

Enge Doppelsternsysteme und ihre Bedeutung in der modernen Astrophysik

Burkhard Fricke

GhK, OE 03 – Naturwissenschaften und Mathematik –

Bedingt durch die Himmelsbeobachtung mit Satelliten, hat die moderne Astrophysik in den letzten 10 Jahren nicht nur einen enormen Wissenszuwachs in dem Bereich der normalen Sterne erfahren, sondern daneben sind physikalisch völlig neuartige Zustandsformen der Materie entdeckt worden. Diese Erkenntnisse stammen in der Hauptsache aus der Beobachtung von engen Doppelsternsystemen, in denen der Abstand der beiden Komponenten in der Größenordnung ihrer Durchmesser ist. Darüber zu berichten ist Ziel dieses Aufsatzes.

Ziehen zwei Sterne gemeinsam ihren Weg durch das Weltall, dann kann man sehr viel mehr über die Sterne erfahren, als es für Einzelsterne möglich ist. Die physikalischen Größen, der Beobachtung nach verschiedenen Methoden mehr oder weniger gut zugänglich, sind die Umlaufzeiten, die Bahngeschwindigkeit sowie der Abstand der beiden Sterne. Diese Werte werden entweder aus der direkten Beobachtung der Bahnbewegung bei optisch getrennten Systemen gewonnen oder aus spektroskopischen Messungen, speziell der zeitlich veränderlichen Dopplershift, einer Methode, bei der man direkt die Geschwindigkeit des Sternes relativ zur Erde erhält. Die besten Daten besonders bei sehr engen Doppelsternsystemen aber erhält man über die Beobachtung der Lichtkurve (der Helligkeit des Sternsystems als Funktion der Zeit) bei Bedeckungsveränderlichen, bei denen dann zusätzlich noch eine Aussage über die Größen der beiden Sterne gemacht werden kann. Da es die Keplerschen Gesetze sind, die die Bahnbewegung bestimmen, lassen sich aus den Beobachtungsdaten Aussagen über die Gesamtmasse des Systems machen. So-

fern auch der Schwerpunkt des Systems bekannt ist, ist damit auch die Masse jedes einzelnen Sternes bekannt.

Diese Aussage ist so besonders wichtig, weil es die einzige direkte Massenbestimmung darstellt, die die Astronomie zur Verfügung hat. Die Masse eines Sternes seinerseits ist aber die wohl wichtigste und bestimmendste Größe für einen Stern überhaupt.

Dies ist aus der Sicht der modernen Astrophysik ganz besonders wichtig, denn man weiß heute, daß die Masse eines Sternes zusammen mit seiner chemischen Zusammensetzung den Entwicklungsweg eines Sternes vollständig bestimmt. Bis auf eine Ausnahme, und das sind *enge Doppelsterne*. Der Grund dafür liegt in der Möglichkeit, daß Masse von dem einen Stern zum anderen Stern hinüberfließen kann, wodurch die Grundbedingung für eine kontinuierliche Entwicklung geändert werden kann. Auf diesen Zusammenhang werden wir noch öfters zurückkommen. Wir wollen aber festhalten, daß Doppelsterne nicht nur deshalb so besonders interessant und wichtig sind, weil sie direkt die Masse der Sterne zu bestimmen gestatten, sondern auch weil sie Sternentwicklungen ermöglichen, die weit außerhalb des Normalen liegen.

Wie aber sieht in groben Zügen der Lebensweg und speziell das Ende eines Sternes aus? Die Beschreibung erfolgt üblicherweise im Hertzsprung-Russel-Diagramm, in dem die Sterne nach ihrer Leuchtkraft sowie ihrer Oberflächentemperatur eingetragen sind (siehe Fig. 1). Erstaunlicherweise – und das macht dieses HR-Diagramm zu so einem wichtigen Hilfsmittel – liegen alle Sterne, die in

der Hauptsache aus Wasserstoff bestehen und im Zentrum Wasserstoff zu Helium verbrennen, auf einer Linie, der sogenannten Hauptreihe. Solange das Wasserstoffbrennen der einzige Prozeß zur Energieerzeugung ist, reihen sich dabei die Sterne nach ihrer Masse geordnet auf dieser Hauptreihe auf. Experimentell kann man verständlicherweise den Entwicklungsweg eines einzelnen Sternes nicht verfolgen, man erhält aber genug Information, wenn man eine große Anzahl von Sternen betrachtet, von denen man weiß, daß sie alle gleichzeitig entstanden sind, was man bei Sternhaufen als gegeben annehmen darf. In Fig. 1 ist schematisch unsere Kenntnis vom Entwicklungsweg eines Sternes eingetragen. Zeitlich hält er sich dabei etwa zu 95 % auf der Hauptreihe auf.

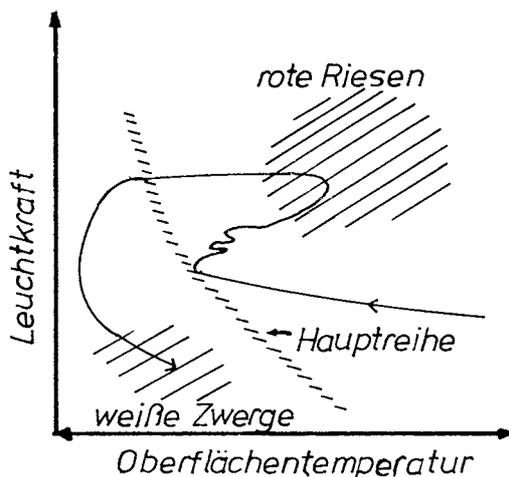


Fig. 1
Schematisches Hertzsprung-Russell-Diagramm mit der Hauptreihe und dem Gebiet der roten Riesen und weißen Zwerge.
Eingezeichnet ist der Entwicklungsweg eines normalen Sternes, der den größten Teil seines Lebens auf der Hauptreihe verbringt.

Je massenreicher ein Stern ist, desto schneller verbraucht er seinen Vorrat, und er ist deshalb auch leuchtkräftiger. Er bewegt sich nach Beendigung des zentralen Wasserstoffbrennens im HR-Diagramm nach rechts oben in das Gebiet der Riesen. Die Stelle, an der der Knick nach rechts beginnt, ist damit ein Maß für das Alter des Sternes. In dem Gebiet der Riesensterne verweilen sie während ihres Helium- oder gar Kohlenstoffbrennens nur relativ kurzzeitig. Über Instabilitäten und Sternexplosionen – wobei der genaue Vorgang, der sich dabei abspielt, allerdings noch nicht ganz geklärt ist – gelangen dann

die Sterne früher oder später auf den Friedhof der Sterne, der von den weißen Zwergen, Neutronensternen und hypothetisch auch von den sogenannten Schwarzen Löchern gebildet wird. Bis vor kurzem hatte man als Endstadium der Sterne nur die weißen Zwerge gekannt. Dies sind Sterne, die bis zu einer Sonnenmasse schwer, aber von der Größe der Erde sind und damit eine Dichte von etwa 1 Million (10^6) Gramm pro cm^3 besitzen.

Der Gravitationsdruck vom Inneren dieser Sterne wird von dem völlig entarteten Elektronengas kompensiert, wobei die Elektronen alle erlaubten untersten Zustände in diesem System bis zur Fermikante besetzen. Zwar ergibt sich dabei noch eine mittlere Temperatur von vielen Millionen Grad, doch im physikalischen Sinne ist dieses System völlig kalt, da es einfach nicht weiter abkühlen kann.

Die noch verbliebene äußerst geringe Leuchtkraft eines weißen Zwerges wird nur noch von einer sehr kleinen und dünnen Hülle mit Wasserstoffschalenbrennen aufrechterhalten. Ein solches System ist völlig stabil, sofern es eine gewisse Obergrenze von etwa 1,2 Sonnenmassen nicht überschreitet. Dann nämlich wird die mittlere Energie der Elektronen so groß, daß es für die Elektronen energetisch günstiger wird, den inversen β -Zerfall des Neutrons zu machen und sich mit einem Proton zu einem Neutron zu vereinigen. Durch diesen Vorgang schrumpft der Stern noch einmal über viele Größenordnungen, bis der Druck des so entstandenen Neutronengases wieder dem

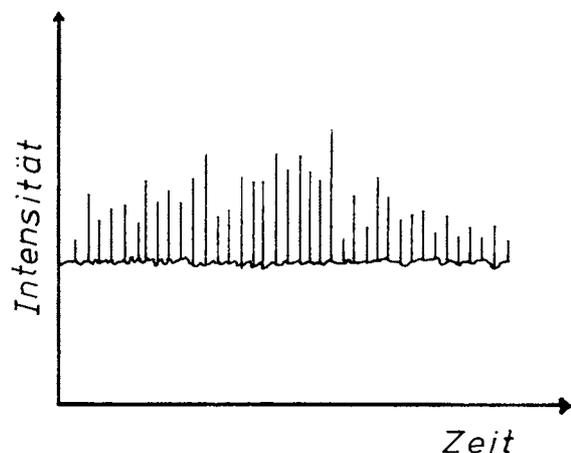


Fig. 2
Die Pulse eines Pulsars, aufgetragen über der Zeit. Der Abstand zwischen zwei Maxima liegt zwischen 0,1 und 4 Sekunden für die verschiedenen Pulsare.

Gravitationsdruck standhält. Diese von Oppenheimer bereits 1938 durchdachte Möglichkeit stellt ein Gebilde von etwa 10 km Radius dar, in dem die mittleren Abstände der Atomkerne in der gleichen Größenordnung wie die Durchmesser der Kerne selber sind. Wieder haben wir ein absolut totes und kaltes Gebilde vor uns, das ebenfalls viele Millionen Grad „heiß“ ist und eine Dichte von etwa 10^{14} g/cm^3 (= 1 Milliarden Tonnen pro cm^3) besitzt.

Diese Neutronensterne sind inzwischen in Form der Pulsare in die Wirklichkeit eingetreten. Diese Pulsare verrieten ihre Existenz durch sehr scharfe Pulse zwischen 0,1 und einigen Sekunden Abstand im Gebiet der Radiowellen, aber auch in anderen Strahlungsbereichen, so wie es in Fig. 2 dargestellt ist. Die Höhe der Pulse ist recht unregelmäßig, dagegen ist ihr zeitlicher Abstand extrem konstant. Die Erklärung sind schnell rotierende Neutronensterne, die durch ein starkes starr mitrotierendes Magnetfeld Anlaß zu diesen Pulsen geben. Die Neutronensterne sind aber auch nur bis zu einer Masse von etwa 2 Sonnenmassen stabile Gebilde. Für noch größere Massen postuliert man die sogenannten Schwarzen Löcher, denn keine bisher bekannte Kraft vermag nämlich für noch schwerere Objekte der Gravitationskraft standzuhalten. Der Gravitationskollaps „verschlingt“ deshalb alle Massen oberhalb von 2 Sonnenmassen, für die Außenwelt gesehen, innerhalb eines Radius von nur etwa 1 bis 3 km, dem sogenannten Schwarzschildradius. Da ein derartiges hypothetisches Schwarzes Loch als einzige physikalische beachtbare Eigenschaft die seiner Masse hat, reduziert sich damit die Möglichkeit seiner Beobachtung auf ein Doppelsternsystem.

Eine Möglichkeit, diese exotischen Gebilde wie ein Schwarzes Loch oder einen Neutronestern in einem Doppelsternsystem zu identifizieren oder zumindest doch als Interpretationsmöglichkeit zu diskutieren, ergab sich vor ein paar Jahren, als man damit begann, mit Satelliten nach Röntgenstrahlungsquellen am Himmel zu suchen. Auf Anhieb gelang es damals, eine ganze Reihe von Objekten zu beobachten. Dabei zeigte es sich sofort, daß eine ganze Reihe von starken Röntgenquellen aus Doppelsternsystemen stammten, bei denen auch teilweise Bedeckungsveränderlichencharakter zu beobachten war.

Im Folgenden möchte ich zwei dieser Gebilde etwas genauer diskutieren. Das erste ist das Ob-

jekt Cen-X 3, ein Röntgenpulsar, bei dem etwa 90% der Röntgenstrahlung in Pulsen emittiert wird. Die Röntgenimpulse haben einen zeitlichen Abstand von etwa 4,8 sec und liegen damit höher als jede andere bisher beobachtete Pulsfrequenz eines Pulsars.

Dieses System enthält aber noch mehr interessante Informationen, denn die Röntgenpulse treffen periodisch alle zwei Tage etwas schneller und dann wieder langsamer ein. Man deutet dies als Dopplereffekt (ein Effekt, mit dem man die Geschwindigkeit eines Objektes ermitteln kann): Die Röntgenquelle läuft auf uns zu und dann wieder von uns weg, d. h., sie gehört einem Doppelsternsystem an. Zusätzlich dazu bleiben die Röntgenimpulse alle zwei Tage für einen halben Tag aus. In dieser Zeit wird der Röntgenemitter von dem großen Zentralstern verdeckt. Aus der Bedeckungsdauer und Art der Bedeckung sowie aus Umlaufzeit und Umlaufgeschwindigkeit lassen sich bereits die wichtigsten Parameter des Doppelsternsystems bestimmen. In diesem Fall ergibt sich ein Hauptstern mit etwa 15 Sonnenmassen und ein kleiner Begleiter mit etwa $1/2$ Sonnenmasse, für den sich zugleich aus der Geschwindigkeit, mit der er bedeckt wird, auf einen Radius von weniger als 1000 km schließen läßt. Diese Dimension hat aber nur ein Neutronestern. Da alle Pulsare ihre Energie, mit der sie ausstrahlen, aus der Rotation decken, werden sie mit der Zeit immer langsamer. Die Abstrahldauer eines Pulsars ist damit auf etwa 10 Millionen Jahre begrenzt. Wenn dieser Pulsar aber im Röntgengebiet noch sehr viel Energie in Form der Röntgenstrahlung emittiert, dann muß diese Energie aus einem anderen Prozeß gespeist werden. Diesen Prozeß darf man sich etwa so vorstellen, daß der ihn begleitende Riesenstern sein erlaubtes Volumen voll ausfüllt und die überfließende Masse auf den Neutronestern herabfällt. Was dabei passiert, kann man sich leicht vorstellen, wenn man die dabei gewonnene Energie ausrechnet. Bereits ein einzelnes Nukleon (Neutron oder Proton) gewinnt bei diesem Fall 100 MeV kinetische Energie, genug, um bereits während des Fallens Röntgenstrahlung zu emittieren. Die Energie stammt also aus der Gravitation. Der Zeitmechanismus, der die Pulsform verursacht, stammt aber vom Neutronestern selbst. Das starke Magnetfeld läßt es nur zu, daß an den Magnetpolen Materie auf den Stern fällt. Das Röntgenstrahlspektrum deutet auf einen thermischen Strahler von etwa 10 Millionen Grad

Oberflächentemperatur hin, was mit 6000 Grad Oberflächentemperatur auf der Sonne zu vergleichen wäre.

Ein Doppelsternsystem, bei dem wahrscheinlich ebenfalls Materie von einem Partner zum anderen fließt, ist die Röntgenquelle im Schwan Cyg – X 1. Sie ist eine sehr intensive, aber irreguläre Quelle. Man findet in statistischer Folge fortlaufende Röntgenausbrüche, deren Frequenzen dem Spektrum eines Knalles entsprechen. Aus den kurzzeitigen Intensitätsschwankungen (0,02 Sekunden) und der kurzen Abklingzeit der Ausbrüche kann man schließen, daß die Röntgenquelle sehr klein sein muß. Dies steht auch in Übereinstimmung mit optischen Beobachtungen. An der entsprechenden Stelle am Himmel findet man außer einem schwachen Radioemitter auch einen spektroskopischen Doppelstern. Aus den so gewonnenen Daten ergibt sich, daß der Zentralstern ein blauweißer Überriese mit etwa 12 Sonnenmassen ist, während der unsichtbare Partner ein sehr kleiner Stern sein muß mit einer Masse von etwa drei Sonnenmassen, und das kann entsprechend der Theorie nur ein Schwarzes Loch sein. Allerdings ist die Massenbestimmung der Einzelkomponenten noch etwas unsicher, denn die starke Röntgenstrahlung strahlt auch auf die Oberfläche des Hauptsternes und heizt sie auf, wodurch sich die Leuchtkraft des Sternes etwas gegenüber seinem normalen Aussehen verändern kann.

Doch kehren wir von diesem modernsten – teils spekulativen – Aspekt der modernen Astrophysik zu etwas sicherer Fundiertem zurück.

Am Anfang hatte ich erwähnt, daß im wesentlichen die Masse eines Sternes seinen Entwicklungsweg bestimmt. Allerdings mit der einen Ausnahme: nämlich engen Doppelsternsystemen. Da man annehmen kann, daß Doppelsterne gleichzeitig entstanden sind, sollte der Entwicklungsstand den jeweiligen Massen entsprechen. Bei den eben besprochenen Doppelsternen standen aber bereits sehr schwere, kaum entwickelte Riesensterne kleinen, aber bereits am Ende ihrer Entwicklung befindlichen Sternen gegenüber, was eindeutig eine Diskrepanz zu unserem bisherigen Wissen über Sternentwicklung darstellt. Da wir aber über die Entstehung eines Neutronensternes oder gar Schwarzen Loches nur Vermutungen haben können, wie z. B. Supernovaexplosionen mit dem Abblasen einer großen Hülle, ist es bisher unmöglich, etwas Definitives über die Entwicklung eines solchen Systems auszusagen.

Wohl aber ist es bereits gelungen, die Entstehung eines kleinen weißen Zwerges als Begleiter eines massereichen unentwickelten Sternes nachzuvollziehen. Dazu sei noch kurz auf die theoretische Beschreibung der Entwicklung eines Sternes eingegangen. Die physikalischen Größen, die einen Stern beschreiben, sind der Druck P , die Temperatur T , seine innere Massenverteilung M , die Leuchtkraft L und die chemische Zusammensetzung. Alle diese Größen sind dabei abhängig vom Abstand r vom Zentrum des Sternes sowie der Zeit t . Insgesamt lassen sich vier mehr oder weniger komplizierte Gleichungen angeben, aus deren Lösung heraus sich die vier oben angegebenen Größen P , T , M und L bestimmen lassen. Es sind dies im wesentlichen folgende vier Gleichungen. Die erste legt die Geometrie des Systems Stern (Kugelform) fest. Die zweite setzt den Gravitationsdruck, der nach innen gerichtet ist, mit dem Strahlungs- und Konvektionsdruck, der nach außen wirkt, gleich. Die dritte Gleichung beschreibt die Energieerzeugung und die vierte den Energietransport im Inneren des Sternes. Dazu kommen noch Materialeigenschaften sowie Anfangs- und Randbedingungen.

Die hauptsächliche Zeitabhängigkeit kommt hinein über die *Veränderung der chemischen Zusammensetzung* mit der Zeit, denn es werden laufend Elemente ineinander umgewandelt.

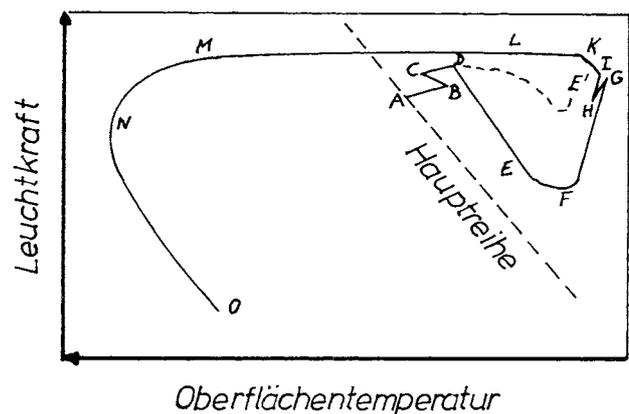


Fig. 3
Der Entwicklungsweg eines Sternes mit 2 Sonnenmassen in einem engen Doppelsternsystem mit einem Stern 1 Sonnenmasse. Bei Punkt D füllt er erstmals sein kritisches Volumen. Ohne Massenverlust würde sich der Stern längs der gestrichelten Kurve nach E' bewegen. Bis Punkt F erfolgt der Massenverlust sehr schnell und wird bis G sehr viel langsamer. Ab Punkt K ist der Massenverlust nach einer kurzen Unterbrechung bei G bis I vorbei. Es folgt dann eine Kontraktion bei konstanter Masse ins Gebiet der weißen Zwerge (Punkt 0).

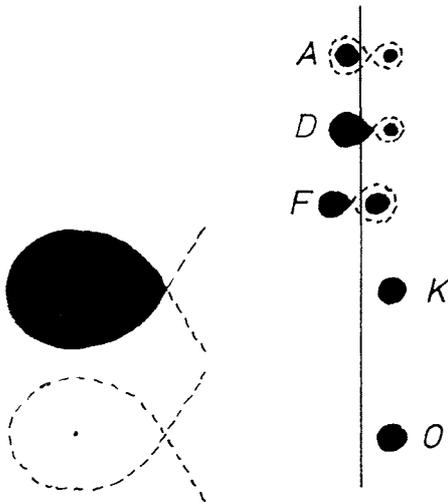


Fig. 4

Skizze des Doppelsternsystems der Figur 3 zu einigen Zeiten der Entwicklung. Schwarz gezeichnet ist jeweils das gefüllte Volumen. Die gestrichelte Linie, bei deren Überschreiten der Massenverlust zum Nachbarstern beginnt, gibt das kritische Volumen an. Die durchgehende schwarze Gerade stellt die durch den Schwerpunkt des Systems gehende Rotationsachse dar. Das stark variierende Abstandsverhältnis entspricht dem sich stark ändernden Massenverhältnis.

Derartige Rechnungen sind durchgeführt worden, wodurch es möglich wurde, den Entwicklungsweg eines Sternpaares von zwei und einer Sonnenmasse im Herzsprung-Russel-Diagramm zu verfolgen (siehe dazu Fig. 3 und 4). Im Unterschied zu den Rechnungen eines Einzelsternes kommt hierbei noch die zusätzliche Randbedingung hinzu, daß jeder Stern nur ein endliches Volumen (gegeben durch die sogenannte Roche'sche Grenze, die in Fig. 4 gestrichelt eingetragen ist) ausfüllen kann. Vergrößert sich das Volumen des Sternes noch weiter, fließt Masse über den inneren Berührungspunkt zu dem anderen Stern hinüber. Je nach dem, wann der eine oder andere Stern im Laufe seiner Entwicklung diese Roche'sche Grenze erreicht und Masse an den anderen Begleiter abgibt, sieht der weitere Entwicklungsweg der beiden Sterne sehr verschieden aus.

Bei diesen Rechnungen muß natürlich auch die Veränderung der physikalischen Bahndaten durch den Massenaustausch mit berücksichtigt werden. Dies wird in Fig. 4 ebenfalls besonders deutlich. Ebenso wird angenommen, daß der Bahnimpuls des Systems erhalten bleibt.

Man beginnt mit den beiden Sternen auf der Hauptreihe. Stern 2 entwickelt sich sehr viel schneller als 1 und erreicht den Zeitpunkt, in dem

sein zentrales Wasserstoffbrennen endet. Danach setzt ein Schalenbrennen ein, verbunden mit einer kurzen Kontraktion und anschließenden Expansion auf dem Weg zum He-Brennen. Dadurch erreicht er sein maximal erlaubtes Volumen, die Roche'sche Grenze, und ein Masseabfluß beginnt (Punkt D in Fig. 3). Da die obersten Schichten plötzlich fehlen, bläht sich der Stern sehr schnell auf, was sehr viel Energie kostet, und die Leuchtkraft sinkt (Punkt E und F), dann justiert sich der Stern ein, die Energieerzeugung kommt wieder nach, und der Stern wird wieder heller. Jetzt ist aber bereits so viel von der Hülle abgegeben, daß das Außengebiet in einer Zone liegt, in der bereits weniger Wasserstoff als am Anfang vorhanden ist. Der Kern und die Hülle kontrahieren aber weiter. Die Hülle produziert die Leuchtkraft durch äußeres Schalenbrennen. Dabei rutscht der Stern im HR-Diagramm relativ schnell in das Gebiet der weißen Zwerge.

Dieser ganze Vorgang geht so schnell (nur etwa 10 Millionen Jahre), daß der andere Stern trotz seines Massenzuwachses nur die Hauptreihe hochgerutscht ist, sich aber kaum merklich weiterentwickelt hat. Das Ergebnis ist schließlich ein Sternsystem, in dem ein großer, massereicher, aber unentwickelter Stern zusammen mit einem kleineren, massearmen, aber sehr entwickelten Stern ein anomales Doppelsternsystem bildet.

Zum Schluß sei noch einmal zusammengefaßt: Es sind zwei Tatsachen diskutiert worden, die speziell die engen Doppelsternsysteme so wichtig und interessant für die moderne Astronomie und Astrophysik machen. Zum einen kann man in einem solchen System die Masse und auch manchmal die Größen der Sterne bestimmen, was besonders bei der Suche nach Neutronensternen und Schwarzen Löchern eine Grundvoraussetzung ist. Zum anderen ermöglicht der Massenaustausch in solchen engen Doppelsternsystemen nicht nur so unerwartete Erscheinungen wie die anomale Emission von Röntgenstrahlung, sondern die Möglichkeit, Sternentwicklungen zu beobachten und zu erklären, wie sie in einem Einzelstern nicht möglich sind.

Literatur:

„Scientific American“ der letzten Jahre, die Veröffentlichungen von R. Kippenhahn und A. Weigert u. a. aus der „Zeitschrift für Physik“ (1964–1968) sowie die neuesten Artikel aus „Journal of Astrophysics“ über die Pulsare, Neutronensterne und Schwarzen Löcher.