Etwa die Hälfte aller Sterne findet sich in Doppel- oder Mehrfachsternsystemen.
Für die Beobachtung des gegenseitigen Umlaufes gibt es drei Möglichkeiten, die vor allem von der Lage der Bahnkurve und dem Abstand der Sterne von der Erde abhängen. Diese werden auf den nächsten Seiten erklärt.

4.7 Doppelsterne und Sternmassen

Grundprinzip:

Viele Sterne kreisen als Pärchen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, gehalten von ihrer gegenseitigen Gravitation.

Mit dem 3. Keplergesetz in allgemeiner Form $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\cdot(m_1+m_2)}$ mit a = Abstand

kann man damit die Massen der Sterne berechnen. Hierzu müssen wir Abstand r und Umlaufdauer T messen.

Sirius A und B haben eine Umlaufdauer von 50 a, ihr mittlerer Abstand ist 7,6". Von der Erde aus wird eine trigonometrische Parallaxe von 0,373" gemessen. Das Abstandsverhältnis zum Schwerpunkt beträgt 2,5:1.
a) Berechne die Entfernung in Lichtjahren.
b) Berechne den Abstand der Komponenten in km.
c) Berechne die Gesamtmasse des Systems.
d) Berechne die Einzelmassen von Sirius A und B.

Berechnung der Sternmassen an einem Beispiel:

a) $r = \frac{1''}{0{,}373''}\,pc = 2{,}68\,pc \overset{\cdot 3{,}26}{=} \underline{8{,}74\,Lj}$

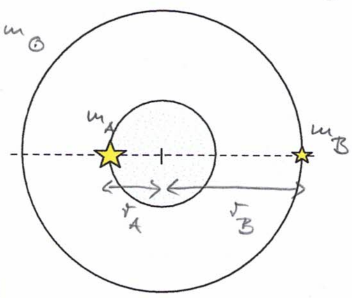
b) $\tan\varphi = \frac{a}{r} \Rightarrow a = r\cdot\tan\varphi = 8{,}74\cdot 9{,}46\cdot 10^{12}\,km\cdot\tan 7{,}6''$
$= \underline{3{,}0\cdot 10^{9}\,km}$

c) $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\cdot(m_{ges})}$

$m_{ges} = \frac{4\pi^2\cdot a^3}{G\cdot T^2} = \frac{4\pi^2\cdot(3{,}0\cdot 10^{12}\,m)^3\,kg\,s^2}{6{,}67\cdot 10^{-11}\,m^3\cdot(50\cdot 365\cdot 24\cdot 3600\,s)^2}$

$= \underline{6{,}43\cdot 10^{30}\,kg} \approx 3\cdot m_{\odot}$

d) Hebelgesetz:



$m_A\cdot r_A = m_B\cdot r_B$

$\frac{m_A}{m_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{2{,}5}{1}\Big\}$ 3,5 Teile

$\rightarrow m_A = \frac{2{,}5}{3{,}5}\cdot m_{ges} = \underline{4{,}59\cdot 10^{30}\,kg}$

$m_B = \frac{1}{3{,}5}\cdot m_{ges} = \underline{1{,}84\cdot 10^{30}\,kg} \approx m_{\odot}$

Auf Leifiphysik gibt's unter Teilgebiet Astronomie – Fixsterne – Downloads Animationen zu den verschiedenen Typen. Bei den visuellen wird klar, dass sich die Bewegung aufgrund der Tangentialgeschwindigkeit des Systems als Schleifenbahn darstellt

Visuelle Doppelsterne:

Bei diesen (eher nahen) Sternen können wir die gegenseitige Umrundung als Positionsänderung der Sterne gut vermessen.
Häufig ist die kleinere B-Komponente so leuchtschwach, dass wir sie zunächst gar nicht sehen können. (astrometrisch).
Aus der Bewegung der A-Komponte lässt sich aber auf eine zweite Masse schließen. Sirius aus der Aufgabe zuvor ist ein typischer Vertreter dieser Klasse.

In welcher Lage die stärkere Reduzierung der Helligkeit eintritt, hängt davon ab, welche Komponente die größere Leuchtkraft pro Fläche besitzt, also von der Temperatur.
Ordne die Phasen für den Fall zu, dass die kleinere B-Komponente auch kühler ist als die A-Komponente.

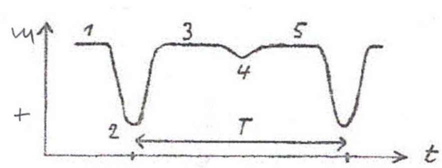
Photometrische Doppelsterne (Bedeckungsveränderliche):

Bei diesen (eher weit entfernten) Sternen können wir die gegenseitige Umrundung meist nicht mehr als Positionsänderung messen.
Ihre Bahnebene liegt parallel zur Beobachtung, so dass die B-Komponente
mal vor der A-Komponente vorbeiläuft
mal hinter der A-Komponente verschwindet.

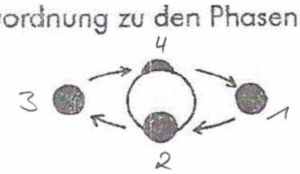
In beiden Situationen wird die Gesamthelligkeit des Systems verringert.

Die Umlaufzeit ist die Periodendauer dieser Schwankung.

Beachte: Im Diagramm wird die Helligkeit nach oben hin stärker, die Werte der scheinbaren Helligkeiten werden also kleiner.



Zuordnung zu den Phasen:



http://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/versuche/spektroskopische-doppelsterne mit Animation

Spektroskopische Auswertung nutzt man auch bei Bedeckungsveränderlichen, da die Veränderungen im Spektrum auch messbar sind, wenn sich die Einzelbahnen der beiden Sterne optisch nicht beobachten lassen. Die beiden Spektren überlagern sich dann zu einem.

Spektroskopische Doppelsterne

Durch die Bewegung der Sterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt läuft jeder der beiden mal auf den Beobachter zu, mal vom Beobachter weg.

Durch diese Bewegung in radialer Richtung führt der Dopplereffekt zu Wellenlängenverschiebungen.

Damit lassen sich die Geschwindigkeiten der Sterne bestimmen.

Aufgabe:

Im 28 pc entfernten Doppelsternsystem Algol umkreisen sich A- und B-Komponente mit einer Umlaufdauer von 2,87 d, ihr gegenseitiger Abstand wird mit 0,00234" vermessen. Im gemeinsamen Spektrum verschiebt sich die Wasserstofflinie H_α (λ_0 = 656,5 nm) periodisch um 0,10 nm und um 0,44 nm.

a) Berechne den gegenseitigen Abstand in km.

b) Berechne die Gesamtmasse m des Systems.

c) Berechne die Geschwindigkeiten der beiden Komponenten.

d) Berechne die Einzelmassen m_A und m_B.

Beachte:
Wegen gleicher Umlaufdauer T ist $\frac{v_B}{v_A} = \frac{r_B}{r_A}$

a) $\tan\alpha = \frac{a}{r} \rightarrow a = r \cdot \tan\alpha = 28 \cdot 3{,}086 \cdot 10^{13}\,\text{km} \cdot \tan 0{,}00234'' = \underline{\underline{9{,}8 \cdot 10^{6}\,\text{km}}}$

b) $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot m_{ges}} \rightarrow m_{ges} = \frac{4\pi^2 \cdot a^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (9{,}8 \cdot 10^{9}\,\text{m})^3\,\text{kg}\,\text{s}^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\text{m}^3 \cdot (2{,}87 \cdot 24 \cdot 3600\,\text{s})^2} = \underline{\underline{9{,}0 \cdot 10^{30}\,\text{kg}}}$

c) $\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \rightarrow v_A = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 3{,}0 \cdot 10^{5}\,\frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{0{,}10\,\text{nm}}{656{,}5\,\text{nm}}$

$\underline{\underline{v_A = 46\,\frac{\text{km}}{\text{s}}, \quad v_B = 201\,\frac{\text{km}}{\text{s}}}}$

d) $m_A \cdot r_A = m_B \cdot r_B$

$\frac{m_A}{m_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{v_B}{v_A} = \frac{201}{46}$ } 247 Teile

$m_A = \frac{201}{247} \cdot m_{ges} = \underline{\underline{7{,}3 \cdot 10^{30}\,\text{kg}}} \approx 3{,}7 \cdot m_\odot$

$m_B = \frac{46}{247} \cdot m_{ges} = \underline{\underline{1{,}67 \cdot 10^{30}\,\text{kg}}} \approx 0{,}84 \cdot m_\odot$

a) Hier bietet sich die semi-quantitative Aufgabe S.126/2 mit Interpretation eines Diagramms an.

b) Zum Rechnen geeignet ist S.126/3 (kurz) oder S.126/1 (mit Wiederholung von weiteren Techniken).

Übungsaufgaben:

S.162/2) Beide Sterne bewegen sich im Durchschnitt mit 75 km/s von uns weg, das ist die radiale Geschwindigkeit des Systems.
Die Geschwindigkeit der A-Komponente weicht davon um maximal 50 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$ ab, die der B-Komponente um 75 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

→ Die Massen verhalten sich wie

$\frac{m_A}{m_B} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{v_B}{v_A} = \frac{75}{50} = \underline{\underline{\frac{3}{2} = \frac{1{,}5}{1}}}$

Selbst-Check:
- **Berechnung der Massen**
- **Hebelgesetz**
- **visuelle Doppelsterne**
- **photometrische DS**
- **spektroskopische DS**

Aufgaben:

Hier ist die Abituraufgabe 2016, Q12, Astrophysik 2, 2. Algol im Sternbild Perseus spannend, die Du z.B. in Deinem Abiturvorbereitungsheftchen findest oder unter isb.bayern.de über Gymnasium - Leistungserhebungen - Abitur.

Buchner Astro S. 126

Aufg. 1 wiederholt. nochmal Helligkeiten!
Doppelsternsystematik in c, d, e
entsprechend und d kürzer ist 3)
neue Aufgabenhaltes bietet 2

1) $m = 2{,}2$, B8 $\rightarrow M = 0$, $T = 15.000\,K$

a) $m - M = 5 \lg \frac{r}{10pc} \quad |:5$

$\frac{2{,}2-0}{5} = \lg \frac{r}{10pc} \quad | 10^{\dots}$

$10^{0{,}44} = \frac{r}{10pc}$

$r = 2{,}75 \cdot 10pc = \underline{\underline{28pc}}$

b) $\underline{R^* = ?}$

$M - M_\odot = -2{,}5 \lg L^*$

$0 - 4{,}8 = -2{,}5 \lg L^* \quad | (-2{,}5)$

$1{,}92 = \lg L^* \quad | 10^{\dots}$

$L^* = 10^{1{,}92} = \underline{83}$

$R^* = \frac{\sqrt{L^*}}{(T^*)^2} = \frac{\sqrt{83}}{\left(\frac{15.000K}{5800K}\right)^2} = \underline{\underline{1{,}4}}$ (abweichendes Ergebnis)

c) $m_A : m_B = 5 : 1 = a_B : a_A$ $\quad$ Radien = ?

$\rightarrow a_A = \frac{1}{5} a_B$

$a_A + a_B = a = \frac{6}{5} a_B$

$a_B = \frac{5}{6} a = \frac{5}{6} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{10} m = \underline{\underline{1{,}0 \cdot 10^{10} m}}$, $a_A = \underline{\underline{0{,}2 \cdot 10^{10} m}}$

d) Massen = ?

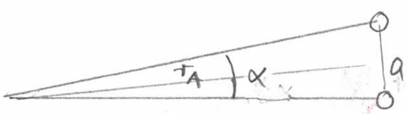
$\omega^2 = G \frac{m_A + m_B}{a^3}$

$m_A + m_B = \frac{1}{G} \cdot \omega^2 \cdot r^3 = \frac{4\pi^2}{GT^2} \cdot a^3 = \frac{4\pi^2 \, kg\, s^2 \cdot (1{,}2 \cdot 10^{10} m)^3}{6{,}67 \cdot 10^{-11} m^3 \, (2{,}8763 \cdot 24 \cdot 3600 s)^2} = \underline{1{,}66 \cdot 10^{-31} kg}$

$m_A = \frac{5}{6}(m_A + m_B) = 1{,}4 \cdot 10^{31} kg$, $m_B = 2{,}7 \cdot 10^{30} kg$

$= \underline{\underline{6{,}9 \cdot m_\odot}}$ $\qquad = \underline{\underline{1{,}4\, m_\odot}}$

e)



$\tan(\alpha) = \frac{a}{r} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{10} m}{28 \cdot 3{,}086 \cdot 10^{16} m} = 1{,}4 \cdot 10^{-8}$

$\alpha = (2{,}9 \cdot 10^{-3})''$

2) $v_B : v_A = 1 : 1{,}5 = 2 : 3$

$m_A : m_B = r_B : r_A = v_B : v_A = 2 : 3$ ($A \leftrightarrow$ blau, $B \leftrightarrow$ grün)

Schwerpunkt bewegt sich dabei mit einer Geschw. von 75 km/s von uns weg.

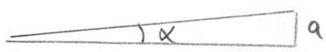
3a) $m_A : m_B = a_B : a_A = 2 : 1$

b) $\omega^2 = G \cdot \frac{m_A + m_B}{r^3}$

$$m_A + m_B = \frac{\omega^2 \cdot r^3}{G} = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 \cdot (3 \cdot 10^{12}\,m)^3\, kg\, s^2}{6{,}67 \cdot 10^{-11}\, m^3 \cdot (50 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600\,s)^2} = \underline{6{,}4 \cdot 10^{30}\,kg}$$

$m_A = \frac{2}{3}(m_A + m_B) = \underline{4{,}3 \cdot 10^{30}\,kg}$; $m_B = \frac{1}{3}(m_A + m_B) = \underline{2{,}1 \cdot 10^{30}\,kg}$

c)



$\tan\alpha = \frac{a}{r} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{12}\,m}{8{,}33 \cdot 10^{16}\,m} = 3{,}6 \cdot 10^{-5} \rightarrow \underline{\alpha = 7{,}4''}$

$r = 2{,}7\,pc = 2{,}7 \cdot 3{,}086 \cdot 10^{16}\,m = \underline{8{,}33 \cdot 10^{16}\,m}$

Wir können nun mit Hilfe des HRD aus den Spektren und scheinbaren Helligkeiten die Leuchtkräfte von Sternen bestimmen. Bei der Analyse von Doppelsternen erhält man auch deren Massen. Vergleich man diese beiden Größen, so finde man für Hauptreihen-Sterne einen empirischen Zusammenhang. Einfach ausgedrückt könnte man sagen: "ein großer Ofen strahlt mehr Leistung ab".

4.8 Alter von Sternen

Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

Bei den **Hauptreihensternen** zeigt sich zwischen der relativen Masse und der relativen Leuchtkraft ein Zusammenhang (siehe Graph).
In doppelt-logarithmischer Darstellung erhält man eine Ursprungsgerade mit Steigung 3:

$$\rightarrow \lg L^* = 3 \cdot \lg m^* \quad | 10^{\cdots}$$

$$L^* = 10^{3 \cdot \lg m^*}$$

$$L^* = (10^{\lg m^*})^3$$

$$\boxed{L^* = (m^*)^3}$$

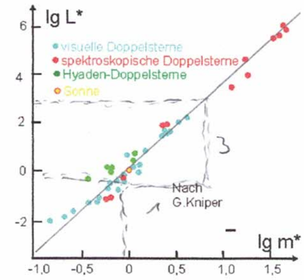


Abb. aus leifiphysik.de

Wega (α Lyrae) hat eine scheinbare Helligkeit von m = 0,04. Von der Erde aus wird eine trigonometrische Parallaxe p = 0,123" gemessen. Bestimme die Masse von Wega.

Aufgabe: Masse aus Leuchtkraft berechnen

a) $r = \frac{1''}{p}\,pc = \frac{1''}{0{,}123''}\,pc = \underline{8{,}1\,pc}$

b) $m - M = 5 \lg \frac{r}{10\,pc} \rightarrow M = m - 5 \lg \frac{r}{10\,pc} = 0{,}04 - 5 \lg \frac{8{,}1\,pc}{10\,pc}$

$= \underline{0{,}49}$

c) $M - M_\odot = -2{,}5 \lg L^*$

$\frac{0{,}49 - 4{,}8}{-2{,}5} = \lg L^* = 1{,}72 \quad | 10^{\cdots}$

$L^* = 10^{1{,}72} = \underline{53}$

d) $L^* = (m^*)^3$

$m^* = \sqrt[3]{L^*} = \underline{\underline{3{,}76}}$ $\quad 7{,}5\ (m = 7{,}5 \cdot 10^{30}\,kg)$

Im nächsten Kapitel werden wir uns noch umfassend mit den Lebensstadien von Sternen befassen.
Das Hauptreihenstadium ist quasi das ausgedehnte "Arbeitsleben" nach der Kindheit und vor der Rente.

Verweildauer auf der Hauptreihe:

Hauptreihensterne sind gekennzeichnet durch gleichmäßige Wasserstofffusion im Kern (so wie bei unserer Sonne).
Sobald der Brennstoffvorrat im Kern zur Neige geht
verändert sich ihr Energiehaushalt und sie verlassen die Hauptreihe.
Ihre Verweildauer τ auf der Hauptreihe hängt damit von der Leuchtkraft und dem Brennstoffvorrat ab.

$$\left.\begin{array}{ll} \tau^* \sim m^* & (\text{Vorrat}) \\ \tau^* \sim \frac{1}{L^*} & (\text{Verbrauch}) \end{array}\right\} \tau \sim \frac{m}{L^*} \longrightarrow \boxed{\tau^* = \frac{m^*}{L^*}}$$

$$\tau^* = \frac{m^*}{(m^*)^3} \longrightarrow \boxed{\tau^* = \frac{1}{(m^*)^2}}$$

Die Verweildauer der Sonne, auf die dabei bezuggenommen wird, kann man

mit $\tau_\odot = 7 \cdot 10^9\,a$ abschätzen (siehe S.132/Aufgabe 2).

Berechne die Verweildauer auf der Hauptreihe für einen Stern, der 10-mal soviel Masse wie unsere Sonne hat.

Aufgabe: Verweildauer

$$\tau^* = \frac{1}{(m^*)^2} = \frac{1}{100} = 0{,}01$$

$$\tau = 0{,}01 \cdot \tau_\odot = 0{,}01 \cdot 7 \cdot 10^9\,a = 7 \cdot 10^7\,a = \underline{70 \text{ Mio Jahre}}$$

Sternhaufen sind zusammengehörige Gruppen von Sternen, die sich zu etwa gleicher Zeit aus kosmischer Materie gebildet haben, also gleich weit entfernt und vor allem gleich alt sind (wie ein gemeinsamer Abi-Jahrgang). Sie eignen sich besonders für das Studium des Lebenszyklus von Sternen.

Alter von Sternhaufen

Sobald der Brennstoff (Wasserstoff) in der Kernzone erschöpft ist,

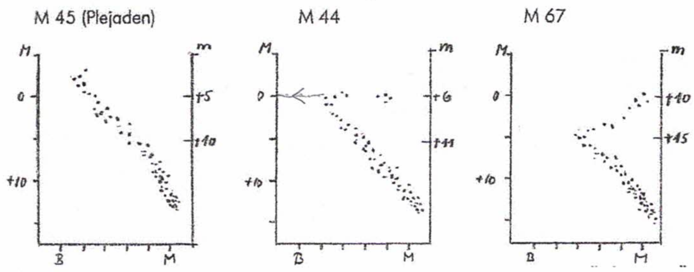
verändert sich der Energiehaushalt,

und damit auch Leuchtkraft und Temperatur.

Im HRD verlassen die Sterne die Hauptreihe meist in Richtung rote Riesen.

In Haufen von gleich alten Sterne verlassen die hellsten Sterne die Hauptreihe zuerst (siehe "Verweildauer auf der Hauptreihe"). Damit entvölkert die Hauptreihe von links oben nach rechts unten.

Am Knick können wir das Alter des Sternhaufens ablesen.



Ermittle das Alter des Sternhaufens M44. Bestimme hierzu
a) die absolute Helligkeit der hellsten Sterne auf der Hauptreihe
b) die relative Leuchtkraft dieser Sterne
c) die relative Masse dieser Sterne
d) das Alter dieser Sterne

Aufgabe:

a) $M \approx 0$ für hellste Sterne

b) $M - M_\odot = -2{,}5 \lg \frac{L}{L_\odot} = -2{,}5 \lg L^* \quad | : (-2{,}5)$

$\frac{0 - 4{,}8}{-2{,}5} = \lg L^* = 1{,}92 \quad | 10^{\dots}$

$L^* = 10^{1{,}92} = \underline{83}$

c) $L^* = (m^*)^3 \longrightarrow m^* = \sqrt[3]{L^*} = \sqrt[3]{83} = \underline{4{,}4}$

d) $\tau^* = \frac{1}{(m^*)^2} = 0{,}052$

$\tau = 0{,}052 \cdot \tau_\odot = 0{,}052 \cdot 7 \cdot 10^9 a = \underline{367 \text{ Mio Jahre}}$

Hier bietet sich die Aufgabe S.133/3 an (entsprechend der Aufgabe auf Folie 3).

Die Musteraufgabe auf derselben Seite befasst sich auch mit M44, kommt aber zu einem anderen Ergebnis. Das liegt an der Ablesung des Wertes am Knick aus dem HRD. (die Wahrheit liegt übrigens genau zwischen unserer Rechnung und dem Buch). Altersbestimmung ist eher so eine "pi mal Daumen" - Sache.

Übungsaufgaben:

M67/a) Knick bei $m = 14$

$m - M = 5 \lg \frac{r}{10pc} \longrightarrow M = m - 5 \lg \frac{r}{10pc} = 14 - 5 \lg \frac{830pc}{10pc}$

$= \underline{4{,}4}$

b) $-2{,}5 \cdot \lg L^* = M - M_\odot = 4{,}4 - 4{,}8 = -0{,}4 \quad | : (-2{,}5)$

$\lg L^* = \frac{-0{,}4}{-2{,}5} = 0{,}16 \quad | 10^{\dots}$

$L^* = 10^{0{,}16} = \underline{1{,}45}$

c) $L^* = (m^*)^3 \longrightarrow m^* = \sqrt[3]{L^*} = \sqrt[3]{1{,}45} = \underline{1{,}13}$

d) $\tau^* = \frac{1}{(m^*)^2} = \frac{1}{(1{,}13)^2} = 0{,}78$

$\tau = 0{,}78 \cdot 7 \cdot 10^9 a = \underline{5{,}5 \text{ Mrd Jahre}}$

Selbst-Check:
- **Masse-Leuchtkraft-Beziehung**
- **Verweildauer auf der Hauptreihe**
- **Alter von Sternhaufen**

Aufgaben:

Sehr gut geeignet ist hier die alte Abituraufgabe "Plejaden" aus 1999. Suchbegriff auf Leifiphysik: "plejaden".

M3 a) $m = 19{,}5$

$m - M = 5 \lg \frac{r}{10\,pc} \rightarrow M = m - 5 \lg \frac{r}{10\,pc} = 19{,}5 - 5 \lg \frac{13.000\,pc}{10\,pc}$

$= \underline{3{,}9}$

b) $-2{,}5 \lg L^* = M - M_\odot = 3{,}9 - 4{,}8 = -0{,}9 \quad | : (-2{,}5)$

$\lg L^* = \frac{-0{,}9}{-2{,}5} = 0{,}36 \quad | 10^{\cdots}$

$L^* = 10^{0{,}36} = \underline{2{,}3}$

c) $L^* = (m^*)^3 \rightarrow m^* = \sqrt[3]{L^*} = \sqrt[3]{2{,}3} = \underline{1{,}32}$

d) $\tau^* = \frac{1}{(m^*)^2} = \frac{1}{(1{,}32)^2} = \underline{0{,}58}$

$\tau = 0{,}58 \cdot 7 \cdot 10^9\,a = \underline{\underline{4{,}0 \text{ Mrd Jahre}}}$

M3

Der interstellare Raum ist nicht leer, die Dichte der Materie dort ist aber sehr klein (auf der Erde würde man hier von einem sehr guten Vakuum sprechen). In den kosmischen Nebeln ist die Materie deutlich dichter. Werden solche Nebel durch Gravitation zusammengezogen, führt dies in der Folge zur Geburt von Sternen. Junge Sterne finden sich deshalb immer im Bereich von interstellaren Gaswolken. Diese sind die Kinderstube der Sterne.

4.9 Lebenszyklus von Sternen

Interstellare Materie, Kosmische Nebel:

Der interstellare Raum ist nicht leer, sondern enthält feinverteilt Materie (die Dichte beträgt etwa 1 Atom pro cm³), sie besteht zu 98 % aus Wasserstoff und Helium.

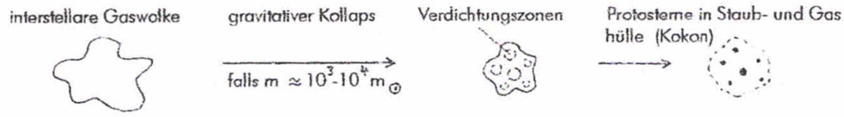
Bei verdichteten Gebieten spricht man von kosmischen Nebeln.

Emissionsnebel: UV-Strahlung von Sternen kann das Gas zum Leuchten anregen

Reflexionsnebel: Staubwolken reflektieren das Licht von nahen Sternen

Absorptionsnebel: Staubwolken absorbieren das Licht von Sternen dahinter

Geburt von Sternen:

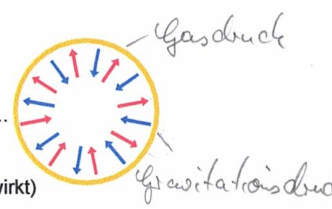


- Verdichtung durch Gravitation (lokale Zentren)
  → freiwerdende Gravitationsenergie heizt Zentrum auf
  → Abstrahlung wegen Temperatur
- Zentrum wird dichter → Abstrahlung wird gebremst
  → Aufheizung bis zu Fusionstemperaturen

Das Hauptreihenstadium ist quasi das "Arbeitsleben" des Sterns, in dem er durch Fusion von Wasserstoff zu Helium Energie freisetzt und abstrahlt.
Aber auch als "Rentner" gibt der Stern nochmal richtig Gas. Aufgrund einer veränderten Struktur im Inneren werden jetzt auch höhere Elemente bis hin zum Eisen exotherm fusioniert. Die Entstehung noch schwerer Elemente findet auch im Kern des Stern statt, die Mechanismen hierfür sind aber noch nicht vollständig verstanden.

Hauptreihenstadium:

Nach dem Zünden der Wasserstofffusion erreicht der Stern einen stabilen Zustand, in dem der Gravitationsdruck (der den Stern weiter zusammendrücken möchte) und der Gasdruck (der der Kompression entgegenwirkt) sich gerade **die Waage halten**. Ebenfalls nach außen gerichtet ist der Strahlungsdruck der aber erst bei sehr großen Sternen einen Einfluss auf die Dynamik des Innenlebens hat (deshalb können Sterne auch nicht beliebig groß sein). Über viele Mio. bis Mrd. Jahre kann der Stern stabil Energie freisetzen und abstrahlen.



Rote Riesen:

Wasserstoffvorräte im Kern gehen zur Neige

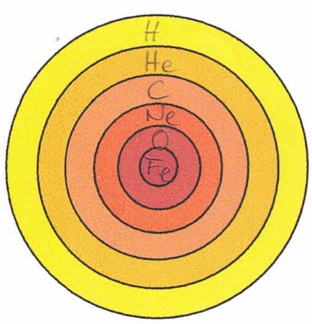
→ Wasserstofffusion im Kern kommt zum Erliegen

→ Temperatur sinkt → Gasdruck sinkt

→ Kern des Sterns kontrahiert

→ Temperatur steigt durch Kontraktion (Energie!)

→ Hülle expandiert und kühlt dabei ab (Roter Riese)



Im weiteren Verlauf werden die Temperaturen auch außerhalb des Kerns hoch genug, um Wasserstoff zu fusionieren. Im Kern selbst werden immer schwerere Kerne fusioniert, die sich dann in Schalen um den Kern anlagern.

Diese Phase des Sterns nennt man Schalenbrennen.

*Für das Sterben von Sternen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Masse des Sterns entscheidet darüber, welches Endstadium angenommen wird. Sterne bis zu 8 Sonnenmassen (auch unsere Sonne) werden zu weißen Zwergen, bis zu 20 Sonnenmassen zu Neutronensternen, darüber zu Schwarzen Löcher. Beachte, dass die **Restmasse** nach Abstoßung der Riesenhülle deutlich niedriger ist.*

Weiße Zwerge

Bei kleineren Sternen ist beim Schalenbrennen ~~ist~~ bereits nach der Fusion

von ....Wasserstoff zu Helium.... Schluß, die Temperaturen hier erlauben keine höheren Fusionen. Der rote Riese stößt dann seine

....äußere Hülle ins All ab.... ,

der Rest fällt durch ....Gravitation.... in sich zusammen.

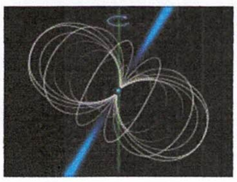
Dieser ....Gravitationskollaps.... wird **bei einer Restmasse unter**

1,4 Sonnenmassen durch den Druck des Elektronengases ....gestoppt.... .

Ein Stern dieser Masse ist dann etwa auf das Volumen ....der Erde....

zusammengeschrumpft und hat eine Dichte von etwa ....$1\,t/cm^3$.... .
Er strahlt noch aufgrund seiner Temperatur und kühlt dabei langsam aus.

Neutronensterne sind beliebte Objekte in der Radioastronomie, da sie aufgrund der intensiven Strahlungsjets auch auf große Distanz gut wahrgenommen und vermessen werden können. Zunächst vermutete man hinter den regelmäßigen Radioimpulsen außerirdische Intelligenz (kleine grüne Männchen).



Graphik aus wikipedia.de

Neutronenstern

Bei mittelgroßen Sternen erreicht man beim Schalenbrennen zwar höhere Elemente, aber auch hier kommt die Fusion nach Aufbrauch des fusionsfähigen Materials zum Erliegen. Der Gravitationskollaps kann bei einer **Restmasse von 1,4 bis 3 Sonnenmassen** nicht durch das Elektronengas gestoppt werden, so dass der Stern weiter schrumpft bis auf einen

Radius kleiner als ....20 km.... bei einer Dichte von ....$10^8\,t/cm^3$....
(= Dichte von Atomkernen). Er besteht dann aus dicht gepackten

Neutronen, die sich aus ....Protonen und Elektronen....
gebildet haben. Die starke Reduzierung des Radius führt zu einer

....schnellen Rotation ($T \leqq 1s$)....
(Drehimpuls, vergleiche Eiskunstlauf), die eine starke, elektromagnetische

....gebündelte Strahlung.... mit sich bringt → ....Pulsar.... .
„Leuchtfeuer"

a) Leite den Schwarzschild-Radius in Abhängigkeit von der Masse des schwarzen Loches ab.
b) Berechne damit den Radius eines schwarzen Loches mit 3 Sonnenmassen.
Hier bieten sich die Buchaufgaben auf den Seiten 135 - 138 an.

Schwarze Löcher

Verbleibt eine **Restmasse größer als 3 Sonnenmassen**, so führt der

Gravitationskollaps nicht mehr zu einem ....stabilen.... Status.

Die Dichte des Sterns wird so groß, dass auch ....Photonen....

ihn nicht mehr verlassen können → ....„schwarzes Loch"....
Die Ausdehnung dieses Objektes lässt sich berechnen, indem man in der Formel für die Fluchtgeschwindigkeit (siehe Keplergesetze) diese gleich der Geschwindigkeit der Photonen (Lichtgeschwindigkeit) setzt.

a) $v_2 = \sqrt{2G \cdot \frac{M}{R}} \overset{!}{=} c$

$$2G \cdot \frac{M}{R} = c^2 \rightarrow \boxed{R = \frac{2GM}{c^2}}$$

b) $R = \frac{2 \cdot 6{,}67 \cdot 10^{-11}\, m^3 \cdot 3 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{30}\, kg}{(3 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2 \; kg\, s^2} = 8893\, m = \underline{9\, km}$

Selbst-Check:
- **Sterngeburt in kosmischen Nebeln**
- **Hauptreihenstadium**
- **rote Riesen**
- **weiße Zwerge, Neutronensterne, schwarze Löcher**

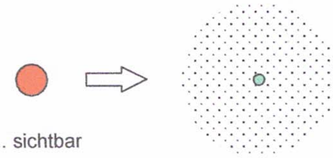
Aufgabe:

Die Abituraufgabe "Sternbild Pegasus" aus 2006 ist umfassend und vielfältig hierzu. Suchbegriff auf Leifiphysik "sternbild pegasus".

4.10 Massenverlust von Sternen (Fortsetzung zu Kap. 4.9)

Im Zusammenhang mit den Lebenszyklen von Sternen gibt es einige, spektakuläre Szenarien, in denen Sterne z.T. erhebliche Teile ihrer Masse an das Weltall abgeben. Sehr schöne Bilder von Nebeln und auch von Novae gibt's auf wikipedia.

Planetarische Nebel:



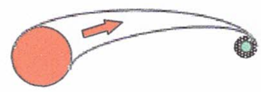
- roter Riese stößt großen Teil des Hüllenmaterials ab
- Materiewolke bleibt mehrere tausend Jahre sichtbar
- Emissions-, Reflexions-, Absorptionsnebel

Novae sind für die Astronomie schon deshalb von großer Bedeutung, da diese gewaltigen Explosionen im All bereits früh in der Geschichte der Himmelsbeobachtung wahrgenommen und dokumentiert wurden.

Novae:

Beobachtung: innerhalb weniger Tage
entsteht ein sehr heller "neuer Stern",
der nach etwa 1 Jahr wieder verschwindet

Mechanismus: in einem Doppelsternsystem



expandiert ein Roter Riese
→ weißer Zwerg erhält Material aus dessen **kühler** Hülle

→ Material heizt am Zwerg auf
Wasserstoffbrennen setzt schlagartig ein
→ Explosion, Material wird weggeschleudert
(der Massenverlust beträgt etwa 0,001 $m_\odot$)

Auswirkung:

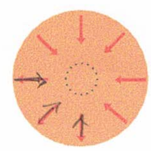
großer Anstieg der Helligkeit
(bis zu 10 Größenklassen)

2,5 Größenklassen bedeuten 10-fache Leuchtkraft
4 · 2,5 " " 10^4-fache "

Wie der Name schon sagt, sind die Supernovae die Blockbuster unter den Sternexplosionen. Dabei können sehr unterschiedliche Mechanismen ablaufen, weshalb wir sie in verschiedene Typen klassifizieren. Wir beschränken uns hier auf die Typen II und Ia. Die Bilder von Supernovae sind nicht weniger spektakulär als die von Novae (ebenfalls auf wikipedia zu finden).

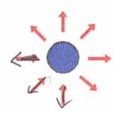
Supernovae Typ II:

Beobachtung: wesentlich heller als Novae,
bis zu 25 Größenklassen
→ $25 = 10 \cdot 2{,}5$, die Leuchtkraft wächst
also um Faktor $10^{10} = 10$ Mrd, das entspricht einer Galaxie!

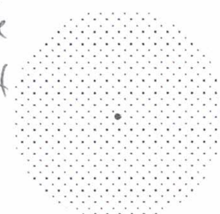


treten nur bei **sehr schweren Sternen** auf
(rote Riesen ab 8 Sonnenmassen)

Mechanismus: Roter Riese kollabiert



→ Neutronenstern entsteht
→ massiver Kern stoppt Kontraktion
→ Kern wird zusammengedrückt, federt zurück
→ äußere Schichten werden weggeschleudert
→ Neutronenstern nicht stabil
→ Endstadium schwarzes Loch



Bedeutung: Da der Vorgang sehr turbulent abläuft, werden auch
schwere Elemente (Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen)
aus den inneren Schichten ins All geschleudert.

→ wichtig für die Planetenentstehung
„wir sind Sternenstaub"

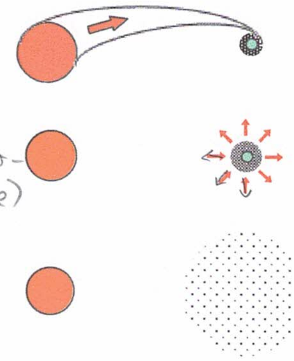
Supernovae Typ Ia ähneln in ihrer Entwicklung sehr den vorher behandelten Novae, allerdings wird hier nicht nur eine "kleine" Menge Materie ins All geschleudert, der Stern explodiert vielmehr komplett!

Supernovae Typ Ia:

Beobachtung: in Doppelsternsystemen ähnlich wie Novae,

allerdings viel heller .

Mechanismus: weißer Zwerg sammelt solange Material vom roten Riesen, bis er 1,4 $m_\odot$ erreicht hat (Chandrasekhar-Grenze)



Da die Entwicklung von Supernovae Typ Ia einem sehr strikten Muster folgt, ergibt sich dabei eine stets gleiche Leuchtkraft ("Standardkerze". Wir wissen also, wie hell die Explosion ist und können diese Information nutzen, um die Entfernung zu berechnen.

→ fulminantes Wasserstoffbrennen

→ Explosion zerreißt Stern

→ Die Explosion ereignet sich immer bei genau der gleichen Masse 1,4 $m_\odot$

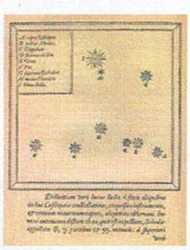
→ stets gleiche Leuchtkraft und damit absolute Helligkeit $M_{max} = -19{,}4 \pm 0{,}2$

→ Entfernungsmodul lässt sich damit verwenden

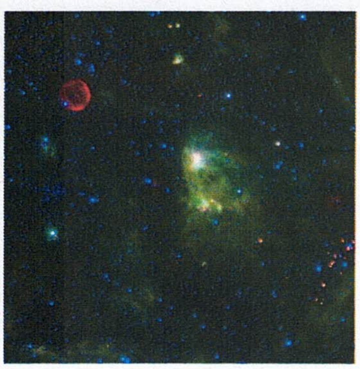
PS:
In diesem Jahrzehnt konnten Astronomen nachweisen, dass sich Supernovae vom Typ Ia in den meisten Fällen nicht wie hier dargestellt entwickeln, sondern das Ergebnis der Kollision von zwei weißen Zwergen sind. Damit geht auch die Eignung als Standardkerzer verloren.

Bedeutung: Da Supernovae so unglaublich hell sind, lassen sich damit Entfernungen auch über sehr weite Distanzen bestimmen

Tycho Brahe beobachtete 1572 eine Supernova im Sternbild Cassiopeia, die ungefähr die scheinbare Helligkeit der Venus hatte (verwende m = - 4). Berechne die Entfernung dieser Sternexplosion von unserer Erde.



Originalaufzeichnung von Tycho Brahe und Ringnebel als Überrest der Supernova, beide Abbn. aus wikipedia.



Übungsaufgabe: Supernova 1572, beobachtet durch Tycho Brahe

$$m - M = 5 \lg \frac{r}{10\,pc}$$

$$-4 + 19{,}4 = 5 \lg \frac{r}{10\,pc} \quad |:5$$

$$3{,}08 = \lg \frac{r}{10\,pc} \quad | 10^{\cdots}$$

$$r = 10^{3{,}08} \cdot 10\,pc = 1202 \cdot 10\,pc = \underline{12\,kpc}$$

Das ist noch innerhalb unserer Galaxie.

Da wir scheinbare Helligkeiten bis +29 (Hubble-T) messen können, ermöglicht das sehr weite Distanzen.

Selbst-Check:
- **planetarische Nebel**
- **Novae**
- **Supernovae Typ II**
- **Supernovae Typ Ia, Entfernungsbestimmung**

Aufgaben:

Die Buchaufgaben S.144/2 und 4 zielen auf den Zusammenhang auf Helligkeit und Leuchtkraft.