4. Sterne

2024-11-23

Inhalt

- 4.1. Jährliche Parallaxe
- Eigen- und Radialbewegung
- Doppelsterne
- Extrasolare Planeten
- Sternhelligkeiten
- Spektralklassen
- Hertzsprung-Russel-Diagramm
- Kugelsternhaufen
- Sternentwicklung
  - Lebenslauf
  - Die Endzustände
  - Masseverlust von Sternen

4.1. Jährliche Parallaxe

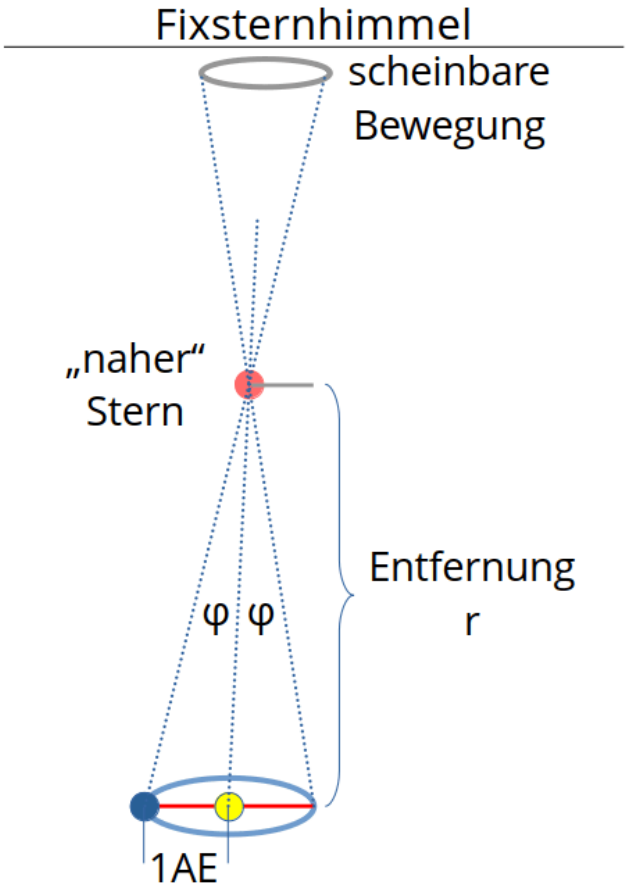
- ...ist eine scheinbare Bewegung von relativ nahen Sternen vor dem Fixsternhimmel.
- Die jährliche trigonometrische Parallaxe ist der Winkel, unter dem man die Bewegung eines Sterns aus dem Erdbahnradius vor dem Fixsternhimmel beobachtet.
- Wo ist dein Daumen vor einem Hintergrund, wenn du abwechselnd mit beiden Augen schaust?

$$tan(\varphi) = \frac{1AE}{r}$$

$$r = \frac{1AE}{tan(\varphi)}$$

r = Entfernung des Sterns
φ = halber insgesamt in einem Jahr zu beobachtender Winkel
Einheit: parallaktische Sekunde („Parsec“)
Beim Winkel 1“ ist der Stern 1pc = 3,26 LJ entfernt.

Merke: Bei kleineren Winkeln ist die Entfernung größer!



Quelle: BieC[1]

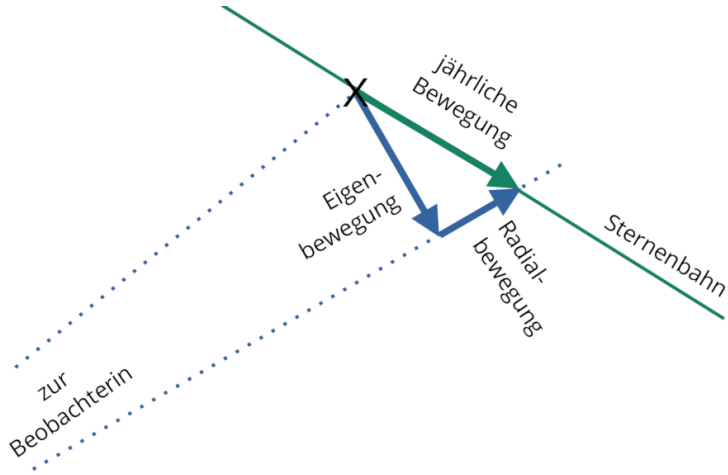
Eigen- und Radialbewegung

Eigenbewegung

...ist die *tangentiale* Komponente v_t (senkrecht zum Radius) der vektoriellen Geschwindigkeit v.

$$tan(\Delta\varphi) = \frac{v_t \cdot \Delta t}{r}$$

Die Eigenbewegung wird im Teleskop beobachtet.



Quelle: biec

Radialbewegung

...ist die *radiale* Komponente v_r (in Richtung des Radius) der vektoriellen Geschwindigkeit v.

Feststellbar über den Dopplereffekt:
Bekannte Spektrallinien (mit Wellenlänge λ_0) werden unter einer anderen Wellenlänge λ beobachtet.

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}$$

- Bewegung auf uns zu führt zu **Blauverschiebung**
- Bewegung von uns weg führt zu **Rotverschiebung**

Doppelsterne

Woher kennen wir die Massen der Sterne?

Dazu erinnern wir uns, woher wir die Masse unserer Sonne kennen: Durch ihre Gravitationswirkung auf andere Körper (Kepler3, Gravitationsgesetz).

Wie erfahren wir nun die Massen ferner Sterne? → DOPPELSTERNE!!!

Wenn zwei Sterne „zueinander gehören", d.h. zu zweit um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen, sind es *Physische Doppelsterne*.

Wir unterscheiden 4 Arten, wie wir sie **erkennen** können. Die 4 Typen können sich daher auch „überschneiden":

> (Anmerkung: Tatsächlich gibt es sehr häufig auch Dreifachsysteme, Vierfachsysteme, usw. Über die Hälfte aller uns bekannten Fixsterne sind Mitglieder von Mehrfachsystemen. Dabei können die Abstände bzw. Umlaufszeiten stark variieren, letztere von Stunden bis zu Millionen Jahren. Wir beschränken uns im Folgenden aber auf den einfachsten Fall, die Doppelstern-Systeme.)

Astrometrische Doppelsterne

Man kann selbst im größten Fernrohr nur **einen** Stern wahrnehmen (also eine Lichtquelle). Aber aus *periodischen* Ortsveränderungen dieses Sterns („Wackeln") kann man schließen, dass es einen Begleitstern geben muss.

1834 bemerkte Bessel ein solches „Wackeln" bei SIRIUS.
1862 konnte der Begleiter mit neuen lichtstarken Fernrohren gesehen werden.

Genauso wurden auch erste Exoplaneten nachgewiesen!

Spektroskopische Doppelsterne

Man sieht wieder nur **eine** Lichtquelle. In deren **Spektrum** entdeckt man Doppler-Verschiebungen, da die beiden Sterne sich uns regelmäßig nähern bzw. sich von uns entfernen.

Variante 1: Das Spektrum enthält nur das Licht eines Sterns, da der andere zu dunkel ist.
Dann bewegen sich die Spektrallinien periodisch zu größeren (Stern entfernt sich) und kleineren (Stern nähert sich) Wellenlängen.

Variante 2: Das Licht beider Sterne tritt gleichzeitig im Spektrum auf.
Ihre Spektrallinien bewegen sich gegenläufig hin und her.

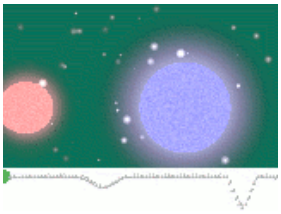
Siehe auch bei ⇗ Leifiphysik (https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/versuche/spektroskopische-doppelsterne).

Photometrische Doppelsterne

(früher auch *Bedeckungsveränderliche*)
Man kann sieht nur **eine** Lichtquelle.

Aber da sich die beiden Sterne, von uns aus gesehen, regelmäßig (evtl. nur teilweise) verdecken, stellen wir periodische Schwankungen der (Gesamt-) Helligkeit fest.

Die Gesamthelligkeit ist als Lichtkurve unter der Animation angegeben.



Quelle: wikipedia [2]

Zur ⇗ Animation (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Eclipsing_binary_star_animation_2.gif) in der Wikipedia.

Visuelle Doppelsterne

Die beiden Sterne können optisch „getrennt" werden, d.h. beide können (im Fernrohr) gesehen bzw. fotografiert werden. Dazu darf ihr gegenseitiger Abstand a aber nicht allzu klein sein (abhängig von ihrer Entfernung r von uns).

Kennt man bei visuellen Doppelsternen die Umlaufszeit T und den Abstand a der beiden Sternpartner (dies setzt voraus, dass die Entfernung r des Sternsystems von uns bekannt ist), so nennt man den Abstand der beiden Sterne a und betrachtet ihn als große Halbachse der Ellipse, auf welcher der eine (kleinere) Stern um den anderen (größeren) Stern läuft.

Nun kann man mit dem 3. Keplergesetz die Gesamtmasse der beiden Sterne berechnen:

$$\mathbf{m_A + m_B = \frac{4\pi^2}{G} \bullet \frac{a^3}{T^2}}$$

Kennt man nun noch das Verhältnis der Abstände beider Sterne vom gemeinsamen Schwerpunkt, so kann man mit Hilfe des Schwerpunktsatzes aus der Gesamtmasse m_{ges} die Einzelmassen m_A und m_B berechnen:

$m_A : m_B = a_B : a_A$

So konnte man die Massen vieler Sterne bestimmen - welche jedoch nur ein winziger Teil aller Sterne waren:
Ein System eines visuellen Doppelsterns, bei dem man klar die Bewegung beider Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt ausmessen werden konnte und bei dem die Parallaxe (Entfernung) mit genügender Genauigkeit bekannt war.

Aus diesen Messungen erhielt man folgenden „groben" Zusammenhang zwischen den Massen von Sternen und ihren Leuchtkräften, der **nur für Hauptreihensterne** gilt:

$$\boxed{L \sim m^3}$$

relativ zur Sonne

Praktisch ist es, die Helligkeiten, Massen und Lebensdauern relativ zur Sonne anzugeben.
Ein Wert mit Sternchen ist also das Verhältnis aus dem Wert des Sterns und dem Wert der Sonne.
Er ist daher ohne Einheit (da sie sich herauskürzt)!

$$L^* = \frac{L}{L_{\text{So}}}$$

$$m^* = \frac{m}{m_{\text{So}}}$$

$$T^* = \frac{T}{T_{\text{So}}}$$

Damit gilt die so genannte **Masse-Leuchtkraft-Beziehung (MLB)** (Eddington 1924):

$$\boxed{\begin{aligned} L^* &= m^{*\,3} \qquad \text{also} \\ \frac{L}{L_{\text{So}}} &= \left(\frac{m}{m_{\text{So}}}\right)^3 \end{aligned}}$$

Betrachten wir einen Stern mit doppelter Sonnenmasse:
Offensichtlich verpulvert er seinen (doppelt so großen) Brennstoffvorrat mit einer achtfachen Leuchtkraft, wofür er bezahlt, indem er nur ein Viertel der **Lebenserwartung** der Sonne hat.

Es gilt daher:

$$\boxed{T^* = \frac{1}{m^{*\,2}}}$$

Massereiche, helle, blaue Sterne leben nicht lange!

Die Leuchtstärken aller Sterne variieren mit 1 : 10^{10} nach diesem Gesetz also viel extremer als ihre Massen (1 : 10^4).
Die meisten Sternmassen liegen zwischen 0,1 m_{So} und 50 m_{So}, sehr viele sogar nur zwischen 0,5 m_{So} und 4 m_{So}.

Übung

Berechne die Bereiche der Leuchtkräfte relativ zur Sonne bzw. die absoluten Lebensdauern der letztgenannten Sterne. Gehe von gerundet 10 Mdr. Jahren bei der Sonne aus.

Lösung

$$\begin{aligned} Angabe\ldots \qquad & \Rightarrow m^* \in \left[0,5;\ 4\right] \\ L^* = m^{*3} \qquad & \Rightarrow L^* \in \left[0,125;\ 64\right] \\ T^* = \frac{1}{m^{*2}} \qquad & \Rightarrow T^* \in \left[4;\ 0,0625\right] \\ T = T^* \cdot 10 \cdot 10^9 a \qquad & \Rightarrow T \in \left[40 \cdot 10^9 a;\ 625 \cdot 10^6 a\right] \end{aligned}$$

Extrasolare Planeten

- Transitmethode → Abdunklung eines Sterns
- Radialgeschwindigkeitsmethode → Dopplereffekt des “wackelnden” Sterns.
- Aktuell: Im Teleskop sichtbare Planeten

Begriff: **habitable Zone**

Geringe Wahrscheinlichkeit einen Planeten mit erdähnlichen Bedingungen zu finden:

- größerer Stern als die Sonne:
  - zu kurze Lebensdauer für Entwicklung von Leben
  - (z.B. m^* = 4 -> ca. 600 Mio Jahre)
- kleinerer Stern als die Sonne:
  - geringere Leuchtkraft, daher
  - habitable Zone eng am Stern.
  - Wegen der größeren Nähe stärkere Gezeitenkräfte und daher
  - frühe **gebundene Rotation** -> fatal.

Sternhelligkeiten

Die scheinbare Helligkeit m

(= mag = magnitudo) eines Sterns beschreibt die Helligkeit, mit der er uns am Himmel *erscheint*. (m nicht mit der Masse m verwechseln!!!)

Griechische Astronomen der Antike (Hipparch von Nikaia, um 150 v.Chr.) führten eine Einteilung der Sterne in **6 Größenklassen** ein. Diese sog. "Größe" hat nichts mit der geometrischen Ausdehnung des Sterns zu tun.

Die hellsten Sterne nannte man "Sterne 1. Größe", die schwächsten mit bloßem Auge gerade noch sichtbaren Sterne hießen "Sterne 6. Größe".

Unsere *heutige* exakte Definition der “Größenklassen” von Sternen stammt aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. Sie gibt immer noch seine *scheinbare Helligkeit* am Himmel an und hat nichts mit seiner geometrischen Größe zu tun - beruht jetzt aber auf physikalischen Strahlungs-Messungen und lässt deshalb auch dezimale Zwischenwerte zu. Sie wurde absichtlich so gewählt, dass die antiken Werte möglichst wenig verändert werden mussten.

Sinnesreize

Dazu müssen wir aber zuerst den Zusammenhang zwischen einem physikalischen **Reiz** und dem menschlichen **Sinneseindruck** betrachten:

Bekanntlich nehmen wir z.B. *Lautstärken* oder *Tonhöhen* logarithmisch wahr:

Die Lautsprecherleistungen 100W – 200W – 400W – 800W – 1600W - ... empfinden wir als jeweils um gleiche Stufen ansteigend.

Die Tonhöhen 110Hz – 220Hz – 440Hz – 880Hz – 1760Hz - ... empfinden wir als jeweils um *1 Oktave* ansteigend.

Psychophysisches Grundgesetz

... von **Weber und Fechner** (1859) beschreibt den Zusammenhang mit **S** für den Sinneseindruck und **R** für den physikalischen Reiz:

$$\boxed{S_1 - S_2 = C \lg \frac{R_1}{R_2}}$$

Tipp: $\lg$ ist der Zehnerlogarithmus. Eine andere Basis würde jedoch nur die Konstante C verändern...

Wahrnehmung von Sternhelligkeiten

Zwischen den *menschlichen Sinneseindrücken* (hier: Empfinden von Helligkeiten → **m**) und der *physikalisch zugrundeliegenden Größe* (hier: ankommende Strahlungsleistung pro Flächeneinheit → **E**) besteht also ein exponentieller bzw. logarithmischer Zusammenhang.

D.h. ein **Vervielfachen** der Bestrahlungsstärke um einen bestimmten **Faktor** bewirkt eine Zunahme des Helligkeitseindrucks um eine **additive Konstante**.

Merke: Da nach der griechischen Definition die Sterne mit einem kleinen Zahlenwert für m die helleren sind, gilt:

$$E_1 > E_2 \;\Leftrightarrow\; m_1 < m_2$$

Herleitung

Messungen ergaben, dass uns von den Sternen 1. Größe nach der antiken Skala circa 100mal soviel Licht wie von einem Stern 6. Größe erreicht. Deshalb hat man festgelegt:

Zwei Sterne, deren Bestrahlungsstärken sich wie

$$100 : 1$$

*verhalten, sollen sich um **5** Größenklassen **unterscheiden**.*

Damit ergibt sich mit einem allgemeinen Ansatz mit einer Unbekannten C folgende Herleitung durch Einsetzen:

$$\begin{aligned} m_1 - m_2 &= C \cdot lg\frac{E_1}{E_2} \\ -5 &= C \cdot lg100 \\ -5 &= C \cdot 2 \\ -2,5 &= C \end{aligned}$$

Allgemein gilt nun für die zwei Magnituden der Zusammenhang mit dem Verhältnis ihrer Lichtintensitäten (z.B. in W/m²):

$$\boxed{\Delta m = m_1 - m_2 = -2,5 \cdot lg\frac{E_1}{E_2}}$$

Diese Formel sagt bis jetzt nur etwas über Helligkeitsverhältnisse zwischen 2 Sternen. Jetzt müsste noch die scheinbare Helligkeit **eines** Sterns per Definition festgelegt werden. Zur Erhöhung der Genauigkeit hat man eine ganze Reihe von Sternen (329), die sog. "Polsequenz", ausgewählt, deren Helligkeiten als Grundlage aller Messungen dienen.

Für die praktische Anwendung der Formel benötigt man stets die Werte eines Vergleichssterns. Trotz ihres negativen m-Wertes verwendet man zu diesem Zweck häufig die Sonne (m_{So} = - 26,8; E_{So} = 1367 W/m^2)

Beispiele

...scheinbarer Helligkeiten m von Sternen, die mit bloßem Auge gesehen werden:

Andromeda-Nebel	5		**Sirius** (hellster Fixstern)	-1,58
Polarstern	2,12		**Venus** (max.)	-4,30
Aldebaran	1,06		**Vollmond**	-12,50
Wega	0,04		**Sonne** im Zenit	-26,8

Merke

m<0	0<=m<=6	m>6
Helle Objekte, Mond, Sonne, Meteore	Sterne, Galaxien mit bloßem Auge sichtbar	Nur mit optischen Instrumenten (Teleskop, Fotoapparat) sichtbar

Bsp.: Um einen Stern mit m=12 durch ein Teleskop zu **sehen**, muss das Objektiv ca. 120 mm Durchmesser haben.
Fotographisch sind damit natürlich auch dunklere Sterne (ca. m=14) erkennbar.

Nochmal zum Einprägen:

Verhältnis der Bestrahlungsstärken ⇔ Größenklassendifferenz

1: 10 ⇔ Δm = 2,5

1: 100 ⇔ Δm = 5,0

1: 1000 ⇔ Δm = 7,5

Lichtschwächste Objekte, die fotografisch erfasst werden: 31mag (Hubble), 34mag James Webb im IR, 28mag terrestrisch). Also Bandbreite von mindestens 60 Größenklassen *(32 ohne Sonne, Planeten, Mond, Meteore)*.

Entspricht einem Verhältnis der Bestrahlungsstärken von 10^{24} : 1 *bzw. 10^{13} : 1 (immer noch 10 Billionen zu 1)*!

)Exponenten über $\frac{60}{2{,}5} = 24 \quad \text{bzw.} \quad \frac{32}{2{,}5} \approx 13$)

Die absolute (= wahre) Helligkeit M

eines Sterns ist die Größenklasse/magnitude (=scheinbare Helligkeit), mit der er uns am Himmel erscheinen würde, wenn wir ihn aus einer Entfernung von **10 pc** beobachten würden.

Da die **„absolute Helligkeit"** eines Stern bereits durch seine Leuchtkraft L (in Watt) vollständig beschrieben wird, erscheint diese neue Größe als eigentlich völlig überflüssig. Sie wird aber trotzdem zusätzlich zur Leuchtkraft verwendet, da sie - genau wie m - logarithmisch ist und dadurch viel besser geeignet ist für Vergleiche mit der scheinbaren Helligkeit m.

Eine Herleitung wäre möglich mit:

- *m* sei die scheinbare Helligkeit eines Sterns im Abstand *r*.
- *M* ist die scheinbare Helligkeit, die er im Abstand 10*pc* hätte.
- $E = L\frac{1}{4\pi r^2}$ (die Bestrahlungsstärke ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes von Lichtquelle und Beobachter)

Ergebnis, auch ohne Herleitung:

$$\boxed{m - M = 5 \cdot lg\left(\frac{r}{10pc}\right)}$$

Den Ausdruck "**m - M**", der eine wesentliche Aussage über die Entfernung eines Sterns beinhaltet, nennt man *den* **Entfernungsmodul**.

M ist also bei den meisten Sternen (die ja weiter entfernt sind als 10 pc) eine kleinere Zahl als m, da der Stern in 10 pc Abstand heller erscheinen würde, als er es jetzt tatsächlich tut.
M > m gilt entsprechend für Sterne mit einem Abstand r < 10 pc.

Aufgaben

1) Berechnen Sie das Verhältnis der Bestrahlungsstärken E von Venus (max.) und Vollmond!

2) Wie groß ist Δm im Falle $E_1 = 2 \cdot E_2$?

3) Welche Bestrahlungsstärke erzeugt Sirius auf der Erde?

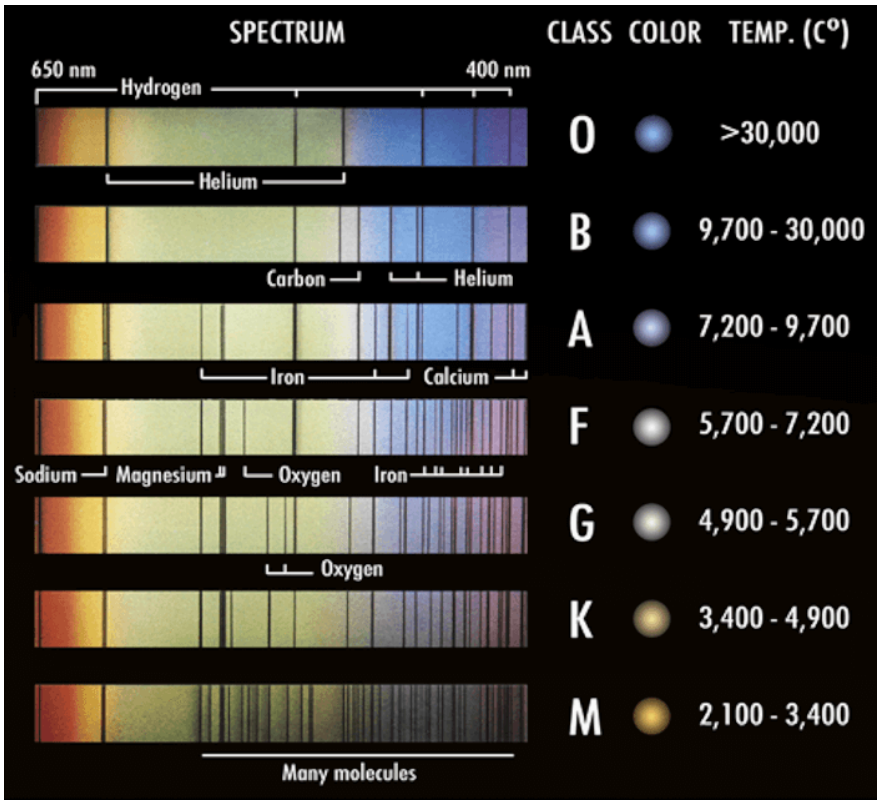
4) Berechnen Sie die wahre Helligkeit von Wega aus m = 0,04 und p = 0,123".

5) Berechnen Sie die wahre Helligkeit der Sonne aus m = - 26,8 und r = 1 AE!

6) Wie verhalten sich die Leuchtkräfte von Sonne und Sirius (M_{Si} = 1,28; M_{So} = 4,8)?

Spektralklassen

Man teilt die Sterne nach ihren Spektren in sogenannte **Spektralklassen** ein:



Quelle: Ausschnitt, aus wikipedia[3]

Zur Zeit der Einführung dieser Klassen waren viele physikalische Zusammenhänge noch unbekannt. Deshalb erhält man eine heute willkürlich erscheinende Buchstabenreihenfolge, wenn man die noch genutzten Klassen nach **absteigenden Temperaturen** ordnet:
O-B-A-F-G-K-M Oh Be A Fine Girl/Guy - Kiss Me

Oder: "Offenbar Benutzen Astronomen Furchtbar Gerne Komische Merksätze" Die Reihenfolge der Klassen O – M stellt auch keine zeitliche Reihenfolge („Lebenslauf") dar, obwohl man (...) gelegentlich von „frühen" und „späten" Klassen spricht.

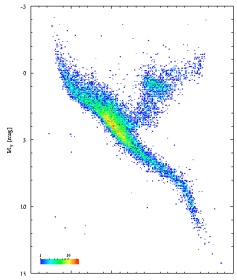
Merke:
Klasse O: die heißesten Sterne (blau)
Klasse M: die „kühlsten" Sterne (rot)

Details: Man hat die Spektralklassen noch feiner unterteilt:
... B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, A1, A2 ...

Leuchtkräfte

In jeder Spektralklasse gibt es Sterne **verschiedener Leuchtkräfte**!

Damit hat man zwei Kriterien (Spektralklasse und Leuchtkraft) die man in einem Diagramm auftragen kann. Es zeigt sich, dass bestimmte Kombinationen häufig auftreten, andere nicht. Entsprechend hat das Diagramm leere (weiß) und stark gefüllte (gelb, rot) Bereiche.



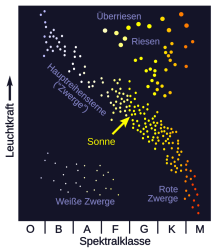
Quelle: astro.uni-bonn.de[4]

Hertzsprung-Russel-Diagramm

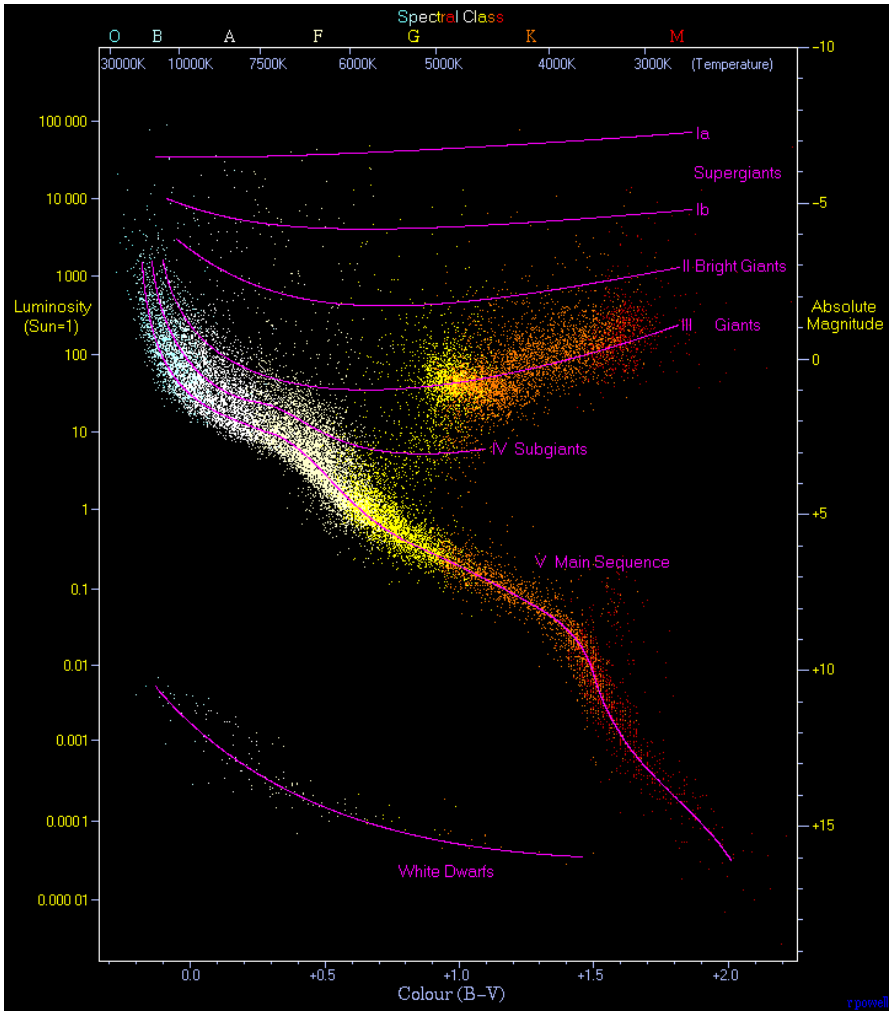
Einen *empirischen Zusammenhang* zwischen den Spektralklassen (Temp.) und den Leuchtkräften (M) von Sternen entdeckten Anfang des 20. Jhd. der Däne Ejnar Hertzsprung und der Amerikaner Henry Noris Russell.

Ein roter K-Stern kann sowohl ein Hauptreihenstern als auch ein Roter Riese sein.

Durch die Untersuchung des Spektrums kann man z.B. einen Hauptreihenstern von einem Riesen unterscheiden (z.B. schärfere Spektrallinien).



Quelle: wikipedia [5]



Quelle: wikipedia [6]

Die wichtigsten Gebiete sind: Hauptreihe - Weiße Zwerge - Rote Riesen - Rote Überriesen.

Zuordnung in der Hauptreihe

Da die *Hauptreihe* genähert ein “länglicher Bereich” ist, kann man für Hauptreihensterne eine ungefähre Zuordnung machen:

Spektralklasse ➔ Leuchtkraft

oder mit anderen Achsenbeschriftungen:

Oberflächentemperatur ➔ absolute Helligkeit **M**

Zusammen mit der beobachteten scheinbaren Helligkeit **m** resultiert daraus über den Entfernungsmodul seine Entfernung **r** („Spektroskopische Entfernungsbestimmung”).

Anmerkung: Leuchtkraft L und Temperatur T eines Sterns erlauben nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz auch die Berechnung seines Radius R!

Übungen siehe Buch. Vorgehen:

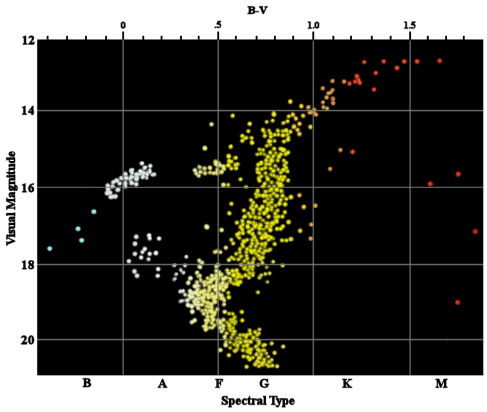
1. Scheinbare Helligkeit **m** und Sternklasse oder Oberflächentemperatur gegeben.
2. Daraus erhält man (mit HRD und nur wenn Hauptreihenstern) die absolute Helligkeit **M**.
3. Aus **m-M** (Entfernungsmodul) erhält man **r**.

Wdh. Sternmassen

- Doppelsterne: Aus der Gravitationskraft/Kepler berechenbar
- Im HRD: aus der Masse-Leuchtkraft-Beziehung berechenbar

Kugelsternhaufen

- sehr enge Ansammlung von Sternen im Halo der Milchstraße
- HRD bildet ein Knie, da kurzlebigere Sterne in der Hauptreihe fast komplett fehlen und bereits in Richtung des Gebiets “Rote Riesen” unterwegs sind oder angekommen sind (Riesenast).



Quelle: wikipedia[7]

- Analyse: Also sind die Sterne quasi gleichzeitig entstanden, von denen jetzt nur noch die langlebigeren existieren.

Sternentwicklung

Lebenslauf

Entstehung aus Gaswolke

- Interstellare Materie hat einzelne Atome je cm^3.
- Wolken, aus denen Sterne (inkl. Planeten) entstehen haben ca. 10 Atome je cm^3
- Wolken sind tw. sichtbar denn...
    - sie absorbieren Licht (verdecken Sterne),
    - leuchten, wenn sie **be**leuchtet werden,
    - leuchten, wenn sie durch Strahlung angeregt werden
- stabile Wolken haben ein Gleichgewicht aus Gasdruck und (wie immer) Gravitation
- ein solcher stabiler Zustand endet i.d.R. durch eine Störung von außen
- Es bilden sich eine oder mehrere Massenkonzentrationen die sich zu **Infrarotsternen** entwickeln. Sie sind innen heiß, da die Materie ihre potentielle (Gravitations-) Energie mitbringt und diese in Wärme umgewandelt wird.
- weiterer Massenzuwachs führt zu weiterer Temperatur- und Dichteerhöhung
- schließlich **zündet** dadurch die Kernfusion ("Wasserstoffbrennen" = "Heliumfusion")
- Größenordnung des Zeitaufwands bisher:
    - O,B-Sterne 10^4 a
    - G,F-Sterne 10^7 a
    - K,M-Sterne 10^8 a

Hauptreihenzeit

- Nun bewegt sich der Stern auf die **Hauptreihe** - es folgt die längste Phase im Leben eines aktiven Sterns: Wasserstoffbrennen, bis der Kern so gut wie wasserstofffrei ist.
- Ist im Kern der Wasserstoff verbraucht, so endet die He-Fusion und damit das Hauptreihenstadium.

Endphase

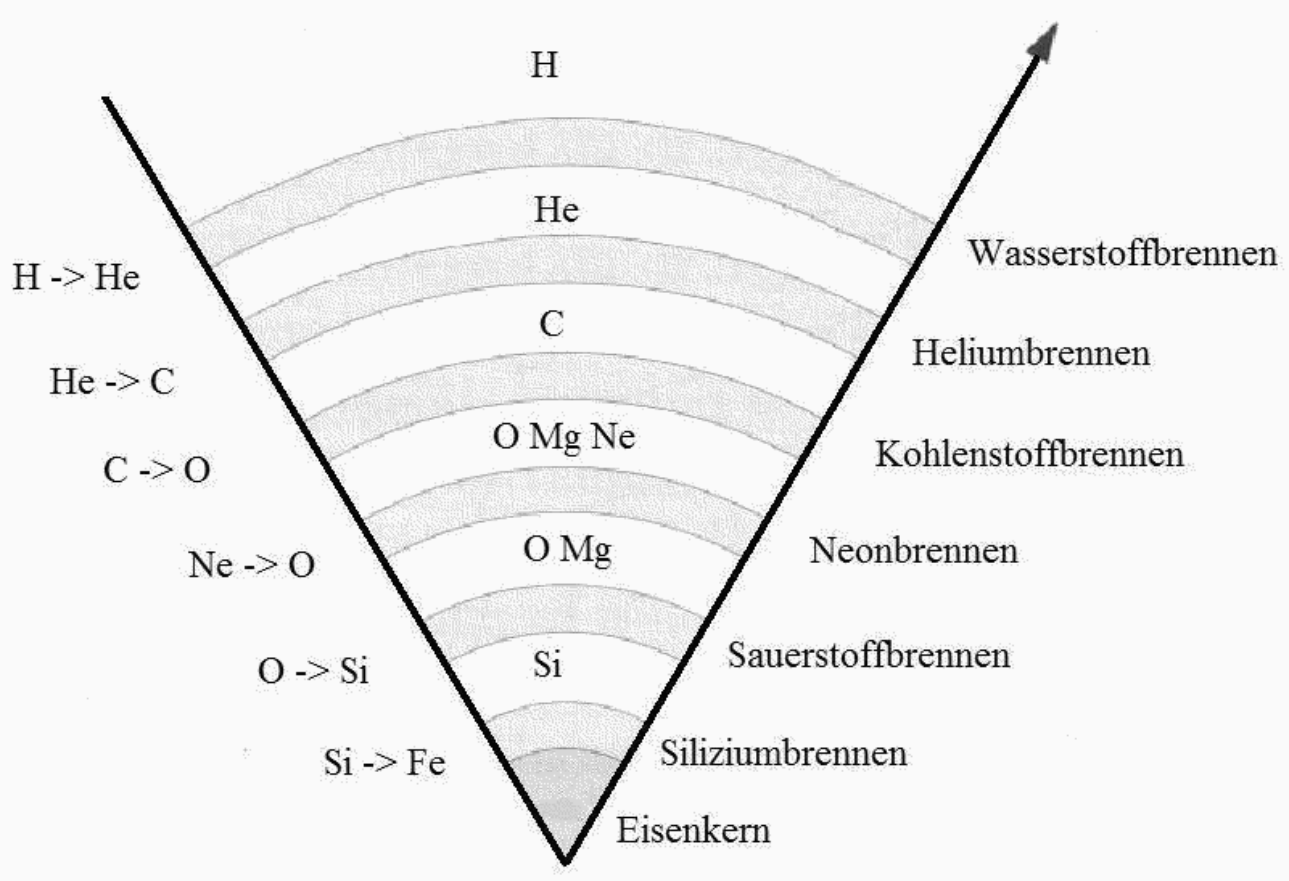
- Durch die fehlende Fusion im Kern sinkt dort der Druck (sowohl der Gasdruck als auch der Strahlungsdruck) massiv ab,
- die äußeren Schichten fallen ins Zentrum und erzeugen schlagartig hohe Temperatur (→ Gravitationsenergie, wie immer) und hohen Druck, was zu einem spontanen Zünden der Fusion von He zu C führt: **Heliumflash**!
- Dadurch bläht sich der Stern enorm auf (Sonne z.B. ca. 1AE Radius) und ist an der sehr großen Oberfläche etwas kühler: Er ist nun ein **Roter Riese**

- Nun läuft im **Kern** die C-Fusion kontinuierlich, solange dort genug He ist.
- In der **Schale** direkt um den Kern ist Temperatur und Druck hoch genug, dass der dort immer noch vorhandene Wasserstoff zu He fusioniert werden kann → **Schalenbrennen**!

Leichte Sterne unter ca. 4 Sonnenmassen beenden nach dem He-Brennen im Kern jegliche Fusion und werden ein weißer Zwerg.

Schwerere Sterne werden nun im Kern C zu u.a. Neon fusionieren. In der innersten Schale um den Kern wird das beim Schalenbrennen erzeugte He zu C fusioniert, während die H→He Fusion außerhalb davon weiterhin stattfindet.

Eine komplexere Darstellung mit den Hauptprodukten bei einem schweren Stern:



Quelle: wikipedia[8]

- Mit jedem Wechsel des Fusionsmaterials im Kern wächst eine weitere Schale um den Kern mit der vorhergehenden Fusion als Schalenbrennen. Beachte dazu auch die Zeiten im Buch Tabelle 28.2

- Nur sehr schwere Sterne kommen bis zur Fusion von Eisen. Spätestens dann (oder wenn schon vorher der Druck nicht ausreichte) wird die Fusion in Kern abbrechen. Dies hat enorme Folgen: Der Stern fällt in sich zusammen (Gravitationskollaps) und explodiert von innen heraus durch diesen letztmaligen enormen Druckanstieg. Die herausgeworfenen Massen kollidieren mit den äußeren, immer noch nach innen fallenden Massen, was zu großer Energiefreisetzung und ggf. dabei auch endothermer Fusion zu schwereren Elementen führt. Eine "**Supernova**"!
- Durch eine Supernova wird viel Material in das Weltall geschleudert. Je nachdem wie viel Masse **übrig** bleibt entscheidet sich das Schicksal des Sterns:

Die Endzustände

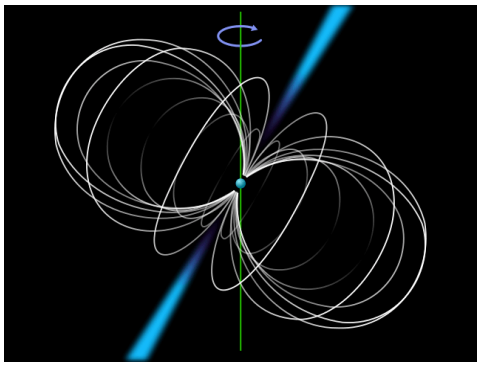
Weißer Zwerg

- Rest-Masse kleiner 1,4 Sonnenmassen.
- Gravitation hat nur noch die Quantenphysik als „Gegenspieler“, welche den Elektronen zu große Nähe untereinander verbietet (Elektronengas).
- Exotische Materie extrem hoher Dichte, keine normalen Atome mehr
- Durchmesser: Größenordnung wie Erde, unter 10000km

Neutronenstern (Pulsar)

- Rest-Masse zwischen 1,4 und ca. 2,5 Sonnenmassen.
- siehe ausführliches Video (14min, nicht alles Stoff...) ⇗ Pulsar Alpha Centauri (https://www.br.de/mediathek/video/alpha-centauri-15082019-was-ist-ein-pulsar-av:5c071216bf85ef001c4e47c6).
- Gravitation & Druck ist größer, so dass die Elektronen in die Atomkerne eindringen und sich je ein Elektron und Proton zu einem Neutron vereinigen (inverser Betazerfall, je ein Neutrino entsteht).
- Damit wird schlagartig die gesamte Materie in Neutronen umgesetzt.
  - Extreme Dichte (quasi ein riesiger Atomkern).
  - Geringe Größe (→ starke Magnetfelder).
  - Schnelle Rotation!
- Durchmesser: Größenordnung einer Stadt, z.B. 22km

- Durch die schnelle Rotation:
  - Magnetfelder sorgen für
  - Strahlung (Radiobereich) in einem
  - Schmalen Strahlungskegel, welcher wie ein Leuchtfeuer wandert und mit Glück die Erde streift und so durch Aufblitzen auf sich aufmerksam macht.



Quelle: wikipedia [9]

Stellare Schwarze Löcher

Ist die Masse des Sternrests größer als ca. 2,5 Sonnenmassen, so ist die Gravitation auch für Neutronen zu stark: Die Materie fällt weiter in sich zusammen. Dabei ändert sich die Masse nicht, also steigt die Dichte noch weiter an. Der Durchmesser des Objekts wird sehr klein.

Schwarzschildradius

Betrachten wir die bekannte Fluchtgeschwindigkeit v_2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Wird der Radius durch Verkleinerung des Körpers zu klein, so kann die errechnete Fluchtgeschwindigkeit den Wert der Lichtgeschwindigkeit überschreiten!

Der Radius, bei dem genau $v_2 = c$ ist, heißt **Schwarzschild-Radius**. Setzt man für v_2 die Lichtgeschwindigkeit c ein und löst nach r auf, so erhält man:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} = M \cdot 1,485 \cdot 10^{-27} \frac{m}{kg}$$

Damit errechnet sich für einige Objekte der Schwarzschild-Radius zu recht kleinen Werten:

- Mnt. Everest: 1nm
- Erde: 9mm
- Sonne: 3km
- Schwarzes Loch mit 30 Sonnenmassen: unter 45km

Sobald der Radius eines Objekts **kleiner** als sein Schwarzschild-Radius ist, ist es ein Schwarzes Loch.
(Schwarze Löcher sind die Objekte, welche in die gedachte Kugel mit ihrem Schwarzschildradius passen)

Anmerkung:
Der Schwarzschild-Radius wird hier klassisch berechnet. Eine relativistische Berechnung für ein nicht rotierendes, ungeladenes Schwarzes Lochs ergibt einen Wert in der gleichen Zehnerpotenz, überschreitet aber unser Schulwissen und auch die mathematischen Möglichkeiten.

Aus dem Inneren des Schwarzschild-Radius' kann also nicht einmal Licht, geschweige denn Materie nach außen dringen. Daher wirkt diese enorme Massenkonzentration schwarz - keine Strahlung geht von ihr selbst aus. Wir haben KEINE Information, was darin vorgeht, wissen also z.B. auch nicht, auf welch kleinen Raum die Materie wirklich konzentriert ist - nur dass es kleiner als der soeben hergeleitete Schwarzschild-Radius ist.

Wirkung Schwarzer Löcher

Wie bemerkt man nun stellare Schwarze Löcher? An ihrer Aussenwirkung, der Gravitation!

Schwarze Löcher können einen Partner in einem Doppelsternsystem haben und über diesen indirekt nachweisbar sein. Schwarze Löcher können Materie (Gas, Staub), die ihnen nahe kommt, anziehen, so dass sich eine Akkretionsscheibe bildet, welche wegen der hohen Energien leuchtet - gerne auch im Röntgenbereich.

Ein stellares Schwarzes Loch ist ein Gravitationszentrum wie jeder andere Stern auch, dessen Wirkung von seiner Masse abhängt. Ein SL mit 10 Sonnenmassen hat dieselbe Gravitationswirkung wie ein Hauptreihenstern mit 10 Sonnenmassen. Für die Bahn eines Planeten macht es keinen Unterschied.

Aber: Dem Schwerpunkt eines SLs könnte man sich auf viel geringere Entfernung nähern, wo man bei dem Stern längst in die glühende Materie eingedrungen wäre. Dort erst passieren die exotischen Dinge, die man aus der allgemeinen Relativitätstheorie kennt. Die Materie, die ggf. einem anderen Stern entkommt, kann einem SL also sehr nah kommen und auf bis zu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, dabei auf einer Kreisbahn sein und enorme Strahlung abgeben. Dadurch bremst sie ab und fällt weiter herunter, bis sie innerhalb des Schwarzschild-Radius' verschwindet.

Ein Stern würde solche Materie völlig unauffällig in viel größerer Entfernung zu seinem Zentrum, nämlich auf seiner Oberfläche, absorbieren, wenn er sie nicht vorher schon mit seinem „Sonnenwind“ wegbläst.

Masseverlust von Sternen

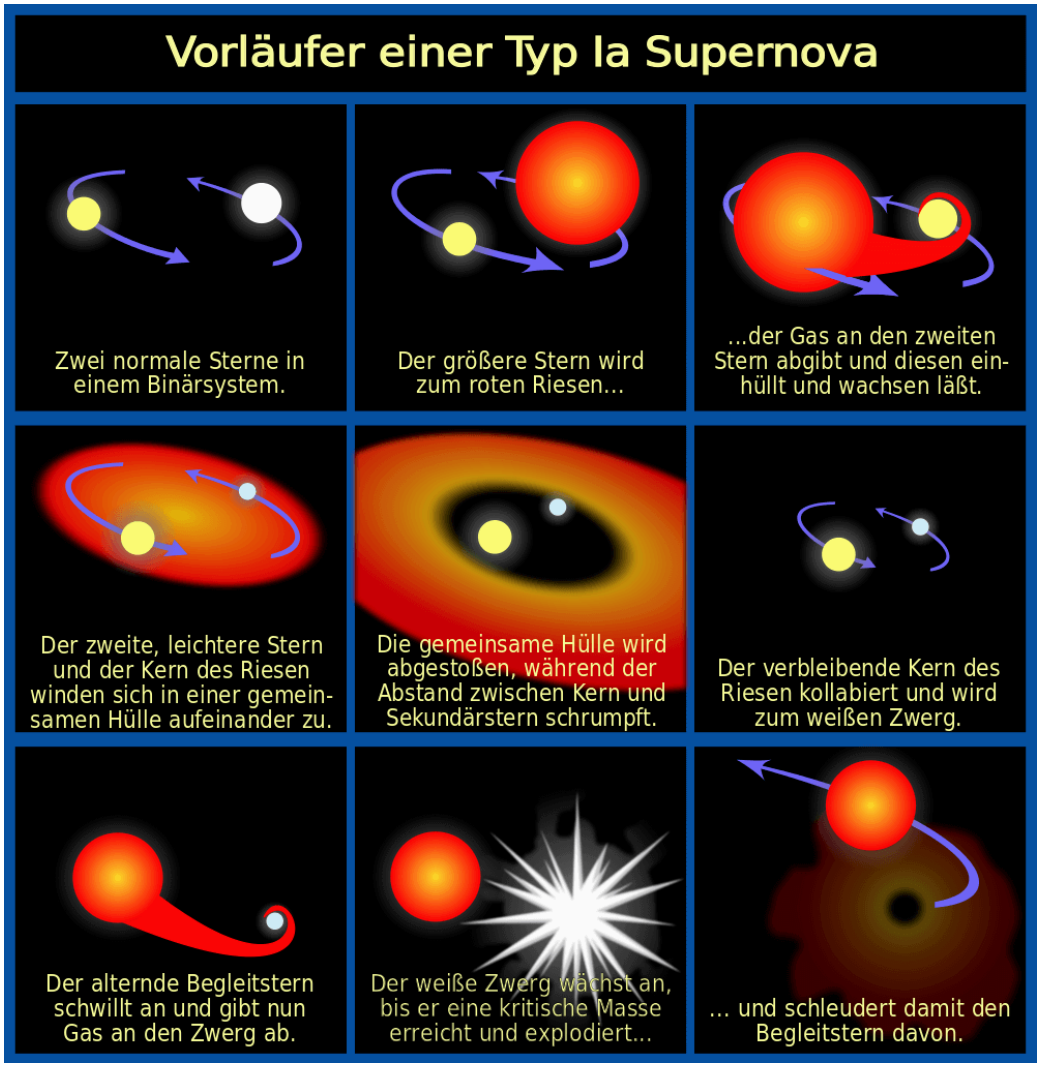
Mehrfach erwähnt: Masse der Sternenleiche - das ist jedoch **nicht** die ursprüngliche Sternmasse! Ein Überblick, wie Sterne so viel Masse verlieren:

- **Planetare Nebel** (final)
  - Ende eines kleineren Roten Riesen
- **Novae** (regelmäßig)
  - kurzzeitiges H-Brennen auf einem Weißen Zwerg
  - Doppelsternsystem: Weißer Zwerg und Roter Riese
  - Weißer Zwerg erhält kontinuierlich Materie (H) vom Roten Riesen und heizt dabei seine Oberfläche auf
  - tritt bei demselben System periodisch auf
- **Supernovae** (final)

Supernova Typ Ia

Ablauf:

- Konstellation wie bei Nova, aber langsamer und kälter.
- H-Brennen zündet dadurch nicht.
- Wird der Weiße Zwerg zu schwer (Chandrasekhar), so kollabiert er und explodiert.
- Die Massengrenze liegt recht präzise fest und damit auch der Ablauf und die Helligkeit der Explosion.
- Dies kann man wiederum für Entfernungsmessungen ("Standardkerze") nutzen.

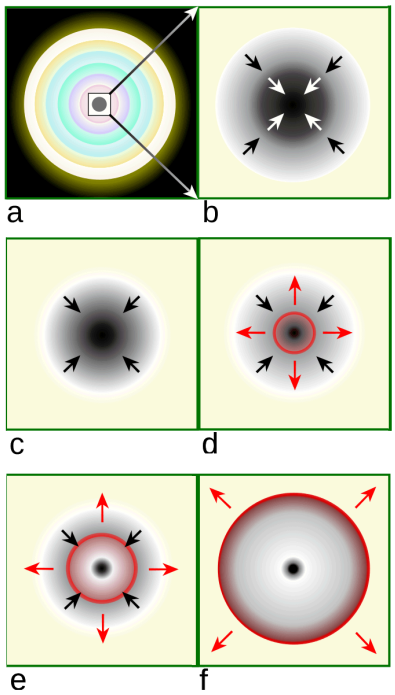


Quelle: wikipedia[10]

Supernova Typ II

Nur bei Sternen mit $m > 8m_{So}$.

Ablauf:



Quelle: wikipedia [12] *von biec bearbeitet*

- Ein Roter Riese am Ende seines ausführlichen Schalenbrennens (kompletter Eisenkern erreicht) (**a**) stürzt wegen des nun fehlenden Strahlungsdrucks durch die Gravitation in sich zusammen.
- Das Material, das auf den Kern auftrifft, erhöht dessen Masse (**b**) über die Chandrasekhar-Grenze (1,2 bis 1,4 m_{So}),...
- wodurch die Materie in **Millisekunden** zu Neutronen kollabiert (**c**) unter extremer Neutrino-Emission (welche die gesamte Bindungsenergie transportieren)
- An dem nun harten "Neutronenkern" schlägt eintreffende Materie auf und erzeugt eine enorme Druckerhöhung und damit Reflexion (**d**): Eine Stoßwelle läuft nach außen durch die nach innen fallende Materie hindurch.
- Eine enorme Kompression in der Stoßwelle, von innen zusätzlich durch die Neutrinolawine (welche die Stoßwelle vorerst nicht komplett durchdringen kann) angetrieben, erzeugt massive Fusionsprozesse (**e**).
- Bei diesen Vorgängen entstehen die chemischen Elemente jenseits von Eisen durch endotherme Fusion.
- Nach **einigen Stunden** erreicht die Stoßwelle mit dem sich dahinter extrem ausdehnenden Gas die Sternoberfläche und sprengt sie ab (**f**). Es treten Geschwindigkeiten von Millionen km/h auf.

- Inzwischen können die Neutrinos die Stoßwelle durchdringen und fliegen, ebenso wie Röntgenstrahlung, mit so gut wie Lichtgeschwindigkeit in das All. Dadurch künden sie noch vor dem sichtbaren Licht eine Supernova dem entfernten Beobachter an $(\Delta t \approx einige\ Stunden\ bei\ vielen\ Mio\ Lj)$.
- Die Neutrinos transportieren den größten Teil der freigesetzten Energie des Kernkollapses hinaus.
- Supernova strahlen für einige Monate so hell wie eine ganze Galaxie. (Manchmal wochenlang hell leuchtend am Taghimmel zu sehen.) Energiequelle: hohe Temperaturen und radioaktiver Zerfall der Produkte (Zerfallsreihen).
- Bei einer Supernova vom Typ II bleibt ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, lange Zeit umgeben von einem Nebel, übrig.

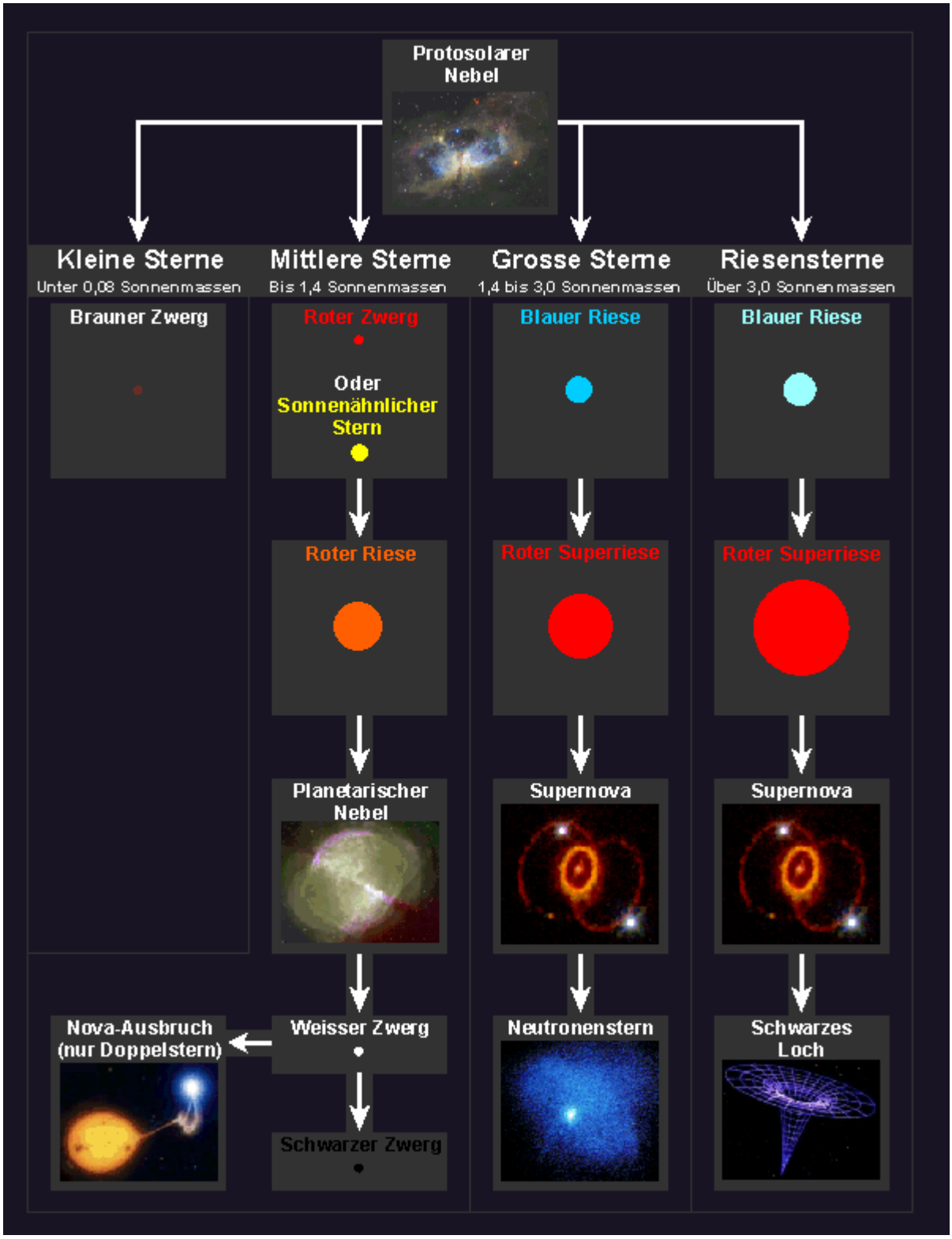
Beispiel: Katzenauge-Nebel

Quelle: wikipedia[13]

Quelle: wikipedia[14]

Supernovae sind (innerhalb unserer eigenen Galaxie) extrem seltene Ereignisse. Aufgrund ihrer Helligkeit registriert man sie aber auch in anderen Galaxien. Die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, unserer nächsten Nachbargalaxie, bot hervorragende Möglichkeiten, ein solches Ereignis „aus nächster Nähe“ (163 000 Lichtjahre) zu erforschen.

Der Ablauf in graphischer Darstellung



Quelle: Dr. R. Freund[15]

1. C. Bienmüller, CC-BY-NC-SA↩
2. Stanlekub, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eclipsing_binary_star_animation_2.gif (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eclipsing_binary_star_animation_2.gif)↩
3. Pablo Carlos Budassi, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stellar_Classification_Chart.png (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stellar_Classification_Chart.png)↩
4. "ESA, Hertzsprung-Russell-Diagramm aus dem öffentlichen Datenarchiv des Hipparcos-Projekts" mit defekten Links, ⇗ https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html (https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html)↩
5. Sch und Rursus, CC-BY-SA⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HR-sparse-de.svg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HR-sparse-de.svg)↩
6. Richard Powell, CC-BY-SA, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HRDiagram.png (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HRDiagram.png)↩
7. R. J. Hall, CC-SA 1.0, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M3_color_magnitude_diagram.jpg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M3_color_magnitude_diagram.jpg)↩
8. Agentjoerg, public domain, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schalenbrennen.jpg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schalenbrennen.jpg)↩
9. Mysid, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Pulsar_schematic.svg (https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Pulsar_schematic.svg)↩
10. (NASA, ESA and A. Feild (STScI); vectorisation by chris 論), CC BY-SA 3.0, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Progenitor_IA_supernova.svg (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Progenitor_IA_supernova.svg) mit toten Links zur Originalquelle↩
11. Illustration by R.J. Hall. Redrawn in Inkscape by Magasjukur2, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Core_collapse_scenario.svg (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Core_collapse_scenario.svg)↩
12. Illustration by R.J. Hall. Redrawn in Inkscape by Magasjukur2, CC BY-SA 3.0, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Core_collapse_scenario.svg (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Core_collapse_scenario.svg)↩
13. NASA, public domain, ⇗ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NGC6543.jpg (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NGC6543.jpg)↩
14. NASA, public domain, ⇗ https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Catseye-big.jpg (https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Catseye-big.jpg)↩
15. Laut Seite 9 der Präsentation in https://slideplayer.org/slide/666764/ ist der Autor Dr. R. Freund, archivierte Homepage (ohne die Abbildung dort zu finden): ⇗ https://web.archive.org/web/20221006224141/https://www.drfreund.net/ (https://web.archive.org/web/20221006224141/https://www.drfreund.net/)↩