

Vortrag zum Kompaktseminar:
„Das frühe Universum“
an der Universität Tübingen

Beobachtungen zur Nukleosynthese

Hermann Dautel

24. März 2004

Betreut von Jörn Wilms

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Gliederung:

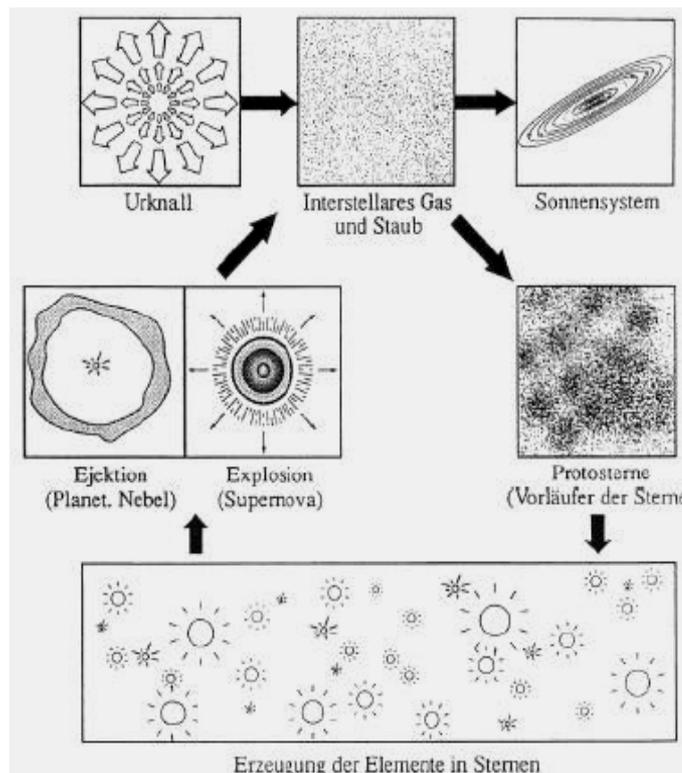
- **Einleitung**
- **Lithium-Häufigkeit:**
primordiale Nukleosynthese, Flaschenhals-Reaktion, Verteilung der Elemente, Lithium-Häufigkeit
- **Population-III-Sterne:** Definition, Beobachtung, Entstehung, Folgerungen
- **Kernbrennen:** pp-Zyklus, CNO-Zyklus, höheres Brennen, Schalenstruktur, Beobachtungen
- **Literaturverzeichnis**

Einleitung:

Im modernen kosmologischen Weltbild der Urknalltheorie durchlebte unser Universum eine Phase der Dunkelheit: Zwischen der Entkopplung von Materie und Photonen ($Z \sim 1000$) und der Bildung erster Objekte ($Z > 6$), gab es kein sichtbares Licht (cosmic dark ages). Wann diese kosmische Finsternis endete ist noch offen, doch durch verbesserte Beobachtungstechniken (immer tieferer Blick in die Vergangenheit) sowie ein immer besseres theoretisches Verständnis in der Strukturbildung, Galaxieentstehung, Sternentstehung und Sternentwicklung scheint die Beantwortung dieser Frage möglich zu werden.

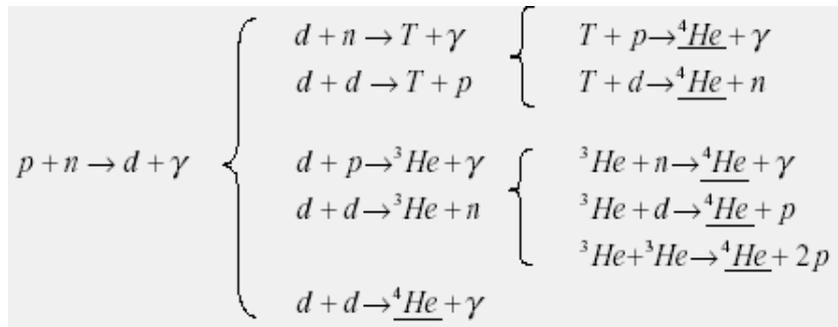
Die Finsternis wurde durch die Bildung der ersten Sterne durchbrochen. Sie markieren das Ereignis in der kosmischen Entwicklung hin zu der Struktur des Universums, die wir heute am Himmel sehen.

Die Theorien zur Entstehung der ersten Elemente und der Entstehung und Entwicklung der ersten und darauf folgenden Sterne können und müssen durch Messungen und Beobachtungen bestätigt und ausgebaut werden, um ein möglichst komplettes Weltbild zu erhalten und um Welt die uns umgibt besser zu verstehen.

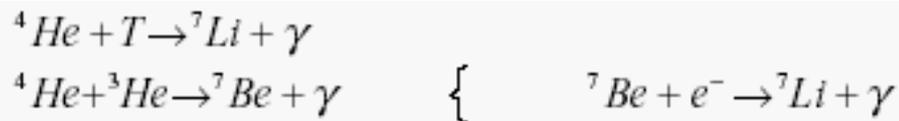


Lithium-Häufigkeit:

Ungefähr 1 Minute nach dem Urknall, als sich das Universum auf ca. $T < 80 \text{ keV}$ abgekühlt hat, wird effektiv Deuterium gebildet und folgende Reaktionen laufen ab:



Aufgrund der hohen Bindungsenergie von Helium4 und weil kein stabiler Kern mit $A = 5$ bzw. $A = 8$ existiert, wird Helium4 kaum abgebaut, außer durch:



Die Wahrscheinlichkeit für diese Reaktionen sind sehr gering, so dass die relative Häufigkeit von Lithium um 5 Größenordnungen kleiner ist als die von Helium4.

Die 3-Körperreaktion $3 \cdot {}^3\text{He} \rightarrow \text{C}$ findet aufgrund der geringen Teilchendichte nicht statt. Sie ist dem Sterninnern zu einem viel späteren Zeitpunkt vorbehalten. Man nennt diese Reaktion auch den Flaschenhals bei Helium. Nur ca. 2% aller Kerne im Kosmos sind schwerer als Helium aber fast alle von ihnen mussten diese Reaktion durchlaufen.

Helium4:

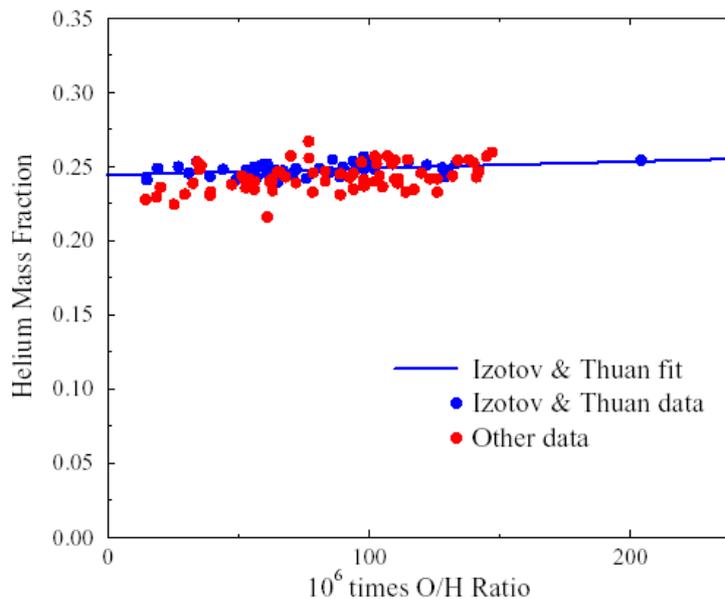
Nach ca. 30 Minuten ist die Teilchendichte im Universum so weit gesunken, dass die primordiale Nukleosynthese stoppt. Spuren von Deuterium, Tritium und Helium3 sind noch übrig, sowie alle diejenigen Protonen(=H), die keinen Reaktionspartner gefunden haben.

Da so gut wie alle Neutronen in Helium4 gebunden sind lässt sich die relative ${}^4\text{He}$ -Häufigkeit abschätzen:

$$X_{{}^4\text{He}} = Y_p = \frac{4 \cdot n_{{}^4\text{He}}}{n_{\text{Nukl}}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{n_n}{2}\right)}{n_n + n_p} = \frac{2 \cdot \frac{n_n}{n_p}}{1 + \frac{n_n}{n_p}} = \frac{2 \cdot \frac{1}{7}}{1 + \frac{1}{7}} = \underline{\underline{0,25}}$$

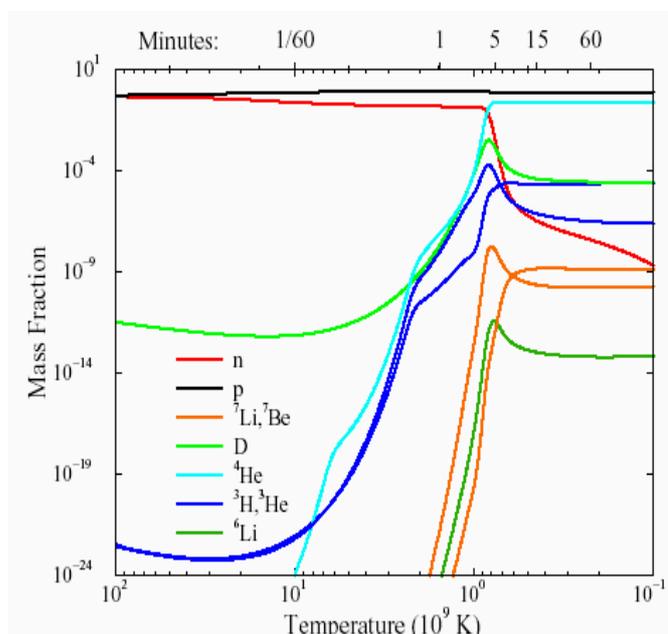
Diese Abschätzung stimmt äußerst gut mit den Messungen überein ($Y=0,234\pm 0,005$). Für Helium4 wurden auch Messungen außerhalb der Milchstrasse gemacht, die dieses Ergebnis bestätigen.

Die Berechnung der Entstehung der Elemente hängt von η ab, dem Verhältnis von baryonischer Materie und Photonen. Damit wird der Zeitpunkt des Beginns der Deuteriumsynthese bestimmt und somit auch der Anteil von Neutronen und damit die gesamte Verteilung der primordial erzeugten Elemente. Über die Helium4-Häufigkeit und die der anderen primordialen Elemente kann man η bestimmen. Sein Wert liegt im Bereich zwischen $10^{-10} \leq \eta \leq 10^{-9}$



Die obige Abbildung zeigt eine Helium4-Messung an metallarmen Sternen. Das im Stern erzeugte Helium4 wurde abgezogen um die primordiale Häufigkeit zu bekommen.

Mit dem errechneten η kann man dann die primordiale Häufigkeit der Elemente errechnen. Die Abbildung zeigt die Häufigkeit der Elemente als Funktion der Zeit und der Temperatur für ein bestimmtes η . Man sieht, dass nach 60 Sekunden die Nukleosynthese beginnt und ca. 30 Minuten nach dem Big Bang die Häufigkeiten konstant bleiben.

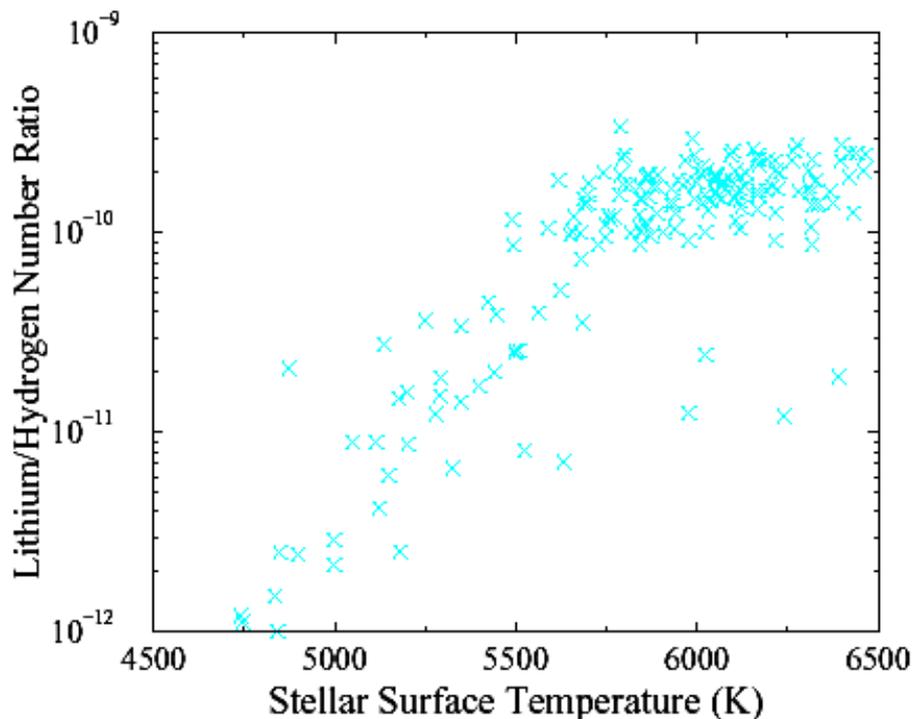


Lithium:

Die Lithium-Häufigkeit kann man auf ähnliche Weise messen und bestimmen. Die Abbildung zeigt die Lithium-Häufigkeit in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur von metallarmen Sternen. Fazit: Sie haben einen Lithium-Gehalt nahe am primordialen Gehalt:

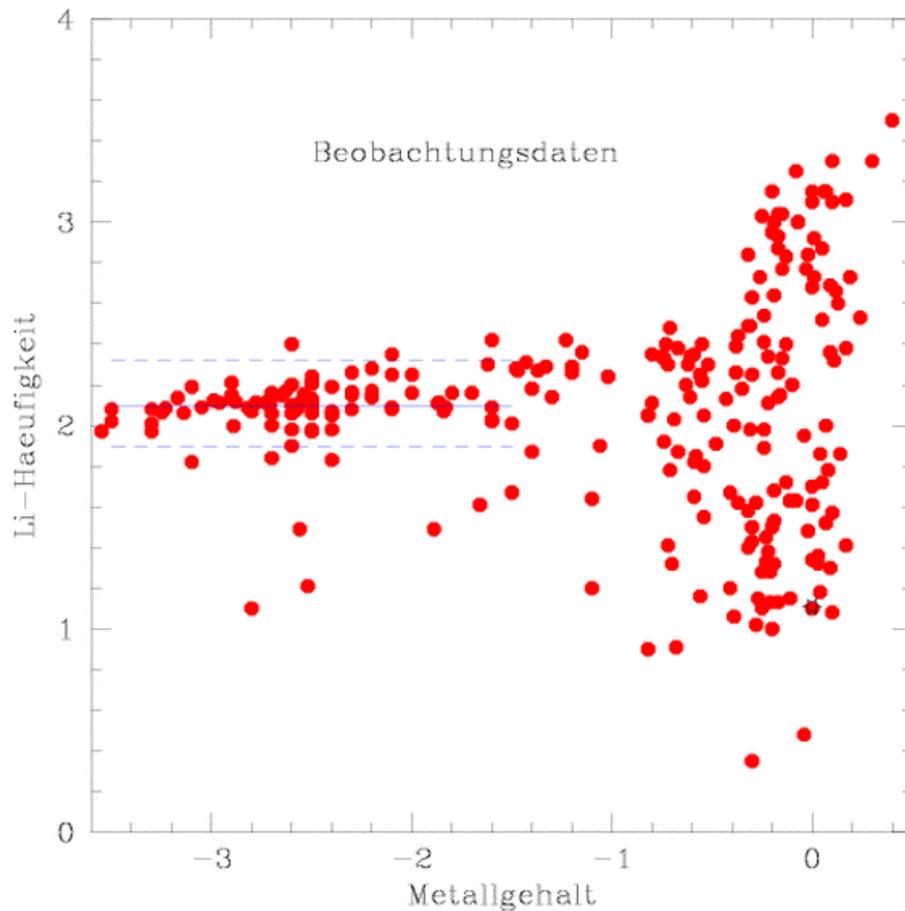
$${}^7\text{Li}/\text{H} = 1.6 \times 10^{-10}$$

Er hat sich kaum verändert, da diese Sterne kein Lithium erzeugen und praktisch nur über das interstellare Medium Lithium durch Akkretion aufgenommen haben können (Im Stern erzeugtes Lithium wird sofort wieder zerstört).



Die untere Abbildung zeigt eine weitere Messung an galaktischen Sternen. Hier ist die Lithium-Häufigkeit als Funktion des Metallgehalts aufgetragen. Die Metallizitätsskala entspricht grob einer Zeitskala: links befinden sich ältere Sterne mit niedriger Metallizität, rechts jüngere Sterne mit hoher Metallizität, wie unsere Sonnen (siehe Stern). Man sieht eine große Variation des Lithiumgehalts. Dies ist das Ergebnis verschiedener Kernprozesse, die zur Erzeugung und Vernichtung von Lithium führen. Das Plateau auf der linken Seite könnte dem primordialen Li-Gehalt entsprechen. Aber der gemessene Wert ist zu niedrig! Das liegt daran, das Lithium ins Sterninnere absinkt (Sedimentation) und somit nicht beobachtet werden kann. Dieser Effekt ist zu allem übel von Stern zu Stern verschieden, da er von der Masse und chemischer Zusammensetzung des Sterns abhängt. Mit Modellrechnungen konnten Salaris und Weiss zeigen, dass der wirkliche Lithiumgehalt ca. doppelt so groß ist als vorher. Somit war die Welt wieder in Ordnung und der Li-Gehalt passt zu Baryonendichte und somit zur Deuterium-Häufigkeit nach dem Urknall. Li-Messungen an anderen Objekten wie Gaswolken oder SN-Überresten macht keinen Sinn, da diese Objekte selbst viel Lithium erzeugen und somit keine

vernünftige Daten liefern (z.b.: durch Spallation schwererer Elemente durch kosmische Strahlung).
Wenn der Li-Gehalt der ersten Sterne gleich dem primordialen ist, müssen diese praktisch nur aus Helium und Wasserstoff bestehen

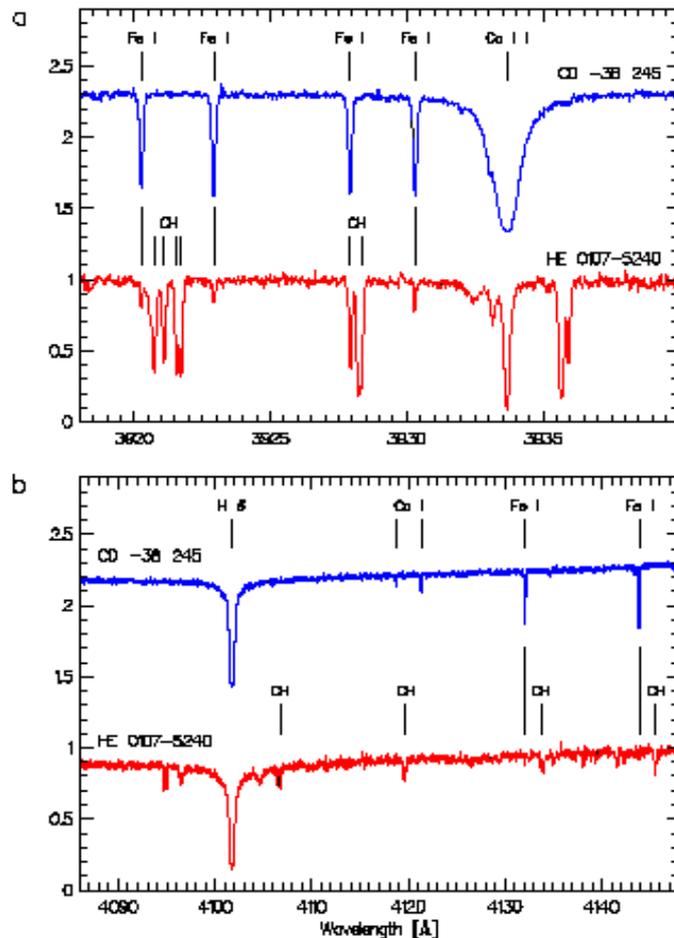


Population-III-Sterne:

Mit einem Population-III-Stern könnte man direkt die primordiale Massenhäufigkeit messen. Leider ist so ein Stern, der nur aus Helium und Wasserstoff besteht ($Z=0$), rein hypothetisch.

Die Pop-III-Sterne sind aus den primordialen Gaswolken frei von Staub und schweren Elementen entstanden.

Bis heute hat man keinen dieser Sterne entdeckt. Der Stern mit der bis jetzt geringsten Metallizität (HE0107-5240) hat $1/200000$ der Metallizität der Sonne.



Die Abbildung zeigt den Ausschnitt des Spektrums des Sterns HE0107-5240 im Vergleich zu dem eines anderen massearmen Sterns aufgenommen mit dem VLT-UT2 und UVES. Man sieht deutlich die schwachen Eisenlinien und die starken CH und C2 Linien.

Folgerungen:

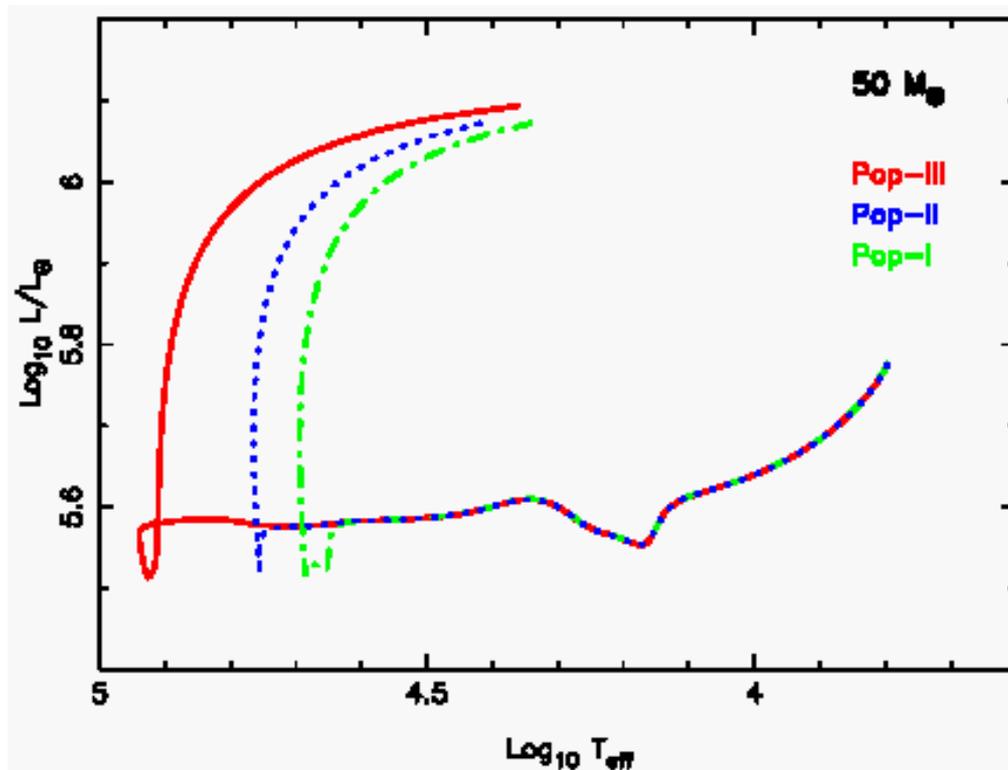
Das Fehlen der schweren Elemente hat für einen Pop-III-Stern immense Konsequenzen:

Die primordialen Wolken haben keine gute Kühlung, die notwendig ist um zu stellaren Dichten zu kollabieren, da das Kühlmittel Staub fehlt. Die Kühlung muss über Wasserstoff oder Deuterium folgen, was sehr ineffizient ist. Es werden also nur sehr massereiche Wolken jeans-unstabil und kollabieren können. Dies legt die Vermutung nahe, dass nur massereiche Pop-III-Sterne entstehen konnten.

Es wird auch auf das Leben des Sterns Einfluss nehmen. Ohne schwere Elemente gibt Auswirkungen auf die Opazität und somit auf die Sternstruktur in den Sternzonen.

Ohne C, N und O steht dem Stern der CNO-Zyklus nicht als Energiequelle zur Verfügung.

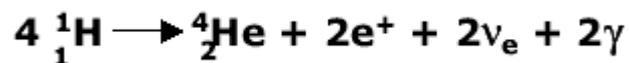
Ezer (1961) konnte zeigen, dass dies zu heißeren Hauptreihensternen führen muß und das sie sogar so heiß werden können, dass sie ihren Kohlenstoff selbst über den 3α -Prozess bilden und so sich das CNO-Brennen erschließen.



Die obige Abbildung zeigt die Entwicklung eines massereichen Pop-III-Sterns ($50M_{\odot}$) im Vergleich zu den anderen Populationen I und II. Man erkennt eine deutlich höhere Effektivtemperatur und einen relativ geringen Leuchtkraftunterschied.

Kernbrennen: Die pp-Kette

Die Hauptenergiequelle allgemein aller Hauptreihensterne ist die Fusion von Wasserstoff zu Helium. Die Nettoreaktion ist in allen Fällen:



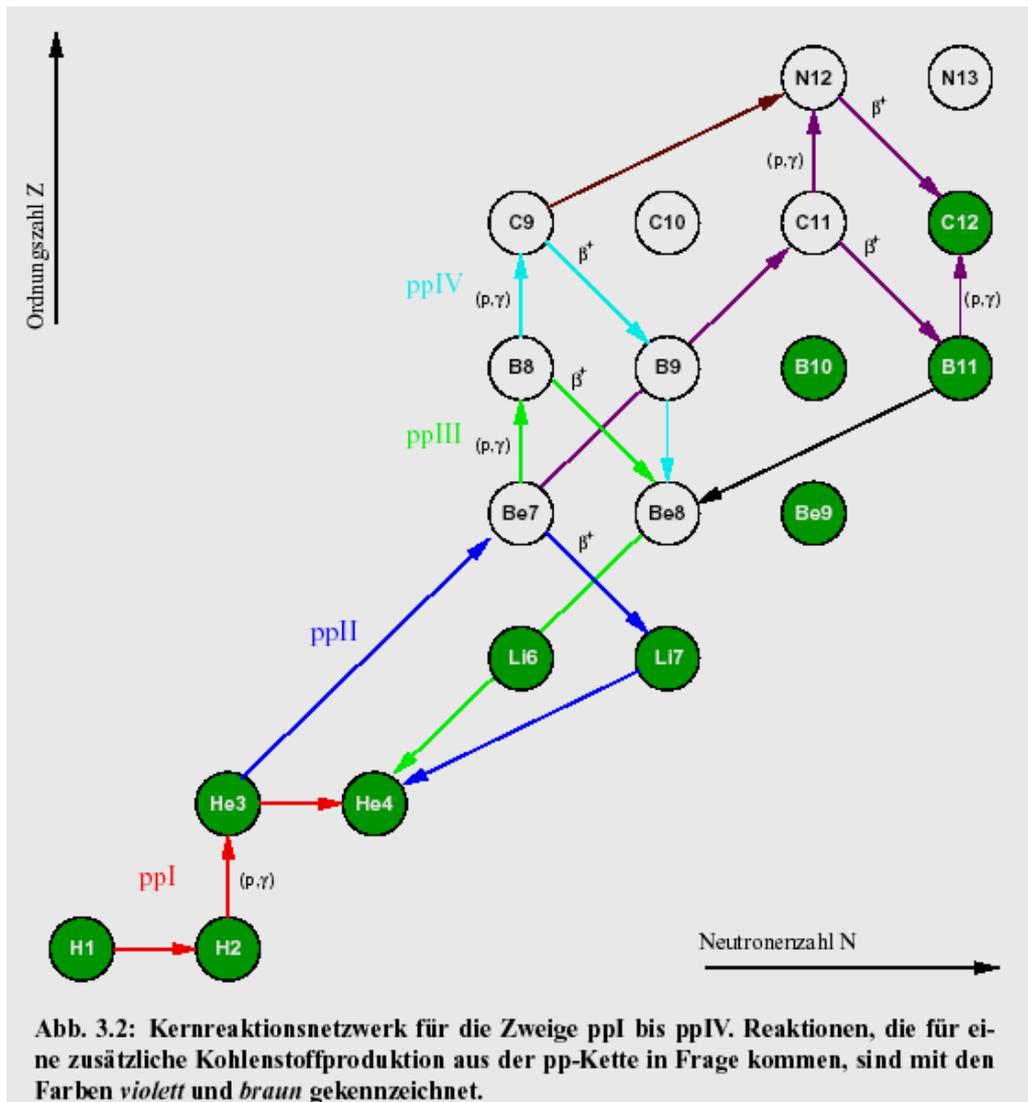
Jede Einzelreaktion hat ihre eigene Reaktionsrate: Die langsamste ist die Produktion von Deuterium am Anfang (10^{10}yr), die schnellste Schritt ist der zu Helium3.

Welcher Zyklus dominiert ist von der Temperatur des Sterns abhängig.

pp-I dominiert bei $T < 10^7 \text{ K}$, pp-II für $T < 2 \cdot 10^7 \text{ K}$, pp-III für $T < 10^8 \text{ K}$ und die pp-IV-Kette bei Temperaturen über 10^8 K .

Bei unserer Sonne dominiert der pp-I-Zweig deutlich mit 91%, pp-II hat nur 9% Anteil und die anderen verschwindend gering.

Bei Temperaturen über $2 \cdot 10^7 \text{ K}$ wird viel C über den 3α -Prozeß gebildet und dem Stern steht auch der CNO-Zyklus zu Verfügung.



Der CNO-Zyklus:

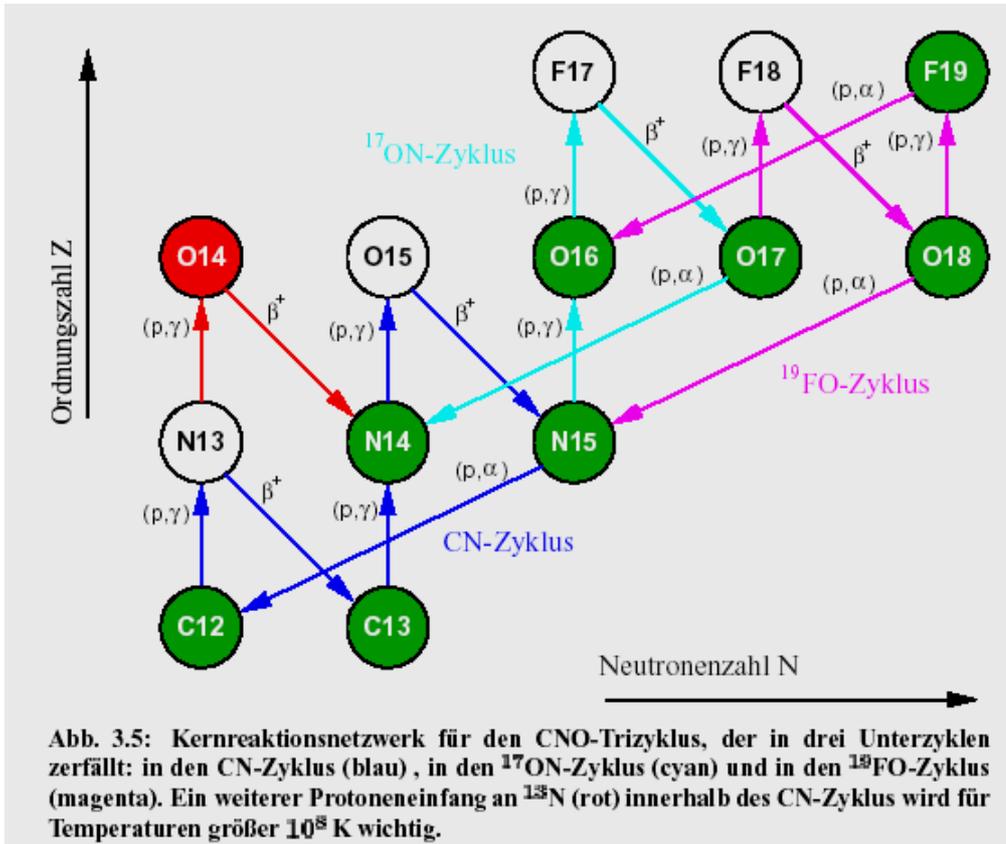
Der CNO-Zyklus bietet dem Stern eine weitere Möglichkeit zum Helium.

Er wurde 1938 von Bethe und Weizsäcker, lange vor der pp-Kette, als Energiequelle in Sternen vorgeschlagen. Mit ihm wird Wasserstoff zu Helium konvertiert durch Protoneneinfang an C, N und O. Diese Elemente sind dabei Katalysatoren und werden dabei nicht verbraucht.

Die Reaktionen laufen bis auf die β -Zerfälle (in Minuten) sehr langsam ab ($10^7 - 10^8$ yr). Der CN-Zyklus dominiert klar vor den Nebenzyklen, die nur mit geringer Wahrscheinlichkeit ablaufen (10^{-3}).

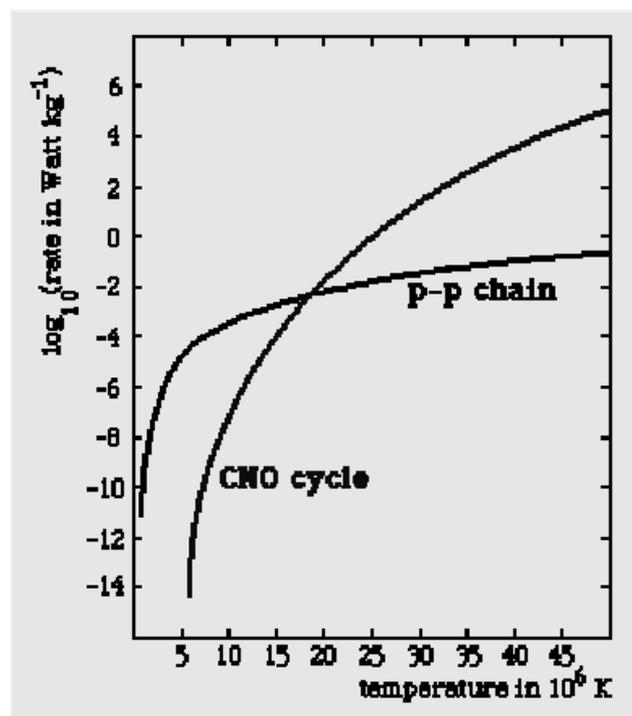
Der CNO-Zyklus ist viel stärker temperaturabhängig als die pp-Kette (T^{20} zu T^4).

Die Zunehmende Umwandlung von Wasserstoff zu Helium bedingt die Entwicklung des Sterns. Wenn ein großer Teil des Wasserstoffs verbraucht ist (ca. 80%), erhöht sich das Molekulargewicht im Kern und der Stern beginnt zu kollabieren. Die Zentraltemperatur und der zentrale Druck steigen, um das gestiegene Mol.Gewicht zu kompensieren und eine neues hydrostatisches Gleichgewicht stellt sich ein.



das Wasserstoffbrennen dominiert. Ihre Metallizität liegt zwischen 0,001 und 0,3. Man nimmt an, dass am Anfang der Entwicklung eines Sterns seine Zusammensetzung homogen ist und das die ersten Kernreaktionen, die im innern zünden die mit der am niedrigsten benötigten Temperatur sind. Also Wasserstofffusion.

Die Kerntemperatur steigt mit der Masse, so das in massearmen Sternen die pp-Kette und in massereichen Sternen der CNO-Zyklus dominiert.

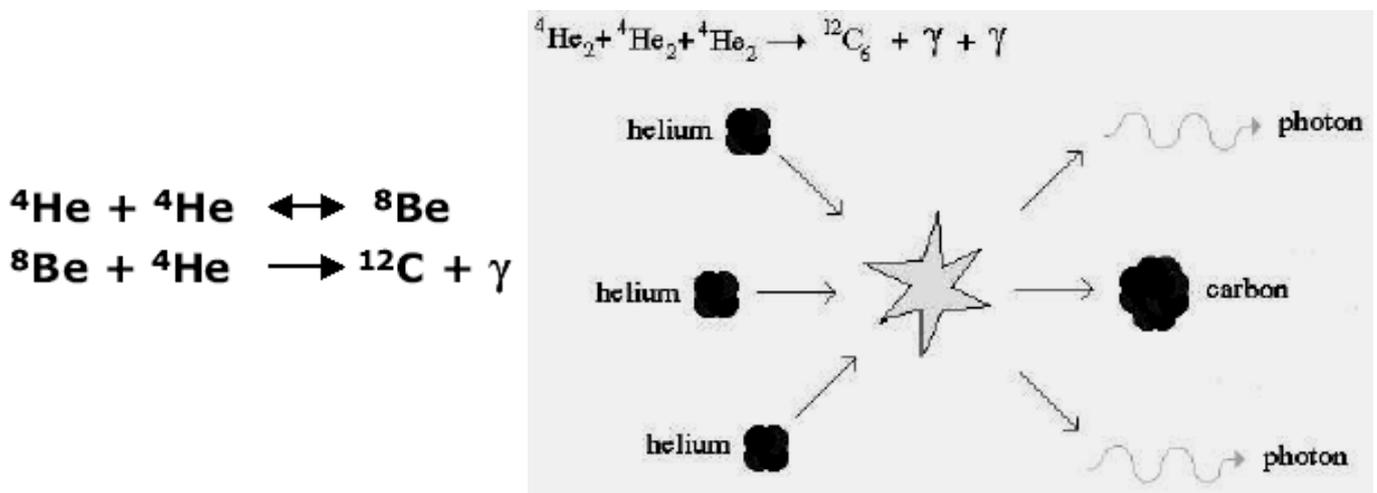


Heliumbrennen:

Wenn der Stern eine Kerntemperatur von über 10^8 K erreicht hat, kann das Heliumbrennen zünden. Er hat dann stark an Leuchtkraft gewonnen.

Die dominierende Reaktion ist der 3α -Prozeß, indem Helium in Beryllium und Beryllium in Kohlenstoff konvertiert wird. Beryllium ist sehr instabil und zerfällt sofort wieder in Helium, so dass 3 Heliumkerne fast gleichzeitig kollidieren. Das He-Brennen ist extrem temperaturabhängig: eine Temperaturerhöhung um 10% bedingt einen Anstieg der freigesetzten Energie um den Faktor 50.

He-brennende Sterne sind keine Hauptreihensterne mehr!



Höheres Brennen:

Brennphasen:

$T \sim 6 \cdot 10^8$ K: Kohlenstoffbrennen \rightarrow Sauerstoff

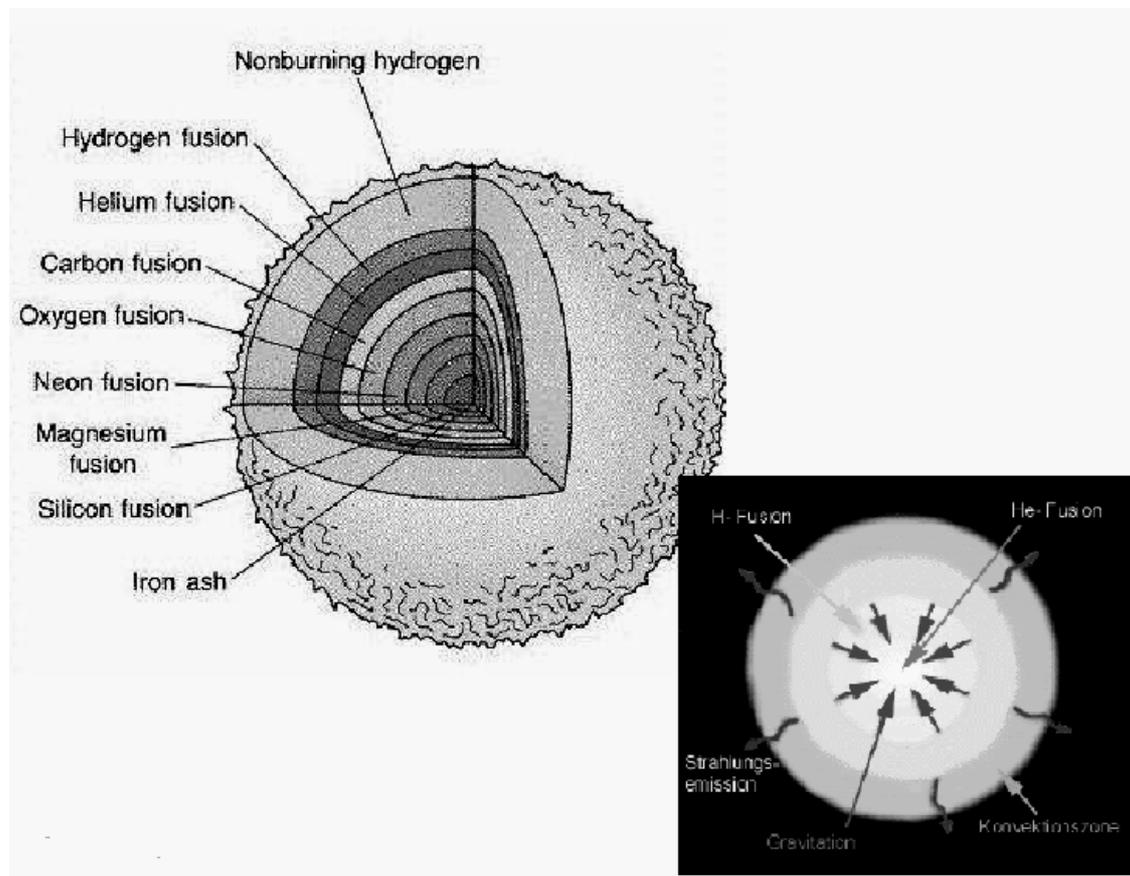
$T \sim 10^9$ K: Sauerstoffbrennen \rightarrow Neon

Neonbrennen \rightarrow Silizium

$T > 10^9$ K: Siliziumbrennen \rightarrow Eisen

Dabei werden alle Elemente bis zum Eisen erzeugt. Ab $T \sim 10^9$ K werden noch Photodissoziationsprozesse wichtig. Diese Prozesse sind allerdings so umfangreich, dass sie eine eigene Arbeit füllen würden, deshalb seien sie hier nur erwähnt. Der Stern hat im Endstadium dann die bekannte Zwiebschalenstruktur.

Schalenstruktur:



In der Schalenstruktur laufen in den verschiedenen Schichten die verschiedenen Kernprozesse ab. Das Bild zeigt die Schalenstruktur eines alten massereichen Sterns. Temperatur und Druck fallen von innen nach außen, so kann in den Schalen bei den entsprechenden Bedingungen gleichzeitig die Kernreaktionen ablaufen. Das kleine Bild zeigt eine gemäßigte Form des Schalenbrennens eines Nach-Hauptreihensterns, wie es auch unsere Sonne einmal haben wird.

Beobachtungen:

Man erwartet eine langsame und gleichmäßige Änderung der Zustandsgrößen, vor allem mit Änderungen der Masse. Die Leuchtkraft steigt mit der Masse, da die nuklearen Erzeugungsraten steil mit der Kerntemperatur steigen. Dies führt zur Masse-Leuchtkraft Beziehung.

Der Bereich stellarer Massen, also der Massenbereich in dem Kernreaktionen möglich sind, beginnt bei 0,08 Sonnenmassen (Kerntemperatur erstmals hoch genug für pp-Kette) und endet bei ungefähr 90 Sonnenmassen (Kernbrennen wird instabil, Oszillationen setzen ein). Ist die Masse eines Sterns und seine Zusammensetzung bekannt, so ist auch seine Leuchtkraft und sein Radius festgelegt. Dies ist auch bekannt als Vogt-Russel Theorem: Die anfängliche Masse und Zusammensetzung eines Sterns bestimmen seinen Radius, seine Leuchtkraft, seine innere Struktur und seine Entwicklung vollständig. Dieses Theorem stimmt aber nur annähernd, da Rotation und Magnetfelder einen Einfluss haben.

Literaturverzeichnis:

- A. Unsöld - B. Baschek:** *Der neue Kosmos* (1991)
- H. Scheffler - H. Elsässer:** *Physik der Sterne und der Sonne* (1990)
- B. Baschek:** *Entstehung der Elemente u. die frühesten Sterne* (1999)*
- C.W. Straka:** *Thermonukleares Brennen in massereichen Pop-III-Sternen* (2002)*
- J. Wilms:** *Beobachtende Kosmologie* (2003)*
- S. Hüttenmeister:** *Sternentwicklung* (2002)*
- A. Stöckl:** *AGB-Sterne und das Lithium-Problem* (2001)*
- T. Mayer:** *Nukleosynthese* (2002)*
- N. Christlieb:** *A stellar relict from the early milky way* (2002)*
(* → Arbeiten aus dem Internet)