Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 32 (1974)
Heft: 143

Artikel: Neutronensterne und Schwarze Löcher in der Röntgenastronomie
Autor: Weiss, W.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899658

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les amateurs de science ont encore un autre rôle à remplir. Notre civilisation est de caractère technique, donc scientifique. Dans une communauté, une proportion notable d'amateurs avertis est une vraie richesse. Non seulement leur attitude combat l'influence des charlatans, mais elle apporte un soutien utile à ceux qui sont aux responsabilités.

Adresse de l'auteur:
Prof. Dr P. Rossier, Route de Jussy 14a, CH-1226 Moillesulaz.

Neutronensterne und Schwarze Löcher in der Röntgenastronomie

von W. Weiss, Wien

Wenn ein Wissenschaftshistoriker im nächsten Jahrhundert eine Geschichte der astronomischen Forschung schreiben sollte, wird er wahrscheinlich unsere Jahrhundertmitte als Beginn jener Entwicklungsphase würdigen, in der die Astronomie mit Hilfe der modernen Elektronik und Satellitentechnik ihre Jahrtausend alten Fesseln gesprengt und über den optischen Bereich hinausgehend nahezu das gesamte Spektrum elektromagnetischer Wellen erobert hat.

Um astronomische Beobachtungen in Spektralbereichen ausserhalb des Sichtbaren anstellen zu können, war es notwendig, zunächst einmal Empfänger zu entwickeln, welche für die beiden anderen «Fenster» unserer Atmosphäre sensibel sind. Die Abb. 1 zeigt, in welchen Wellenlängenbereichen unsere Atmosphäre durchsichtig ist. Eingetragen wurde dabei schematisch jene Höhe über dem Erdboden, in welcher die Strahlung entsprechender Wellenlänge auf die Hälfte abgeschwächt wird. Markant fällt dabei das sogenannte «Radiofenster» (R) auf, zwischen etwa 1 cm und 30 m. Strahlung noch grösserer Wellenlänge wird durch elektrisch leitende Schichten in 80 bis 500 km Höhe reflektiert und gelangt so nicht bis auf die Erdoberfläche, während die kurzwelligere Strahlung u. a. vom Wasserdampf in der Luft absorbiert wird. Dieser Wasserdampf ist jedoch in manchen Wellenlängenintervallen zwischen 4,5 μ und 11 μ im sogenannten «Infrarot-Fenster» (I) durchsichtig und schliesslich noch einmal zwischen etwa 8000 Å und 3500 Å Wellenlänge (0), dem «optischen Fenster». (1 μ = 0,001 mm, 1 Å = 0,0000001 mm). Strahlung noch kürzerer Wellenlänge vermag bereits Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle zu ionisieren und wird bei diesem Prozess absorbiert. Dabei werden auch jene elektrisch geladenen Teilchen erzeugt, welche das langwellige Ende des Radiofensters bestimmen. Von diesen drei Fenstern abgesehen, ist unsere Atmosphäre undurchsichtig. So segensreich diese Schirmfunktion unserer Erdatmosphäre für die Entwicklung des menschlichen Lebens auch war – unter dem Einfluss der Röntgen- und Gammastrahlung z. B. wären wir schon längst den Strahlungstod gestorben – so sehr hat sie die astronomische Forschung behindert.

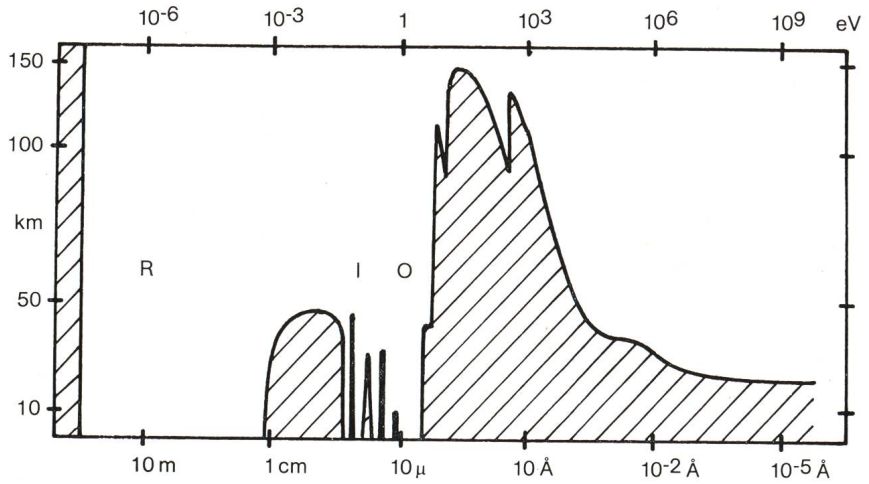

Abb. 1: Spektrale Durchlässikgeit der Erdatmosphäre. Vom Weltraum einfallende Strahlung kann die Erdoberfläche ungeschwächt nur im Radiofenster (R), in den Infrarotfenstern (I) und im optischen Fenster (O) erreichen. Die Grenzkurve der schraffierten Fläche gibt die Höhe in km über dem Erdboden an, in welcher die Strahlung auf die Hälfte geschwächt wird.

Als Ausweg bleibt nur die Beobachtung von Stationen ausserhalb unserer Atmosphäre, und dabei haben sich gerade in den letzten Jahren eine Reihe aufregender, neuer Beobachtungsergebnisse eingestellt. Wenn eine Theorie von LANDAU (1932) und von OPPENHEIMER und SNYDER aus dem Jahre 1939 in der Schublade «Kuriosa» verschwand, so deshalb, weil sie sich mit hypothetischen Objekten befasste, welche als so massereich und dicht angenommen wurden, dass keine Masse – und auch kein Licht – diese Sterne je wieder verlassen könnte. Diese Objekte können daher keinerlei Strahlung aussenden, sie sind keiner direkten Beobachtung zugänglich und man nennt sie daher auch «Schwarze Löcher». Zum Glück scheinen aber solche Objekte in Doppelsternsystemen vorzukommen, sodass sie sich mit Hilfe der klassischen Himmelsmechanik nachweisen lassen. Solche Doppelsterne verraten sich aber primär durch eine ungewöhnlich intensive Röntgenstrahlung. Ein weiteres Paradebeispiel für die Aufsehen erregenden Ergebnisse, welche in der nichtoptischen Astronomie gewonnen wurden, sind die «Neutronensterne», welche schon 1934 u. a. von ZWICKY theoretisch untersucht wurden. Einem Zufall ist die Entdeckung des ersten Neutronensternes als «Pulsar» CP 1919 im Jahre 1967 durch Radioastronomen der Universität Cambridge zu verdanken. Die Entdeckung von Pulsaren und Röntgen-Doppelsternen haben in den letzten wenigen Jahren zu einem gewaltigen Anstieg von theoretischen Arbeiten über die letzten Phasen von Sternentwicklungen geführt. Diese haben dabei mit einer Abhängigkeit von der Sternmasse zu einem erweiterten Verständnis der Zustände bei Weissen Zwergen und Objekten mit entarteter Materie als Endprodukt aus einem Gravitationskollaps, eben die Neutronensterne und die schwarzen Löcher, geführt haben.

Aber auch der Geburtsvorgang eines Sternes bei seiner Kondensation aus interstellarer Materie zum sogenannten «Protostern» rückte durch die Infrarotastronomie in den Bereich des Beobachtbaren, verraten sich doch solche «Sternsäuglinge» primär durch ihre Wärmestrahlung von einigen (100 °K). (K = KELVIN: Absolute Temperaturskala, wobei eine Temperatur unter 0 K prinzipiell nicht erreichbar ist. Diese Temperatur entspricht etwa —273° Celsius). Schliesslich hat uns die Radioastronomie mit den «Quasaren» Probleme gestellt, an denen wohl noch viele Theoretiker und Beobachter ihr Glück versuchen werden. Wie sollen auch diese sternähnlichen Objekte mit einer bis dahin noch nie gemessenen Dopplerverschiebung, welcher einer Fluchtgeschwindigkeit bis zu 80% der Lichtgeschwindigkeit entspricht, erklärt werden? – Bei einer Interpretation dieser Fluchtgeschwindigkeit mit Hilfe der HUBBLE-Konstante als Entfernung ergibt sich die völlig ungeklärte Frage, wieso überhaupt von diesen Objekten bei einer derart grossen Entfernung diese intensive Radiostrahlung empfangen werden kann.

Schliesslich hofft man aus über das gesamte elektromagnetische Spektrum verteilten Beobachtungen die Frage nach der Entwicklung und dem Ursprung unseres Kosmos beantworten zu können. Besonders die Röntgen- und Gammaastronomie vermag dabei über die Messung der allgemeinen Himmelshintergrundstrahlung zu helfen, wichtige Entscheidungen zu fällen.

Wenn diese Einleitung vielleicht etwas länger ausgefallen ist, dann deshalb, um zu zeigen, wie sehr sich unser Wissen über unseren Kosmos und damit auch die Anzahl offener Probleme vermehrt hat, seit die Beobachtungen im optischen Fenster nicht mehr die einzigen den Astronomen zugänglichen sind. Jeder dieser neuen Zweige der astronomischen Forschung: Die Radioastronomie, die Infrarotastronomie, die Satelliten-UV-Astronomie und die Röntgen- und Gammaastronomie, haben dabei ganz wesentliche Impulse geliefert.

Im folgenden wollen wir uns jedoch nur mit einigen Teilaspekten der Röntgenastronomie beschäftigen; hierzu sei auf einige fundamentale Zusammenhänge hingewiesen: In der Röntgenastronomie werden Spektralbereiche oft nicht nur in Wellenlängen angegeben, sondern durch Energien definiert. Dabei benützt man die folgenden Beziehungen:

$$e \cdot U = E = h\nu$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

e = Ladung eines Elektrons.
E = kinetische Energie E.
U = Zurückgelegte Potentialdifferenz, bei welcher das Elektron die kinetische Energie E erreicht
h = PLANCK'sches Wirkungsquantum (Naturkonstante)
ν = Frequenz
c = Lichtgeschwindigkeit
womit sich ergibt:

$$E = 12{,}34/\lambda$$

E: in 1000 Elektronenvolt (= 1 keV)
λ: in 10^{-8} cm (=1 Å)
Die Gleichwertigkeit der Bezifferung der Abszissenachse in Abb. 1 findet hier ihre Begründung.

In der Einleitung wurde bereits erwähnt, dass unsere Erdatmosphäre Röntgenstrahlung absorbiert, und zwar so, wie dies etwa eine 1 m dicke Bleiplatte in unseren Laboratorien ebenfalls tut. Doch von dieser Absorption abgesehen, erleidet diese Strahlung auch noch eine zusätzliche Schwächung durch das interstellare Medium, welches in Form von Gas und Staub in unserer Milchstrassenebene konzentriert ist (Abb. 2). Auch diese Absorption ist wellenlängenabhängig. Setzt man eine homogene Verteilung des interstellaren Gases voraus, erhält man für verschiedene Wellenlängen (bzw. Photonenenergien) jene Entfernungen von Röntgenquellen zur Erde, bei welcher die beobachteten Intensitäten auf 1/10 absinken. Somit kann durch die Beobachtung des spektralen Intensitätsverlaufes von einer Röntgenquelle aus der

Wellenlänge, bei der die beobachtete Intensität auf 1/10 des durch eine Extrapolation von höher energetischer Strahlung erwarteten Wertes gesunken ist, eine sehr rohe Abschätzung der Entfernung erfolgen. Die Kanten im Diagramm sind auf die bei der entsprechenden Energie einsetzende Ionisation interstellaren Sauerstoffs und Heliums zurückzuführen.

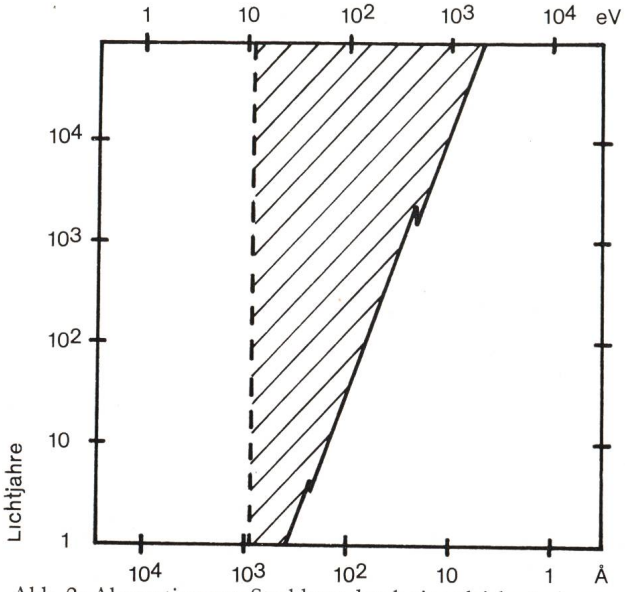

Abb. 2: Absorption von Strahlung durch eine gleichmässig verteilte interstellare Materie mit einer Dichte von 1 Atom/cm³. Die schräg verlaufende Grenzkurve gibt jene Entfernung von der Sonne in Lichtjahren an, in welcher die Strahlung auf 1/10 geschwächt wird.

Obwohl also die Absorption innerhalb unserer Milchstrassenebene beachtliche Werte erreichen kann (eine Erscheinung, welche auch aus der optischen Astronomie und der Radioastronomie sehr gut bekannt ist), gibt es dennoch so intensive Strahlungsquellen, dass diese auch aus der weiten Entfernung des galaktischen Zentrums beobachtbar bleiben, wie etwa die Quelle Cygnus X - 3, welche von uns etwa 30000 Lichtjahre entfernt sein dürfte. Dass zur Erklärung dieser Strahlungsmechanismen nicht mehr normale leuchtende Gaskugeln in Frage kommen, wie es für unsere Sterne der Normalfall ist, sondern physikalisch hochinteressante Objekte wie z. B. die schon erwähnten Neutronensterne, ist nicht verwunderlich. Wie aus der Abbildung 3 ersichtlich ist, nimmt nicht nur die ausgestrahlte Energie eines heissen Körpers mit zunehmender Temperatur zu (Fläche unter den Kurven), es verlagert sich auch die Wellenlänge, bei welcher dieser Körper die meiste Energie ausstrahlt, die sogenannte effektive Wellenlänge (λe in Å). Der Physiker W. WIEN hat für dieses Faktum den folgenden Zusammenhang gefunden:

$\lambda e \cdot T \sim 3.10^7$ cm · grad

Bedenkt man, dass bis 1940 als heisseste bekannte Sterne nur solche mit etwa 50000 K Oberflächentemperatur bekannt waren und bei den kühlsten Sternen etwa 3000 K gemessen wurden, und berücksichtigt man ferner den sehr steilen Intensitätsabfall zu kurzen Wellenlängen hin, so erklärt sich die Skepsis der Astronomen zu Beginn unseres Jahrhunderts, Sterne im Röntgen- bzw. Radiogebiet beobachten zu können. Erst durch die Entwicklung empfindlicherer Detektoren in der Satellitentechnik sowie durch glückliche Zufälle gelang es in der Mitte unseres Jahrhunderts, die ersten Strahlungsquellen ausserhalb des optischen Fensters zu beobachten – sieht man von unserer Sonne ab. Nahezu in jedem Fall zeigte sich, dass abnorme Vorgänge als Strahlungsmechanismen anzunehmen sind.

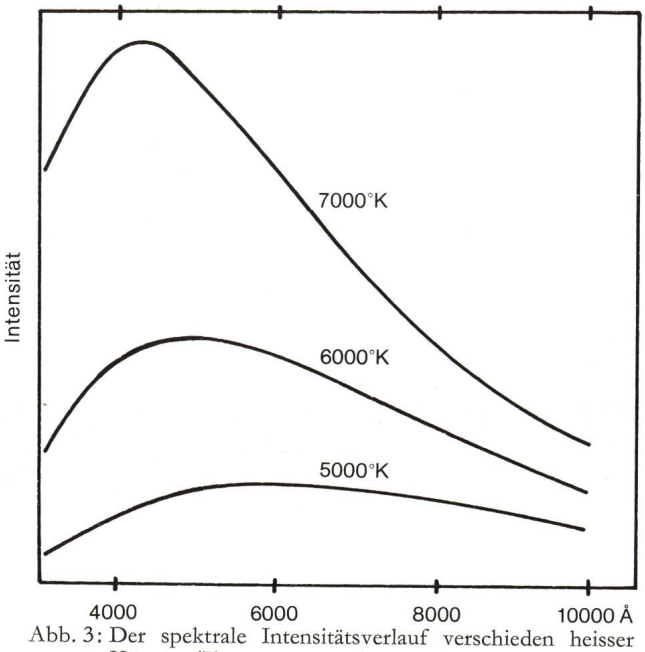

Abb. 3: Der spektrale Intensitätsverlauf verschieden heisser Körper (Temperaturangabe in °K), die nach dem PLANCK'schen Strahlungsgesetz leuchten.

Im folgenden Abschnitt sollen einige der etwa 80 in unserer Milchstrasse beobachteten Röntgenquellen behandelt werden. Einige der intensivsten Quellen zeigen eine starke, zeitlich konstante Absorption bei niederen Energien, sodass eine Entfernung von etwa 30000 LJ, unserem Abstand vom Milchstrassen-Zentrum entsprechend, angenommen werden muss. Aus dieser Entfernung leitet sich eine Röntgenleuchtkraft der Objekte in der Grössenordnung von 10^{38} erg/sec ab, was einer Leistung von etwa 8.10^{26} Watt entspricht! Die 17 hellsten Quellen, welche von dem bisher erfolgreichsten Röntgensatelliten, dem 1970 gestarteten UHURU, beobachtet wurden, liegen alle innerhalb eines Streifens von 40° Länge und 3° Breite um das galaktische Zentrum. Die anderen Röntgenquellen finden sich in den Spiralarmen mit einer mittleren Entfernung von etwa 6000 Lichtjahren.

Die meisten dieser Objekte werden als Röntgensterne beobachtet, welche im optischen Bereich meist sehr unscheinbar sind. Oft war ein erheblicher Suchaufwand mit den grössten Teleskopen notwendig, um solche Röntgensterne optisch identifizieren zu können. Bei den meisten war dies jetzt überhaupt noch nicht eindeutig möglich.

Diese Röntgenquellen unterscheiden sich von den nebeligen Überresten einer Supernovaeexplosion, wie wir dies z. B. beim Krebs-Nebel beobachten können, durch ihr sternartiges Äusseres und eine Röntgenleuchtkraft, welche jene im optischen Bereich weit übertrifft. Unsere Sonne strahlt z. B. im gesamten Bereich der elektromagnetischen Strahlung um mehrere Zehnerpotenzen weniger Energie ab, als diese Röntgensterne allein im Röntgenbereich. Weiter sind diese Objekte durch eine deutliche Kurzzeitvariabilität von unterschiedlichster Struktur charakterisiert. Für diesen Strahlungsmechanismus kommt ein bemerkenswerter Prozess in Frage: Fällt Gas auf einen Körper von überaus grosser Dichte, so wird dieses Gas sehr stark beschleunigt, sodass es nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht. Wenn dieses Gas nun durch die Strahlung des Sternes ionisiert ist, wird bei dieser beschleunigten Bewegung viel Energie abgestrahlt, welche wir z. B. in der Form von Röntgenstrahlung messen können. Ein Proton z. B. wird bei seinem Fall auf einen Neutronenstern so beschleunigt, als hätte es eine Potentialdifferenz von 10 Millionen Volt durchlaufen. Als solche überaus dichte Zentralkörper kommen daher primär Neutronensterne und Schwarze Löcher in Frage.

Nach unseren jetzigen Vorstellungen über die Sternentwicklung hängt die Endphase stark von der Ausgangsmasse bei der Kontraktionsphase des Sternes ab. Aber diese Verhältnisse sind noch nicht gesichert. Sterne mit einer Ausgangsmasse von weniger als 3,5 Sonnenmassen ($M_\odot$) entwickeln sich zu Weissen Zwergen mit einer Dichte bis zu etwa 10^8 g/cm³, wobei sie laufend weiter Masse verlieren und schliesslich weniger als 1,4 $M_\odot$ besitzen.

Bei einer Ausgangsmasse von 3,5 bis 10 $M_\odot$ kollabiert der Kern eines Sternes zu einem Neutronenstern von sehr hoher Dichte. Auslösendes Moment für diesen Kollaps ist der Umstand, dass der Elektronendruck in einem Stern einen kritischen Wert überschreitet und schliesslich ausreicht, dass Elektronen mit Protonen vereinigt werden und dabei Neutronen entstehen. Diese Neutronen können aber wesentlich dichter zusammengedrückt werden als normale Atomkerne, sodass der Kollaps erst sein Ende findet, wenn die gesamte Sternmasse zu einem Neutronenstern von bis zu 10^{17} g/cm³ Dichte und einigen 10 km Radius degeneriert. Bei diesem Prozess muss einmal das Drehmoment erhalten bleiben, sodass ein Stern von Sonnenmasse schliesslich als Neutronenstern von 10 km Radius mit einer Rotationsperiode von einigen Millisekunden (1 ms = 1/1000 Sekunde) rotiert. Andererseits muss das Magnetfeld von etwa 1 Gauss an der Sonnenoberfläche zu 10^{10} Gauss auf der Neutronensternoberfläche anwachsen. Die Energie, welche durch diesen Gravitationskollaps frei wird, übersteigt bei weitem die Atomkernbindungsenergie, sodass ein kompakt rotierender Neutronenstern mit einer kinetischen Rotationsenergie von mehr als 10^{50} erg weit mehr Energie zur Verfügung steht als unserem Vergleichsstern durch Kernverschmelzung. Als Begleiterscheinung bei dieser fundamentalen Umgestaltung einer Sternstruktur nimmt man einen Supernovaausbruch an. Tatsächlich wurde auch im Krebs-Nebel (Supernova vom Jahre 1054) als Supernova-Sternrest der Pulsar NP 0532 identifiziert mit einer Rotationsperiode von 33 ms. Als Folge dieser hohen Rotationsperiode und des hohen Magnetfeldes wirken diese Objekte ähnlich wie Teilchenbeschleuniger in unseren irdischen Laboratorien, nur sind wesentlich höhere Energien im Spiel.

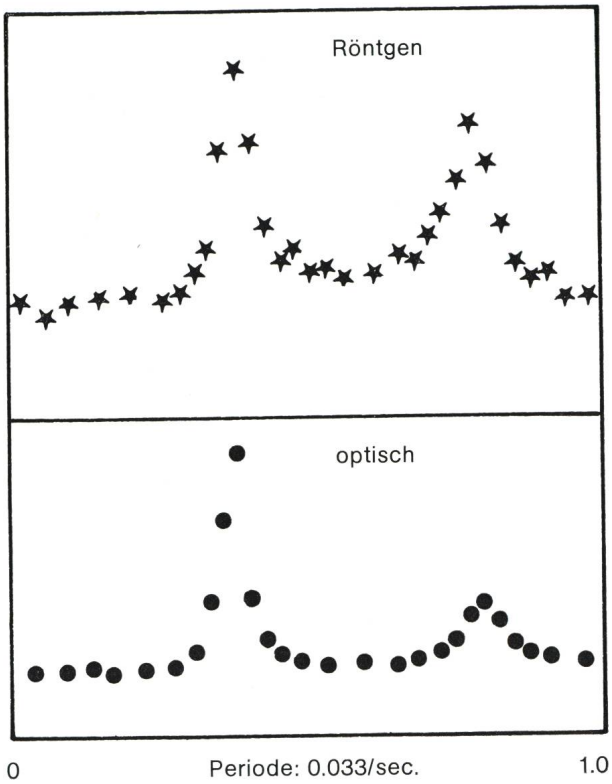

Abb. 4: Periodische Helligkeitsänderungen des Pulsars NPO 532 im RÖNTGENbereich und im optischen Bereich.

Die hohe Rotationsenergie von 10^{49} bis 10^{52} erg bei NP 0532 nimmt laufend (wenn natürlich auch sehr langsam) mit einer Rate von 10^{38} erg/sec ab, wobei die Rotationsperiode pro Jahr um 0,015 ms länger wird. Der Pulsar übertrifft dabei die Sonne um den Faktor 100000, was die Energieausstrahlung betrifft. Es war eine überzeugende Demonstration der modernen astronomischen Forschungsmethodik, dass inzwischen von diesem Objekt Intensitätskurven in einem Spektralbereich von Radiowellen bis zu Röntgenstrahlen gemessen wurden, welche alle einen ähnlichen Kurvenlauf zeigen (Abb. 4). Da die Rotationsachse nicht mit der Magnetfeldachse zusammenfällt, beobachtet man während eines Umlaufes einmal den Nord- und einmal den Südpol. Jedes Mal, wenn wir auf einen der Pulsar-Magnetpole blicken, registrieren wir einen Intensitätsanstieg, da geladene Gasmaterie primär entlang der Magnetfeldlinien in den Magnetpolgegenden auf den Stern aufprallt.

Obwohl bisher von den Radioastronomen etwa 70 Pulsare entdeckt wurden, hat man nur von neun Supernovaeresten Röntgenstrahlung empfangen. Es dürfte bei der gegenwärtigen Empfindlichkeit von Detektoren schwierig sein, den Röntgenstrahlenfluss von auskühlenden Neutronensternen gegenüber dem diffusen Hintergrund zu registrieren. Obwohl es wegen der etwa 10^{11} Sterne in unserem Milchstrassensystem viele Supernovaeüberreste geben dürfte, ist selbst die Anzahl der bekannten Pulsare anteilmässig viel zu klein. Die Rotation der alten Neutronensterne dürfte schon weitgehend abgeklungen sein und ein Nachweis dieser Sterne ist nur mehr durch die ausgedehnten Nebelreste oder möglicherweise einer thermischen Strahlung von der Sternoberfläche entsprechend dem PLANCK'schen Gesetz (siehe Abb. 3) möglich. Die Theorie ergibt eine Abkühlung an der Oberfläche innerhalb des ersten Jahres nach dem Gravitationskollaps auf etwa 10^6K, was zwar einerseits noch eine sehr hohe Temperatur darstellt, aber zusammen mit der sehr kleinen Oberfläche eine sehr kleine Leuchtkraft ergibt. Circinus X-1 kann möglicherweise als Kandidat für diese Entwicklung angesehen werden.

Der Strahlungsmechanismus, welcher in Zusammenhang mit superdichten Sternen das grösste Interesse beansprucht, wird hingegen – wie schon eingangs erwähnt – durch auf den Stern zufallendes Gas ausgelöst. Ein Proton (ein Elementarteilchen welches mit Neutronen Atomkerne aufbaut, etwa gleich schwer wie ein Neutron, positive, aber gleich grosse Ladung wie ein Elektron) kann dabei über 10 Millionen Elektronenvolt kinetischer Energie erreichen, welche beim Aufprall auf den Stern natürlich in Strahlungsenergie umgewandelt wird. Nimmt man an, dass pro Jahr auf einen Neutronenstern etwa 10^{-9} (ein Milliontel) der Sonnenmasse aufprallt, würde dieser dabei etwa 10^{36} erg/sec an Röntgenstrahlung aussenden. Bei einem weissen Zwerg ergeben 10^{-7} $M_\odot$ die gleiche Röntgenleuchtkraft.

Bedingt durch die geringe Dichte interstellaren Gases in unseren Spiralarmen könnte ein schwarzes Loch dort nur etwa 10^{-15} $M_\odot$/Jahr «aufsaugen», was eine Röntgenleuchtkraft von nur 10^{31} erg/sec liefern könnte. Die grossen Entfernungen und die interstellare Absorption lassen daher den Nachweis solcher isolierter entarteter Sterne vorläufig als unwahrscheinlich erscheinen. Bedenkt man aber, dass die Hauptkomponente bei einigen veränderlichen Doppelsternen, wie β Lyrae, pro Jahr etwa 10^{-5} $M_\odot$ auswerfen und nimmt man an, dass etwa die Hälfte davon auf den Begleiter regnet, erscheint es nachträglich nicht mehr verwunderlich, dass die hellsten galaktischen Röntgenquellen sich oft als Doppelsternsysteme entpuppen. Dabei kann dem Röntgenastronomen die Himmelsmechanik noch ein Kriterium für die Abschätzung der Massen der beiden Doppelsternkomponenten liefern.

Als Beispiel sollen hier die Überlegungen an Cygnus X - 3 gebracht werden. Dieses im Radio-, Infrarot- und Röntgenbereich sehr intensiv untersuchte Objekt zeigt die kürzeste bisher bei Röntgendoppelsternen beobachtete Umlaufperiode, nämlich von nur 4,8 Stunden. Es handelt sich dabei auch um den ersten bekannten Infrarot-Doppelstern variabler Helligkeit (Abb. 5). Mit einer Gesamtmasse des Systems von etwa 16 $M_\odot$ folgt auch schon, dass die beiden Sterne nur etwa einen Lichttag, also rund 150 astronomische Einheiten, von einander entfernt sind. Doppelsterne dieser Dimensionen sind auch deshalb so interessant, weil im Laufe ihrer Entwicklung Masse von einem Stern zum anderen strömen kann, wodurch ein Stern auf Kosten des anderen schrumpft bzw. wächst.

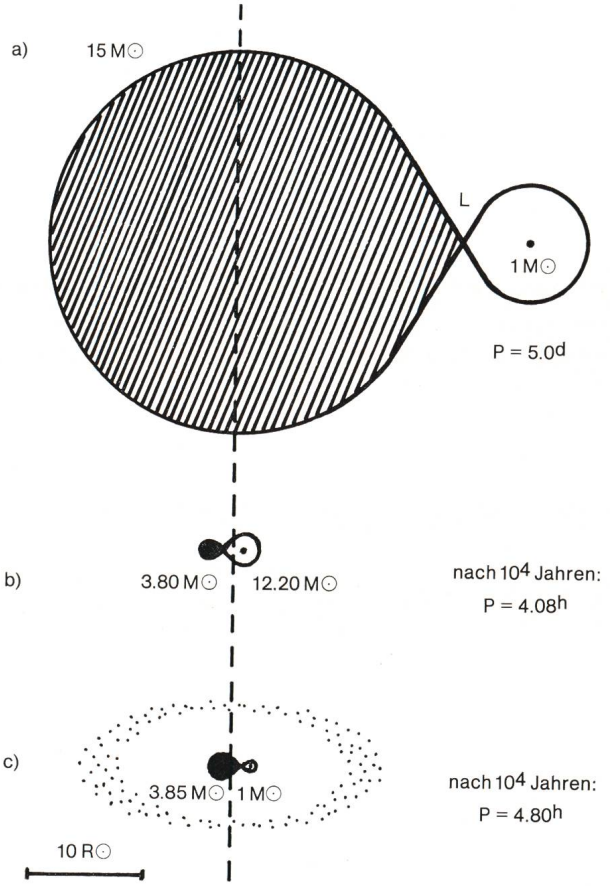

Abb. 5: Entwicklungsmodell für Cyg X-3:

a) Doppelsternsystem zu Beginn der betrachteten Entwicklung mit einem Neutronenstern von 1 $M_\odot$ als Begleiter eines Riesensterns von 15 $M_\odot$, dessen Oberfläche bis zur ROCHE'schen Grenze reicht, und bevor der Materiestrom über den LAGRANGE'schen Punkt (L) zum Neutronenstern erfolgt.

b) Ein möglicher Zustand des Systems nach 10.000 Jahren: Der Riesenstern ist zu einem Stern von 3.8 $M_\odot$ geschrumpft und der Neutronenstern hat sich zu einem «Schwarzen Loch» von 12.2 $M_\odot$ entwickelt.

c) Ein anderer möglicher Zustand des Systems nach 10.000 Jahren: Der Grossteil der vom Riesenstern abgeströmten Materie hat einen Gasring um den Neutronenstern von 1 $M_\odot$ und den Hauptstern von 3.85 $M_\odot$ gebildet.

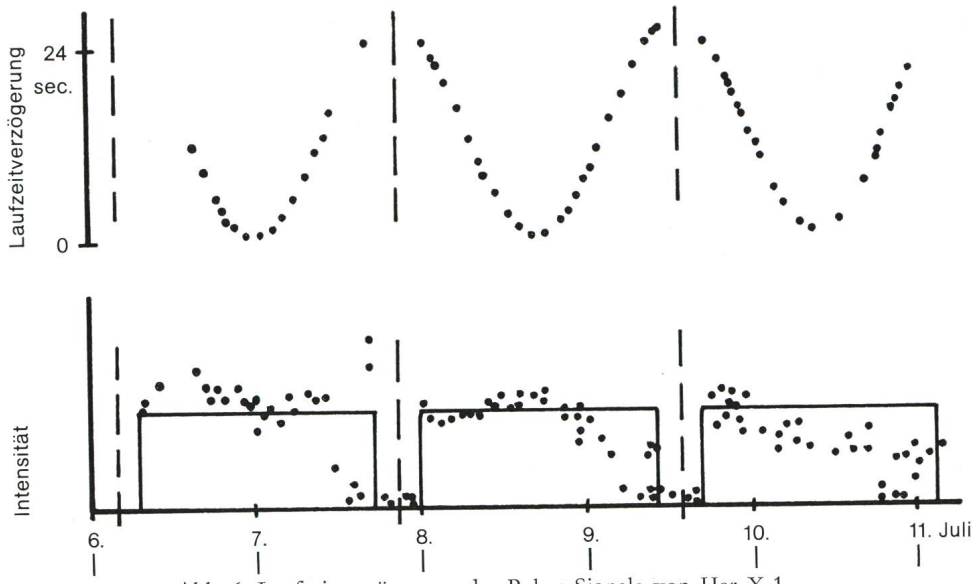

Abb. 6: Laufzeitverzögerung der Pulsar-Signale von Her X-1 und die Variation ihrer RÖNTGENintensität.

Eine wichtige Grenzfläche ist bei solchen Systemen die sogenannte ROCHE'sche Grenze, sie umfasst jene maximalen Volumina, in denen Masseteilchen noch eindeutig einem der beiden Sterne zuzuordnen sind. Normalerweise ist das Volumen von Doppelsternkomponenten wesentlich kleiner als das kritische. Doch kann es bei sogenannten halbgetrennten Systemen dazu kommen, dass ein Stern das kritische Volumen ausfüllt und ein Massestrom durch den sogenannten inneren LAGRANDE-Punkt L einsetzt (Abb. 5a). Im Fall von Cygnus X - 3 hat sich die massereichere Komponente rascher entwickelt, dabei Masse verloren und schliesslich ihre Endphase als Neutronenstern gefunden. Der Begleiter schliesslich entwickelte sich so lange, bis er das kritische Volumen ausfüllte. Zu diesem Zeitpunkt verteilten sich die Massen auf 15 bzw. 1 $M_\odot$, bei einer Umlaufsperiode von etwa 5 Tagen.

Die weitere Entwicklung hängt davon ab, ob die vom grossen und schwereren Stern abströmende Masse von beiden Komponenten entkommt und einen Gasring um das System bildet, oder ob die Masse vom Neutronenstern aufgefangen wird.

Im ersten Fall ergibt sich nach etwa 10000 Jahren ein Doppelsternsystem mit einem Neutronenstern von etwa 1 $M_\odot$ und einer zweiten Komponente von etwa 3,85 $M_\odot$ in einer Entfernung von 2,4 Sonnenradien und einer Umlaufzeit von 4,8 Stunden, umgeben von einem Gasring von etwa 7 Sonnendurchmesser Radius (Abb. 5c).

Im zweiten Fall wächst die Masse des Neutronensternes weiter an, bis er sich schliesslich zu einem schwarzen Loch von 12,2 $M_\odot$ entwickelt hat. Er wird umkreist von einem Stern in einem Abstand von 3,5 Sonnenradien, und zwar in nur 4,08 Stunden (Abb. (5b).

Im Fall Cygnus X-3 scheint der erste Fall der wahrscheinlichere zu sein, da sich der heisse Gasring als Quelle der Radio- und Infrarotstrahlung in die Beobachtungen bestens einordnen lässt. Das Objekt konnte jedoch selbst nach intensivstem Suchen mit dem 5 m Teleskop und dem 1,2 m SCHMIDT-Teleskop auf Mt. Palomar als im optischen Bereich sichtbarer Stern nicht gefunden werden, obwohl die Nachweisgrenzgrösse bei dieser Suche knapp unter 24^m lag! Auch diese Tatsache lässt vermuten, dass Cygnus X - 3 von uns etwa 30000 Lichtjahre entfernt ist und das sichtbare Licht durch den interstellaren Staub völlig absorbiert wird.

Im Fall der nicht minder bekannten Röntgenquelle Herkules X - 1 hat man es ebenfalls mit einem Doppelsternsystem zu tun, nur ist hier die Existenz des Neutronensternes gesichert. Man kann nämlich dessen Rotationsperiode von 1,24 sec im Röntgenbereich nachweisen, ähnlich wie beim Krebs-Pulsar NP0532, wobei Herkules X - 1 alle 1,7 Tage für etwa 6 Stunden von einem Riesenstern verdeckt wird und die Systemhelligkeit um $1{,}5^m$ sinkt. Interessanterweise war dieses Objekt optisch schon lange als unregelmässig optisch Variabler unter dem Namen HZ Herkules bekannt. Die Pulsationsperiode nimmt aber pro Jahr um 0,009 ms ab, d. h. der Neutronenstern wird durch die vom Riesenbegleiter abströmende Masse in seiner Rotation beschleunigt.

In Abb. 6 ist ausser der Röntgenintensität, welche periodisch durch die Bedeckung abnimmt, noch zu sehen, dass die Intensität, bedingt durch das heisse strömende Gas einmal über dem Durchschnittswert liegt, andererseits auch unterhalb, wenn das Gas noch heissere Zonen auf dem Neutronenstern verdeckt, bzw. diese Zonen freigibt.

Weiter ist die Verzögerung der Ankunftszeiten der 1,24 Sekunden-Pulse eingetragen. Dies ist ein augenfälliger Beweis für die Bewegung des Neutronensternes um den gemeinsamen Systemschwerpunkt. Aus der Laufzeitdifferenz zwischen den beiden extremen

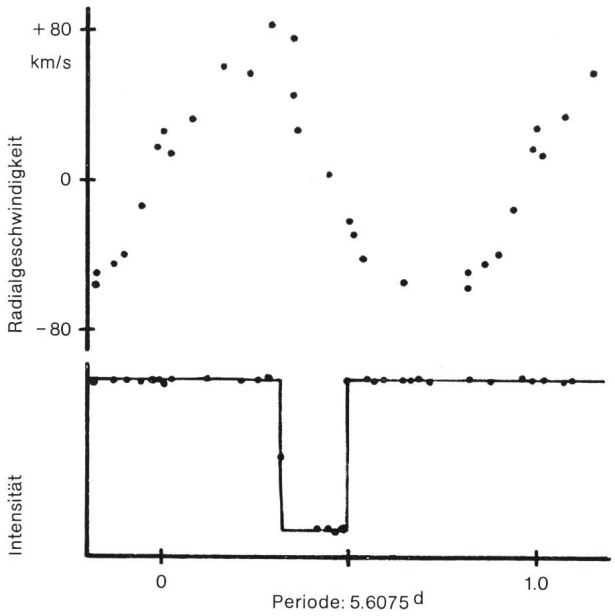

Abb. 7: Radialgeschwindigkeitsschwankungen von Cyg X-1 und die Variation seiner RÖNTGENintensität.

Bahnpunkten des Neutronensterns von 24 Sekunden ergibt sich ein Abstand vom Schwerpunkt von etwa 0.05 astronomischen Einheiten. Ganz klar sind die Verhältnisse in diesem System jedoch nicht, da der Röntgenstrahlung noch eine Periode von 35 Tagen überlagert ist, während welcher die Röntgenstrahlung nur für 10–11 Tage beobachtbar ist (und für 25 Tage unbeobachtbar bleibt). Während die Umlaufsperiode von 1,7 Tagen sehr genau konstant ist, variiert die 35 Tage-Periode um $\pm$ 1 bis 2 Tage. Zur Erklärung nimmt man an, dass das überströmende Gas beim Neutronenstern zum Taumeln seiner Rotationsachse führt, weshalb diese präzediert. Im Laufe der 35tägigen Präzessionsperiode können wir nur 10–11 Tage lang auf die Magnetpole blicken. Neben der Umwandlung von kinetischer Energie in Strahlungsenergie und der PLANCK'schen Strahlung eines heissen Körpers spielt bei diesem System sicher noch die Synchrotronstrahlung eine Rolle, wobei geladene Teilchen durch das rasch rotierende Magnetfeld stark beschleunigt werden und ebenfalls strahlen.

Schliesslich sei noch ein ganz ähnliches Doppelsternsystem erwähnt, wobei die Röntgenquelle mit einer 5,6 Tage-Periode vom Stern HDE 226868, einem Überriesen vom Spektraltyp B0I und 9^m Helligkeit, bedeckt wird. Die Schwankungen der Röntgenintensität sind in Abb. 7 zu sehen, wo auch die Radialgeschwindigkeitsschwankungen des Überriesen zu finden sind. Aus den himmelsmechanischen Daten folgt bei einer Masse von 20 $M_\odot$ für den blauen Überriesen eine Begleitermasse von 13 $M_\odot$! Sollten alle Abschätzungen richtig sein, wäre dies der Nachweis eines Schwarzen Lochs, da Neutronensterne von über 3,5 $M_\odot$ nicht entstehen können. Ausserdem schwankt die Intensität von Cygnus X - 1 völlig unregelmässig und nicht wie bei einem Pulsar, was sich durch einen Gasstrom unterschiedlicher Stärke erklären lässt, welcher auf das schwarze Loch zufällt, immer stärker beschleunigt wird und dabei Energie abstrahlt.

Wie die neuesten Erkenntnisse in der astronomischen Forschung zeigen, kann eine Theorie gar nicht so utopisch sein – sofern keine Naturgesetze in Frage gestellt werden –, dass sie vielleicht nicht doch eines Tages Geltung erhalten könnten.

Zweifellos stehen wir jetzt wieder am Beginn einer Phase hochinteressanter Entwicklungen in unserer Wissenschaft und man kann gespannt darauf sein, was uns die nächsten Jahre an neuem Wissen bringen werden.

Literatur:

H. FRIEDMANN, Cosmic X-Ray Sources. A Progress Report, Science *181*, 395 (1973), No. 4098.

R. M. HJELLMING, An Astronomical Puzzle, called Cyg X-3, Science *182*, 1089 (1973), No. 4117.

Adresse des Autors:

Dr. W. WEISS, Universitäts-Sternwarte, Türkenschanzstrasse 17, A-1180 Wien.

Zur Kenntnis der Quasare

von S. MITTON, Cambridge

Quasare – quasistellare Radioquellen – wurden zum ersten Mal 1963 gefunden, als Forscher der Radio- und optischen Astronomie gemeinsam der Natur der vielen diskreten Radioquellen auf den Grund zu kommen suchten, die nicht mit Galaxien identifiziert werden konnten. Ein britischer Wissenschaftler, Dr. CYRIL HAZARD, verfolgte mit dem 64-m-Radioteleskop bei Parkes in Australien die Bewegung des Mondes, um genau den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem die Strahlung der Radioquelle 3C 273 durch das Dazwischentreten des Mondes nicht mehr empfangen werden konnte.

Durch diesen Zeitbestimmungsversuch gewann Dr. HAZARD eine genaue Lokalisierung der Quelle, und der optisch arbeitende Astronom MAARTEN SCHMIDT fand am bezeichneten Ort ein ungewöhnliches sternartiges Objekt, das hauptsächlich durch seine ausserordentliche Rotverschiebung faszinierte.

Die Rotverschiebung

Dies war die erste Entdeckung eines Quasars, eines sternähnlichen Objekts mit starker Rotverschiebung und starker Radiostrahlung. Von seinen Eigenschaften wird heute am intensivsten die Rot-