

Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung

Die Nach-Hauptreihen-Phase beschreibt die Entwicklungen der Sterne ab dem Ende des zentralen Wasserstoffbrennens bis hin zum allgemeinen Aussetzen der Kernfusionen als Energiequelle.

Da der Stern in unserem Modell also zunächst keine Energie mehr produziert – damit außer dem Gasdruck keine Kraft aufbringt, die der Gravitation entgegenwirkt – kontrahiert er, bis durch die so freigesetzte Gravitationsenergie die Temperatur hoch genug wird, um in einer konzentrischen Schale um den Kern die H-Fusion zu zünden – das so genannte Schalenbrennen. Durch den Leistungs- und Temperaturanstieg expandiert der Stern auf ein Vielfaches seiner Größe, wobei seine äußeren Bereiche abkühlen, und er wird als **Roter Riese**¹ beobachtbar. Sehr massereiche Sterne (etwa ab 40 Sonnenmassen) verlieren ihre äußerste, kühle Hülle durch starken Sternwind schon früh, sodass sie durch hohe Oberflächentemperaturen bläulich-weiß erscheinen, die **Blauen Riesen**.

- $0,26 M_{\odot} < m < 2,5 M_{\odot}$: In eher massearmen Sternen steigt die Dichte im Zentrum so stark an, dass die Elektronen „entartet“ werden: Diesem quantenmechanischen Effekt zufolge werden – vereinfacht ausgedrückt – Elektronen auf einen so kleinen Raum komprimiert, dass Paulis Ausschlussprinzip zur Geltung kommt. Um der totalen Äquivalenz der Quantenzahlen bei



Abbildung 1: Der Red-Spider-Nebel (NGC 6537), aufgenommen vom Hubble-Space-Teleskope

größerer Kontraktion auszuweichen, müssten immer höhere Energieniveaus eingenommen werden, woraus letztendlich ein Druck – der **Entartungsdruck** – resultiert. Die Energie, welche dabei den Elektronen zugeführt werden muss, wird **Fermi-Energie** genannt.

Der Entartungsdruck macht zu dem Zeitpunkt den größten Teil der expandierenden Kräfte aus und hat – im Gegensatz zum Gasdruck – die Eigenschaft bei zunehmender

Temperatur nicht anzuwachsen. Dadurch wird der Kern immer heißer, ohne dass Kühlung durch eine Expansion erfolgt.

Ab $10^8 K$ setzt im Zentrum die explosionsartige Helium-Fusion zu Kohlenstoff nach dem $3-\alpha$ -Prozess ein ($3 \cdot {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + 2\gamma + 7,3 \text{ MeV}$)², wodurch sich die Temperatur innerhalb kürzester Zeit nochmals stark erhöht. Ein Teil der umgebenden Hülle wird bei diesem so genannten **Helium-Flash** durch den hohen Strahlungsdruck als **Planetarischer Nebel** „abgeworfen“ (vgl. dazu Abbildung 1). Ist das Helium im Kernbereich aufgebraucht, so läuft die Reaktion ebenfalls in einer Schale weiter, wobei der Wasserstoff-Fusionsbereich nach außen gedrängt wird. Auch in der Schale läuft der Prozess jedoch nicht gleichmäßig ab, sondern ähnlich dem zentralen Brennen in einzelnen Pulsen. Je nach deren Stärke verliert der Stern so nach und nach an Masse.

Zurück bleibt also ein Roter Riese mit H- und He-Brennschalen, dessen Kern sich aus C, vereinzelt auch O und Ne, zusammensetzt. Letztere entstehen durch He-Einfangprozesse, in denen bei hoher Temperatur ein kleiner Anteil der C-Kerne erneut mit Helium verschmilzt.

- $m > 2,5 M_{\odot}$: Massereichere Sterne erreichen die He-Zündtemperatur von $10^8 K$ bei geringerer Dichte im Zentrum, sodass die Elektronen dort nicht entartet werden. Dementsprechend läuft die Fusion solange stabil ab, bis das Helium im Brennbereich aufgebraucht ist, woran sich ebenfalls eine He-Brennschale anschließt.

Sterne, deren Massen unter $8 M_{\odot}$ liegen, beenden damit die Nach-Hauptreihen-Phase – als Rote Riesen mit C-O-Ne-Kern und H-, He-Brennschalen.

- $m > 8 M_{\odot}$: Ab $8 M_{\odot}$ steigt die Kerntemperatur im weiteren Verlauf so weit an, dass Kohlenstoff im Kern zu verschmelzen beginnt, wodurch sich O, Ne, Mg und Na anreichern. Da

¹ Massey, 3.3 Red Supergiants

² Triple-Alpha-Prozess vgl. Metzler Physik: Seite 555

die einzelnen Reaktionen jedoch nur zwischen 2,2 und 7,15 MeV pro entstandenem Kern freisetzen – ein deutlich geringerer Betrag als beim H- und He-Brennen – erreichen nur **Sterne über $13 M_{\odot}$** die erforderlichen Bedingungen um noch schwerere Elemente zu verschmelzen – Sterne geringerer Masse können nicht genug Gravitationsenergie in Wärme umsetzen.

Für die sehr massereichen Himmelskörper schließen sich also drei weitere Fusionsprozesse³ mit abnehmender Energieausbeute und Brenndauer an (die Zentraltemperatur wächst jedoch stetig):

1. das Verschmelzen von $^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$ zu ^{24}Mg (*Neonbrennen*),
2. das *Sauerstoffbrennen* (auch O-Brennen), bei dem ^{31}Si , ^{32}Si , ^{31}P und ^{28}Mg als Produkte entstehen,
3. die letzte Brennphase, in der aus $2 \cdot ^{28}\text{Si}$ schließlich Eisen (^{52}Fe) erbrütet wird;

Nach dem *Siliciumbrennen*, das nur noch über den Zeitraum von ungefähr einem Tag abläuft, erlöschen die thermonuklearen Reaktionen im Kern endgültig, da die Bindungsenergie pro Nukleon im Eisenkern maximal ist. Darüber hinaus gehende Fusionsprozesse würden dementsprechend Energie verbrauchen.⁴

Der zurückbleibende Stern wird **Überriese** genannt – er zeichnet sich durch die sehr hohe Leuchtkraft und eine „Zwiebelschalenstruktur“ aus, welche durch die verschiedenen Brennschalen zustande kommt. Dort laufen um den Eisenkern von außen nach innen alle Fusionsprozesse ab, die vorher im Zentrum stattgefunden haben.

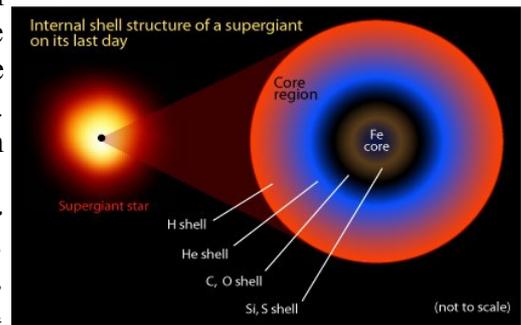


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Roten Überriesen kurz vor Erlöschen der thermonuklearen Energiequellen.

Finale Entwicklungen und Endstadien

Für die letztendlich verbleibende Zustandsform eines Sterns ist die Masse zum Zeitpunkt der finalen Entwicklungen ausschlaggebend. Jeder Endkonfiguration – mit Ausnahme der Schwarzen Löcher – kann eine Grenzmasse zugeordnet werden, bis zu der jeweils ein stabiles Gleichgewicht möglich ist. Von essentieller Bedeutung für das folgende Kapitel ist deshalb der Massenverlust, den Sterne ab der Hauptreihe erfahren.

Neben dem Abstoßen eines sogenannten Planetarischen Nebels übernimmt der **Sternwind** dabei eine entscheidende Rolle: Durch einen Strom heißen, hochionisierten Gases, das mit Geschwindigkeiten über 1000km/s das Sternumfeld verlässt, verliert zwar unsere Sonne nur wenig ausschlaggebende $10^{-14} M_{\odot}/a$, im Durchschnitt beträgt die Verlustrate⁵ der Sterne aber etwa $10^{-10} - 10^{-8} M_{\odot}/a$. In späten Entwicklungsphasen kann der Wert sogar auf über $10^{-5} M_{\odot}/a$ – in irdischen Einheiten etwa $10^{17} - 10^{18} \text{ kg/s}$ – steigen.

Weißer Zwerge

Dadurch, dass sich die meisten Hauptreihensterne in dem Massenbereich befinden, der für Weiße Zwerge als Endstadium typisch ist, stellen diese auf die Anzahl bezogen den größten Teil der erloschenen Sternformen dar.

Entstehung

- $0,08 M_{\odot} < m < 0,25 M_{\odot}$: Da die Konvektion während des Wasserstoffbrennens stark ausgeprägt war, bestehen die massearmen Sterne am Ende der Hauptreihen-Phase nahezu ausschließlich aus Helium. Sie können dieses jedoch nie als Brennstoff nutzen, weshalb sie nach einer letzten

3 letzte Brennphasen vgl. dazu u.a. Demtröder, Exph 4: Seite 337,338 ; Unsöld, Kosmos: Seite 298

4 Einteilung in Massenbereiche vgl. Demtröder, Exph 4: Seiten 336-338

5 Werte für Sternwinde vgl. dazu Unsöld, Kosmos: Seiten 166, 256-257

Kontraktion als Weiße Zwerge ihren stabilen Endzustand erreichen.

- $0,25 M_{\odot} < m < 1,44 M_{\odot}$ und $M_{\text{Riese}} < 8 M_{\odot}$: Rote Riesen haben durch die Heliumfusion einen sehr dichten C-O-Ne-Kern, welcher prinzipiell bereits der letztendlich verbleibenden Sternform entspricht. Kann der Riesenstern bis zum Erlöschen der thermonuklearen Reaktionen nahezu seine gesamte Hülle abwerfen, so wird der Zentralbereich als Weißer Zwerg sichtbar.

Eigenschaften

Die Stabilität von Weißen Zwergen kommt durch das Phänomen der Elektronenentartung zustande: Durch die hohe Dichte kommen sich Elektronen im verbleibenden Stern so „nahe“, dass Paulis Ausschlussprinzip greift. Um eine weitere Kontraktion – und damit einhergehend eine weitere Annäherung der Elektronen – zu erreichen, müssten diese immer höhere Energieniveaus einnehmen. Bei Radien von einigen $10^3 - 10^4 \text{ km}$ wird diese Energieschwelle (auch Fermi-Energie genannt) im Verhältnis zur potentiell freisetzbaren Gravitationsenergie so hoch, dass die Kontraktion zum Stillstand kommt.

Subrahmanyan **Chandrasekhar** entdeckte die nach ihm benannte Grenzmasse⁶ für Weiße Zwerge von $M_{\text{Ch}} = 1,44 M_{\odot}$, für die der höchstmögliche Druck des entarteten Elektronengases die Gravitation noch ausgleichen kann.

Durch anfänglich hohe Oberflächentemperaturen von bis zu mehreren 10^4 K kann ein zuvor abgestoßener Planetarischer Nebel zum Leuchten angeregt werden. Über lange Zeiträume – in Größenordnung des bisherigen Alters des Universums – hinweg kühlen die Weißen Zwerge schließlich aus, bis sie als sogenannte **Schwarze Zwerge** enden.

Supernova Typ Ia

Befinden sich Weiße Zwerge mit Riesensternen als Begleiter in Doppelsternsystemen, so kann es zu Masseübertragungen kommen, bei denen der wesentlich dichtere Zwergstern Gas aus der Hülle des Riesen akkretiert. Die Materie fällt dabei nicht direkt auf den Zwerg, sondern bewegt sich spiralartig in einer sogenannten **Akkretionsscheibe** auf diesen zu, wobei sie durch eine starke Erwärmung intensiv zu leuchten beginnt.

Steigt die Zwergmasse über Chandrasekhars Grenze, so kollabiert der Stern ein weiteres Mal. Es bildet sich jedoch keine noch dichtere, stabile Endform – etwa ein Neutronenstern – sondern der noch im Kern vorhandene Kohlenstoff wird dem Modell zufolge zum Brennmaterial für eine weitere Fusion. Dieses Kohlenstoffbrennen läuft so schlagartig ab, dass der Weiße Zwerg in einer Explosion vollständig zerrissen und sein Begleiter wegkatapultiert wird.



Abbildung 3: Künstlerische Darstellung der Massenübertragung auf einen Weißen Zwerg.

Supernova Typ II

Kontrahiert der Eisenkern eines Überriesen durch den Wegfall des fusionsbedingten Strahlungsdrucks als Ausgleich der Gravitation (Abbildung 4: a,b), so spielen sich innerhalb von Minuten und Sekunden die gewaltigsten Ereignisse der Sternentwicklung ab. Liegt die Masse des Kerns dabei unter einer Grenzmasse, so entsteht ein Neutronenstern, andernfalls ein Schwarzes Loch.

Übersteigt die wachsende Temperatur im kollabierenden Zentrum den Wert von 10^9 K , können durch extreme Strahlung – genauer sehr energiereiche Photonen – in der so genannten Photodesintegration⁷ die Eisenkerne wieder in Helium aufspaltet werden (${}^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13 \cdot {}^4\text{He} + 4n$),

⁶ Chandrasekhar-Grenzmasse vgl. u.a. Metzler Physik: Seite 556

⁷ Zerfallsprozesse (Photodesintegration bis inverser Betazerfall), vgl. dazu Tipler, Physik: Seite 1462, 42.18 ff

bevor dieses weiter nach dem Schema ${}^4\text{He} \rightarrow 2\text{p} + 2\text{n}$ zerfällt. Beide Prozesse laufen endotherm ab, was durch Senken der Temperatur die Kontraktion beschleunigt. Dabei werden die Elektronen so stark entartet, dass es für sie energetisch günstiger ist, mit einem Proton zu einem Neutron zu verschmelzen, als weiter frei zu existieren – die Fermi-Energie wird größer als die Differenz der Ruheenergien: $E_{\text{Fermi}} > (m_N - (m_P + m_e)) \cdot c^2$. Durch den **inversen Betazerfall**

($p + e \rightarrow n + \bar{\nu}$) wird so in Sekunden ein Großteil der vorhandenen Elektronen „verbraucht“ – der Entartungsdruck fällt stark ab und der Kollaps fährt nahezu ungebremst fort (c).

In kürzester Zeit wird dabei die gesamte Materie im Zentralbereich extrem verdichtet – die Teilchen setzen den größten Teil ihrer potentiellen Energie in Wärme um, was den Druck schlagartig

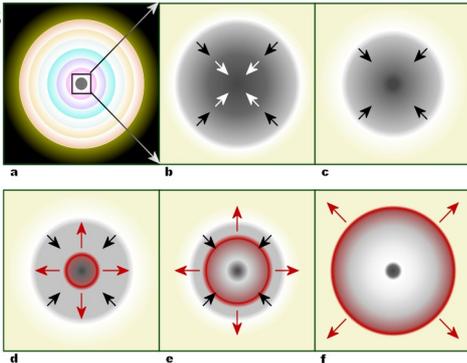


Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Supernova-Explosion

5.3.1 Entstehung von Neutronensternen

Erreicht der Kern einen Radius von ca. 20 km bevor die Explosion durch den immensen Gasdruck ausgelöst wird, stellt sich dort schlagartig ein erneuter Gleichgewichtszustand ein bei dem der Entartungsdruck wieder die Gravitation ausgleicht. Die beteiligten Teilchen sind in diesem Fall jedoch keine Elektronen, sondern die angereicherten Neutronen. Prallt die mit über 10% Lichtgeschwindigkeit nachfallende Hülle auf die Oberfläche, führt der Kern eine Art voll elastischen Stoß aus (d) und katapultiert in einer radial nach außen verlaufenden Stoßwelle die gesamte Hülle explosionsartig von sich weg (e,f). Neutrinos – Teilchen, die eigentlich kaum mit Materie wechselwirken, also auch nur geringfügig an Stößen beteiligt sind – entstehen bei der Neutronenbildung so zahl- und energiereich, dass sie diese Wellenfront verstärken.

Hinter der Front laufen unter extremen Druck- und Temperaturverhältnissen bei ständigem Neutronenbeschuss vom Kern weitere Nukleosynthese-Prozesse (Erzeugung von Elementen, in diesem Fall durch erneute Kernfusionen) ab. Dabei entsteht der Großteil aller im Universum existierenden Elemente, die schwerer als Eisen sind – beispielsweise auch auf der Erde vorhandenes Kupfer, Silber, Gold...

*Bei dieser Form der Supernova-II-Explosion verbleibt also zusammenfassend ein **Neutronenstern** als Produkt, welcher im nächsten Kapitel näher beschrieben wird.*

5.3.2 Entstehung von Schwarzen Löchern

Beim Gravitationskollaps von Überriesen, deren Eisenkern über der Oppenheimer-Volkow-Grenzmasse liegt, kommt es nicht zur Bildung eines Neutronensterns, da zu viel Gravitationsenergie freigesetzt wird. Temperatur und Strahlungsdruck steigen dementsprechend so extrem an, dass die Supernova ausgelöst wird, bevor der Kernbereich sich stabilisiert hat.

Bei der Explosion wird die Hülle radial nach außen wegkatapultiert, wohingegen der Zentralbereich durch den Druckanstieg in der Umgebung weiter komprimiert wird.

Da keine Kraft mehr der Gravitation entscheidend entgegenwirken kann, verdichtet sich die Materie immer stärker – bis zur Bildung der Singularität.

In einem anderen Entstehungs-Szenario können schon entstandene Neutronensterne durch Massenakkretion (vgl. Supernova Typ Ia) ihre Grenzmasse übersteigen und sich in einem weiteren Gravitationskollaps zu Schwarzen Löchern entwickeln.

5.3.3 Energiefreisetzung

Größenordnungsmäßig wird bei einer solchen Supernova-Explosion vom Typ II (oder Typ I b,c) potentielle Energie in Form elektromagnetischer Strahlung (bis in den Gamma-Bereich) und



Abbildung 5: Die Supernova SN1994D (als heller Punkt links unten) neben der Galaxie NGC4526. Auffallend ist die große Helligkeit der Explosion verglichen mit dem Galaxiezentrum.

kinetischer Energie – die Hülle expandiert mit bis zu 10000 km/s – im Bereich von 10^{44} J frei. Diese enorme Energie, durch die eine Supernova auf Helligkeit bezogen ganze Galaxien übertreffen kann, macht nur einen Bruchteil des insgesamt freiwerdenden Betrags aus. Über 99% – 10^{46} J – finden sich in den hochenergetischen Neutrinos, die trotz ihrer gewaltigen Zahl nur schwer detektierbar sind⁸.

Würde man unsere gesamte Erde auf einen Schlag mittels Einsteins $E=mc^2$ in Energie umwandeln, wären die daraus resultierenden $5 \cdot 10^{41}\text{ J}$ im Vergleich dazu eher unbeeindruckend.

5.4 Neutronensterne

Auf dem Papier existierten Neutronensterne als möglicher Endstatus massereicher Sterne schon kurz nach der Entdeckung des Neutrons im Jahr 1932. Da sie aufgrund ihrer kleinen Oberfläche jedoch nur über geringe stabile Leuchtkräfte verfügen, dauerte es jedoch noch fast 40 Jahre, bis erste Beobachtungen von Pulsaren das Modell bestätigten.

5.4.1 Aufbau

Eine dünne Eisenschicht umschließt das 3 – 5 km dicke Gebiet der „Inneren Kruste“ – einer Übergangsphase von Eisen und schwereren, neutronenreicheren Kernen hin zu einer reinen Neutronenflüssigkeit, die sich bereits im Dichtebereich von Atomkernen befindet. Sie verdichtet sich nach innen so sehr, dass im Kernbereich nach gegenwärtigen Theorien das so genannte Quark-Gluonen-Plasma existiert. Es setzt sich den Annahmen zufolge aus noch kleineren Elementarteilchen, möglicherweise Quarks, zusammen.

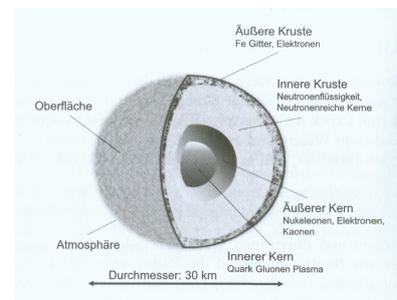


Abbildung 6

5.4.2 Eigenschaften

Die bei der Behandlung von Supernovae angesprochene Obergrenze der Masse wird nach ihren Entdeckern **Oppenheimer-Volkow-Grenze**⁹ genannt und liegt bei etwa $m = 3 M_{\odot}$. Analog zur Chandrasekhar-Grenzmasse kann über diesem Wert der Entartungsdruck der Gravitation nicht mehr standhalten. Jener wächst erst in extremen Dichtebereichen ab 10^{10} kg/cm^3 merklich an, sodass im Zentrum Werte von bis zu 10^{12} kg/cm^3 erreicht werden – eine Milliarde Tonnen Materie so groß wie ein irdisches Zuckerstückchen.

Der hohen Dichte entsprechend liegt der Durchmesser bei nur noch 20 – 30 km. Verbunden mit der Abnahme des Radius wächst durch Impulserhaltung die Rotationsgeschwindigkeit stark an (vgl. dazu Kap. 1.2), sodass sich eine Vielzahl von Neutronensternen mit Frequenzen jenseits von 500 Hertz drehen. Gleichzeitig bleibt auch der magnetische Fluss erhalten - das Produkt aus Fläche und der magnetischen Feldstärke – wodurch diese auf Werte über 10^6 Tesla steigen kann¹⁰.

5.5 Schwarze Löcher

Schon im 18. Jahrhundert kam mit Bezug auf Newtons Gravitationsgesetz und sein Teilchenmodell des Lichts die Idee eines sehr kleinen und dichten Sterns auf, der durch Gravitation sogar Licht in gewisser Weise „gefangen halten“ könnte. Tiefer gehende Beschreibungen des als **Schwarzes Loch** getauften Himmelskörpers waren jedoch erst ab dem frühen 20. Jahrhundert mit Einsteins Relativitätstheorie möglich. Auch heute noch sind diese faszinierenden Himmelskörper Gegenstand der Forschung und selbst fundamentale

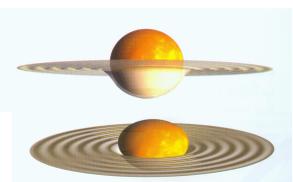


Abbildung 7

⁸ Werte für die freigesetzten Energiebeträge vgl. dazu Demtröder, Exph: Seite 346

⁹ Oppenheimer-Volkow-Grenzmasse vgl. u.a. Hanslmeier, Einführung: Seite 354

¹⁰ Werte für Neutronenstern vgl. dazu u.a. Demtröder, Exph 4: Seite 347

Eigenschaften werden nach wie vor in Frage gestellt.

5.5.1 Modell

Unter anderem Stephen Hawking stellt den Kollaps eines Sterns zum Schwarzen Loch mit einem anschaulichen Modell dar. Die Raumzeit wird dabei als eine Art flache Gummifolie dargestellt, die durch große Massen – beispielsweise Sterne – gekrümmt wird (die Folie wird eingedellt; zwei Blick 7). Lichtstrahlen, die einen Stern in geringem Abstand passieren, folgen dabei der Krümmung – von außen betrachtet werden sie quasi abgelenkt..



Abbildung 8

Im Lauf der Kontraktion wird dieser Gravitationssechacht – so wird die „Delle“ genannt – immer tiefer, bis mit Entstehung der Singularität die Verbindung zur Oberfläche der Raumzeit-Folie geschlossen wird – einfallende Materie oder Licht können nicht mehr entweichen (Abbildung 8).

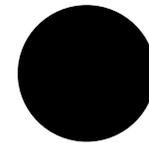
5.5.2 Eigenschaften

Wesentlich aussagekräftiger ist jedoch der **Schwarzschild-Radius**, den der Physiker Karl Schwarzschild aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ableitete:

$$R_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2} \quad (1)$$

Innerhalb des **Ereignishorizonts** – der Oberfläche einer Kugel mit Radius R_s – müsste sich ein Teilchen mit der unerreichbaren Überlichtgeschwindigkeit bewegen, um aus dem Gravitationsfeld zu entkommen. Die viel diskutierte Tatsache, dass somit eigentlich auch keine Informationen aus dem Inneren des Ereignishorizonts an die Umgebung abgegeben werden, wird von Roger Penrose als **Kosmische Zensur** bezeichnet – einer der Gründe dafür, dass selbst mit heutigen physikalischen Erkenntnissen nur eingeschränkte Darstellungen dieses Sternendstadiums möglich sind.

Würde sich unsere Sonne nach dem Ende der nuklearen Energieproduktion nicht zu einem Weißen Zwerg, sondern einem Schwarzen Loch entwickeln, so würde ihr Radius R_s nur noch etwa 2,9 km betragen, die Erde würde auf weniger als 1,8cm im Durchmesser (!) – ungefähr die Größe einer Kirsche – schrumpfen.



Schwarzschild-Radius der Erde (Abbildung 9)

Quellen

- [1] **Massey, Philip** : *Massive Stars in the local group: Implications for Stellar Evolution and Star Formation*
- [2] **Demtröder, Wolfgang** : *Experimentalphysik 4: Kern-, Teilchen- und Astrophysik* ; Springer-Verlag : 1998; ISBN:3-540-57097-7
- [3] **Grehn, Joachim; Krause, Joachim** : *Metzler Physik* ; 4. Auflage, Schroedel : 2007; ISBN:978-3-507-10710-6
- [4] **Hanslmeier, Arnold** : *Einführung in die Astronomie und Astrophysik* ; 2. Auflage, Spektrum, Springer-Verlag : 2007; ISBN:978-3-8274-1846-3
- [5] **Hawking, Stephen** : *Die illustrierte Kurze Geschichte der Zeit* ; illustrierte Sonderausgabe, Rowohlt Taschenbuch Verlag : 2001; ISBN:3-499-61340-9
- [6] **Hermann, Joachim** : *dtv-Atlas Astronomie* ; 14. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag : 2000; ISBN:3-423-03006-2
- [7] **Keller, Hans-Ulrich** : *Astrowissen* ; Kosmos : 2000; ISBN:3-440-08074-9
- [8] **Tipler, Paul A.** : *Physik* ; 3. Ausgabe, Spektrum Akademischer Verlag : 2000; ISBN:3-86025-122-8
- [9] **Unsöld, Albrecht; Baschek, Bodo** : *Der Neue Kosmos - Einführung in die Astronomie und Astrophysik* ; 6. Auflage, Springer-Verlag : 1999; ISBN:3-540-64165-3
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution

Bilderverzeichnis

# Abb.	Beschreibung	Quelle
1	Red Spider Nebula	http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/af/NGC6537.jpg/250px-NGC6537.jpg
2	Zwiebelschalen-Überriese	http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/images/stellarevolution/redsupergiant.jpg
3	Supernova Ia	http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/2004/41/images/a/formats/full_jpg.jpg
4	Ablauf Supernova	http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0c/Core_collapse_scenario.svg/775px-Core_collapse_scenario.svg.png
5	SN1994D neben NGC 4526	http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/1999/19/images/i/formats/full_jpg.jpg
6	Aufbau NS	Hanslmeier, Einführung: Seite 354: Abbildung 10.5
7,8	SL-Modell 1/2	Hawking, Geschichte d. Zeit: Seiten 114, 115: Bild 6.6