hohe Materiedichten** aufweisen. Der Schwellwert liegt bei etwa einer Million g/cm³. Ein Kubikzentimeterwürfel dieser kompakten Materie wiegt mindestens eine Tonne!

2 Sternentwicklung

Auch wenn es bei einem Blick an den Nachthimmel nicht den Anschein hat: Sterne entwickeln sich, d. h. sie verändern ihren Zustand, z. B. ihre Größe oder ihre Leuchtkraft. Die typische

3 Gravitation formt einen neuen Stern

Entwicklungszeitskala beträgt allerdings je nach Stern Millionen bis Milliarden Jahre. Da dies das Lebensalter des Menschen bei weitem überschreitet, bemerken wir die Sternentwicklung nicht unmittelbar.

Die Astronomen haben allerdings durch viele Beobachtungen über Jahrhunderte in der **Stellarastronomie** Einblicke in sehr unterschiedliche Sternstadien erhalten. Zwar können sie kaum die Entwicklung an ein und demselben Stern verfolgen, aber sie können die verschiedenen, beobachteten Sterne zueinander in Bezug setzen. Wie das geschehen soll, diktiert die Physik. Immer komplexere Modelle in der **Stellarphysik** haben so ein sehr facettenreiches Bild von der Sternentwicklung entworfen. Diese Theorie besagt, dass Sterne entstehen und früher oder später starken Veränderungen ausgesetzt sind. Die entscheidende Zustandsgröße ist dabei die **Masse** des Sterns. Sie bestimmt, welche thermonuklearen Brennzyklen der Stern durchläuft, d. h. welche chemischen Elemente der Stern produzieren kann. Die Masse bestimmt auch das Schicksal des Sterns. In der Regel steht am Ende ein bestimmter Typus eines kompakten Objekts.

3 Gravitation formt einen neuen Stern

Die treibende Kraft, die kompakte Objekte erzeugt, ist die **Gravitation**. Nur sie vermag die unglaublichen Dichten von mehr als einer Tonne pro Kubikzentimeter auf natürliche Weise herzustellen. Wenn der Brennstoff zur Fusion im Innern des Sterns zur Neige geht und kein weiterer Brennzyklus gezündet werden kann, gewinnt die Schwerkraft. Sie stört das hydrostatische Gleichgewicht und komprimiert im **Gravitationskollaps** den Stern. Dieser Prozess kann unter Umständen auch mit einer **Sternexplosion** einhergehen. Wieder ist die kollabierende Masse entscheidend, was aus dem kollabierenden Stern wird. Denn je mehr Masse vorhanden ist, umso höher ist der Gravitationsdruck und umso kompakter kann das Sternrelikt werden.

4 Das Ende von Sternen

Massearme Sterne, die vergleichbare Massen wie die Sonne haben (rund 10^{33} g) enden weniger spektakulär als **Weiße Zwerge**. Eine typische Entwicklungssequenz ist, dass diese Sterne sich zu den so genannten Roten Riesen aufblähen. Dabei stoßen sie ihre äußeren Sternhüllen durch heftige Sternwinde ab und erzeugen Planetarische Nebel in der Umgebung. Der Sternkern fällt weiter in sich zusammen und bildet den Weißen Zwerg. Das wird das Schicksal unseres Tagesgestirns in etwa sechs Milliarden Jahren sein.

Massereiche Sterne dagegen entwickeln sich viel schneller, können schwerere Elemente produzieren und verabschieden sich mit einer spektakulären Sternexplosion, einer **Supernova** oder sogar einer **Hypernova**, vom 'normalen Sternenleben'. Während die äußeren Sternhüllen explodieren, kollabiert der Sternkern auf ein noch kompakteres Objekt: einem **Neutronenstern**. Neutronensterne weisen noch höhere Dichten als Weiße Zwerge auf, etwa 10^{15} g/cm³ und mehr. Es wurde auch vorgeschlagen, dass alternativ noch kompaktere Quarksterne entstehen könnten. Derzeit ist allerdings unklar, ob diese Alternativen tatsächlich existieren. Die astronomischen Beobachtungen können bislang ausnahmslos mit einem Neutronenstern erklärt werden, der auch als Pulsar oder Magnetar in Erscheinung tritt.

Die dritte klassische, stabile Endkonfiguration ist die kompakteste von allen: ein **stellares Schwarzes Loch**. Sie entstehen, falls eine kollabierende Masse etwa drei Sonnenmassen

5 Auswahl kompakter Objekte

übersteigt - diese Grenze ist allerdings Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen und könnte auch etwas kleiner sein.

Die Gravitation hat nun endgültig gewonnen und erzeugt ein kompaktes, dunkles Objekt, das sogar das Licht einfängt!

Die Typen kompakter Objekte wurden hier nur knapp vorgestellt. An anderer Stelle, dem umfassenden [Astro-Lexikon im Wissensportal](#), werden sehr viele Einzelheiten zu den kompakten Objekten erläutert. Neben dem klassischen Schwarzen Loch werden auch Alternativen diskutiert, die hier nur angeführt werden: Bosonenstern, Fermionenstern, Gravastern und Holostern. Die Wissenschaftler sind sich nicht einig, inwiefern die Natur solche Alternativen hervorbringt. Nach herrschender Lehrmeinung sind nur drei Typen kompakter Objekte etabliert: **Weißer Zwerg, Neutronenstern und Schwarzes Loch.**

Folgen Sie einfach den Links auf dieser Seite, um Details zu erfahren.

Wir schließen die knappe Einführung in die Physik der kompakten Objekte mit einer tabellarischen Gegenüberstellung, die die verschiedenen Typen hinsichtlich ihrer Masse, ihres Radius und ihrer mittleren Massendichte vergleicht. Um ein Gefühl für die Zahlenwerte zu bekommen sind die Daten von Sonne und Erde ergänzt worden.

kompaktes Objekt	Massen [kg]	Massen [M _⊕]	Radius [km]	Radius [R _⊕]	mittlere Dichte [g cm ⁻³]
Weißer Zwerg	$\lesssim 2 \times 10^{30}$	$\lesssim 1$	6500	10^{-2}	10^6
Neutronenstern	$\sim 2\text{--}6 \times 10^{30}$	$\sim 1\text{--}3$	~ 15	10^{-5}	10^{14}
Quarkstern	$\sim 4 \times 10^{30}$	~ 2	~ 10	10^{-5}	10^{15}
Schwarzes Loch	beliebig		$3 \text{ km} \times (M/M_{\odot})$		$10^{16} \times (M/M_{\odot})^{-2}$
Sonne	$\sim 2 \times 10^{30}$	1	696000	1	1.4
Erde	$\sim 6 \times 10^{24}$	$\sim 10^{-6}$	~ 6400	10^{-2}	5.5

5 Auswahl kompakter Objekte

Das eigentliche Thema dieses Web-Artikels sind konkrete Quellen der Astronomie. Im Folgenden wird eine Auswahl **prominenter Vertreter von kompakten Objekten** vorgestellt. Dabei beschränken wir uns auf die besonders kompakten Klassen: Neutronensterne (NS) und Schwarze Löcher (SL). Bei den Schwarzen Löchern werden auch deutlich massereichere Kandidaten betrachtet, die viel schwerer als Sterne werden können, nämlich auch die **mittelschweren Schwarzen Löcher** und die **supermassereichen Schwarzen Löcher**.

Anmerkungen zur Tabelle: Die astronomisch gemessene Entfernung ist der Ordnungsparameter in der Tabelle. Unter dem Terminus 'Wirt' verstehen Astronomen dasjenige kosmische Objekt, von dem das kompakte Objekt Materie erhält. Dieser Vorgang heißt **Akkretion** und führt zur Aktivität (Leuchtkraft) und zum Wachstum (Massenzunahme) des kompakten Objekts. In alten Objekten, wie den Kugelsternhaufen oder entwickelten Galaxien, ist dieser Prozess in Ermangelung von Umgebungsmaterial fast

5.1 Tabelle

zum Erliegen gekommen. Hier kann der Nachweis kompakter Massen nur indirekt geschehen, beispielsweise über die Vermessung von Sternbewegungen in der Nähe des kompakten Objekts. Junge Objekte, Mikroquasare, ultraleuchtkräftige Röntgenquellen (ULXs) und Aktive Galaktische Kerne (AGN) beobachten die Astronomen *in flagranti* bei der Akkretion. Das verleiht ihnen gerade hohe Aktivität, Variabilität und UVXGamma-Leuchtkraft.

5.1 Tabelle

Objekt	Entfernung	kompaktes Objekt	Wirt
RX J185635-3754	61 bis 140 pc	Quarkstern?	isoliert
Vela Pulsar	460 bis 500 pc	Pulsar	planetarischer Nebel
XTE J1118+480	1.8 kpc	stellares SL	Begleitstern
Cyg X-1	2.0 bis 2.5 kpc	stellares SL	blauweißer Riesenstern
SS 433	3.0 kpc	NS oder stellares SL	Begleitstern
Circinus X-1	6.1 kpc	Pulsar	Begleitstern
Her X-1	4.9 bis 6.1 kpc	Pulsar	blauer Riesenstern
Sgr A*	8.3 kpc	supermassreiches SL	Milchstraße
M15	9.8 kpc	mittelschweres SL	Kugelsternhaufen
Cyg X-3	10.0 kpc	NS oder stellares SL	Wolf-Rayet-Stern
GRS 1915+105	12.5 kpc	stellares SL	Begleitstern
G1	720 kpc	mittelschweres SL	Kugelsternhaufen
M82	3.8 Mpc	mittelschweres SL	Starburstgalaxie
NGC 4395	4.2 Mpc	mittelschweres SL	Zwerggalaxie
NGC 4258	7.2 Mpc	supermassreiches SL	Galaxie
M87	16.0 Mpc	supermassreiches SL	Riesenellipse
POX 52	93.0 Mpc	mittelschweres SL	Zwerggalaxie
Cyg A	233.2 Mpc	supermassreiches SL	Zwerggalaxie
CXO 0312 Fiore P3	1.0 Gpc	supermassreiches SL	Galaxie

5.2 Legende

Die Einheit **pc** ist sehr gebräuchlich in der Astronomie und steht für die Parallaxensekunde (kurz: Parsec). Sie ist definiert als die Entfernung, von der aus der Abstand Erde - Sonne unter einer Bogensekunde ($1''$) erscheint und entspricht somit 3.2615 Lichtjahre. Siehe dazu Lexikon der Astrophysik.

Entsprechend steht

- ◊ **kpc** für 'Kiloparsec' und entspricht etwa 3262 Lichtjahre,
- ◊ **Mpc** ist eine 'Megaparsec' mit etwa 3.26 Millionen Lichtjahren,
- ◊ **Gpc** ist eine 'Gigaparsec' mit etwa 3.26 Milliarden Lichtjahren.

Zum Vergleich:

- ◊ Der nächste Stern *Proxima Centauri*, die C-Komponente des hellen Sterns *alpha Centauri*, ist **1.3 pc** oder 4.3 Lichtjahre entfernt.
- ◊ Der Andromedanebel, unsere Nachbargalaxie in der *Lokalen Gruppe*, ist **667 kpc** oder 2.2 Millionen Lichtjahre entfernt.

5.3 RX J185635-3754

- ◊ Der nächste Galaxienhaufen zur Lokalen Gruppe ist der Virgo-Haufen in **16 Mpc** Entfernung (Zentrum ist die Radiogalaxie M87, eine Riesenellipse).
- ◊ Darauf folgt der Coma-Haufen in **140 Mpc** Distanz (Zentrum ist Abell 1656).
- ◊ Dann folgt der Herkules-Haufen, **215 Mpc** entfernt. Dieser Galaxienhaufen enthält viele junge Sternensysteme, 70% Spiralen und 30% Ellipsen, die aus Verschmelzung von Spiralgalaxien hervorgehen.
- ◊ Der hellste Quasar, 3C 273, ist **640 Mpc** entfernt und befindet sich in der *Jungfrau*.
- ◊ Das Universum hat nach aktuellen kosmologischen Modellen und Infrarotmessungen (Mikrowellensatelliten **WMAP, CBI**) etwa eine Größe von **4.2 Gpc** oder 13.7 Milliarden Lichtjahren.

5.3 RX J185635-3754

Dieses Objekt ist ein sehr naher **isolierter Neutronenstern ohne Pulsareigenschaften** (*isolated neutron star candidate INSC*). *Pons et al. 2001* (astro-ph/0107404) leiten eine Entfernung von nur 61 pc ab, während neuere Beobachtungen mit dem Röntgenobservatorium *Chandra* Säulendichten von neutralem Wasserstoff (HI) messen, die eher eine Entfernung von 140 pc nahelegen (*Drake et al. 2002*, astro-ph/0204159). Damit handelt es sich vermutlich um das nächste kompakte Objekt überhaupt.

Derzeit zweifeln die Astronomen daran, ob es sich bei diesem Objekt um einen **Quarkstern** handeln könnte und favorisieren mehr den klassischen Neutronenstern.

Das Magnetfeld des Neutronensterns ist mit etwa 10^{12} Gauß sehr hoch und erreicht fast die Domäne der **Magnetare**. Das Alter des Neutronensterns wurde zu einer Million Jahre bestimmt, und man spekuliert darüber, ob ein Quarkstern das mögliche Ende der Entwicklung eines Neutronensterns ist. Da Quarkmaterie viel dichter gepackt werden kann, sind Quarksterne kleiner als Neutronensterne. Zurzeit gibt es keinen einzigen überzeugenden Quarksternkandidaten.

5.4 Vela Pulsar

Der Vela Pulsar ist ein Neutronenstern in einer Entfernung von etwa 1500 Lj oder entsprechend 460 pc, der sich im Sternbild *Vela* zu deutsch *Segel* befindet. Dieses kompakte Objekt entstand aus einer Supernova, deren ausgeworfene Materie sich mit 400 000 km/h bewegt. Die heutige Ausdehnung des Supernovaüberrests lässt den Schluss zu, dass sich vor etwa 10 000 Jahren die Supernova ereignet haben muss. Es gibt jedoch auch die Spekulation von der Beobachtung einer Supernova im Sternbild Vela durch die Sumerer vor bereits 6000 Jahren, die den Neutronenstern gebildet haben könnte.

Der Pulsar hat eine Periode von 89.2 ms und eine Zunahme der Periodenlänge von 10.7 ns pro Tag. Der Supernovaüberrest ist ein planetarischer Nebel (PN), der im Radiowellenlängenbereich strahlt und als **Vela X** bekannt ist. Außerdem gibt es eine Assoziation des Vela-Pulsars zum Bedeckungsveränderlichen **Vela X-1**, der sogar eine Gammaquelle ist. Die Umlaufperiode beträgt nur 9.86 Tage. Der Vela-Pulsar ist die unsichtbare Komponente im Binärsystem mit einer Masse von etwa 1.5 Sonnenmassen. Die andere Komponente ist ein heißer Riesenstern mit Spektraltyp B und hat eine Masse von etwa 30 Sonnenmassen. Die Gammastrahlung fluktuiert mit einer Periode von 282.8 Sekunden.

5.5 XTE J1118+480

Hierbei handelt es sich um eine stellare Quelle, einem Galaktischen Kandidaten für ein Schwarzes Loch (*Galactic Black Hole Candidate, GBHC*), und im Speziellen einem so genannten SXT (*Soft X-ray Transient*), also eine Quelle die vorübergehend sehr hell im Bereich der weichen Röntgenstrahlung leuchtet.

XTE J1118+480 wurde während einer Röntgendifferenzmusterung im März 2000 mit dem *RXTE All-Sky Monitor* entdeckt und sitzt im Galaktischen Halo (Sternbild *Ursa Major*, dt. *Großer Bär*) in einer Entfernung von etwa 1.8 kpc (*Wagner et al. 2001, astro-ph/0104032*). Damit ist XTE J1118+480 **räumlich der uns am nächsten liegende Kandidat für ein stellares Schwarzes Loch** und ein Schwarzes Loch überhaupt!

Das Binärsystem besteht aus einem Schwarzen Loch mit einer Masse von **6.0 bis 7.7 Sonnenmassen** und einem Begleitstern mit einer Masse von 0.09 bis 0.5 Sonnenmassen.

Die Quelle zeigt außerdem Quasi-Periodische Oszillationen (QPOs) im Bereich von wenigen Hertz, die mit globalen, räumlichen Schwingungen in der Akkretionsscheibe in Verbindung gebracht werden. QPOs dienen der Studie des zeitlichen Verhaltens der Akkretionsscheibe und der Ableitung des Viskositätsparameters.

Die beobachteten Plasmaausflüsse wurden mit einem Blandford-Znajek Mechanismus erklärt, wo starke, poloidale Magnetfelder nahe am stellaren Schwarzen Loch ein leptonisches Plasma aus Elektronen heizen. Dabei bilde sich eine Korona aus, in der einerseits Comptonisierung stattfinde und andererseits der Jet gebildet werde. Für die Korona wird angenommen, dass sie sowohl eine lachrige Struktur haben kann und auf der Akkretionsscheibe sitzt (*patchy corona model*) oder ein geometrisch dicker, heißer Akkretionsfluss im Innern ausgebildet werden kann (*sphere-disk geometry model*). Als wahrscheinliches Szenario gilt eine Verbindung von Korona und Jet. Hier wird ein **magnetisches Energiereservoir** angenommen, dessen Energie über *magnetische Rekonnexion* auf das Plasma aus Elektronen übertragen wird (*Malzac et al. 2004, astro-ph/0402674*).

5.6 Cygnus X-1

Dieser Galaktische Kandidat für ein Schwarzes Loch (GBHC) befindet sich nahe eta Cygni und ist eine starke Röntgenquelle (daher die Bezeichnung *X* für *X-rays*). Die Helligkeitsvariationen im Röntgenbereich zeigen keinerlei Periodizitäten und fluktuieren auf der ms-Zeitskala. Cyg X-1 wurde 1972 von dem kanadischen Astronomen *Tom Bolton* entdeckt und war der erste Kandidat für ein tatsächlich existierendes Schwarzes Loch überhaupt!

Cyg X-1 hat einen blauweißen Riesen (Spektraltyp O9.7) mit 18 Sonnenmassen als Begleitstern (Name: HDE 226868), der einen Radius von 17 Sonnenradien und visuell 9. Größe (8.84^{mag}) hat. Seine Umlaufzeit beträgt nur 5.6 Tage und der physikalische Abstand des Doppelsterns nur 20 Sonnenradien! Das kompakte Objekt ist höchstwahrscheinlich ein Schwarzes Loch und hat eine Masse von etwa 5 bis 8 oder 16 Sonnenmassen. Nach XTE J1118+480 ist Cyg X-1 das nächste stellare Schwarze Loch.

In neuen Modellen wurde versucht diesen Mikroquasar mit einem **dunklen Jet** (engl. *dark jet model*) zu erklären (*Gallo et al., Nature 436, 819, 2005*). Das Schwarze Loch 'bläst' die Akkretionsenergie ins ISM bis auf die pc-Skala zurück.

5.7 SS 433

Dieses Objekt gehört zu den rätselhaftesten im Universum! Es wurde bereits 1977 entdeckt und befindet sich im Sternbild *Adler*, inmitten eines Supernovaüberrestes (Supernova remnant, SNR), genannt W50A. W50A ist vermutlich der Überrest aus, dem das kompakte Objekt in SS 433 hervorging. Dabei handelt es sich im weitesten Sinne um einen Mikroquasar, also ein kompaktes Objekt (Neutronenstern oder stellares Schwarzes Loch), das von einem massereichen Donatorstern umkreist wird. Dabei bildet sich aus dem vom Stern überfließenden Material eine Akkretionsscheibe aus.

Der Donatorstern in diesem Doppelsternsystem ist ein massereicher OB-Stern mit 20 Sonnenmassen, der in nur 13.1 Tagen um den kompakten Begleiter kreist. In Form eines starken Sternwindes verliert der Riesenstern 10^{-4} Sonnenmassen pro Jahr an das kompakte Objekt (*Windakkretion*). Die Natur des kompakten Objektes ist umstritten: lange wurde ein Neutronenstern favorisiert, mittlerweile spricht vieles für ein stellares Schwarzes Loch.

Das Besondere an dieser Quelle ist ein **präzidiertender Jet**, zumindest dachte man lange, das er präzidiert, wie der Wasserstrahl eines rotierenden Rasensprengers. Heute nimmt man eher an, dass es nur so scheint, als ob ein kontinuierlicher Jet präzidiert und in Wirklichkeit das kompakte Objekt diskrete Materiepakete auswirft, die man englisch **bullets** nennt. Sie werden so erklärt, dass die zugrundeliegende Akkretion auf das kompakte Objekt gestört abläuft: die Akkretionslösung oszilliert und sorgt so nur für eine diskontinuierliche Versorgung des Ausflusses.

Die Inklination der Jetachse bzw. der Achse, wo die Auswürfe oder 'Blobs' mit jedesmal nahezu konstanten 26% der Lichtgeschwindigkeit ballistisch hinausgeschossen werden ist zum irdischen Beobachter mit 79 Grad stark geneigt. Außerdem präzidiert diese Achse langsam wie die Achse eines Kreisels mit einer Periode von 164 Tagen. Der 'Schussintervall' für die bullets liegt bei 50 bis 1000 Sekunden. Ihre Masse beträgt durchschnittlich 10^{19} bis 10^{19} g, also etwa ein Millionstel der Masse des irdischen Mondes.

Der Jet ist beidseitig und besitzt Emissionlinien des Wasserstoffs (H alpha), die dementsprechend ebenfalls doppelt vorkommen. Die abgeschätzte Jet-Leuchtkraft ist mit 10^{39} erg/s sehr hoch!

Kürzlich (Dezember 2002) wurden vom Röntgenbilder vom Satelliten *Chandra* veröffentlicht, die ebenfalls die helikale Struktur des Jets wie die Radiobilder offenbaren. Die emittierten Blobs sind deutlich durch ihre Bremsstrahlung sichtbar und mit etwa 50 Millionen Grad sehr heiß.

SS 433 ist ein heißer Favorit für die Neutrinoastronomie, weil der Jet dieses Mikroquasars **ultra-hochenergetische** (UHE) Neutrinos emittieren könnte, die Energien im Bereich von 1 bis 100 TeV haben. Sie entstehen im Jet, wo die hadronische Komponente, vornehmlich Protonen, bis auf gigantische Energie von 10^{16} eV beschleunigt werden könnten und über p-p-Kollisionen und p-gamma-Reaktionen über andere Teilchenspezies (Pionen, Myonen) schließlich UHE-Neutrinos der Myon- und Elektronfamilie generieren. Es ist Aufgabe von Neutrinodetektoren der 1 km^2 -Klasse, wie AMANDA und demächst ICECUBE (beide mit Sitz in der Antarktis), die Cerenkov-Strahlung neutrino-induzierter Myonen zu messen. Dabei entstehen in einem riesigen Detektorvolumen aus Eis von etwa 3 km^3 Große Strahlungsblitze, dadurch dass sich Myonen im Medium schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Medium bewegen. Empfindliche Lichtmesser, so genannte *Photomultiplier Tubes* (PMTs), messen diese Lichtspur und erlauben Rückschlüsse auf Richtung und Energie vorangegangener Neutrinos aus denen sie hervorgingen.

5.8 Circinus X-1

Quellen

- ◊ *Distefano et al., 2002*
- ◊ *Chakrabarti et al., 2002, astro-ph/0208148*

5.8 Circinus X-1

Circinus ist das Sternbild *Zirkel*, nahe dem *Kreuz des Südens*, in der galaktischen Ebene. Hier findet sich die zeitlich schnell veränderliche Röntgenquelle Cir X-1, die 1971 entdeckt wurde. Diese Quelle ist vermutlich ein **galaktischer 'Mikroquasar'**, der ein typisches P Cygni Profil zeigt, einen starken Wind, der von der Sternoberfläche ausgeht und Geschwindigkeiten bis zu 4.5 Millionen km/h erreicht! Der Teilchenwind besteht aus ionisiertem Silizium, Neon, Eisen, Magnesium und Schwefel, wie die Spektrallinien verraten.

Die Entfernung beträgt etwa 20 000 Lj, also 6.1 kpc. Das System besteht aus einem Neutronenstern plus einem sonnenartigen Stern.

5.9 Hercules X-1

Hercules X-1 ist ebenfalls ein **Pulsar**, der durch Akkretion (100 Mrd. Tonnen pro Sekunde!) Drehimpuls gewinnt und so 'aufgezogen' wird (Periodenzunahme um 10^{-5} pro Jahr). Die Periode ist mit 1.2378 Sekunden durchschnittlich. Die Masse des Neutronensterns wurde zu 0.9 Sonnenmassen (mit einer Unsicherheit von 0.4 Sonnenmassen) abgeleitet. Außerdem besitzt er ein starkes Magnetfeld (etwa 4.6×10^8 Tesla). Die Röntgenemission ändert sich ebenfalls mit einer Periode von 35 Tagen, was auf eine präzidierende Akkretionsscheibe zurückgeführt wird.

Der Begleiter und Wirt des Neutronensterns ist ein blauer Riese mit der Bezeichnung **HZ Her**, der 1970 entdeckt wurde. Sein Spektraltyp variiert stark von B0Ve bis F5e, und er umkreist die kompakte Komponente in nur 1.7 Tagen. Auch hier liegt der Fall eines **Bedeckungsveränderlichen** vor, wo die kompakte Röntgenquelle (der Neutronenstern) für 0.24 Tage bedeckt wird und somit keine Röntgenstrahlung detektierbar ist.

Wie bei Cir X-1 ist die Entfernung etwa 6.1 kpc.

5.10 Sagittarius A*

Hinter dieser Bezeichnung verbirgt sich die hellste Radioquelle im **Galaktischen Zentrum**, also im Zentrum der Milchstraße, die mit dem dynamischen Zentrum zusammenfällt. Blickt man an den Nachthimmel, so erkennt man das Band der Milchstraße, das auch durch das Sternbild Schütze (*Sagittarius*) verläuft: Hier ist das Zentrum unserer Heimatgalaxie in einer Entfernung von 8.5 kpc oder 26 000 Lj.

Sgr A* ist der **nächste Kandidat für ein supermassereiches Schwarzes Loch!** Die Masse dieses riesigen Schwarzen Lochs wird aktuell zu etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen beziffert (*Eisenhauer et al. 2005; Ghez et al. 2005*).

Die Astronomen können das Schwarze Loch natürlich nicht direkt sehen, aber seine Masse kann man ähnlich bestimmen, wie die Masse der Sonne, wenn man die Parameter der umlaufenden Planeten beobachtet: Astronomen untersuchen im Galaktischen Zentrum die Bewegungen von Sternen in unmittelbarer Nachbarschaft von Sgr A* im Infrarot-Band. Sie 'tanzten' - gezwungen durch die gekrümmte Raumzeit - in schnellen Bewegungen um das Schwarze Loch. Die Kepler-Gesetze verraten dann die Masse.

Die Größe des Schwarzen Loches ist (für ein Schwarzes Loch) enorm: Der **Schwarzschildradius**, also der Radius des Ereignishorizontes eines nichtrotierenden Schwarzen Loches, beträgt knapp 10.6 Millionen km, was 15.3 Sonnenradien oder etwa 1700 Erdradien entspricht. Bei einem maximal rotierendem Loch vom Kerr-Typus hätte es einen halb so großen Horizontradius.

Sollte die Milchstraße einmal einen Aktiven Galaktischen Kern gehabt haben, so passt diese Massendomäne bestens zu den *Seyfertgalaxien*.

Es gibt im Wissensportal eine sehr detaillierte Darstellung des Galaktischen supermassereichen Schwarzen Loches.

5.11 M15

M15 ist ein **Kugelsternhaufen** in der Milchstraße und befindet sich in einer Entfernung von 32000 Lj oder 9.8 kpc im galaktischen Halo. Kugelsternhaufen sind die ältesten Objekte in einer Spiralgalaxie und umkreisen die galaktische Scheibe in einer sphäroiden Region. Aufgrund ihres Alters dienen sie auch der Altersbestimmung einer Galaxie.

Kugelsternhaufen sind Sternansammlungen von etwa 10^4 bis 10^7 Sternen, deren Konzentration deutlich zum Zentrum des Haufens hin zunimmt. Damit unterscheiden sie sich morphologisch deutlich von offenen Sternhaufen (wie den Plejaden, Hyaden oder h/χ Persei), die eher einen lockeren Verbund mit gemeinsamen Konvergenzpunkt bilden. Aufgrund der damit verbundenen Helligkeitszunahme zum Zentrum hin und der resultierenden kugeligen Gestalt, haben die Kugelsternhaufen diesen Namen bekommen.

M15 ist schon lange bekannt, wie die Messier-Katalogbezeichnung verrät. Er erscheint von uns aus gesehen im nördlichen Sternbild *Pegasus*. Neben weiteren Objekten ist dieser Kugelsternhaufen nun ein heißer Kandidat für die Beherbergung eines **massereichen Schwarzen Loches** im Innern! Die Masse dieses zentralen, dunklen Objekts kann kinematisch aus Sternbewegungen abgeleitet werden. Auf analoge Weise kann man im Sonnensystem die Masse der Sonne aus Planetenbewegungen bestimmen. Die abgeleitete Masse beträgt für das massereiche Schwarze Loch in M15 etwa 4000 Sonnenmassen (*van Der Marel et al. 2002*). Neue Untersuchungen korrigieren diesen Wert nach unten zu 3400 Sonnenmassen innerhalb der innersten 0.05 pc (*van den Bosch et al. 2005*). Dieses vermutete Schwarze Loch würde die lange vorhandene Massenlücke zwischen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern schließen. Massereiche Schwarze Löcher sind vor allem auch deshalb so attraktiv, weil sie durch Verschmelzungsprozesse die Entstehung der supermassereichen Schwarzen Löcher erklären könnten.

Alternativ zum Schwarzen Loch können für den recht dichten Haufen M15 viele Neutronensterne oder andere kompakte Objekte im Zentrum angenommen werden, aber die Beobachtungen häufen sich, dass massereiche Schwarze Löcher Normalität in vielen Kugelsternhaufen und kleineren Galaxien sind (siehe auch G1, M82, POX 52, NGC 4395).

Quellen

- ◊ *van Der Marel et al. 2002*, astro-ph/0209314
- ◊ *van Der Marel et al. 2002*, astro-ph/0209315
- ◊ *van den Bosch et al. 2005*, astro-ph/0512503

5.12 Cygnus X-3

Diese Quelle wurde 1967 entdeckt (*Giacconi et al.*) und ist ein so genannter **Mikroquasar**, ein Binärsystem, bestehend aus einem kompakten Objekt und einem sehr massereichen Stern. Dieser Stern gibt einen Wind ab, wie man im I- und K-Band beobachten kann. Deshalb vermutet man einen so genannten Wolf-Rayet Stern als Wirt für das kompakte Objekt (*van Kerkwijk et al. 1992*).

Die Entfernung liegt bei etwa 10 kpc (33000 Lj). Die beiden Komponenten umkreisen sich mit einer Periode von 4.8 Stunden, was an der Modulation des Flusses (Bedeckung) im Infrarot- und Röntgenbereich belegt werden kann, wenn die kompakte Komponente vom Wirtsstern bedeckt wird (*Parsignault et al. 1972* und *Mason et al. 1986*). Cyg X-3 ist sogar eine TeV-Quelle.

Optisch ist diese Quelle unsichtbar, weil das Licht über Extinktion in der Galaktischen Ebene stark abgeschwächt wird. Außerdem konnte mit Radiobeobachtungen (VLBA) ein gekrümmter, einseitiger **Jet** im System von Cyg X-3 nachgewiesen werden, der sich mit relativistischen Geschwindigkeiten von 0.8c bewegt (*Mioduszewski et al. 1998, 2001* und *Marti et al. 2001, 2006*). Die Inklination des Jets wurde mit einem Winkel kleiner als 14 Grad abgeleitet. Der Jet emittiert auch im Radiowellenlängenbereich Synchrotronstrahlung, die vor allem von den Elektronen im Jetplasma stammt. Bei 15 GHz beträgt der Fluss 10,5 Jy (1 Jy = 10^{-26} Wm $^{-2}$ Hz $^{-1}$, benannt nach dem Radioastronomen *Karl Guthe Jansky*, 1905 - 1950).

Die Natur des kompakten Objektes ist strittig: Es gibt Modelle, die einen Neutronenstern (etwa eine Sonnenmasse) favorisieren, der die Materie des Wolf-Rayet Sterns (etwa 15 Sonnenmassen schwer) mit 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr akkretiert (*Heuvel & de Loore 1973*). Andere erwägen, dass aus einem Vorläufersystem aus zwei Sternen mit 50 und 10 Sonnenmassen schließlich ein Schwarzes Loch entstand, das die Materie eines Wolf-Rayet Sterns akkretiert (*Vanbeveren et al. 1998*). *McCollough (1999)* schätzte die Masse des WR-Sterns zu 2.5 Sonnenmassen ab.

weitere Quelle

- ◊ *Koch-Miramond et al. 2002*, astro-ph/0207466

5.13 GRS 1915+105

Auch bei diesem Objekt handelt es sich um einen **Mikroquasar**, also einem kompakten Objekt, das die Masse eines massereichen Wirtssterns akkretiert. In diesem speziellen Fall handelt es sich außerdem um ein stellares bzw. Galaktisches Schwarzes Loch (engl. *Galactic Black Hole*, kurz **GBH**), weil man sich sehr sicher ist, dass das kompakte Objekt ein stellares Schwarzes Loch mit 14 ± 4 Sonnenmassen ist. Die Entfernung von der Erde mit etwa 11 kpc ist recht hoch (*Zdziarski et al. 2005*), aber es gab auch die Behauptung, dass sie mit 6.5 kpc viel kleiner wäre (*Kaiser et al. 2004*).

Als Mikroquasar besitzt diese Quelle per definitionem einen Jet, also Plasma, das aus dem innersten Bereich, wo das kompakte Objekt sitzt, ausgeworfen wird. Im Unterschied zu den kontinuierlichen, extragalaktischen Jets der Quasare, die Plasmastrahlen sind, die von supermassereichen, rotierenden Schwarzen Löchern und Winden der Akkretionsscheiben stammen, sind die Ejekta eines Mikroquasars eher 'Blobs', also eher diskontinuierliche Auswürfe. Die Achse dieses Jets ist im Falle von GRS 1915+105 ist der Jet stark geneigt (70

Grad Inklination) und zeigt damit eher vom irdischen Beobachter weg. Die Geschwindigkeiten des Jets sind mit 92% Lichtgeschwindigkeit relativistisch hoch.

McHardy et al. (Nature 2006) bestimmten die Akkretionsrate aus Röntgendifferenzdaten. GRS 1915 wechselt zwischen radiolauten und radioleisen (Typ-1) Zuständen.

weitere Quelle

- ◊ *Mirabel & Rodriguez, 1994*)

5.14 G1

Der Kugelsternhaufen G1 befindet sich im Halo der Spiralgalaxie Andromeda. G1 und sein 'galaktischer Kollege', der Kugelsternhaufen M15 in der Milchstraße wurden etwa zur gleichen Zeit dem Weltraumteleskop Hubble (HST) beobachtet (*Rich et al.* 2002).

Beide Kugelsternhaufen (engl. *globular clusters*) sind neben einem jungen Sternhaufen in der Galaxie M82 und den beiden Zwerggalaxien POX 52 und NGC 4395 die derzeit besten **Kandidaten für mittelschwere Schwarze Löcher** (*intermediate-mass black holes, IMBHs*). Sollte sie wirklich existieren, wäre die bislang beobachtete Massenlücke zwischen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern Geschichte. Die massereichen Schwarzen Löcher weisen nämlich gerade Massen zwischen einigen 100 und 10000 Sonnenmassen auf. Das macht diese Entdeckungen so außerordentlich attraktiv.

G1 ist als extragalaktisches Objekt einiges weiter entfernt als M15. Er umkreist im galaktischen Halo der Andromedagalaxie deren Zentrum in etwa 170000 Lj Entfernung. Damit ist er von der Erde 720 kpc entfernt. Der gesamte Kugelsternhaufen hat eine Masse von 10^7 Sonnenmassen und ist damit der massereichste überhaupt bekannte Kugelsternhaufen. Er besitzt etwa 300000 Sterne. Außerdem ist er auch mit einer scheinbaren Helligkeit von $m_V = 13.72^{mag}$ der hellste Kugelsternhaufen der lokalen Gruppe. Die abgeleitete Zentralmasse aus der Sternbewegung um das Zentrum (Geschwindigkeitsdispersionskurven) beträgt 20000 Sonnenmassen (*Rich et al.* 2002) und wurde nun zu einem genaueren Wert von etwa 17000 bis 18000 Sonnenmassen korrigiert (*Gebhardt et al.* 2005). Die Erklärung, dass die Zentralmasse ein Schwarzes Loch ist, ist bei G1 wahrscheinlicher als bei M15, weil er weniger konzentriert/dicht zum Zentrum hin ist. Damit scheidet zumindest die Alternativerklärung mit einer Ansammlung vieler Neutronensterne im Zentrum eher aus.

Allerdings wird aktuell diskutiert, ob ein Röntgendoppelstern (ein so genannter *low-mass X-ray binary*, LMXB) als Alternative zum IMBH in Frage kommt: Eine aktuelle Beobachtung mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM zeigte eine helle Quelle mit einer Röntgenleuchtkraft von 10^{36} erg/s. Diese Beobachtung kann so interpretiert werden, dass entweder ein IMBH akkretiert oder dass hier ein gewöhnlicher LMXB in Erscheinung tritt (*Pooley & Rappaport* 2006). Klarheit über die Natur der Quelle werden nur weitere Beobachtungen - am besten mit hoher räumlicher Auflösung - verschaffen.

Quellen

- ◊ *Rich et al.* 2002
- ◊ *Gebhardt et al.*: An Intermediate-Mass Black Hole in the Globular Cluster G1: Improved Significance from New Keck and Hubble Space Telescope Observations, ApJ **634**, 1093, 2005

5.15 M82

- ◊ Pooley & Rappaport: X-rays from the Globular Cluster G1: Intermediate Mass Black Hole or Low Mass X-ray Binary?, ApJ **644**, L45, 2006

5.15 M82

Das erste Indiz für die Existenz **mittelschwerer Schwarzer Löcher** (engl. *intermediate-mass black holes, IMBHs*; früher auch *mid-mass black holes*) gab es bei diesem Objekt des Messier-Katalogs M82. Als gut etablierte Massentypen in der Astrophysik gelten die stellaren und die supermassereichen Schwarze Löcher. Die nun vermuteten mittelschweren Schwarzen Löcher würden die auffällige Lücke (*mass gap*) in der Massenverteilung Schwarzer Löcher füllen. Seit dem Jahr 2000 und diesem Präzedenzfall M82 häufen sich die Entdeckungen von IMBHs (siehe auch Kugelsternhaufen M15 und G1 sowie Zwerggalaxien POX 52 und NGC 4395).

Innerhalb der **Starburstgalaxie M82**, die von der Erde 11 Millionen Lichtjahre entfernt ist, haben Astronomen den jungen Sternhaufen MGG 11 entdeckt. Er ist etwa 600 Lichtjahre vom Galaxiezentrums entfernt. Im Zentrum des Sternhaufens vermuten die Astronomen ein **Schwarzes Loch mit etwa 350 Sonnenmassen**. Es hätte gemäß der Definition des Schwarzschildradius etwa die halbe Größe des Mondes - entsprechend schwierig gestaltet sich der klare Nachweis des winzigen Loches.

Die Röntgenbeobachtungen von Chandra zeigten eine helle Punktquelle (*Matsumoto et al. 2001*), die mit optischen, Radio- und Infrarotdaten verglichen wurde. Die Röntgenemission ist zeitlich variabel und ähnelt sehr den Variabilitäten bei akkretierenden, stellaren Schwarzen Löchern. Daher ist der Schluss auf ein mittelschweres Schwarzes Loch die bislang einzige, plausible Erklärung. Ähnlich wie die stellaren Schwarzen Löcher soll dieses Loch aus dem Gravitationskollaps eines Supersterns entstanden sein. Es ist inzwischen gelungen, die Entstehung des IMBHs auch theoretisch zu modellieren: Simulationen auf Hochleistungsrechnern bestätigen, dass sich in MGG 11 ein mittelschweres Schwarzes Loch durch Sternkollisionen gebildet haben kann (*Zwart et al. 2004*).

Quellen

- ◊ Pressemitteilung 09/2002: *Chandra Clinches Case for Missing Link Black Hole* auf der Chandra Website
- ◊ *Matsumoto et al.*: Discovery of a Luminous, Variable, Off-Center Source in the Nucleus of M82 with the Chandra High-Resolution Camera, ApJ **547**, L25, 2001
- ◊ *Zwart et al.*: Formation of massive black holes through runaway collisions in dense young star clusters, Nature **428**, 724, 2004

5.16 NGC 4395

NGC 4395 befindet sich im Sternbild *Canes Venatici* (dt. *Jagdhunde*) und ist zusammen mit der elliptischen Zwerggalaxie POX 52 die einzige bisher bekannte Zwerggalaxie, die einen AGN enthält (in beiden Fällen vom Seyfert-Typ). NGC 4395 ist mit einer Entfernung von oder 8.5 Mio. Lichtjahren oder 4.2 Mpc relativ nahe (die oft zu lesende Entfernungsangabe von 2.6 Mpc nach *Rowan-Robinson, 1985* ist veraltet), sogar die nächste Seyfertgalaxie überhaupt. Morphologisch gesehen fehlt bei NGC 4395 der Bulge, sie hat lediglich eine galaktische Scheibenkomponente. Es handelt sich um eine Spiralgalaxie vom Typ Sd III-IV.

5.17 NGC 4258

Die Masse des zentralen massereichen Schwarzen Löches wurde zu 10^4 bis 10^5 Sonnenmassen (*Shih et al.*, 2003), maximal jedoch zu 6.2×10^6 Sonnenmassen (*Filippenko & Ho*, 2003) abgeschätzt. Das Spektrum besteht aus hoch angeregten Emissionslinien. Breite Wasserstoff- und Heliumlinien legen daher eine Seyfertgalaxie vom Typ 1 nahe. Die radiale Geschwindigkeitsdispersion beobachteter stellarer Absorptionslinien dient der Bestimmung der Virialmasse, also einer oberen Massengrenze für den zentralen Sternhaufen oder der zentralen Sternenansammlung plus massereichem Schwarzen Loch. HST-Messungen liefern hier eine Virialmasse von 6.2×10^6 Sonnenmassen. Unterschiedliche Methoden liefern verschiedene Virialmassen, wie auch 1.2×10^5 (H-beta) oder 1.3×10^4 Sonnenmassen (anderer Radius für BLR).

Diese Beobachtung legt die Hypothese nahe, das sämtliche Zwerggalaxien zentrale massereiche Schwarze Löcher unterhalb von etwa 10^6 Sonnenmassen enthalten könnten.

Quellen

- ◊ *Shih et al.*, 2003, astro-ph/0302108
- ◊ *Filippenko et al.*, 2003, astro-ph/0303429

5.17 NGC 4258

Dieses Objekt (Messierbezeichnung M106) ist eine **Seyfertgalaxie** vom Typ 1.9 (also hohe Inklination) und daher ein Aktiver Galaktischer Kern (AGN). Die Entfernung ist mit 7.2 Mpc recht hoch (*Herrnstein et al.* 1999). Die Masse kann mit der Linienemission eines Wassermasers für das rotierende Gas modelliert werden und beträgt 36 Millionen Sonnenmassen innerhalb des Kerngebietes von 0.13 pc. Dies spricht demnach für ein **supermassreiches Schwarzes Loch**, dessen umkreisende Akkretionsscheibe hoch inkliniert ist (etwa 83 Grad, daher fast Typ 2).

Beobachtungen mit dem Röntgensatellit *ASCA* konnten die Existenz der heißen Eisenlinie bei etwa 6.4 keV belegen. *XMM-Newton*, ebenfalls ein Röntgensatellit, senkte die Breite der Eisenlinie ab. Das Röntgenobservatorium *Chandra* konnte zeigen, dass die harte Röntgenquelle mit dem Radiokern zusammenfällt.

Quelle

- ◊ *Pietsch & Read*, 2002, astro-ph/0201267

5.18 M87

M87 (oder auch NGC 4486, 3C 274, Virgo A) ist eine sehr gut untersuchte, riesige, elliptische Galaxie (Hubbletyp E1) im Sternbild *Virgo* (dt. Jungfrau) und Zentrum des Virgo-Haufens, einem Supergalaxienhaufen. Ihr Abstand von der Erde beträgt 16 Mpc oder 52 Mio. Lichtjahre oder eine kosmologische Rotverschiebung von $z \sim 0.004$ (*Tonry et al.* 1991).

M87 war der erste gute Kandidat für ein supermassreiches Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie. Dies legten Beobachtungen des Weltraumteleskops Hubble 1994 nahe. Es handelt sich bei dem Schwarzen Loch um einen Giganten seiner Gattung: es wiegt 2 Mrd. Sonnenmassen!

Sehr auffällig im optischen Wellenlängenbereich ist der Jet dieser Quelle. Er wird gemäß des Paradigmas für aktive Galaxien direkt im Zentrum am Schwarzen Loch erzeugt. Dann

5.19 POX 52

propagiert der Jet auf die große Längenskala und übersteigt in der Länge sogar die Galaxie, in der er entstanden ist. Optisch (HST-Aufnahme) hat der Jet eine Länge von etwa 1.5 kpc bzw. 5000 Lichtjahren, im Radiobereich (VLA-Bilder) sogar etwa 30 kpc bzw. 100 000 Lichtjahre. Der Jet bewegt sich relativistisch schnell mit Geschwindigkeiten von 4 bis 6c. Dieser Effekt der **Überlichtgeschwindigkeit** (engl. *superluminal motion*) ist ein *scheinbarer* Effekt, der auftritt, wenn der Jet fast genau auf den Beobachter zeigt. Der Jet reicht bis nahe an die zentrale Maschine heran: 0.01 pc oder 60 Schwarzschildradien konnten im IR gemessen werden.

Aufgrund des Alters dieser Galaxie hat sie viel von ihrem Gas verloren. Es wurde u. a. auf das zentrale, supermassereiche Schwarze Loch akkretiert. Die Akkretionsrate kann mit der Prämisse sphärisch symmetrischer Bondi-Akkretion zu 0.1 Sonnenmassen pro Jahr abgeleitet werden. Die Masse des Schwarzen Loches ist mit 3 Milliarden Sonnenmassen enorm hoch (*Macchetto et al. 1997*).

Die **nukleare Scheibe** von M87 rotiert größtenteils Keplersch, jedoch im innersten Bereich unterhalb von 20 pc, können **nicht-Keplersche Komponenten** mit der Sauerstofflinie OIII nachgewiesen werden. In dieser Region ist sie stark blauverschoben, ein Effekt, der im Englischen *Beaming* genannt wird.

5.19 POX 52

POX 52 ist eine elliptische Zwerggalaxie in einer Entfernung von 303 Mio. Lj oder 93.0 Mpc ($H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$). Das Besondere an ihr ist ihr aktiver Kern, so dass man sie zu den AGN zählen kann. Zunächst klassifizierte man sie als Seyfertgalaxie Typ 2 (*Kunth et al., 1987*), also einer Galaxie mit hoher Inklination der inneren Galaxienscheibe; später konnte man mit neuen Daten dies zu einer Seyfertgalaxie Typ 1 korrigieren, weil man ähnliche Emissionslinien wie beim Seyfertzweig Typ 1 NGC 4395 feststellte. Bisher ist POX 52 das einzige Beispiel einer Zwerpellipse mit Seyfert-AGN.

Man hat nun aus den stellaren Geschwindigkeitsdispersionen, also Sternbewegungen um den Galaxienkern, eine Zentralmasse ableiten können. Die stellare Geschwindigkeitsdispersion (Sigma) beträgt etwa 36 km/s. Wasserstofflinien ($H\beta$) dienen dazu, um Skalenrelationen aus Masse, Leuchtkraft und Linienbreite zu definieren. Die resultierende außerordentlich große Masse von 1.6×10^5 Sonnenmassen in einem kleinen Raumgebiet legt ein **massreiches Schwarzes Loch** (*intermediate mass black hole*) nahe, das POX 52 beherbergt. Mit dieser Masse liegt das mutmaßliche Schwarze Loch an der unteren Grenze für supermassereiche Schwarze Löcher und etwa eine Größenordnung oberhalb von massereichen Schwarzen Löchern, die man in Kugelsternhaufen vermutet (siehe M15 und G1).

Diese Beobachtung legt die Hypothese nahe, das sämtliche Zwerggalaxien zentrale massereiche Schwarze Löcher unterhalb von etwa 10^6 Sonnenmassen haben.

Quellen

- ◊ *Barth et al. 2003*, astro-ph/0310435
- ◊ *Barth et al. 2004*, astro-ph/0402110

5.20 Cygnus A

Cygnus A ($z = 0.056$) ist eine sehr aktive Radiogalaxie und befindet sich in einer Entfernung von 760 Mio. Lj oder 233.2 Mpc ($H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Sie zeigt sehr deutlich **zwei Radio-**

5.21 CXO 0312 Fiore P3

Jets, die sie als klassische **doppelte Radioquelle** (engl. *double radio source*) spezifizieren. Cyg A ist trotz der hohen Entfernung eine der hellsten Radioquellen am Himmel. Der Hubble-Typ der 1952 von *W. Baade* und *R. Minkowski* entdeckten Galaxie ist elliptisch. Sie weist wie viele Radiogalaxien eine ähnliche Morphologie wie radiolaute Quasare auf. Bezuglich der Fanaroff-Riley-Klassifikation ist Cyg A der **FR II Archetypus**, d. h. die Hot Spots stehen in großer Distanz zum Core, und es zeigen sich ausgeprägte Radiolobes.

Die Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum von Cyg A beträgt etwa 2.5 Mrd. Sonnenmassen. Nahe am Kern misst man spektroskopisch eine turbulente Verbreiterung von Emissionslinien. Die bolometrische Leuchtkraft wurde zu 10^{46} erg/s bestimmt und setzt die aktive Radiogalaxie damit an das untere Ende der Quasarleuchtkräfte.

Von der Jetachse nimmt man wie üblich beim AGN-Paradigma an, dass die mit der Rotationsachse des supermassereichen Schwarzen Loches übereinstimmt. Die Messungen im Radiobereich und im Optischen legen eine Inkarnation zwischen 50 und 90 Grad nahe. Die Jetgeschwindigkeiten sind relativistisch und betragen etwa 0.5c.

Quellen

- ◊ *Tadhunter et al. 2003*, astro-ph/0302513
- ◊ *Bach et al. 2003*, astro-ph/0309403

5.21 CXO 0312 Fiore P3

Dieses am weitesten entfernte Objekt (Katalogbezeichnung CXOU J031238.9-765134) in meiner Übersicht ist vermutlich ein **Quasar** oder ein **BL Lac Objekt**, in jedem Fall also ein Aktiver Galaktischer Kern (AGN). Die Rotverschiebung wurde zu $z = 0.158$ bestimmt, entsprechend einer Entfernung von 2.5 Milliarden Lichtjahren. Optisch erscheint es als normale Galaxie, im Licht der Röntgenstrahlung ist es aber äußerst hell, etwa einen Faktor 30 heller als übliche elliptische oder Spiralgalaxien.

Die Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum von CXO 0312 kann als obere Grenze aus der Blauhelligkeit des Galaxienbulges abgeschätzt werden (*Magorrian et al., 1998*): **400 Mio. Sonnenmassen**. Die Bezeichnung CXO bedeutet dabei *Chandra X-ray Observatory* und verät, dass diese starke Röntgenquelle im Sternbild *Hydrus* von **Chandra** entdeckt wurde (im September 1999). *Fiore* geht auf den italienischen Astronom *Fabrizio Fiore* zurück, der mit seinem Team das Objekt entdeckte.

Quelle

- ◊ *Fiore et al., 2000*, astro-ph/0003273

6 Buchtipp

- ◊ M. Camenzind: **Compact Objects in Astrophysics. White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes**, Springer Berlin, 2007

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04