Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1984) *129/3*: 246–267

Weisse Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher

Norbert Straumann, Universität Zürich

Die Physik der kompakten Endzustände der Sterne hat seit der Entdeckung der Pulsare im Jahre 1967 beachtliche Fortschritte gemacht. Da diese Endprodukte der Sternentwicklung einen enormen Dichtebereich umspannen, erfordert deren Analyse ein tiefes physikalisches Verständnis der Struktur der Materie und der Natur der Wechselwirkungen der Bausteine über einen weiten Parameterbereich. Bei der Bildung sowie für die Struktur und Stabilität der kompakten Objekte spielen alle fundamentalen Wechselwirkungen eine wesentliche Rolle. Die Modifikationen der enormen gravitativen Feldstärken durch die Allgemeine Relativitätstheorie sind für Neutronensterne zumindest quantitativ wesentlich und für Schwarze Löcher sogar für ein qualitatives Verständnis ausschlaggebend.

Neutronensterne können direkt als pulsierende Radioquellen und indirekt als Röntgenquellen (Röntgenpulsare, Röntgenburster) beobachtet werden. Die Öffnung des «Röntgenfensters» hat auch zur wahrscheinlichen Entdeckung eines Schwarzen Loches in der irregulären und rasch fluktuierenden Quelle Cyg X-1 geführt. Die Energiequelle von Quasaren und anderen aktiven galaktischen Kernen beruht möglicherweise auf der Akkretion von Materie auf supermassive Schwarze Löcher, da dieser Prozess auf die wirksamste Weise Ruhemasse in Strahlung umwandelt und damit in kleinen Räumen die gewaltigen beobachteten Energien der Quasare freisetzen könnte.

White dwarfs, neutron stars, and black holes

The physics of the compact final states of stars has made remarkable progress since the discovery of pulsars in 1967. Because these end products of stellar evolution span an enormous density range, their analysis requires a deep physical understanding of the structure of matter and of the nature of interparticle interactions over a vast range of parameters. All fundamental interactions play an essential role in the formation, the structure, and the stability of compact objects. The modifications of the enormous gravitational field strength due to general relativity become quantitavely important for neutron stars. General relativity is indispensable for even a qualitative understanding of black holes.

Neutron stars can be observed directly as pulsating radio sources and indirectly as X-ray sources (X-ray pulsars and X-ray bursters) and more recently as γ-bursters. The opening of the "X-ray window" led also to the discovery of a black hole in the irregular, rapidly fluctuating source Cyg X-1. The energy source of quasars and other active galactic nuclei may involve accretion of matter onto supermassive black holes because this is the most efficient way to convert rest mass into radiation, and thus generate in a small volume the enormous luminosities observed from quasars.

1 Einleitung

Die äusserst vielfältigen und oft glanzvollen Entwicklungspfade der Sterne[1] führen zu (soweit wir wissen) vier möglichen Endzuständen. Diesen Friedhof der Sterne will ich zuerst kurz vorstellen:

[1] Text nach einem Vortrag anlässlich der Woche der Philosophischen Fakultät II vom 21.–25. Juni 1983 im Rahmen «150 Jahre Universität Zürich».

(1) Der Stern kann in einer gewaltigen Kerndetonation total auseinandergerissen werden. Dann bereichert er das interstellare Medium mit C, O und anderen «schweren» Elementen. Aus diesem Material können später neue Sterngenerationen entstehen.

(2) Relativ leichte Sterne wie die Sonne beenden ihr langes und ruhiges Leben als *Weisse Zwerge.* Dann sind sie nur noch etwa so gross wie die Erde, d. h. ihre Dichte ist einige Tonnen pro cm^3. Die Struktur dieser Sterne verstehen wir schon lange sehr gut.

(3) Die zentrale Region von genügend massiven Sternen wird am Ende der thermonuklearen Evolution unstabil und fällt in sich zusammen. Unter Umständen kann der Einsturz bei Kerndichten gestoppt werden. Dann entsteht ein *Neutronenstern,* d. h. ein gewaltiger «Atomkern» von etwa einer Sonnenmasse. Kurz bevor der Kollaps gestoppt wird, ist die Geschwindigkeit der hochverdichteten einstürzenden Materie einige Zehntausend Kilometer pro Sekunde. Bei Kerndichten prallt sie zurück, und es entsteht eine äusserst heftige Stosswelle, welche nach aussen in die äussere Hülle des Sterns läuft. Diese kann unter Umständen die Sternhülle absprengen. Das gewaltige Feuerwerk der Explosion erscheint uns als Supernova. Der zurückgebliebene Neutronenstern kann sich auf mannigfaltige Weise, z. B. als Radiopulsar, äussern.

(4) Schliesslich bleibt die Möglichkeit, dass die Gravitation übermächtig wird und der Kollaps nicht mehr gestoppt werden kann. Dann wird das Gravitationsfeld sogar so stark, dass nicht einmal mehr Licht entweichen kann. Die Materie scheidet dann in einem sehr realen Sinne aus der Weltgeschichte aus. Zurück bleibt ein «Loch im Raum», ein sog. *Schwarzes Loch,* mit einem sehr starken Gravitationsfeld. Dieses kann auf die umgebende Materie enorme Wirkungen ausüben und dadurch grosse Energiemengen freisetzen.

2 Stabilität der «alltäglichen» Materie

Damit wir den Kampf der universellen gravitativen Anziehung mit den anderen Wechselwirkungen und ihren endgültigen Sieg bei genügend massiven Objekten besser verstehen, möchte ich zuerst etwas zur «alltäglichen» Materie sagen.

In seiner Laudatio zur Verleihung der Lorentz-Medaille an Wolfgang Pauli im Jahre 1931 sagte Ehrenfest:

«Wir nehmen ein Stück Metall in die Hand. Oder einen Stein. Schon ein wenig Nachdenken macht uns erstaunt, dass dieses Quantum Stoff nicht einen viel geringeren Raum einnimmt. Denn wohl liegen die Moleküle schon ganz dicht aufeinandergepackt. Und ebenso die Atome im Molekül. – Gut. – Aber warum sind die Atome selber so dick?!

Betrachtet man zum Beispiel das Bohrsche Modell für ein Blei-Atom. Warum laufen von den 82 Elektronen des Atoms nur so ganz wenige auf den

Quantenbahnen *dicht* um den Kern, alle anderen aber in immer weiteren und weiteren Bahnen? Die Anziehung der 82 positiven Ladungseinheiten ist doch so mächtig. Viel mehr von den 82 Elektronen könnten sich also auf die inneren Quantenbahnen zusammenziehen, ehe ihre wechselseitige Abstossung zu gross wird. Was verhindert dann also das Atom, sich in dieser Weise viel kleiner zu machen?!

Antwort: Nur das Pauli-Verbot: ‹Keine zwei Elektronen im selben Quantenzustand!› Darum also die Atome so unnötig dick: darum der Stein, das Metallstück etc. so voluminös!

Sie müssen zugeben, Herr Pauli: Durch eine *partielle* Aufhebung Ihres Verbotes könnten Sie uns von gar vielen Sorgen des Alltags befreien: z. B. vom Verkehrsproblem unserer Strassen.»

Der letzte Satz zeigt, dass Ehrenfest (und seine Zeitgenossen) die Bedeutung des Pauli-Prinzips für die makroskopische Materie noch unterschätzt hat. Könnten wir das Pauli-Verbot aufheben, so würden makroskopische Objekte mit zunehmender Teilchenzahl tatsächlich immer dichter, und damit würde die Bindungsenergie stark zunehmen. Dies hätte dramatische Folgen: Bei der Vereinigung zweier Materialstücke würde eine Energie freigesetzt, die typisch einer starken H-Bombe entspricht. In einer solchen Welt wäre eine biologische Evolution undenkbar.

Das Pauli-Prinzip ist demnach entscheidend für die Stabilität der makroskopischen Materie. Dank ihm ist die Dichte eines Steins, eines Felsbrockens und eines grossen Berges gleich gross. Wir müssen deshalb – um mit Ehrenfest zu sprechen – «jedesmal, wenn ein Atomkern bei einem Beta-Zerfall ein neues Elektron in die Welt setzt, mit Herzklopfen abwarten; wird sich nun das neue Elektron gehorsam dem Pauli-Verbot fügen oder wird es in boshaftem Übermut den Anti-Symmetrie-Tanz seiner älteren Geschwister verwirren?»

Für die Stabilität der makroskopischen Materie ist auch wesentlich, dass die elektrische Ladung beide Vorzeichen hat; deshalb kompensieren sich anziehende und abstossende Kräfte weitgehend.

3 Die Gravitation saturiert nicht

Dies ist bei der Gravitation nicht der Fall. Deshalb ändert sich die Struktur der makroskopischen Materie, wenn deren Eigengravitation wesentlich wird. Wann ist dies der Fall? Die Antwort wird direkt durch die folgende winzige dimensionslose Zahl gegeben,

$$\frac{Gm_p^2}{e^2} \simeq 10^{-36},$$

welche das Verhältnis der Stärken von gravitativen und elektrischen Kräften charakterisiert.

Wenn die Zahl der Elektronen grösser als etwa $(Gm_p^2/e^2)^{-3/2}$ ist, so werden die Gravitationskräfte ebenso wichtig wie die elektrischen Kräfte zwischen Elektronen und Atomkernen. Diese sehr grosse Zahl ist gerade gleich der Zahl der Elektronen im Jupiter.

Für noch grössere erkaltete «Planeten» wird die Gravitation zunehmend wichtig: «Newton dominiert dann über Coulomb.» Der Zustand der kalten Materie wird zunehmend dichter. Die erkaltete Sonne wird am Ende der thermonuklearen Evolution nur noch etwa so gross sein wie die Erde. Warum kann sie überhaupt einen Gleichgewichtszustand annehmen, wenn ihr thermischer Druck so klein wird?

Die Antwort gibt wiederum das Pauli-Prinzip: Da die Elektronendichte sehr hoch wird, müssen sich die Elektronen in ihren Impulsen stark unterscheiden. Deshalb bewegen sie sich auch am absoluten Nullpunkt sehr rasch. Diese Nullpunktsbewegung übt einen enormen Druck aus und erlaubt es dem Stern, in einem gesicherten Gleichgewicht als Weisser Zwerg langsam zu verglimmen.

Die Materie in einem (genügend abgekühlten) Weissen Zwerg hat eine einfache Struktur: Die Atomkerne (meist He, C, O) sind nackt und bilden ein regelmässiges Gitter; die Elektronen bewegen sich durch dieses mit Geschwindigkeiten, die mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar sind. Weisse Zwerge sind demnach «kosmische Diamanten». Ihre Dichte ist enorm, typisch einige Tonnen pro cm^3.

Diese Einsichten wurden alle kurz nach Entstehung der Quantenmechanik im Jahre 1926 (v. a. durch Fowler) gewonnen. Damit war das Rätsel um Sirius B schlagartig geklärt.

4 Relativitätstheorie und Weisse Zwerge

Wenige Jahre später machten mehrere Forscher, darunter Chandrasekhar und Landau, eine Entdeckung von epochaler Bedeutung. Da die Elektronengeschwindigkeiten im Inneren von Weissen Zwergen nicht mehr weit von der Lichtgeschwindigkeit entfernt sind, muss man sie nach den Regeln der Speziellen Relativitätstheorie behandeln. Darum nimmt aber der Pauli-Druck mit wachsender Dichte nicht mehr so stark zu, und es ergibt sich eine Grenzmasse, oberhalb welcher kein Gleichgewicht mehr möglich ist.

Die erwähnte Grenzmasse, die sog. *Chandrasekhar-Grenze,* ist durch elementare Naturkonstanten bestimmt. Der genaue numerische Wert hängt von der chemischen Zusammensetzung ab; er ist in der Praxis bei $\simeq 1.4\ M_\odot$.

Diese Entdeckung warf sofort die dringende Frage nach dem Schicksal von massereichen Sternen auf, da diese nicht als Weisse Zwerge enden können, wenn es ihnen nicht gelingt, rechtzeitig genügend Masse loszuwerden.

Chandrasekhar konnte damals seine bedeutende Einsicht bei den Astrophysikern, v. a. gegen den Widerstand von Eddington – dem damaligen

«Papst» der Astrophysik – nicht durchsetzen. Auch Landau war sich der unerhörten astronomischen Konsequenzen dieser Grenzmasse wohl bewusst. Er vertraute aber merkwürdigerweise den zugrundeliegenden Gesetzen nicht und schloss sich den Ideen von Bohr an, wonach der Energiesatz in der Mikrophysik nur statistische Gültigkeit haben sollte. Diese Hypothese wurde damals von Bohr zur Deutung des kontinuierlichen β-Spektrums vertreten, in scharfem Gegensatz zu Pauli, der mit seiner Neutrino-Hypothese den Energiesatz auch für Elementarprozesse rettete.

5 Das Nova-Phänomen

Bevor wir uns dem gefährdeten Schicksal massereicher Sterne zuwenden, möchte ich noch kurz etwas zu Nova-Ausbrüchen sagen, welche – wie wir heute wissen – immer mit Weissen Zwergen in engen Doppelsternsystemen verbunden sind.

Bei einem Nova-Ausbruch leuchtet ein bis dahin völlig unauffälliger Stern plötzlich zwischen zehntausend und einer Million Mal heller als zuvor und ist dann so hell wie die hellsten Sterne am Himmel. Dies passiert etwa alle zehn Jahre im Teil der Milchstrasse, den wir im sichtbaren Licht beobachten können. Die letzte helle Nova in unserer Galaxie wurde im Spätsommer 1975 im Sternbild Schwan beobachtet (Nova Cygni); sie war für einige Tage so hell wie Deneb, ein benachbarter Stern erster Grösse. Man schätzt, dass der Stern dabei in der Helligkeit um das Neunzehnmillionenfache angestiegen ist – ein Rekord unter den bekannten Novae.

Nova-Ausbrüche können sich wiederholen. Ein berühmtes Beispiel ist T Pyxidis; dieser Stern leuchtete in den Jahren 1890, 1902, 1920, 1944 und zuletzt 1966 auf. (Für diese wiederkehrende Novae steigt die Helligkeit aber nur um etwa 10^3 an.)

Aus umfangreichen Beobachtungen wissen wir, dass sich Nova-Ausbrüche immer in engen Doppelsternsystemen abspielen. Die Umlaufperioden sind meistens kürzer als ein Tag, und der Abstand der beiden Partner ist kaum grösser als der Durchmesser der Sonne. Ausserdem dürfte feststehen, dass einer der beiden Sterne immer ein Weisser Zwerg ist.

Wenn der normale Begleiter langsam ein Roter Riese wird und sich dabei aufbläht, strömt fortlaufend Wasserstoff ab und wirbelt in Form einer Akkretionsscheibe um den Weissen Zwerg (Bild 1). Da die Keplerschen Umlaufsfrequenzen vom Abstand abhängen, rotiert die Scheibe differentiell. Durch viskose Prozesse spiralt das Gas nach innen und stürzt schliesslich auf die Sternoberfläche.

Der unverbrauchte Kernbrennstoff wird durch das starke Gravitationsfeld (durch das Gewicht der neu hinzukommenden Schichten) enorm komprimiert und dabei erhitzt. Die hohe Dichte von etwa 10^4 g cm^{-3} bewirkt, dass die

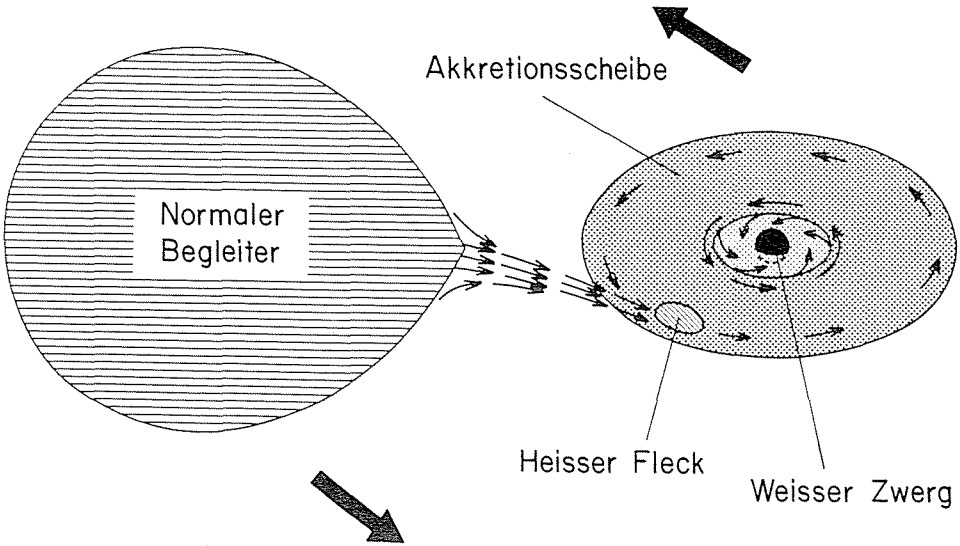


Bild 1 Das binäre Modell von cataclysmischen Variablen. Durch seine starke Gravitation deformiert der Weisse Zwerg seinen Begleiter erheblich. Von der expandierenden Sternhülle im roten Riesenstadium strömt fortlaufend Wasserstoff ab und bildet um den Weissen Zwerg eine Akkretionsscheibe.

Fig. 1 The binary model of cataclysmic variables. Through his strong gravitational field the white dwarf deformes the companion considerably. From the expanding envelope in the red giant stage hydrogen gas continuously flows over and forms an accretion disk around the white dwarf.

Materie (teilweise) entartet ist. Der Wasserstoff aus der Akkretionsscheibe vermischt sich wahrscheinlich mit Kohlenstoff und Sauerstoff aus dem Inneren des Weissen Zwerges (Bild 2).

Wenn etwa 10^{-4} $M_\odot$ zugeströmt sind – was typisch in 10 000 Jahren der Fall sein dürfte – zündet der CNO-Zyklus bei circa 20 Millionen Grad. Es entsteht auf grossen Teilen der Sternoberfläche eine unkontrollierte Kernverschmelzung, welche zum Nova-Ausbruch führt[2]. In einigen Fällen konnte man die abgestossenen Nova-Hüllen beobachten.

In letzter Zeit wird auch intensiv die Möglichkeit untersucht, ob Typ I-Supernovae sich in solchen engen Doppelsystemen abspielen könnten. Durch die Akkretion könnte schliesslich der Weisse Zwerg die Chandrasekhar-Grenze erreichen und instabil werden. Beim anschliessenden Kollaps würde er sich genügend erhitzen, um eine thermonukleare Explosion (C- oder O-Detonation) zu zünden.

[2] Dafür ist einerseits die Entartung verantwortlich und anderseits eine Instabilität für dünnes Schalenbrennen, welche von Schwarzschild und Härm entdeckt wurde.

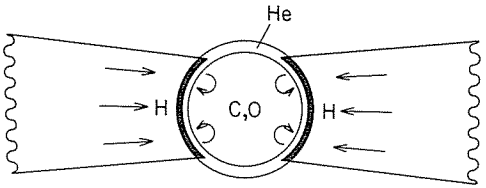


Bild 2 Der einstürzende unverbrauchte Kernbrennstoff aus der Akkretionsscheibe wird enorm komprimiert und (fast adiabatisch) erhitzt. Vermutlich wird er auch mit Kohlenstoff und Sauerstoff aus dem Innern vermischt. Unter gewissen Bedingungen kann eine unkontrollierte Kernverschmelzung entstehen, welche zu einem Nova-Ausbruch führt.

Fig. 2 The infalling unburned nuclear fuel from the accretion disk is compressed enormously and heated (almost adiabatically). Presumably, some carbon and oxygen from the interior is mixed in. Under certain conditions an uncontrolled nuclear fusion sets in and leads to a nova outburst.

Es ist aber auch denkbar, dass bei langsamer Akkretion die Heliumschale des Weissen Zwerges soweit komprimiert und erhitzt wird, dass zunächst ein explosives Heliumbrennen zündet. Von der explosiv brennenden Schale breitet sich eine Druckwelle sowohl nach aussen als auch nach innen aus. Die nach innen laufende Welle kann dabei den Kohlenstoff zur Detonation bringen, wodurch der Stern zerrissen wird. Energetisch ist dies jedenfalls möglich, da bei einer Detonation von einer Sonnenmasse Kohlenstoff gerade etwa soviel Energie frei wird, wie bei Supernova-Ausbrüchen beobachtet wird. (Ähnliches gilt für die Sauerstoff-Fusion.)

Trotz detaillierter Computerstudien gibt es hier noch Schwierigkeiten und zahlreiche offene Fragen.

6 Evolution von massereichen Sternen, Gravitationskollaps und die Bildung von Neutronensternen

Ein massereicher Stern kann der Gravitation so lange standhalten, als durch thermonukleare Prozesse ein hoher Gasdruck aufgebaut wird. Schliesslich wird aber der Kernenergievorrat erschöpft, wenn dort alle Atomkerne zu den stabilsten Kernen der Eisengruppe verschmolzen sind. Dann bleibt dem Stern nur noch die Gravitationsenergie. Indem er sich zusammenzieht, steigt zwar die Temperatur weiter an, aber ein grosser Teil der Energie wird sehr rasch in Form von Neutrinos wieder abgestrahlt. Die Neutrinoluminosität erreicht schliesslich Werte, welche die optische Leuchtkraft einer ganzen Galaxie um Grössenordnungen übersteigt (Bild 3). Der zentrale Eisen-Nickel-Kern muss sich rasch weiter zusammenziehen. Schliesslich wird er instabil. Die Temperatur ist nämlich jetzt so hoch, dass durch Photodesintegration Eisen und Nikkel in α-Teilchen aufgebrochen werden. Diese Dissoziation kostet viel innere Energie. Der zentrale Bereich des Sterns wird deshalb instabil und stürzt in sich zusammen. (Elektroneneinfang an Kernen verstärkt die Instabilität, da

dadurch der Druck reduziert wird, der hauptsächlich auf den Elektronen beruht.)

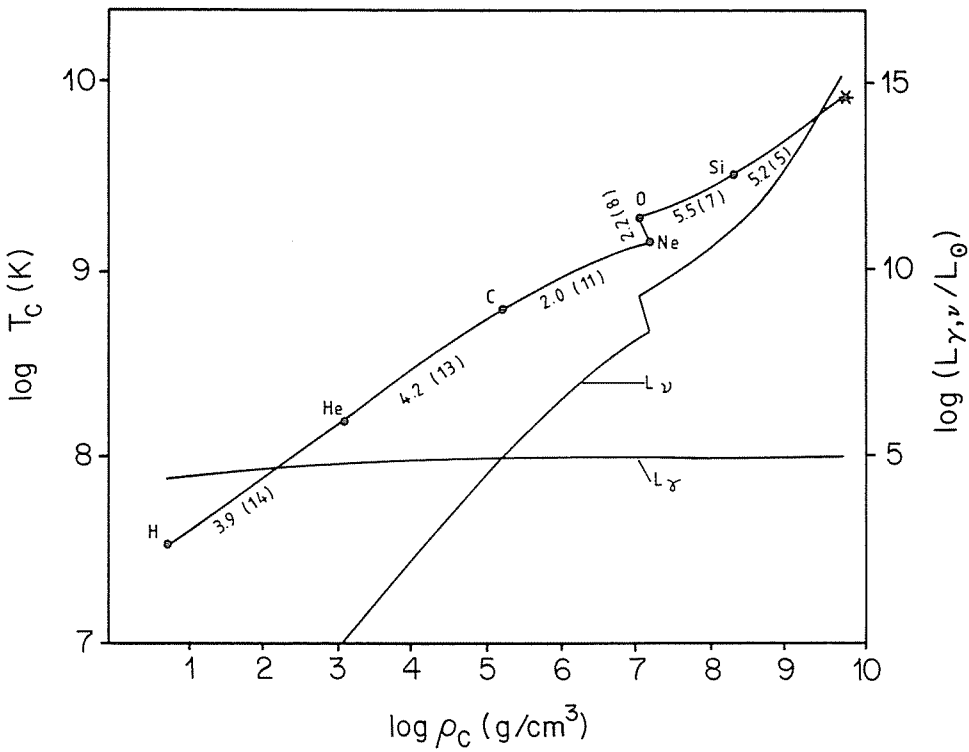


Bild 3 Evolutionsweg eines 15 $M_\odot$-Sterns; totale optische (L_γ) und Neutrino-(L_ν) Luminositäten.

Fig. 3 Evolutionary track of a 15 $M_\odot$ star; total optical (L_γ) and neutrino (L_ν) luminosities.

In den späteren Stadien, bevor das Innere instabil wird, ist der Stern ein Roter Überriese. Der Radius ist fast so gross wie der Abstand des Jupiters von der Sonne. Seine Leuchtkraft ist dementsprechend etwa 100 000mal so gross wie für die Sonne (Bild 4).

Computersimulationen zeigen, dass der kollabierende Eisen-Nickel-Kern bei nuklearen Dichten gestoppt wird. Die sich berührenden Atomkerne werden dann aufgebrochen, wodurch der Druck wesentlich erhöht wird. Die Gleichgewichtslage wird dabei etwas überschossen. Beim Rückprall auf die mit Zehntausenden Kilometern pro Sekunde einstürzende Materie bildet sich eine gewaltige Stosswelle aus, die eine Energie von einigen 10^{51} erg hat. Wolfgang Hillebrandt vom M.P.I. in München hat mit umfangreichen Computer-

studien gezeigt, dass in gewissen Fällen die äusseren Schichten mit grosser Wucht abgestossen werden. Dabei entsteht ein kosmisches Feuerwerk, welches einer Supernova gleicht. Es muss betont werden, dass dafür einige Prozent der beim Kollaps freigesetzten Gravitationsenergie bereits genügen.

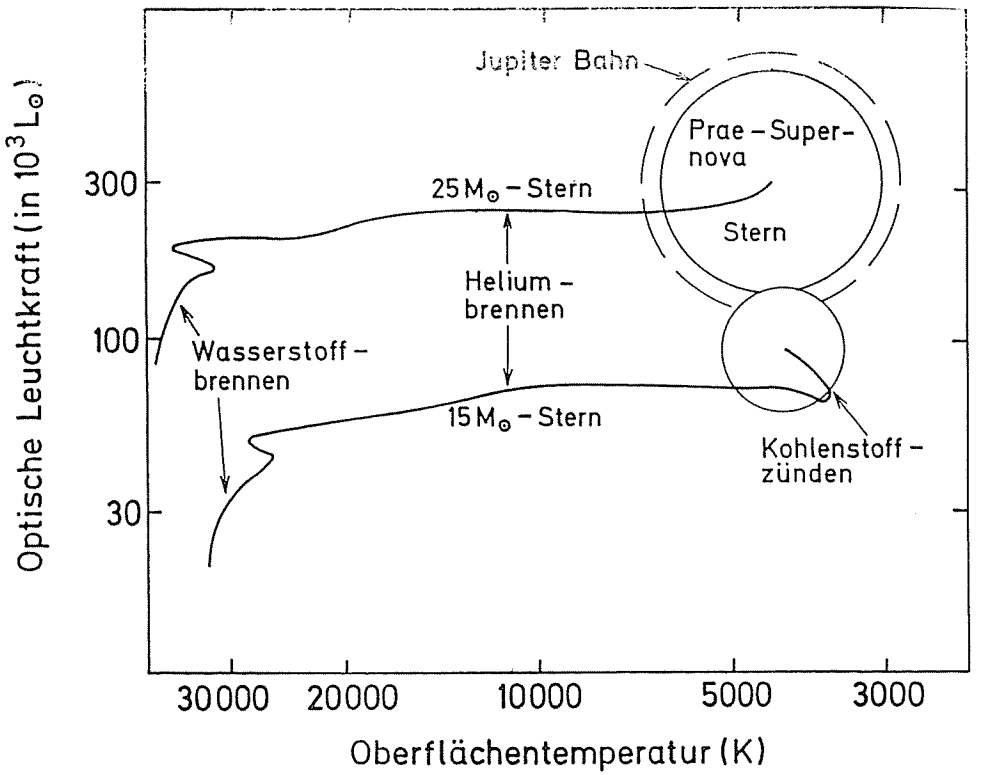


Bild 4 Entwicklungspfade massereicher Sterne (25 und 15 Sonnenmassen) im Temperatur-Leuchtkraft-Diagramm (Herzsprung-Russel-Diagramm). Die Leuchtkraft ist in Einheiten von 10^3 Sonnenleuchtkräften dargestellt. Massstabsgerecht sind am Ende der normalen Entwicklung die Radien der Sterne im Vergleich zur Jupiter-Bahn gezeigt.

Fig. 4 Evolutionary paths of massive stars (25 and 15 solar masses) in the temperature-luminosity diagram (Herzsprung-Russel diagram). The luminosity is represented in units of 10^3 solar luminosities. The radii of the stars at the end of normal evolution are compared on scale with the orbit of Jupiter.

Das interstellare Medium wird auf diese Weise mit schweren Elementen angereichert. Auch die Materie in unserem Körper, ausser Wasserstoff, wurde auf diese Weise erzeugt und freigesetzt.

Eine sehr bekannte galaktische Supernova, deren Überreste der Krebsnebel und der Krebspulsar sind, wurde am 4. Juli 1054 von den chinesischen Hofastronomen bemerkt. Sie ist in den chinesischen Jahrbüchern der Sung-

Dynastie genau beschrieben. Danach erschien an diesem Tag ein «Gasstern», der erst nach einem Jahr allmählich wieder unsichtbar wurde. Er war anfänglich sogar tagsüber mit blossem Auge zu erkennen und leuchtete 23 Tage lang heller als die Venus. Der neue Stern hatte rot-weisse Farbe.

Hubble hat als erster 1928 das Ereignis von 1054 mit dem Krebsnebel assoziiert.

Wir wissen heute, dass zumindest in diesem Fall tatsächlich ein Neutronenstern entstand. Der Krebspulsar ist ein schnell rotierender Neutronenstern mit einem gigantischen Magnetfeld $B \sim 10^{12}$ Gauss. Die von ihm in Form von elektromagnetischen Wellen und hochenergetischen Teilchen ausgehende Energie bringt auch heute den Krebsnebel noch zum Leuchten. Die Strahlung des Nebels stammt von hochenergetischen Elektronen, welche Energien bis zu 10^{14} eV haben. Das zugehörige Synchrotronspektrum erstreckt sich vom Radiobereich bis zur Röntgen- und γ-Strahlung.

7 Eigenschaften der Neutronensterne, Radiopulsare

Neutronensterne sind etwa 1½mal so massiv wie die Sonne, aber nur so ausgedehnt wie ein grosser Berg. Die Dichte im Inneren ist deshalb Hunderte von Millionen von Tonnen pro cm^3. Das Gravitationsfeld auf der Oberfläche ist etwa 10^{11}mal so gross wie auf der Erde. Deshalb entspricht einer Mt. Everest-Besteigung auf einem Neutronenstern die Besteigung von weniger als einem Tausendstel mm.

Über das Innere eines Neutronensterns wissen wir recht gut Bescheid (Bild 5). Unterhalb einer Atmosphäre von wenigen Metern befindet sich die *äussere Kruste,* welche aus einem Gitter von vollständig ionisierten Kernen und

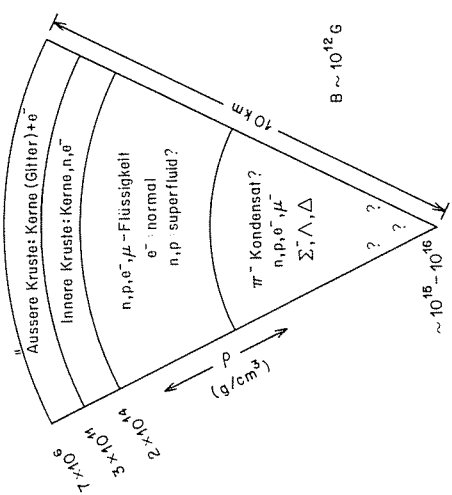


Bild 5 Querschnitt durch einen typischen Neutronenstern.

Fig. 5 Cross section through a typical neutron star.

einem hochentarteten relativistischen Elektronengas besteht. In dieser Schicht steigt die Dichte auf etwa 3×10^{11} g cm^{-3} an, und ihre Dicke ist typisch ein Kilometer.

Die *innere Kruste* ist ebenfalls etwa 1 km dick. Sie enthält, neben zunehmend neutronenreichen Kernen im β-Gleichgewicht und entarteten relativistischen Elektronen, auch ein hochentartetes Neutronengas, welches möglicherweise superfluid ist.

Die *innere Flüssigkeit* besteht v. a. aus Neutronen (welche in einem gewissen Dichtebereich möglicherweise superfluid sind), mit einigen Prozent Protonen und Elektronen, welche das β-Gleichgewicht aufrechterhalten. Man beachte, dass das Pauli-Prinzip die Neutronen stabilisiert.

Der *zentrale Kern,* die Region innerhalb weniger km vom Zentrum, enthält neben Hyperonen und Müonen für die massereichsten Sterne in der Nähe des Zentrums möglicherweise eine Quark-Phase.

Wenn der zentrale Eisen-Nickel-Kern eines massereichen Sterns instabil wird und auf Kerndichten kollabiert, werden etwa 10% seiner Ruheenergie, d. h. $\simeq 10^{53}$ erg, freigesetzt. Ein Grossteil dieser Energie wird in kurzer Zeit durch Neutrinos abgestrahlt. Die Innentemperatur des Neutronensterns sinkt deshalb in kurzer Zeit von $\sim$ 10 MeV auf $\sim$ 1 MeV. Dann ist die Materie «kalt».

Bei der Implosion auf einen Neutronenstern nimmt auch das Magnetfeld enorm zu, da das Sternplasma sehr gut leitend ist und damit der magnetische Fluss erhalten bleibt. Man erwartet deshalb für Neutronensterne gigantische Magnetfelder von etwa 10^{12} Gauss. Dies wird durch Beobachtungen bestätigt. Die hohen Magnetfelder verändern die Struktur der Materie an der Oberfläche auf recht dramatische Weise.

Beim Kollaps wird auch der Drehimpuls erhalten. Deshalb rotieren Neutronensterne anfänglich sehr schnell. Z. B. rotiert der Krebspulsar mit einer Periode von 33 msec. Dies gibt Anlass zu einer Strahlung von 33 Hz mit einer Leistung von 5×10^{38} erg/sec.

Letztes Jahr wurde ein ganz aussergewöhnlicher, sehr schneller Pulsar mit einer Periode von 1.56 msec entdeckt. Seine Oberfläche dreht sich mit etwa 20% der Lichtgeschwindigkeit.

Ein berühmter Pulsar befindet sich in einem sehr engen Binärsystem[3]. (Wahrscheinlich ist auch der Partner ein Neutronenstern.) Dies ermöglicht es, den Pulsar zu «wägen», mit dem Resultat $M = 1.4\ M_{\odot}$. Zudem verliert dieses System Energie durch Abstrahlung von Gravitationswellen; die abgestrahlte Menge entspricht genau den Voraussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Es ist sehr schwierig zu sagen, welcher Zustand sich in der Magnetosphäre eines schnell rotierenden magnetischen Neutronensterns einstellt. Deshalb ist

[3] Pulsperiode = 59 msec, Bahnperiode = 7.75 Std.

die Entstehung der Pulsarstrahlung, welche ihren Ursprung wahrscheinlich in den magnetischen Polgegenden hat, noch nicht genügend geklärt. Die stark gebündelte Strahlung an den Polen wirkt wie die Lampen eines Leuchtturms, wenn die magnetischen Pole nicht mit den Rotationspolen zusammenfallen (Bild 6).

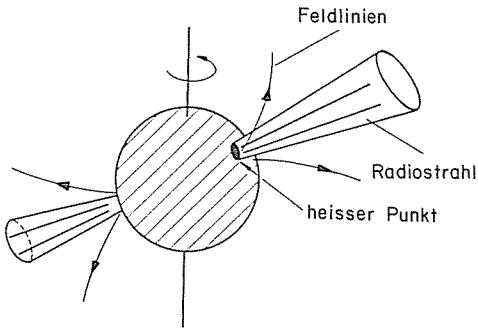


Bild 6 Radiopulsare sind schnell rotierende Neutronensterne mit enorm starken Magnetfeldern ($B \sim 10^{12}$ Gauss). Die vom Neutronenstern ausgehende Radiostrahlung entweicht in zwei engen Kegeln, welche sich mit der Rotation des Sternes wie der Strahl eines Leuchtturms drehen. Nur wenn ein Beobachter von einem Strahlungskegel überstrichen wird, kann er den Neutronenstern in Form einer scheinbar gepulsten Strahlung sehen. Der Ursprung der Strahlung ist aber noch ungenügend verstanden.

Fig. 6 Radio pulsars are rapidly rotating neutron stars with enormous magnetic fields ($B \sim 10^{12}$ Gauss). The radio emission of the neutron star is directed in two narrow cones, which turn around with the rotation of the star, like the beam of a lighthouse. The neutron star becomes only visible in the form of a pulsed radiation if one of the radiation cones sweeps by us. The origin of the radiation is, however, not yet sufficiently understood.

8 Röntgenpulsare

Wesentlich besser Bescheid über den Ort und den Mechanismus der gepulsten Strahlung wissen wir bei den *Röntgenpulsaren*. Diese wurden mit dem berühmten Röntgensatellit UHURU im Jahre 1971 entdeckt.

Diese Röntgenquellen haben ihren Sitz in engen Doppelsternsystemen. Eine der beiden Partner ist fast immer ein heller O- oder B-Stern, der etwa die zehn- bis zwanzigfache Masse der Sonne hat. (Eine Ausnahme ist Hercules X1.)

Die qualitative Interpretation der Röntenpulsare steht fest. Der Begleiter des normalen Sternes ist ein Neutronenstern, und dieser saugt überströmendes Gas an (Bild 7).

Die Materie fällt schliesslich auf die Oberfläche des Sternes, wobei etwa 10% der Ruheenergie freigesetzt werden. Die starken Magnetfelder des Neutronensterns leiten das Plasma – wie beim Sonnenwind – zu den magnetischen Polen ab (Bild 8). Die herunterstürzende Materie erzeugt zwei «heisse Flekken» von intensiver Röntgenstrahlung.

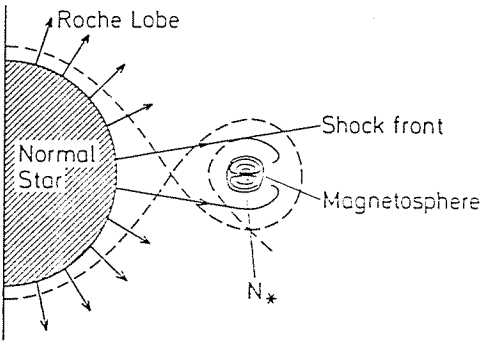
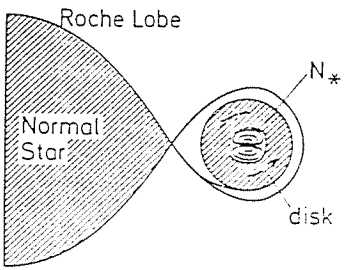


Bild 7 Schematisches Bild von Wind- und Scheiben-Akkretion.

Fig. 7 Schematic picture of wind and disk accretion.



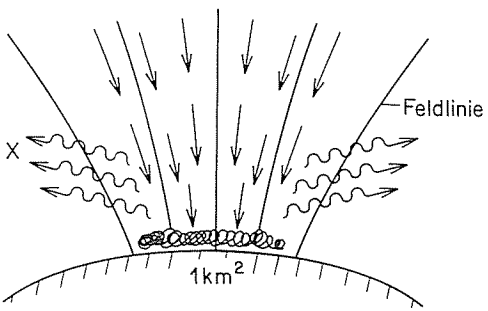


Bild 8 Materieeinfall und Heizung der Polkappe. Die Röntgenstrahlung hat eine Stärke von typisch 10^{36}–10^{38} erg/sec. Die zugehörige Strahlungstemperatur ist in der keV-Region.

Fig. 8 Infalling matter and heating of the polar cap. The X-ray luminosity is typically 10^{36}–10^{38} erg/sec. The corresponding radiation temperature is in the keV region.

Die Dipolachse des Feldes wird im allgemeinen nicht mit der Rotationsachse zusammenfallen, und deshalb rotieren die heissen Flecken mit dem Stern. Damit drehen sich auch die beiden von ihnen ausgehenden Röntgenlichtkegel ähnlich wie der Lichtstrahl eines Leuchtturmes, und wenn diese die Richtung nach der Erde überstreichen, erscheint uns der Stern als Röntgenpulsar. In vielen Fällen wird die Röntgenstrahlung vom optischen Begleiter mit der Umlaufszeit des Systems periodisch verdunkelt.

Die beobachteten Röntgenluminositäten sind $L_X \simeq 10^{36} \div 10^{38}$ erg/sec. Dies entspricht einem Einfall von ~ 100 Milliarden Tonnen pro Sek. Die strahlende Fläche an den Polkappen ist nur etwa 1 km². Der Energiefluss ist so gross, dass der Beitrag von einem Zehnmilliardstel mm² den Primärenergiebedarf der Schweiz decken würde.

9 Röntgenburster

Mit Hilfe von weiteren Satelliten (ANS, SAS-3, OSO-8 etc.) entdeckten die Astronomen in den Jahren 1975 und 1976 eine neue Klasse von Röntgenquellen, die sog. Burster. Bei diesen handelt es sich um kurzzeitige Ausbrüche von Röntgenstrahlung aus Quellen nahe dem Zentrum unserer Galaxie oder in Kugelsternhaufen. Diese wiederholen sich in unregelmässigen Abständen, die zwischen mehreren Stunden und einigen Tagen betragen. Typischerweise erreicht die Intensität bei einem solchen Ausbruch nach wenigen Sekunden ihr Maximum und fällt danach etwa innerhalb einer Minute auf ihren alten Wert zurück. In einem Ausbruch werden etwa 10^{39} erg abgestrahlt. (Dies ist etwa gleichviel wie die Sonne in ungefähr zwei Wochen aussendet).

Wiederum haben diese Quellen ihren Sitz in sehr engen binären Systemen, mit einem Neutronenstern als Partner. Diesmal ist aber der optische Begleiter ein massearmer Stern von vielleicht 0.5–1.0 $M_\odot$. Wenn dieser ein roter Riese wird und sein kritisches Volumen ausfüllt, strömt Gas auf den Neutronenstern über und bildet wieder eine Akkretionsscheibe. Das kritische Volumen ist tatsächlich nicht sehr gross (und kann deshalb vom massearmen Stern erreicht werden), da die Bahnperioden, in den Fällen, wo man diese bestimmen konnte (mit Ausnahmen), nur einige Stunden betragen. Die optische Strahlung des Systems stammt zum überwiegenden Teil aus der Akkretionsscheibe, denn man konnte nur in einigen Fällen im röntgenruhigen Stadium (neben den Emissionslinien) auch Absorptionslinien finden. Dies zeugt von der niedrigen Leuchtkraft des optischen Partners. In diesem Zusammenhang ist auch die bereits erwähnte Tatsache wichtig, dass die Röntgenquellen, die nicht pulsieren und keine Verfinsterungen zeigen, meist im galaktischen Zentrum und in Kugelhaufen, d. h. in alten Sternpopulationen, zu finden sind. Deshalb würde man erwarten, dass das Magnetfeld des Neutronensterns teilweise zerfallen ist, oder dass die Dipolachse mit der Rotationsachse zusammenfällt. Dies passt umgekehrt dazu, dass diese Röntgenquellen nicht pulsieren. Die herunterstürzende Materie wird sich mehr oder weniger auf die ganze Oberfläche des Neutronensterns verteilen, und die freiwerdende Gravitationsenergie wird in Form einer ungefähr konstanten Röntgenstrahlung wieder abgegeben (Bild 9). Diese wird vom optischen Partner, im Einklang mit den Beobachtungen, nicht verfinstert, weil die Scheibe für Röntgenstrahlung optisch dick ist und der kleine optische Stern deshalb im Röntgenschatten untertaucht.

Da die angehäufte Materie hauptsächlich aus H und He besteht, können unkontrollierte Kernfusionsprozesse gezündet werden. Tatsächlich steht ziemlich fest, dass die Röntgenausbrüche der Burster über dem konstanten Hintergrund (mit einer Ausnahme) auf thermonukleare Explosionen zurückzuführen sind. Ich will dies noch etwas näher erklären.

Unterhalb einer etwa 1 m dicken Schicht des angehäuften Wasserstoffs ist

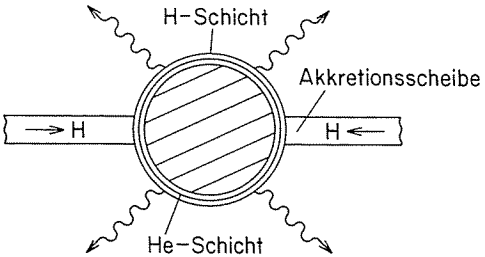


Bild 9 Die kontinuierliche Röntgenstrahlung der Burster entsteht aus dem Einsturz des Wasserstoffs einer Akkretionsscheibe auf einen Neutronenstern. Die Ausbrüche von Röntgenstrahlung werden durch thermonukleare Blitze erzeugt.

Fig. 9 The continuous emission of X-rays is generated as hydrogen from an accretion disk falls on a neutron star. The bursts of X-rays are generated by thermonuclear flashes.

die Dichte bereits auf $\sim 10^{4-6}$ g cm^{-3} angestiegen. Wenn nun der core des Neutronensterns genügend heiss ist ($\sim$ einige 10^8 K), so wird in einem Meter Tiefe der Wasserstoff bereits zu brennen beginnen. Deshalb entwickelt sich darunter, wie detaillierte Rechnungen zeigen, eine etwa gleich dicke Heliumschicht. Weiter unten ist auch Helium nicht mehr stabil bezüglich Fusion in Kohlenstoff. Deshalb brennen zumindest zwei dünne Schalen (Bild 10). Diese sind, wie Schwarzschild und Härm in einem anderen Zusammenhang entdeckt haben, thermonuklear instabil. Die Existenz und die Stärke dieser Instabilität sind eine direkte Folge der sehr starken Temperaturabhängigkeit der thermonuklearen Reaktionsraten. In der vorliegenden Situation wird dies noch durch die teilweise Entartung des brennenden Materials verstärkt, da der Druck nicht so stark auf die ansteigende Temperatur reagiert.

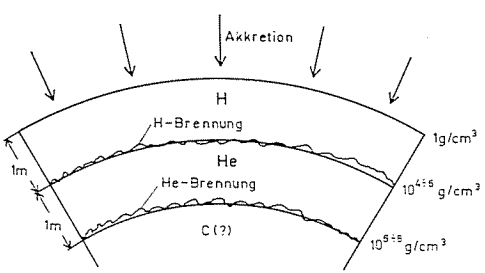


Bild 10 Äussere Schichten eines akkretierenden, schwach magnetisierten Neutronensterns.

Fig. 10 Outer layers of an accreting weakly magnetized neutron star.

Die p-p-Kette ist nicht genügend temperaturempfindlich, um ein thermisches Weglaufen der wasserstoffbrennenden Schicht auszulösen. Der CNO-Zyklus wäre zwar dazu genügend temperaturabhängig, aber dieser saturiert bei hohen Reaktionsgeschwindigkeiten aufgrund der relativ langen Lebensdauer ($\sim 10^2$ sec) der β-instabilen Kerne ^{13}N, ^{14}O, ^{15}O und ^{17}F, welche am Zyklus beteiligt sind.

Hingegen ist die He-brennende Schale für einen weiten Bereich von Bedingungen instabil. Dies wird durch detaillierte Rechnungen bestätigt. Wenn sich etwa 10^{21} g Materie auf der Oberfläche angesammelt haben, entsteht ein Heliumblitz, bei dem praktisch alles brennbare Material aufgebraucht wird. Die meiste Energie wird dabei zur Photosphäre transportiert und in einem

Röntgenausbruch abgestrahlt. Die berechneten Eigenschaften dieser Röntgenschauer (Anstiegszeit, maximale Luminosität, Abklingzeit etc.) gleichen den beobachteten recht gut. Für eine typische Akkretionsrate von 10^{17} g/sec betragen die Zeitabstände zwischen den Ausbrüchen etwa 3 Stunden.

Die Leuchtkraft des konstanten Hintergrundes ist etwa hundertmal grösser als in den zeitlich aufintegrierten Röntgenbursts. Dies entspricht gerade dem Verhältnis der Gravitationsenergie (100 MeV/H-Atom) zur He-Fusionsenergie ($\sim$ 1 MeV pro ursprüngliches H-Atom).

Bei der Explosion wird eine Schicht von etwa 10^7 g cm^{-2} um ca. 100 m angehoben; die Temperatur ist am Explosionsort zunächst Milliarden von Grad, und die maximale Luminosität beträgt etwa 10^{38} erg/sec.

Weitere Beobachtungen stützen die Richtigkeit des diskutierten Modells. Bei der Abkühlphase eines Ausbruchs ist das Spektrum praktisch schwarz. Deshalb lässt sich aus der Luminosität und dem ungefähren Abstand der Röntgenquelle die emittierende Oberfläche bestimmen. Man erhält in allen Fällen Radien um zehn Kilometer.

Es ist zudem gelungen nachzuweisen, dass fast gleichzeitig mit einem Röntgenblitz auch ein Ausbruch im optischen Bereich erfolgt. Das Maximum des letzteren erscheint aber um einige Sekunden verzögert. Die Interpretation liegt auf der Hand: Der Röntgenblitz erhitzt die Akkretionsscheibe, und deshalb entsteht dort ein verzögertes optisches «Echo».

Schliesslich müssen wir noch auf eine, bis jetzt einzigartige Röntgenquelle hinweisen, nämlich den schnellen Burster MXB 1730–335. Dieser zeigt in seinen aktiven Perioden (welche sechs Monate auseinanderliegen) alle 3–4 Stunden Röntgenausbrüche der bereits beschriebenen und gedeuteten Art. Als Besonderheit emittiert er aber zusätzlich in schneller Folge eine zweite Art von Röntgenblitzen, oft mehrere Tausend in einem Tag. Man vermutet, dass diese auf gewisse Instabilitäten im Akkretionsfluss zurückzuführen sind; aber wirklich verstanden ist dieses «Garbenfeuer» nicht.

10 Gamma-Burster

Mit den Vela-Satelliten, die zur Überwachung von Kernwaffenexplosionen im erdnahen Raum gebaut wurden, hat man kosmische γ-Ausbrüche entdeckt, welche zunächst sehr rätselhaft waren. Vermutlich werden diese ebenfalls durch thermonukleare Explosionen – diesmal jedoch auf magnetisierten Neutronensternen – erzeugt. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um alte ausgediente Radiopulsare, die langsam Materie aus interstellaren Wolken akkretieren. Dafür sprechen verschiedene Beobachtungen. Besonders interessant ist das Auftreten von Emissionslinien im Bereich 420–460 keV, bei denen es sich vermutlich um gravitations-rotverschobene Elektron-Positron-Paarvernichtungslinien handelt. Die Grösse der Rotverschiebung passt gerade zu den erwarteten Werten für Neutronensterne.

Ein besonders spektakulärer γ-Burst wurde am 5. März 1979 beobachtet. Da seine Anstiegszeit nur 0.25 msec betrug, konnte die Quelle sehr genau trianguliert werden. Innerhalb der Fehler fällt sie mit dem Supernova-Überrest N49 in der Grossen Magellanschen Wolke zusammen, welche ihrerseits eine Radioquelle und eine Quelle weicher, diffuser Röntgenemission ist. Auf der abfallenden Flanke des Ausbruchs beobachtet man regelmässige Pulsationen im Abstand von 8.3 sec, was sehr stark darauf hinweist, dass es sich tatsächlich um einen Neutronenstern handelt.

Hier sind aber noch mehr Beobachtungen nötig, um die theoretischen Möglichkeiten einzuschränken.

11 Schwarze Löcher

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie können – auch für Zustandsgleichungen, welche bei hohen Energien sehr steif werden – nicht beliebig massive Neutronensterne existieren. Eine realistische Grenzmasse dürfte zwischen zwei und drei Sonnenmassen liegen.

Eine superkritische Masse kann zwar temporär in einem Gleichgewicht existieren, indem sie durch thermonukleare Prozesse einen Druck aufbaut. Da aber früher oder später die Kernenergiequellen erschöpft sind, ist kein dauerndes Gleichgewicht möglich, wenn nicht genügend Masse (etwa in einer Supernova-Explosion) abgestossen wird. Dann wird der Stern auf ein Schwarzes Loch kollabieren.

Wir betrachten zunächst den sphärisch symmetrischen Kollaps und die sphärisch symmetrischen Löcher. In dieser einfachen Situation zeigen sich bereits einige der qualitativ wichtigsten Eigenschaften.

Der sphärisch symmetrische Kollaps ist besonders einfach, weil das Gravitationsfeld ausserhalb des Sterns bekannt ist und nur von der kollabierenden Gesamtmasse abhängt (und nicht von den dynamischen Details der Implosion). Das Feld im Aussenraum ist ein Stück der *Schwarzschild-Kruskal-Lösung* der Einsteinschen Vakuumsgleichungen.

In Bild 11 ist der sphärisch symmetrische katastrophale Kollaps auf ein Schwarzes Loch in einem Raum-Zeit-Diagramm veranschaulicht. Man beachte insbesondere die Lichtkegelstruktur, aus der sich die merkwürdigen Kausalitätsverhältnisse ablesen lassen. Die Lichtkegel berühren den sog. Horizont («Zylinder» mit Schwarzschild-Radius $R_S = 2\ GM/c^2 \simeq 3$ km $M/M_\odot$) von aussen. Aus dieser Figur ergeben sich die folgenden Schlüsse:

1. Wenn der Sternradius kleiner als der Radius des Horizonts geworden ist, kann kein Gleichgewicht mehr existieren, da die Weltlinien der Sternoberfläche innerhalb der Lichtkegel verlaufen müssen. Der Kollaps auf eine Singularität ist unvermeidlich. In der Nähe der Singularität dürfte allerdings die Allgemeine Relativitätstheorie ihre Gültigkeit verlieren, weil schliesslich auch Quanteneffekte der Gravitation wichtig werden.

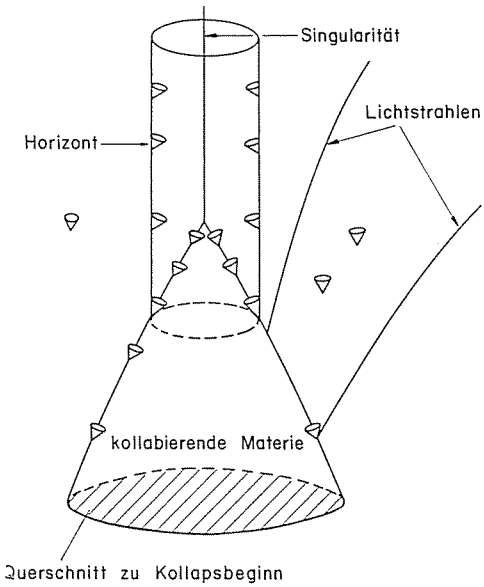


Bild 11 Raum-Zeit-Diagramm eines kollabierenden Sterns und Entstehung eines Schwarzen Loches.

Fig. 11 Space-time diagram of a collapsing star and formation of a black hole.

2. Wird innerhalb des Horizonts ein Signal abgesandt, so kann dieses nicht mehr zu einem entfernten Beobachter gelangen. Die Sternmaterie ist buchstäblich aus der Weltgeschichte ausgeschieden. Auch alle Lichtstrahlen fallen in die Singularität. Der Horizont bildet den Rand des Gebietes, das kausal mit einem weit entfernten Beobachter verbunden ist; durch diese Eigenschaft ist er allgemein definiert. Der Ereignishorizont wirkt also wie eine einseitige Membrane, durch welche Energie und Information nach innen, aber nicht nach aussen treten können. Das Auftreten von Horizonten, d. h. von Kausalitätsrändern in unserem Universum, ist eine sehr bemerkenswerte Konsequenz der Allgemeinen Relativitätstheorie. (Die Singularität liegt jenseits des Horizonts und hat folglich keine kausale Verbindung mit einem äusseren Beobachter; sie kann von einem solchen nicht «gesehen» werden. Es besteht die Vermutung, dass dies für alle «realistischen Singularitäten» so ist.)

3. Ein Beobachter auf der kollabierenden Sternoberfläche bemerkt beim Überqueren des Horizonts nichts Besonderes. Lokal ist dort die Geometrie von Raum und Zeit wie anderswo. Für sehr grosse Massen sind auch die Gezeitenkräfte am Horizont durchaus erträglich. Der Horizont ist also ein *globales* Phänomen der Raum-Zeit-Mannigfaltigkeit.

4. Für einen äusseren Beobachter weit weg vom Stern erreicht letzterer den Schwarzschild-Horizont erst nach unendlich langer Zeit. Für ihn erstarrt der Stern – aufgrund der gravitativen Zeitdilatation – beim Schwarzschild-Horizont. In der Praxis wird aber der Stern plötzlich unsichtbar, da die Rotverschiebung exponentiell anzusteigen beginnt und die Leuchtkraft entsprechend abnimmt. Die charakteristische Zeit dafür ist $\tau \sim R_S/c \simeq 10^{-5}\,(M/M_\odot)$ sec;

für $M \sim M_\odot$ ist diese also ausserordentlich kurz. Danach liegt ein «Schwarzes Loch» vor. Sinnvollerweise nennt man den Horizont die Oberfläche und die äussere Geometrie das Gravitationsfeld des Schwarzen Loches. Das Innere ist für die Astrophysik nicht relevant. Das äussere Gravitationsfeld sieht aber, von weit weg gesehen, genauso aus wie dasjenige eines kompakten massiven Objektes.

Beim realistischen Kollaps auf ein Schwarzes Loch wird sich zunächst ein nichtstationärer Horizont bilden. Durch Emission von Gravitationswellen wird sich aber dieses angeregte Schwarze Loch in Bruchteilen einer Sekunde einem stationären Zustand nähern.

Die möglichen Typen von stationären Löchern sind alle bekannt; die elektrisch neutralen sind durch Masse und Drehimpuls völlig charakterisiert. Wenn also die Materie hinter einem Horizont verschwindet, so sieht man von ihren mannigfaltigen Besonderheiten nichts mehr als deren Gesamtmasse und Drehimpuls; die Vorgeschichte geht fast völlig verloren und ist jenseits des Horizonts verborgen.

Rotierende Schwarze Löcher haben einige bemerkenswerte Eigenschaften, auf die wir aber nicht eingehen können. Insbesondere kann man – auf Kosten des Drehimpulses – eine beträchtliche Energie extrahieren. Diese wird durch den sog. *2. Hauptsatz von S. Hawking* begrenzt. Er lautet:

«Die Oberfläche eines (nicht notwendigerweise stationären) Schwarzen Loches kann im Laufe der Zeit bei (klassischer) Wechselwirkung mit Strahlung und Materie nicht abnehmen. Liegen mehrere Schwarze Löcher vor, so gilt die entsprechende Aussage für die Summe der Oberflächen aller Löcher.»

Schwarze Löcher wirken wie kosmische Staubsauger. Wenn z. B. ein Schwarzes Loch Teil eines engen binären Systems ist, so kann es von seinem Partner (wenn dieser beispielsweise ein Riese ist) Materie ansaugen, welche dabei so sehr erhitzt wird, dass eine starke Röntgenquelle entsteht. Es gibt gute Gründe anzunehmen, dass die Röntgenquelle Cygnus X-1 auf diese Weise zu erklären ist.

Der optische Begleiter dieses spektroskopischen binären Systems ist ein blauer Superriese der 9. Grössenklasse und trägt die Bezeichnung HDE-226868. Die Bahnperiode beträgt 5.6 Tage und die Röntgenluminosität L_X ist etwa 10^4 $L_\odot$. Die Röntgenquelle fluktuiert chaotisch auf allen Zeitskalen zwischen 20 sec und den kürzesten gegenwärtig auflösbaren Zeiten von etwa 10^{-2} sec. Es zeigen sich keine Periodizitäten, und es konnte auch keine eindeutige Röntgenverdunkelung beobachtet werden. Erwähnt sei auch noch, dass das Röntgenspektrum ungewöhnlich hart ist (entsprechend einer Temperatur von 3×10^8 K).

All dies spricht nicht sonderlich für Akkretion auf einen Neutronenstern. Das entscheidende Argument dagegen beruht aber auf der grossen Masse, welche man für das kompakte Objekt aus den Beobachtungen entnimmt. Die Massenbestimmung ist zwar mit vielen Unsicherheiten behaftet und deshalb

recht ungenau. Trotzdem ist aber die Masse des kompakten Objektes mit hoher Wahrscheinlichkeit grösser als etwa 6 $M_\odot$. Nun lässt sich aber zeigen, dass Neutronensterne mit so hoher Masse nicht existieren können: (Die maximale Masse eines Neutronensterns beträgt etwa 3 $M_\odot$.) Deshalb sitzt in Cyg X-1 sehr wahrscheinlich ein Schwarzes Loch. Gewisse Zweifel sind aber nach wie vor angebracht.

12 Supermassive Schwarze Löcher in aktiven Galaxien und Quasaren

In aktiven Galaxien (Radiogalaxien, Seyfert-Kerne und BL-Lacertae-Objekte), wozu wahrscheinlich auch die Quasare gehören, werden gewaltige Energiemengen in relativ kleinen Räumen freigesetzt. Ein typischer Quasar setzt hundert- bis tausendmal mehr Energie frei als eine normale Galaxie. Die relativ raschen Schwankungen der optischen und Röntgen-Leuchtkraft zeigen, dass das eigentliche Energiezentrum, der antreibende «Motor» eines Quasars, einen Durchmesser von nicht mehr als einem Lichttag hat.

Der folgende Vergleich beleuchtet diese extremen Verhältnisse: Stellen wir eine normale Galaxie hinsichtlich Grösse und Energieausstoss durch die Stadt Boston dar, dann entspricht einem Quasar die gesamte Energieerzeugung der Vereinigten Staaten auf der Grösse eines Fussball-Feldes.

Immer mehr setzt sich die Überzeugung durch, dass bei der Energieerzeugung in Quasaren gigantische Schwarze Löcher von vielleicht 10^9 Sonnenmassen im Spiel sind. (Der Schwarzschild-Radius eines solchen Loches beträgt etwa 3 Lichtstunden.) Diese Monster würden dauernd mit Gas und Staub gefüttert, welche in den zentralen Gebieten von Galaxien reichlich vorhanden sind. (Im zentralen Parsec ist die Dichte der Sterne so gross, dass durch Zusammenstösse Staub- und Gaswolken erzeugt werden.) Würde ein Schwarzes Loch nur einige Sonnenmassen pro Jahr verschlingen, so könnte die dabei freiwerdende Energie den hellsten Quasar «antreiben», und dieser könnte eine Galaxie mit einer Billion Sterne überstrahlen.

Die Akkretion geschieht wahrscheinlich wiederum in einer Scheibe. Möglicherweise wird ein Teil des Gases in Form von Jets längs der Rotationsachse des Loches durch eine Art Düsenmechanismus wieder ausgestossen.

Auf diesem sehr aktuellen Gebiet gibt es aber noch viel mehr Fragen und Hypothesen als Antworten.

13 Zusammenfassung

Im Sinne einer Zusammenfassung wollen wir die kosmischen Objekte in einem Masse-Radius-Diagramm betrachten (Bild 12). In dieser Ebene gibt es drei verschiedene Gebiete.

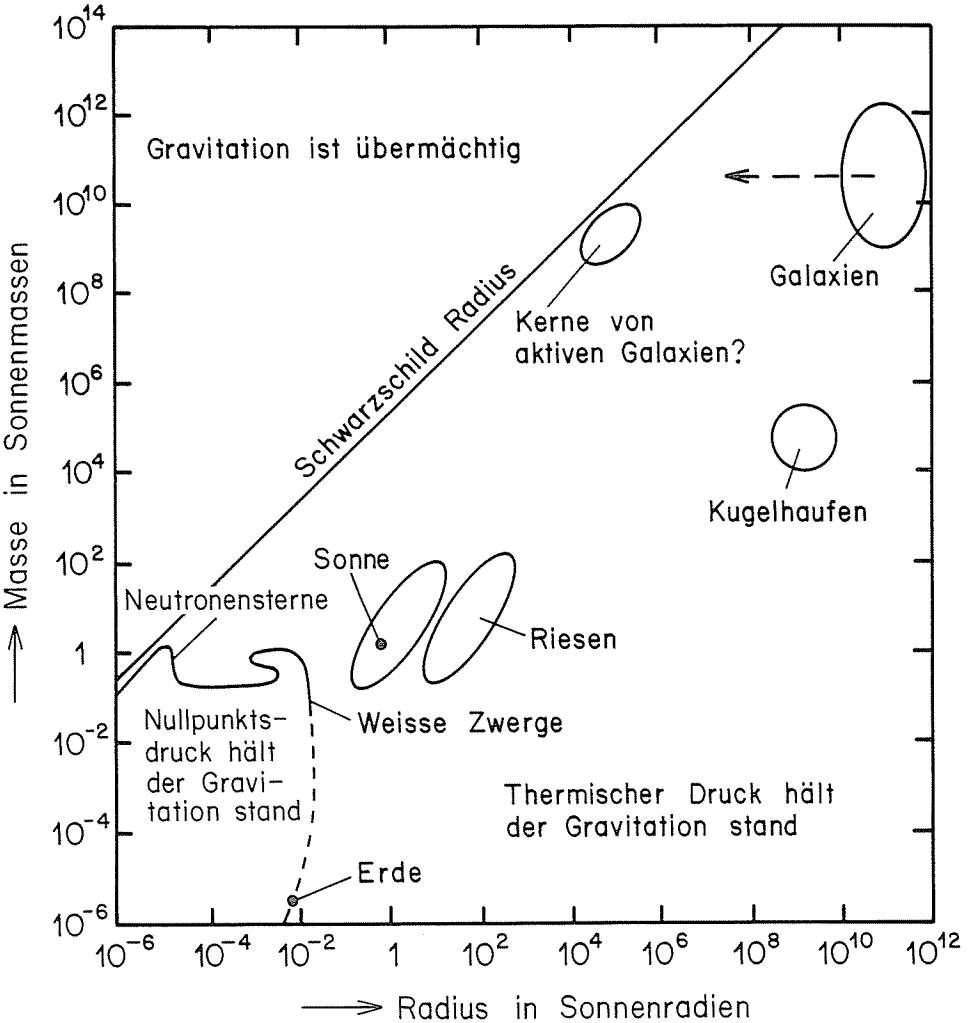


Bild 12 Masse-Radius-Diagramm für bekannte astronomische Objekte.

Fig. 12 Mass-radius diagram for known astrophysical objects.

(1) Die Hauptreihensterne (z. B. unsere Sonne), die Riesen, die Kugelsternhaufen und die grosse Vielfalt der Galaxien sind Assoziationen, bei denen der thermische Druck oder makroskopische Bewegungen der Gravitation standhalten. Dies ist ein temporärer Zustand, der allerdings bei den Galaxien sehr lange dauert.

(2) In einem kleinen Bereich kann die Materie auch in einem «kalten» Zustand existieren. Dazu gehört die «alltägliche» Materie (Steine, Berge,

Meere etc.), der Mond, die Planeten und am oberen Ende der Massenskala die Weissen Zwerge und die Neutronensterne. Die maximale Masse ist aber nicht grösser als zwei bis drei Sonnenmassen.

(3) Jenseits der Linie $R = 2\ GM/c^2$ gewinnt die Gravitation immer. Keine Kräfte können dann ein Gleichgewicht aufrechterhalten. Sehr massive Objekte werden früher oder später dort enden, wodurch sie zu Schwarzen Löchern werden. Dies gilt auch für die Galaxien, welche in ferner Zukunft (nach $\sim 10^{18}$ Jahren) zu supermassiven Schwarzen Löchern kollabieren. (Die Masse der Schwarzen Löcher ist unbegrenzt.)

Mit dieser, etwas trüben Aussicht wollen wir unsere Ausführungen beschliessen.

Prof. Dr. Norbert Straumann, Institut für Theoretische Physik der Universität Zürich, Schönberggasse 9, 8001 Zürich