

Die Zentralsterne Planetarischer Nebel

Teil 2

von Frank Giesecking

Nachdem wir in der letzten Folge im Hertzsprung-Russel-Diagramm (HRD) der Zentralsterne Planetarischer Nebel (ZPN) deren Entwicklungsrichtung feststellen konnten, wollen wir nun möglichen Zusammenhängen mit anderen Entwicklungsstadien der Sterne nachgehen. Dazu betrachten wir das erweiterte HRD in Abb. 10a. Als Orientierungshilfe wollen wir uns zunächst die vertraute Hauptreihe (HR) vergegenwärtigen, indem wir uns die Verbindungslinie zwischen der Sonne und dem Stern HD 93250 denken, der das obere Ende der heute bekannten HR markiert. Gemessen an diesem „Giganten“ der Hauptreihe, der bei $T_{\text{eff}} \approx 50\,000\text{ K}$ eine Leuchtkraft von über 1 Million Sonnenleuchtkräfte entwickelt, zeigen sich nun die meisten ZPN bei den Effektivtemperaturen klar überlegen. Sie sind jedoch trotz ihrer gewaltigen Leuchtkräfte von häufig über 1000 L_{\odot} hier deutlich unterlegen: Gemessen an ihren extrem großen Effektivtemperaturen müssen wir 1000 Sonnenleuchtkräfte als „unterleuchtkräftig“ bezeichnen. Dies gibt uns einen ersten Hinweis darauf, daß ZPN einen vergleichsweise zwergenhaften Aufbau besitzen müssen.

Da wir bei der Suche sowohl nach den Vorfahren als auch nach den Nachkommen der ZPN durch die Radien der Sterne einen vielversprechenden Aufschluß erhalten werden, sind in dem Diagramm auch noch die Orte gleichen Radius' eingetragen. Diese berechnen sich bekanntlich nach dem Stephan-Boltzmann-Gesetz $L = C_1 R^2 T_{\text{eff}}^4$ mit $R = C_2$, oder $\log L = 4 \log T_{\text{eff}} + C_3$ ($C_{1,2,3}$ sind Konstanten). Sie sollten also in unserem doppelt-logarithmischen HRD Geraden der Steigung 4 sein. (Da der Maßstab von L – nicht ganz zufällig – vierfach gegenüber dem von T_{eff} überhöht wurde, sind sie dort Geraden mit einer Neigung von 45° .)

Suche nach den Nachkommen

Im Gegensatz zur Hauptreihe, entlang derer sich die Radien der Sterne nur langsam ändern, durchschneidet die Verteilung der ZPN die Geraden konstanten Radius' beinahe senkrecht und überdeckt dabei mehr als zwei Größenordnungen. Die ZPN sind meist kleiner als die Sonne, die kleinsten unter ihnen nicht größer als die Erde! Solch kleine Radien kennen wir auch noch bei den Weißen Zwergen (WZ), die sich in unserem HRD exakt entlang einer Geraden konstanten Radius' mit $R = 0.012 R_{\odot}$ verteilen. Tatsächlich kühlen Weiße Zwerge entlang dieser Geraden unter Abstrahlung ihrer thermischen Energie ab und verglühen mit $L \sim T_{\text{eff}}^4$. Dadurch wird ein genetischer Zusammenhang nahegelegt, den wir mit folgenden drei Argumenten begründen wollen:

- Die heißesten ZPN müssen bereits einen Aufbau wie Weiße Zwerge besitzen. Sie liegen im HRD bereits genau auf der Linie konstanten Radius', auf der Weiße Zwerge abkühlen.
- Nach der in der letzten Folge festgestellten Entwicklungsrichtung innerhalb der ZPN-Verteilung zeigt sich, daß diese vermuteten unmittelbaren Vorfahren Weißer Zwerge tatsächlich auch die ältesten ZPN sind.

- Ein weiteres Argument liefert uns der Vergleich der Geburtsrate der ZPN (die bei zeitlich konstantem Umfang der Population äquivalent ihrer Sterberate ist) und der Geburtsrate der Weißen Zwerge. Beide ergeben sich aus der beobachteten Raumdichte der Objekte in einem möglichst vollständig erfaßten Raumvolumen (und damit notwendigerweise in der Sonnenumgebung), und einer typischen Zeitskala,

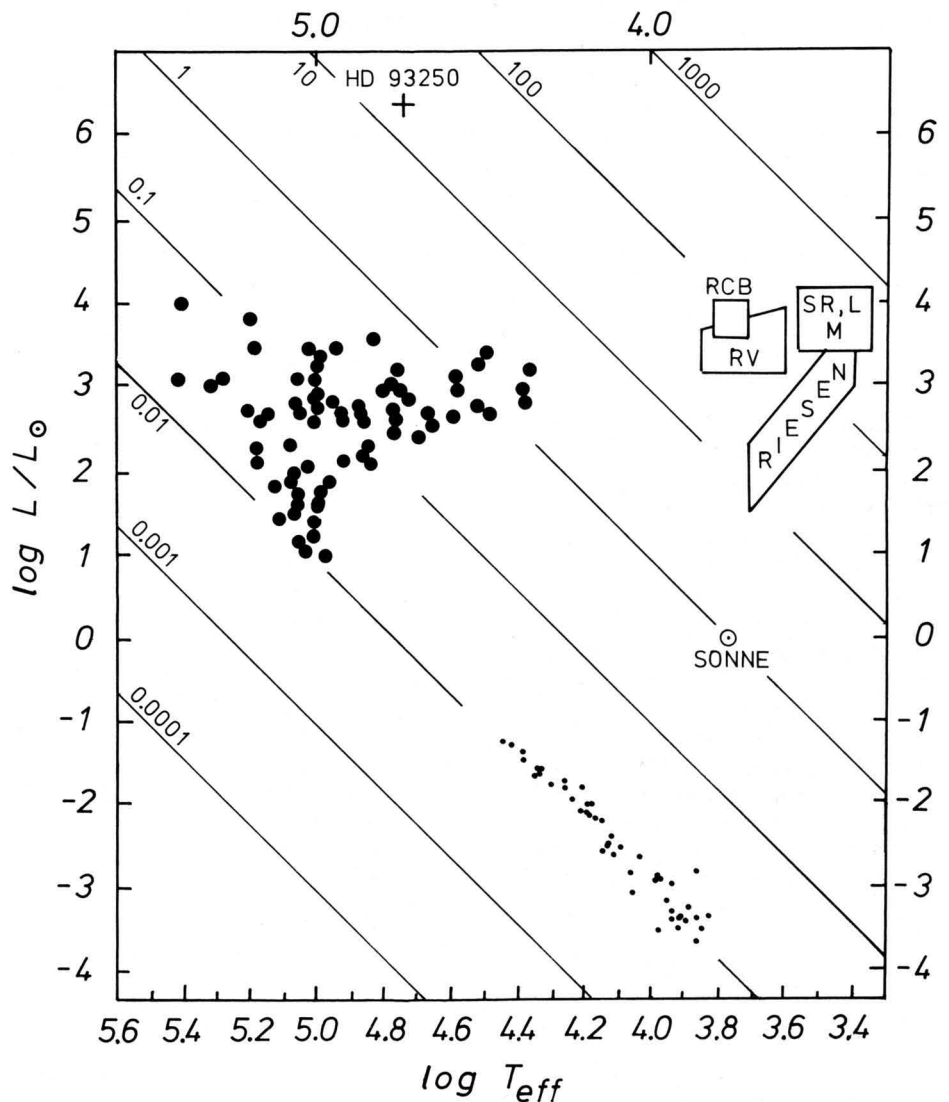


Abb. 10a: Hertzsprung-Russel-Diagramm. Große Punkte zeigen die Zentralsterne Planetarischer Nebel (siehe SuW 24, 448 [8–9/1985]). Die kleinen Punkte zeigen nach Koester, Schulz und Weidemann (1979) Weiße Zwerge mit Parallaxen ≥ 0.03 , also gut bekannten Entfernungen. (Da die schwächeren unter ihnen keineswegs mehr weiß, sondern bereits ziemlich gelb sind, sollte sich der bessere Name „entartete Zwerge“ einbürgern). Die Sonne und HD 93250, einer der heißesten und leuchtkräftigsten Hauptreihensterne, markieren die Lage der Hauptreihe. Ebenfalls eingetragen sind die Bereiche, die die Roten Riesen und die prominentesten Veränderlichen unter ihnen bevölkern. Hier findet man die kleine Gruppe der R-Coronae-Borealis-Sterne (RCB), weiter die RV-Tauri-Sterne (RV), die semiregulären (SR) und unregelmäßig veränderlichen Riesen (L), sowie die Mira-Veränderlichen (M). Die „heißesten“ (kühlen) Kandidaten, die verdächtigt werden, unmittelbare Vorfahren der Planetarischen Nebel zu sein, sind die Miras und RV Tauris. – Die unter 45° geneigten Geraden sind Linien konstanten Radius', die in Einheiten von Sonnenradien gekennzeichnet sind.

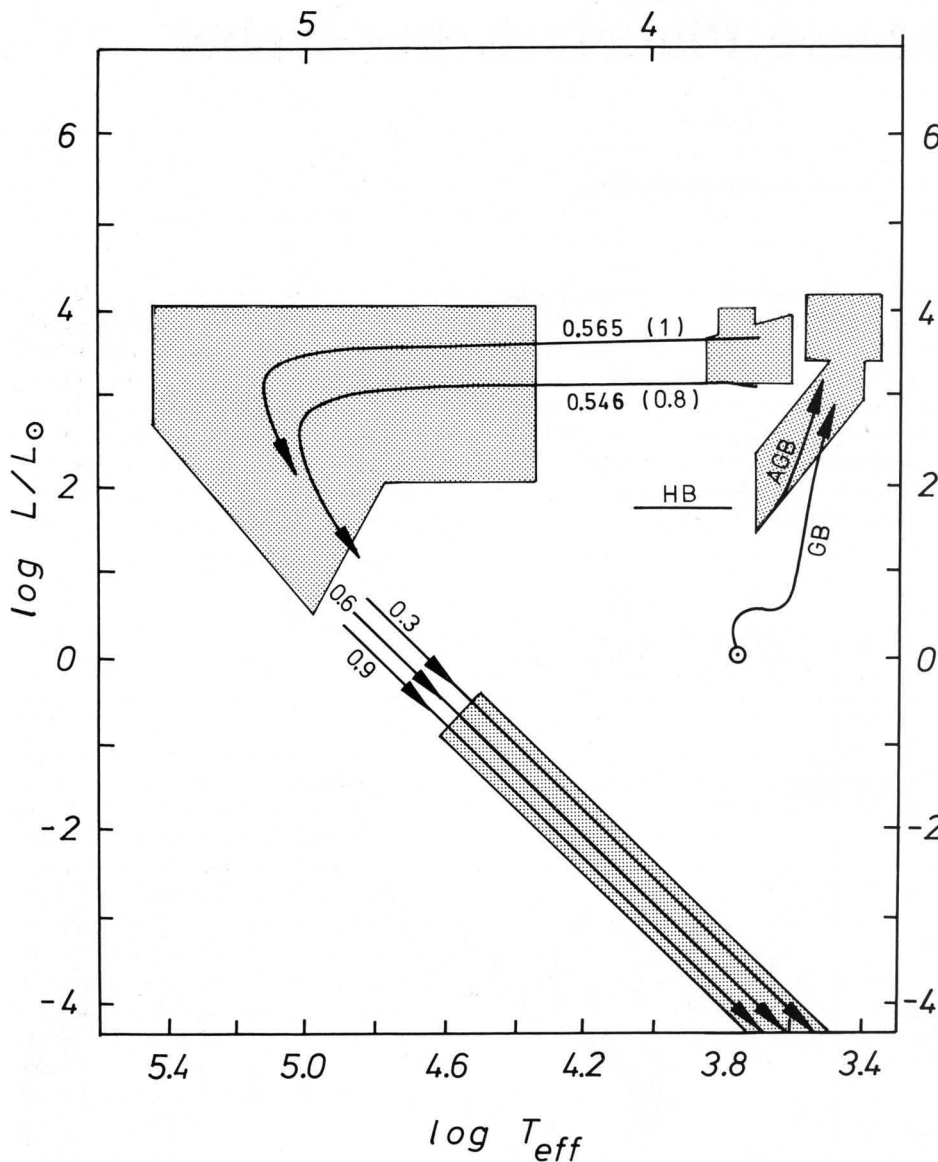


Abb. 10b: Wie Abb. 10a, jedoch nun mit besonderer Betonung der Entwicklungswege sonnenähnlicher Sterne von der Hauptreihe zu den Roten Riesen, über das Stadium der Planetarischen Nebel bis hin zu den entarteten Zwergen. In dem ersten Abschnitt bezeichnet GB den bekannten Riesenast, HB den Horizontalast und AGB den asymptotischen Riesenast. Der Weg in das Gebiet der Planetarischen Nebel wird nach neueren Rechnungen von Schönberner (1983) gezeigt für Sterne mit den ursprünglichen Massen von 1 und 0.8 Sonnenmassen, die sich nach Berücksichtigung des Massenverlustes auf die fast gleichen Massen von 0.565 bzw. 0.546 M_{\odot} reduzieren. (Man glaubt heute, daß unter anderem auch mit Hilfe des Sternwindes im Stadium der Roten Riesen wenigstens die Sterne mit Massen kleiner als vielleicht 5 M_{\odot} soviel Masse loswerden können, daß sie alle unter die Chandrasekhar-Grenze von 1.4 M_{\odot} kommen und die permanente Endkonfiguration entarteter Zwerge erreichen.) Die Kühlungswege in den Bereich der entarteten Zwerge hinein (auf Linien konstanten Radius) werden gezeigt für Restmassen von 0.3, 0.6 und 0.9 M_{\odot} , die sich aus den Radien ergeben, wenn bestimmte Annahmen über die chemische Zusammensetzung der entarteten Materie, insbesondere das C/O-Verhältnis, gemacht werden. – In allen Phasen entwickeln sich die Sterne um so schneller, je größer ihre Massen sind. Außerdem wächst die Zeitskala von der Entwicklung aus dem Gebiet der Roten Riesen bis zu den entarteten Zwergen ständig an. So ist ihre Größenordnung bis zum Erreichen des PN-Gebietes etwa 10^3 Jahre, im PN-Gebiet etwa 10^4 bis 10^5 Jahre, um dann bis zum roten Ende des Streifens der „Weißen Zwerge“ bis über 10^{10} Jahre anzuwachsen.

im ersten Fall der Lebensdauer des beobachtbaren PN-Phänomens, im zweiten Fall dem Zeitraum, während dessen die Bevölkerungsdichte der WZ auf den heute beobachteten Umfang angewachsen ist. Die heute bestgesicherte sonnennahe Raumdichte der PN ist $4.5 \cdot 10^{-8} \text{ pc}^{-3}$, die der WZ über 500 000 mal größer: $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ pc}^{-3}$. Für die Hüllen der PN können wir eine typische Lebensdauer abschätzen aus einer größten Ausdehnung von etwa 0.5 pc (bei der die Hüllen in dem zur Ab-

leitung der Raumdichte betrachteten sonnen-nahen Raumvolumen noch einigermaßen vollständig nachweisbar sind), und einer mittleren Expansionsgeschwindigkeit von 25 km/s. Aus diesen Zahlen erhalten wir eine für diese Statistik relevante Lebenserwartung von knapp 19 000 Jahren, was mit der obigen Raumdichte dann auf eine Sterberate von etwa $2.5 \cdot 10^{-12} \text{ pc}^{-3} \text{ a}^{-1}$ führt. Andererseits zeigt die Theorie der Kühlungswege Weißer Zwerge (insbesondere der Kühlzeiten), daß die in unserer

Statistik der Sonnenumgebung erfaßten WZ sich über ziemlich genau 10^{10} Jahre angesammelt haben müssen. Die hieraus mit der obigen Raumdichte folgende Geburtsrate Weißer Zwerge von etwa $2.5 \cdot 10^{-12} \text{ pc}^{-3} \text{ a}^{-1}$ steht in überraschend perfekter Übereinstimmung mit der Sterberate Planetarischer Nebel!

Aufgrund dieser drei Indizien gelangen wir zu der Schlußfolgerung, daß sich die Zentralsterne Planetarischer Nebel zu Weißen Zwergen entwickeln. Die Zahlenübereinstimmung bei unserem dritten Argument läßt sogar vermuten, daß, wenn auch vielleicht nicht alle WZ aus ZPN hervorgehen, letztere doch ihre hauptsächlichsten Vorfahren darstellen. (Neuere Statistiken lassen vermuten, daß vielleicht 20% der WZ nicht durch das ZPN-Stadium gegangen sind.)

Suche nach den Vorfahren

Nachdem wir jetzt die Nachkommen der ZPN gefunden haben, wollen wir uns auf die Suche nach den Vorfahren machen. Der erste, der vorgeschlagen hat, daß als mögliche Kandidaten hierfür die Roten Riesen (RR) ins Auge zu fassen seien, war wieder Shklovskii (im Jahre 1956!), dessen Name schon mehrfach im Zusammenhang mit PN's eine Rolle gespielt hat. Wir wollen wieder durch drei Indizien den Verdacht eines genetischen Zusammenhangs erhärten:

- Betrachten wir wieder die Radien der Sterne. Von den Geraden gleichen Radius in unserem HRD lesen wir ab, daß die Roten Riesen im Bereich von 100 Sonnenradien liegen. (Dabei läßt sich die zufällige exakte Symmetrie der Radien Weißer Zwerge ($1/100 R_{\odot}$) und Roter Riesen ($100 R_{\odot}$) bezüglich sonnenähnlicher Hauptreihensterne leicht merken.) Die mittleren Radien der Roten Riesen sind also vier Größenordnungen größer als die der Weißen Zwerge, mithin (bei Annahme vergleichbarer Massen) ihre mittleren Dichten 10^{12} mal kleiner, noch immer sechs Größenordnungen geringer als bei vergleichbaren Hauptreihensternen. Wegen der großen Ausdehnung und geringen mittleren Dichte erwarten wir also von Roten Riesen von vornherein, daß sie ihr äußeres Material leichter verlieren als alle anderen Sterne. Wir wollen diesen Tatbestand durch eine grobe Abschätzung der Entweichgeschwindigkeit V_{entw} an deren Oberfläche untermauern: Diese ergibt sich durch die Bedingung, daß ein Probeteilchen der Masse m im Schwerefeld des Sterns mit Radius R und Masse M gerade die Gesamtenergie Null besitzt, also $E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = 0$ oder $1/2 mV_{\text{entw}}^2 - GmM/R = 0$. Wir finden also für vergleichbare Massen nach Auflösen sofort $V_{\text{entw}} \approx 1/\sqrt{R}$. Mit der Entweichgeschwindigkeit der Sonne von 618 km/s, erhalten wir dann für einen größeren Roten Riesen mit $R = 200 R_{\odot}$ ein $V_{\text{entw}} \approx 40$ km/s. Dies aber entspricht in bemerkenswert guter Übereinstimmung gerade der Expansionsgeschwindigkeit Planetarischer Nebel! Sie würden dann aus Roten Riesen entstehen durch ein Ereignis niedrigst möglicher Energie, die nämlich gerade ausreicht, der Hülle die Entweichgeschwindigkeit zu erteilen. (Im Ver-

gleich zu den Expansionsgeschwindigkeiten von Novae und Supernovae, die zwei bis drei Größenordnungen größer sind, ist das Ereignis der Planetarischen Nebel tatsächlich äußerst „harmlos“.)

● Einen zweiten wichtigen Befund liefern uns die Photometriker der Sterne. Sie zeigen nämlich, daß gerade in dem fraglichen Bereich des HRD besonders viele veränderliche Sterne zu finden sind. Mehr noch, dort scheinen überhaupt keine stabilen Sterne vorzukommen. Genauere Untersuchungen zeigen weiter, daß die meisten im weitesten Sinne pulsierende Veränderliche sind, deren äußere konvektive Hülle sich also in periodischer, halbperiodischer oder unregelmäßiger Bewegung befindet. Die prominentesten und gleichzeitig wahrscheinlichsten PN-Vorfahren sind die Mira-Veränderlichen mit ihren gewaltigen Amplituden bis zu 8 Größenklassen und riesigen Periodenlängen bis zu 500 Tagen.

● Das überzeugendste Indiz liefert uns schließlich ein Blick in das Innere der Roten Riesen. Bisher kennen wir nur ihre extrem geringe mittlere Dichte, $\bar{\rho} \approx 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ ($\bar{\rho}_{\odot} = 1.4 \text{ g/cm}^3$). Nun interessiert uns der Dichteverlauf von der Oberfläche des Sterns bis in sein Zentrum. Dazu betrachten wir einen Stern von 1.3 Sonnenmassen, wie ihn Martin Schwarzschild in den fünfziger Jahren gerechnet hat, wenn in seinen inneren 26 Massenprozenten der Wasserstoff verzehrt ist. Er besitzt dann einen Radius von $21 R_{\odot}$ und eine Leuchtkraft von $226 L_{\odot}$, befindet sich also in unserem HRD etwa bei dem ersten „E“ des Wortes „Riesen“. Der Aufbau eines solchen Sterns ist so extrem inhomogen, daß man sich zur Veranschaulichung der Dichteveränderung den Weg in den Stern hinein logarithmisch darstellen muß. Dies zeigt die Abb. 11a. Ihr entnehmen wir, daß im Gegensatz zu einer gewaltigen zentralen Dichte von weit über 10^5 g/cm^3 , in dem größten Volumenanteil des Sterns, nämlich über die äußeren 30% des Radius, oder 66% des Gesamtvolumens, die Dichte völlig „aus dem Rahmen fällt“ und unter 10^{-4} g/cm^3 bleibt. Die mit linearem Maßstab in den Text gedruckte Darstellung soll uns die wahren Größenverhältnisse vor Augen führen. Dabei soll uns die gerasterte Fläche verdeutlichen, wie überwiegend groß der Anteil des Sterns ist, in dem die Dichte äußerst

klein (unter 0.003 g/cm^3) bleibt. (Bei $r/R = 0.2$ schon wird sie kleiner als die Dichte unserer Erdatmosphäre am Boden.) Der Punkt im Zentrum zeigt im richtigen Maßstab den harten Kern unseres Sterns, in dem die Dichte rasch über 1600 g/cm^3 steigt und im Zentrum $4 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^3$ erreicht (Sonnenzentrum: 10 g/cm^3), eine Dichte also, die bereits an die mittlere Dichte Weißer Zwerge herankommt! *Tatsächlich tritt hier der Vorläufer der Weißen Zwerge in Erscheinung, versteckt im Bauch eines Roten Riesen und umgeben von dessen ausgedehnter labiler Hülle.*

Synthese

Wir wollen jetzt die Planetarischen Nebel zusammen mit ihren inzwischen identifizierten Vorfahren und Nachkommen als drei Stationen einer einheitlichen Entwicklung betrachten und sehen, wie neuere theoretische Rechnungen der Sternentwicklung die Zusammenhänge quantitativ beschreiben. Als gut verstanden gilt heute die Entwicklung von Hauptreihensternen zu Roten Riesen. Da diese kürzlich ausführlich in SuW 24, 385 [7/1985] behandelt wurde, können wir uns hier damit begnügen, in Abb. 10b als Beispiel nur noch einmal an den Weg unserer Sonne zu erinnern. Als Urahnen der heute beobachtbaren PN werden Hauptreihensterne mit Massen zwischen 0.8 und vielleicht 5 Sonnenmassen angesehen. (Sterne mit Massen kleiner als $0.8 M_{\odot}$ entwickeln sich auf einer Zeitskala, die größer als das derzeitige Alter des Kosmos ist. Sterne mit Massen größer als $5 M_{\odot}$ können Supernova-Explosionen erleiden und entarten zu Neutronensternen und Schwarzen Löchern.) Tatsächlich steht auch die aus der Theorie der Nach-Hauptreihen-Entwicklung und dem beobachteten Massenspektrum berechnete Sterberate von Hauptreihensternen für dieses Massenintervall in befriedigender Übereinstimmung mit der Geburtsrate Planetarischer Nebel. – Die weitere lückenlose Verfolgung unserer Objekte auf dem Weg in das Stadium der PN scheidert nur leider noch an der Tatsache, daß die genauen Mechanismen der Hüllenabstoßung bis heute noch nicht so befriedigend aufgeklärt werden konnten, daß sie von der astronomischen Gemeinschaft un widersprochen akzeptiert wer-

den. Vielversprechende Ansätze liegen im Bereich möglicher Instabilitäten etwa der Mira-Pulsation am oberen Ende ihrer Perioden-Leuchtkraft-Beziehung oder des möglichen Auftretens eines „Superwindes“, der bezüglich der Massenverlustrate wesentlich über den schon länger bekannten, mit der Leuchtkraft der Sterne rasch anschwellenden Sternwind im Stadium der Roten Riesen hinausgeht. (Der Massenverlust Roter Riesen kann bereits durch diesen letztgenannten Sternwind wegen $\dot{M} = -3.2 \cdot 10^{-13} (L/L_{\odot})^{1.66} M_{\odot}/\text{Jahr}$ in fortgeschrittenen Entwicklungsphasen (hoher Leuchtkraft) erhebliche Ausmaße annehmen.) Einig ist man sich nur, daß es irgendwo im oberen Bereich des asymptotischen Riesenastes (AGB) passieren muß. Nach der Hüllenabstoßung nehmen nun die Rechnungen einen ausgebrannten, aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehenden Kern an, der umgeben ist von einer verbliebenen dünneren Hülle, in der noch Kernbrennen in Helium- und Wasserstoff-Schalenquellen stattfindet (wobei letztere den hauptsächlichsten Anteil zur Leuchtkraft des Sterns beiträgt). Es kann gezeigt werden, daß in dieser Konfiguration die resultierende Leuchtkraft nur noch von der Masse des Kerns abhängt: Die weitere Entwicklung des Sterns läuft daher zunächst mit (beinahe) konstanter Leuchtkraft ab. Der aktuelle Radius des Sterns wird bestimmt durch die Dimension der Hülle. Da diese mit fortschreitendem Kernbrennen an Mächtigkeit verliert, verkleinert sich der Radius zunehmend, und die Effektivtemperatur steigt entsprechend an: Unser Objekt wandert im HRD mit immer langsamer werdenden Schritten horizontal nach links in das Gebiet der ZPN. (Man beachte, daß durch das steigende T_{eff} sich der Schwerpunkt der spektralen Strahlungscharakteristik immer weiter zum Ultraviolett verschiebt, und eine konstante Leuchtkraft daher eine entsprechend *abnehmende absolute visuelle Helligkeit* bedeutet.) Die horizontale Entwicklung dauert an, solange die Masse der Hülle genügend groß ist, um das Kernbrennen in Gang zu halten. Sie erfährt ein unaufhaltsames Ende, wenn unterhalb einer kritischen Hüllenmasse auch diese letzte Kernenergiequelle erlischt und unser Stern in eine Abkühlphase eintritt. Wann und bei welchem T_{eff} dies geschieht, bestimmen nur die

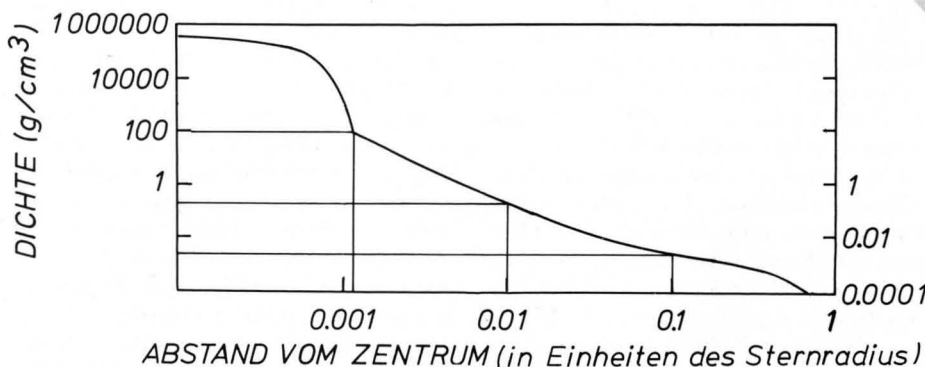
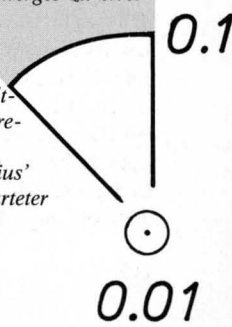


Abb. 11a: Dichtemodell (nach Martin Schwarzschild) eines Roten Riesen von $1.3 M_{\odot}$ in einer Entwicklungsphase, in der der Wasserstoff in den inneren 26 Massenprozenten des Sterns aufgebraucht ist. Seine Leuchtkraft ist dann in diesem Modell auf $226 L_{\odot}$, sein Radius auf $21 R_{\odot}$ angewachsen. Der extrem inhomogene Aufbau eines solchen Sterns zwingt zu einer doppelt-logarithmischen Darstellung der Dichteveränderung.

Abb. 11b: Veranschaulichung der in Abb. 11a logarithmisch dargestellten 4 Abschnitte längs des Sternradius, nun jedoch in linearem Maßstab. In der gerasterten Fläche bleibt die Dichte unter 0.003 g/cm^3 (Erdatmosphäre am Boden: 0.0013 g/cm^3)! Der Punkt im Zentrum zeigt im richtigen Maßstab den unvergleichlich viel härteren Kern, in dem die Dichte über 1500 g/cm^3 liegt, um rasch ansteigend im Zentrum die mittlere Dichte eines Weißes Zwerges zu erreichen. (Man beachte, daß wir zur Veranschaulichung nur die Verhältnisse von Flächen betrachten. Das Verhältnis der Sternvolumina ist entsprechend noch krasser.) Unterhalb 0.0008 des Sternradius' gilt die Zustandsgleichung entarteter Materie.



Die 20 scheinbar hellsten Zentralsterne gesicherter Planetarischer Nebel

Namen der Hülle		α	2000	δ	m_v	Sp-Typ	Entf. pc	Bemerkungen
PK Nr.	andere Bez.							
220-53	1360	03 ^h 33 ^m 14 ^s	-25°52'10"	11.32	sd 0	400		
165-15	1514	04 09 17	+30 46 34	9.51	A0III	750	Doppelstern?	
215-24	1C418	05 27 28	-12 41 48	10.65	07f	600		
166+10	1C2149	05 56 24	+46 06 17	11.3:	07f	900		
215+	3 1 2346	07 09 23	-00 48 23	11.16	A2V	1400	Doppelstern!	
197+17	1 2392	07 29 11	+20 54 43	10.47	06f	1150	„Eskimo“	
272+12	1 3132	10 07 02	-40 26 10	10.07	A2V	1100	vis. DS	
294+	4 1 3918	11 50 19	-57 10 51	10.84	-	750		
303+40	1 A 35	12 53 33	-22 52 22	9.63	G8III-IV	350	Doppelstern?	
339+88	1 LoTr 5	12 55 34	+25 53 28	8.81	G5III	500	Doppelstern!	
315-13	1 He2-131	15 37 12	-71 54 53	10.64	08(f)p	1300:		
	25+40 1 IC4593	16 11 44	+12 04 28	11.20	07f	2300		
332-	9 1 He3-1333	17 09 01	-56 54 51	11.03	WC10	-		
96+29	1 6543	17 58 33	+66 37 59	11.1:	07+WR	700		
50+	3 1 M1-67	19 11 31	+16 51 32	11.12	WN8	900		
64+	5 1 BD+30°3639	19 34 45	+30 30 59	10.03	WC9	650	sehr junger PN	
53-	3 2 HM Sge	19 41 57	+16 44 40	10.9 var	WN6	-	Proto-PN?	
83-12	1 6826	19 44 48	+50 31 31	10.59	06f	900	Doppelstern?	
75+	5 1 V1016Cyg	19 57 03	+39 49 30	10.6 var	symbiot.	2300:	Proto-PN?	
60-	7 1 FG Sge	20 11 56	+20 20 05	8.9 var	B4I-G9I	2400:	Proto-PN?	

Erläuterungen: *Spalte 1:* Nummerierung im System von Perek und Kohoutek. *Spalte 2:* Vierstellige Zahlen ohne Zusatz sind NGC-Nummern. In vier Fällen ist der Name des Zentralsterns der gebräuchlichere. *Spalten 3, 4:* Koordinaten für die Epoche 2000 aus dem Katalog von Acker. *Spalte 5:* Mittelwert neuerer lichtelektrischer Messungen der scheinbaren visuellen Helligkeit. *Spalte 6:* Meistgenannter Spektraltyp unter den neueren Klassifikationen. Das Spektrum von V 1016 Cyg heißt „symbiotisch“, weil es gleichzeitig Absorptionslinien einer kühlen Photosphäre und Emissionslinien hoher Anregung zeigt. Das Spektrum von FG Sge hat sich in nur 25 Jahren dramatisch von B4 nach G9 entwickelt. *Spalte 7:* Die Entfernungen sind gerundete Mittelwerte aus den Katalogen von Maciel und Daub, außer für LoTr 5, V 1016 Cyg und FG Sge, bei denen verschiedene andere Quellen verwendet wurden. *Spalte 8:* In verschiedenen Fällen wird eine Doppelsternnatur vermutet. In drei Fällen konnte sie bisher nachgewiesen werden: Bei 2346 liegt ein spektroskopischer Doppelstern mit Bedeckungslichtwechsel vor, bei 3132 wurden die Komponenten getrennt, bei LoTr 5 wurde eine heiße Komponente im UV nachgewiesen (ein Lichtwechsel der kühlen Komponente wird als Reflexionseffekt in einem engen Doppelsternsystem gedeutet).

nach der PN-Ejektion verbleibenden Hüllenmassen, die sich ihrerseits aus den Kernmassen ergeben. So durchläuft ein Stern einer bestimmten Anfangsmasse seinen horizontalen Entwicklungsweg bei einer bestimmten Leuchtkraft und erreicht bei einer bestimmten Effektivtemperatur seinen Kühlungsweg. Neuere Rechnungen zeigen, daß die in dem oben genannten Massenintervall (0.8–5) M_{\odot} entsprechend dem universellen Massenspektrum am häufigsten vorkommenden kleinsten Massen das PN-Gebiet mit ihren horizontalen Entwicklungswegen recht gut treffen und letztere auch mit befriedigender Treffsicherheit an die Kühlungswege anschließen, die sich für die beobachteten Weißen Zwerge ergeben (siehe Abb. 10b).

Besonders bemerkenswert ist, daß die neuen Rechnungen, die während der ganzen Entwicklung Massenverlust durch Sternwinde berücksichtigen, zeigen, daß trotz signifikanter Massenunterschiede der Vorfahren, die Massen der ZPN letztlich in ein äußerst enges Massenintervall „getrichtert“ werden, welches wenigstens eine Größenordnung kleiner als das ursprüngliche ist. Dies steht in schöner Übereinstimmung mit dem Befund, daß auch das Massenspektrum der Weißen Zwerge eine extrem geringe Breite von $\pm 0.1 M_{\odot}$ um einen Mittelwert von 0.58 M_{\odot} aufweist.

Durch das beschriebene Szenario gilt heute die Entwicklung von den Roten Riesen zu den Weißen Zwergen, zwischen zwei Bauplänen, die die (entgegengesetzt) extremsten Konfigurationen darstellen, die von der Natur bei Sternen geringer Masse verwirklicht wurden, als grundsätzlich verstanden. Die Planetarischen Nebel zeigten sich als das entscheidende Bindeglied, welches dieses Verständnis erst ermöglichte.

Auswahleffekte

Wie kommt es zu der charakteristischen Häufung in drei beobachtbare Entwicklungsstadien, also der besonderen Besetzungsdichte der Beobachtungsdaten im HRD? Diese läßt sich wie folgt gänzlich durch Entwicklungsgeschwindigkeiten und Entdeckungswahrscheinlichkeiten verstehen: Die erste Entdeckungslücke von den Roten Riesen zu den Planetarischen Nebeln kommt natürlich durch die viel zu schnelle Entwicklung in dieser Phase zustande, deren Zeitskala fast zwei Größenordnungen kleiner als im Bereich der beobachteten ZPN ist, wodurch wir also beinahe 100 mal weniger Objekte erwarten können. (Das halbe Dutzend bekannter „protoplanetarer“ Kandidaten unter etwa 500 untersuchten PN's bestätigen diese Erwartung.) So ist auch die obere Be-

grenzung des beobachteten ZPN-Gebietes, also in Richtung der Entwicklungswege masse-reicherer Sterne wesentlich durch Selektion mitbestimmt, die hier gleich zwei Ursachen hat: Einerseits wird entsprechend dem universellen Massenspektrum der Sterne die Häufigkeit zu größeren Massen hin rasch geringer. Hinzu kommt, daß die Entwicklungsgeschwindigkeit mit wachsender Masse schnell so groß wird, daß wir die Sterne bestenfalls erst nach dem Abbiegen in die Kühlungsphase zu fassen bekommen. Selbst die Zeitskala im Bereich der beobachteten ZPN von 10^4 bis 10^5 Jahren ist astronomisch so unbedeutend klein, daß wir solche Objekte praktisch kaum wahrnehmen dürften. (Man beachte, daß etwa der Übergang von Hauptreihensternen zu Roten Riesen schon bei 3 M_{\odot} kaum mehr beobachtbar ist, weil seine Zeitskala 10^7 Jahre „klein“ geworden ist. Praktisch aussichtslos wird der Versuch dann oberhalb 5 M_{\odot} , wenn nämlich die Zeitskala des Übergangs von knapp 10^6 Jahren kleiner als 1/100 der Verweilzeit dieser Sterne auf der Hauptreihe wird, wenn wir also von 100 Hauptreihensternen dieses Abschnitts im Mittel weniger als einen während seines Übergangs zum Roten Riesen erwarten können.) Offensichtlich kommen uns bei den Planetarischen Nebeln glückliche Umstände zu Hilfe. Tatsächlich bekommen wir nämlich nicht nur deshalb so viele dieser Objekte zusammen, weil die meisten massearmen Sterne diese Entwicklungsphase durchlaufen, sondern vor allem deshalb, weil sie eine solch außergewöhnlich große Entdeckungswahrscheinlichkeit besitzen. So lassen sie sich zum einen durch die große Leuchtkraft der Hüllenemissionen noch in großen Entfernungen, also in einem sehr großen Raumvolumen nachweisen. Zum anderen lassen sie sich morphologisch und/oder spektroskopisch besonders leicht in systematischen Durchmusterungen identifizieren, d. h. von andersartigen Objekten unterscheiden. Nie würden wir sonst eine solch kurzlebige Episode in dem Umfang erfassen können! Nun verstehen wir auch, warum in den fortgeschrittenen Phasen der PN-Entwicklung wieder eine Entdeckungslücke auftreten muß, obwohl uns die nun rasch länger werdenden Entwicklungszeiten eine immer größer werdende Anzahl beobachtbarer Objekte beschert: Jetzt nämlich wird mit wachsenden Ausmaßen der immer größer werdenden Hüllen, die letztlich in dem umgebenden interstellaren Medium aufgehen, ihre Entdeckungswahrscheinlichkeit in großer Reichweite so schnell kleiner, daß das erfaßbare Raumvolumen plötzlich auf kleinste Dimensionen zusammenschrumpft, und mit ihm die Zahl beobachtbarer Objekte: *Sie werden immer zahlreicher, doch wir finden sie nicht mehr!* Ab nun gälte es, die um Größenordnungen schwerer identifizierbaren Zentralsterne unter allen anderen Sternen herauszusuchen. Ihr Leuchtkraftverlust läßt zudem das übersehbare Raumvolumen noch weiter schrumpfen, bis nun allerdings wegen der allmählich über 10^8 Jahre beachtlich groß werdenden Entwicklungszeiten die Anzahl der Objekte so überwältigend groß wird, daß wir sie selbst in der inzwischen aufgezungenen engsten Sonnenumgebung zu

sehen beginnen, ja mehr noch, daß ihre Zahl sogar wieder stattlich groß wird, wenn wir den Objekten 10^9 und schließlich gar 10^{10} Jahre Zeit geben, sich anzusammeln. – Die erneut sinkende Zahl der noch schwächeren, nunmehr immer rötlicher werdenden „Weißen“ Zwerge hat ihre Ursache vermutlich in einer jetzt unaufhaltsamen Zunahme unserer beobachtungsbedingten Unkenntnis.

Materiekreislauf

Nachdem wir nun Planetarische Nebel mit ihren Zentralsternen als kosmische Plasmalaboratorien und als wichtige Station auf dem Lebensweg der Sterne kennengelernt haben, dürfen wir diese Übersicht nicht abschließen, ohne noch einen dritten Aspekt dieser Objekte zu erwähnen. Dieser steht im Zusammenhang mit der Frage nach der Herkunft des uns bekannten reichhaltigen Sortiments an chemischen Elementen, die uns selbst und die Dinge unserer Umwelt aufbauen. Heute wissen wir, daß in den Anfängen des heutigen Kosmos (unmittelbar nach dem Ereignis des Urknalls) nur die allerleichtesten Sorten entstehen konnten. Dies sind im wesentlichen nur Wasserstoff, Helium und ein wenig Lithium. Für die Erzeugung beispielsweise des Kohlenstoffs, eines der wichtigsten Bausteine von uns selbst und den alltäglichen Dingen unserer Umwelt, müssen andere Mechanismen verantwortlich sein. Diese jedoch können wir jetzt nur noch im Innern der Sterne finden, in dem durch thermonukleare Reaktionen und langsamem Neutroneneinfang eine Nukleosynthese stattfindet, und in Supernova-Ereignissen, während derer vor allem durch schnellen Neutroneneinfang weitere schwere Elemente erzeugt werden können.

Die wesentliche Voraussetzung für einen funktionierenden Kreislauf der Materie ist nun natürlich die Rückgabe wenigstens eines Teils der synthetisierten Atomsorten an den interstellaren Raum, um den Sternen der nachfolgenden Generation zur Verfügung zu stehen, wenn sie sich durch Kontraktion aus diesem Material bilden. Hierbei hat die Natur unseren Planetarischen Nebeln eine gewichtige Rolle zugeteilt, nachdem sie dafür gesorgt hat, daß bereits während der Entwicklung im Stadium der Roten Riesen – genauer während des Aufstiegs auf dem RGB und AGB – ein Teil des synthetisierten Materials aus dem Sterninnern in äußere Zonen transportiert wurde („dredge-up“). Sie haben bei dieser Aufgabe Konkurrenz durch Supernovae, Novae und den Sternwind leuchtkräftiger Sterne, vor allem Roter Riesen und Wolf-Rayet-Sterne. Für einen Leistungsvergleich dieser Materie-Lieferanten bezüglich Qualität und Quantität des Materials benötigen wir viele, teilweise unsicher bekannte Parameter wie Massenverlustraten, Lebensdauern, Raumdichten und chemische Zusammensetzung des „recycling“-Materials. Wegen ihrer kurzen Lebensdauer und ihrer Fähigkeit, auch schwerste Atomsorten zu erzeugen, sind für die chemische Zusammensetzung der präsolaren interstellaren Wolke, aus der vor über vier Milliarden Jahren unser Sonnensystem entstand, aus der also auch wir selbst ge-

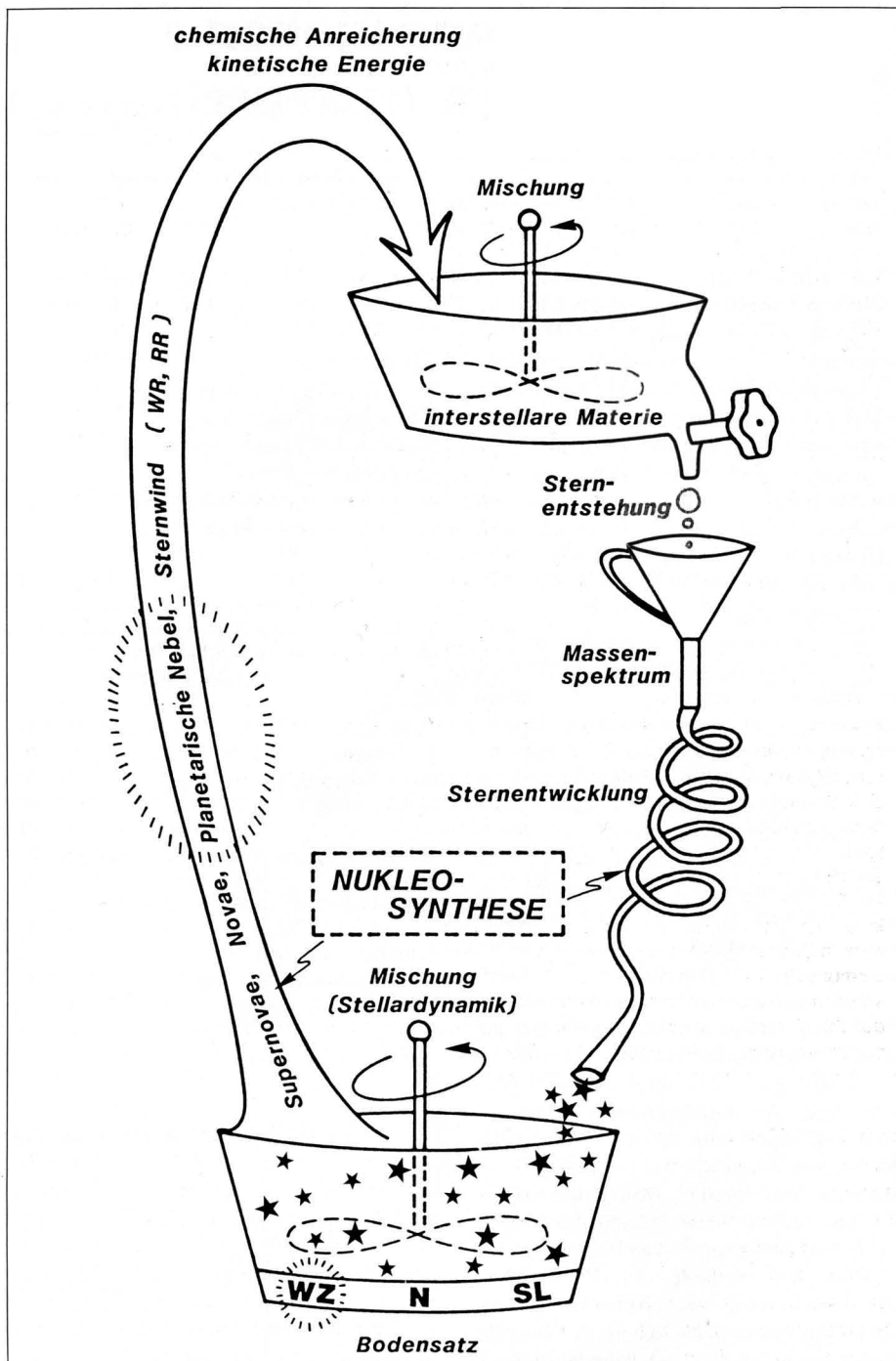


Abb. 12: Kreislauf der Materie. An zwei Stellen dieses Kreislaufs werden schwerere chemische Elemente erzeugt. Diese gelangen durch verschiedene stellare Massenverlustmechanismen zurück ins interstellare Medium und bereichern dieses chemisch, während die degenerierten stellaren Endkonfigurationen wie Weiße Zwerge (WZ), Neutronensterne (N) und Schwarze Löcher (SL) als „Bodensatz“ zurückbleiben und an dem Kreislauf nicht mehr teilnehmen (also nur noch zur stellaren Dynamik beitragen). – Bezüglich Massenrückgabe und Umfang der Lieferung an leichteren synthetisierten Atomsorten spielen Planetarische Nebel und der Sternwind der Roten Riesen die wichtigste Rolle. – Bei der Sternentstehung durch Kontraktion der interstellaren Materie finden dann spätere Sterngenerationen ein chemisch immer stärker angereichertes Material vor. Je größer die Masse der Sterne ist, desto schneller wird die „Spirale der Sternentwicklung“ durchlaufen. Beispielsweise verfließen bis zur Entstehung der Sonne für Sterne mit nur $5 M_{\odot}$ bereits 100 Generationen. Offensichtlich reichte die Zeit, um durch den vielzähligen Generationswechsel massereicherer Sterne nach umfassender Durchmischung auf einer kosmisch langen Zeitskala den präsolaren Nebel so weit mit den synthetisierten Atomsorten anzureichern, die wir heute in unserem Sonnensystem beobachten.

macht sind, unumstritten vor allem die massereichsten Sterne oberhalb vielleicht 7 Sonnenmassen (die also als Supernova enden) verantwortlich. Trotz noch umstrittener Details obiger Parameter gilt es jedoch als wahrscheinlich, daß, auch wegen ihrer relativ großen

Raumdichte, die Gesamtheit der Planetarischen Nebel heute nicht nur der größte Masse-Lieferant, sondern auch ein Hauptlieferant wichtiger leichterer Elemente, vor allem des Stickstoff und Kohlenstoff, darstellt. (Schluß) □