

2. Leben und Tod von Sternen

2.1 Kernfusion in der Sonne

$$M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$$

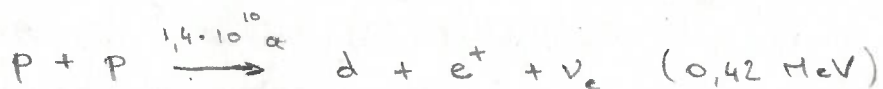
$$L_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

System im Gleichgewicht : die Gravitation hält die Sonne zusammen ; der Druck aus Wärme und Strahlung definiert die Größe.

Je nach der Temperatur spielen verschiedene Mechanismen mit :

2.1.a pp-Ketten

- ppI Kette : 98% der Sonnenenergieproduktion
 $T \sim 10^7 \text{ K}$ ($\sim 1 \text{ keV} \rightarrow$ Plasma)



Unter Berücksichtigung von $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ (1,02 MeV) setzt die „Umwandlung“ von 4 p in einen ${}^4\text{He}$ -Kern 26,73 MeV frei (davon $2 \times 0,26 \text{ MeV}$ für die ν_e).

Dauer eines pp-Stoßes : $\sim 10^{-22} \text{ s}$

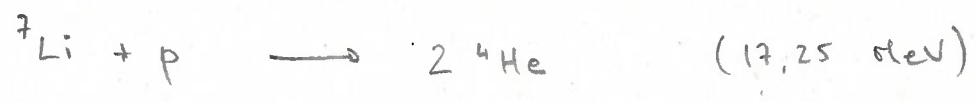
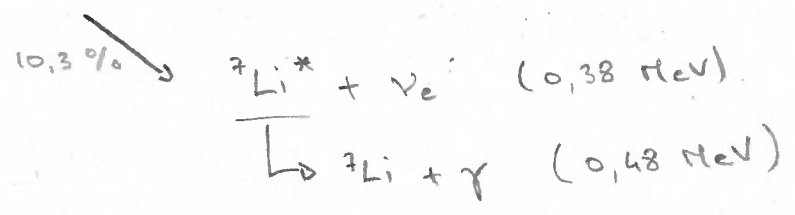
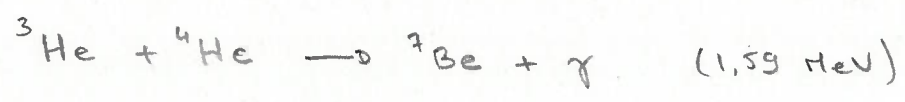
$\Rightarrow$ β -Umwandlungswahrscheinlichkeit $\sim 10^{-25} / \text{Stoß}$
(vgl. $T_{1/2} \sim 880 \text{ s}$ für das Neutron)

Dichte & Temperatur im Sonneninneren $\rightarrow$ Stoßfrequenz

$$\Rightarrow \lambda_{p+p \rightarrow d} \sim 10^{-18} \text{ s} \quad \Leftrightarrow \quad \tau_{p+p \rightarrow d} \sim 10^{18} \text{ s} \sim 10^{10} \text{ a}$$

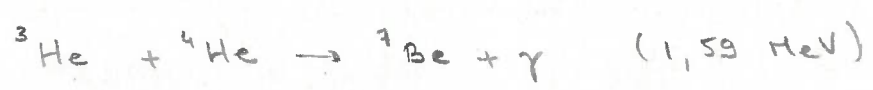
Für einen schwereren Stern ($10 M_{\odot}$), $\tau_{pp} \sim 10^8 \text{ a} \dots$
zu kurz für die Entwicklung / Evolution höheren Lebens.

• PP II Kette : $14 \cdot 10^6 \leq T \leq 23 \cdot 10^6 \text{ K}$

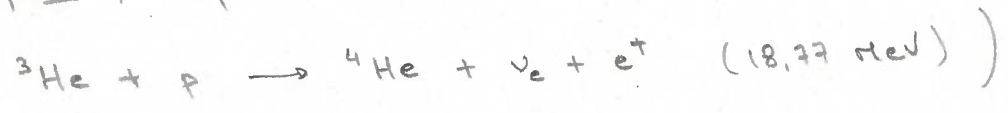


Bem.: Die letztere Reaktion verbrennt ^7Li , aber zu wenig, um das „kosmologische Lithium-Problem“ zu lösen.

• PP III Kette : $T > 23 \cdot 10^6 \text{ K}$



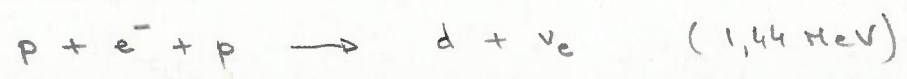
• (PP IV / Hep Reaktion



Bem.: Diese Ketten erzeugen Neutrinos, die „ungestört“ vom Inneren der Sonne bis zu Detektoren auf der Erde fliegen können $\Rightarrow$ Bestätigung des Sonnenmodells.

- * ν_e aus pp (pp I) und ^8B -Zerfall (^8B -Neutrinos, pp III) : kontinuierliches Spektrum
- * ν_e aus PP II : diskretes Spektrum
- * ν_e aus Hep wurden bisher nicht beobachtet, d.h. das stattfinden der Reaktion ist nicht bestätigt.

2.1.b pep - Reaktion



(6)

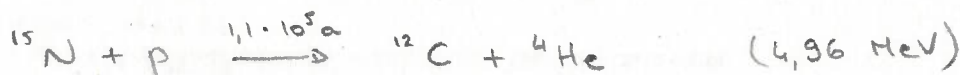
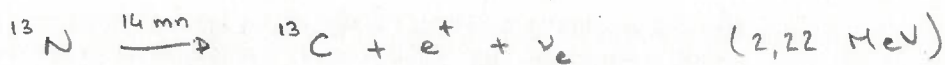
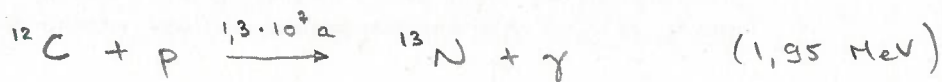
3 Teilchen im Anfangszustand $\leadsto$ deutlich seltener als pp-Reaktion. Aber experimentell bestätigt durch die Beobachtung des emittierten ν_e (diskretes Spektrum!)

2.1.c CNO-Zyklus

auch „Bethe-Weizsäcker-Zyklus“ genannt

$\sim 1\%$ der Sonnenenergieproduktion

Findet ab $T > 15 \cdot 10^6$ K statt, vorherrschend ab $30 \cdot 10^6$ K



Insgesamt werden 4 p in 1 ^4He verwandelt — global wirkt ^{12}C als Katalysator — und 26,76 MeV werden freigesetzt

Bem.: Die Menge an ^4He im heutigen Universum aus sonnenähnlichen Sternen ist klein im Vergleich zu primordialen Helium

Aber ... woher kommt ^{12}C ?

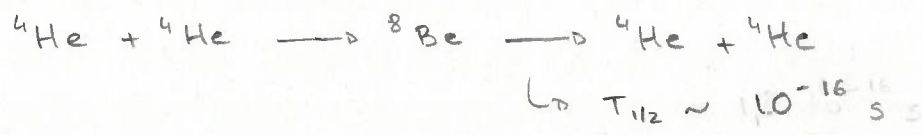
2.2 Nukleosynthese in Sternen

Sobald der Wasserstoff verbrannt ist, besteht der Kern eines Sterns aus ^4He . Da es keine Fusionsreaktionen mehr gibt, um Energie freizusetzen, nimmt zuerst die Temperatur — und damit der Druck — ab.

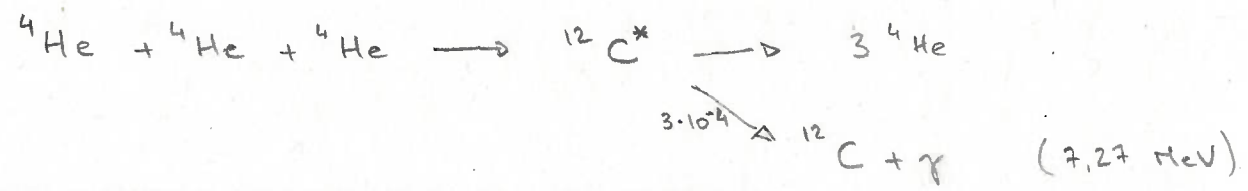
Wegen der Schwerkraft kontrahiert sich der Stern, was zu einer erneuten Temperatur- und Dichteerhöhung führt.

2.2.a Helium-Brennen

Wie im frühen Universum können zwei ^4He -Kerne zwar einen ^8Be -Kern erzeugen, der aber instabil ist.



Ab $T > 10^8 \text{ K}$ ist die Dichte in einem Stern so hoch, dass ein dritter ${}^4\text{He}$ -Kern schnell genug teilnehmen kann, entsprechend effektiv dem 3α -Prozess



Dabei existiert ein passender ${}^{12}\text{C}^*$ -Zustand, der mit einem großen Wirkungsquerschnitt erzeugt werden kann ("Hoyle-Zustand": Vorhersage von F. Hoyle 1954)

Wenn genug ${}^{12}\text{C}$ vorhanden ist: " α -Prozesse":

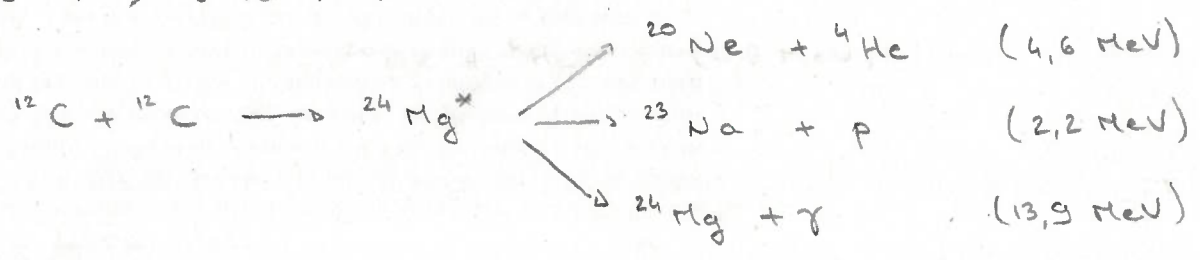


und mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit



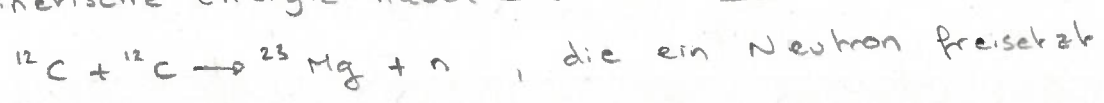
2.2.b Kohlenstoffbrennen

Ab $T > 5 \cdot 10^8 \text{ K}$:



Der letzte Kanal hat aber ein sehr geringes Verzweigungsverhältnis (elektromagnetischer Prozess, während die zwei ersten starke Prozesse sind)

Bem. Auch möglich – wenn die ${}^{12}\text{C}$ -Kerne eine sehr hohe kinetische Energie haben – ist die endotherme Reaktion



und s. " s -Prozess" unten

2.2.c Neonbrennen

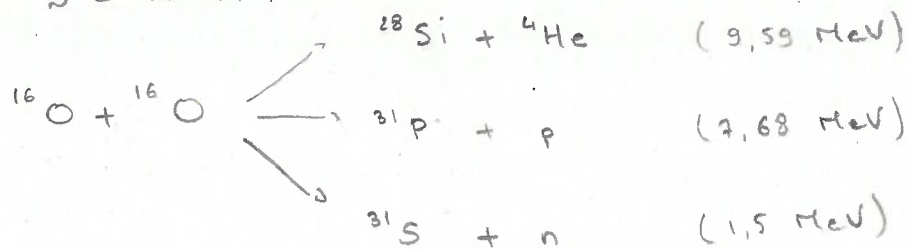
Ab $T > 1,2 \cdot 10^9 \text{ K}$:



2.2.d Sauerstoffbrennen

8

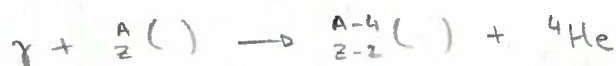
Ab $T \geq 2 \cdot 10^8 \text{ K}$:



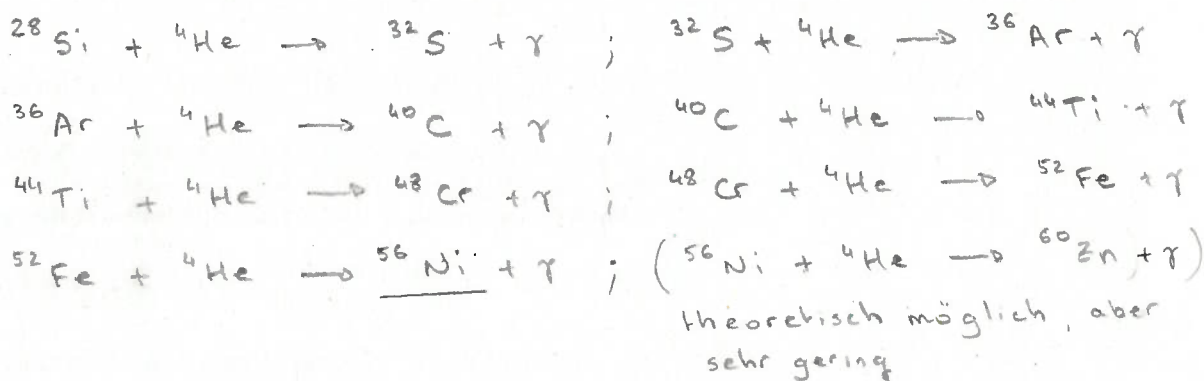
2.2.e Siliciumbrennen

Ab $T \geq 2,7 \cdot 10^8 \text{ K}$:

Kernfotoeffekte setzen α -Teilchen frei:



Wiederum können die ${}^4\text{He}$ -Kerne über α -Prozesse neue Kerne schwerer als ${}^{28}\text{Si}$ erzeugen:



Dazu werden auch in alternativen Kanälen n & p erzeugt, die eingefangen werden können $\leadsto$ Nuklide mit ungerader Z oder N (z.B.: ${}^{36}\text{Ar} + \text{n} \longrightarrow {}^{37}\text{Ar} + \gamma$)



${}^{56}\text{Fe}$ ist sehr stabil (zweithöchste B/A) und kann daher nicht verbrannt werden $\leadsto$ kein Strahlungsdruck mehr, um der Schwerkraft zu widerstehen

$\longrightarrow$ Kernkollaps

(hier: Kern des Sterns!)

2.2.f Supernova Explosion

Sterne mit Masse größer als $\sim 8 M_{\odot}$ können sukzessiv He , C , Ne , O , und Si erzeugen und verbrennen. Wenn Si nicht mehr vorhanden ist, kollabiert der Kern (in $\sim \text{ms}$!),

- • Die Elektronen fusionieren mit den Protonen der Fe-Kerne $\leadsto$ Neutronenstern : $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- Die äußeren Schichten des Sterns werden durch eine auslaufende Schockwelle (n, ν_e ?) beschleunigt $\leadsto$ Supernova (Typ I)
- sehr hoher Neutronenfluß $\Phi_n \approx 10^{23} \text{ n/m}^2/\text{s}$, der auf die Kerne der äußeren Schichten trifft: schnelle Neutroneneinfangsprozesse $n + {}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A+1}_Z\text{X} + \gamma$
- "r-Prozesse" ($r = \text{rapid}$)
- Dabei werden (sehr) neutronenreiche Nuklide erzeugt, die später über β^- -Zerfall zu den Elementen jenseits Zn ($Z=30$) führen
- (Auch "rp-Prozesse" = schneller Protoneneinfänge?)

2.2.g s-Prozess

In "lebenden" Sternen und in Sternen mit Masse $< 8 M_\odot$, die ihren Brennstoff (H, He...) verbrannt haben, können "langsame" ($s = \text{slow}$) Neutroneneinfangsprozesse stattfinden.

$\leadsto$ Erzeugung von Elementen im β -Stabilitätstal (oder mit einem Neutron zu viel) bis ${}^{209}\text{Bi}$.

(Theoretisch: "p-Prozess" = langsamer p-Einfang).

2.3 Kollision zweier Neutronensterne

= die Hauptquelle von r-Prozessen?

$\leadsto$ "schnelle" Erzeugung der schweren Elemente

Erste Beobachtung: 17.08.2017, sowohl Gravitationswellensignal (GW170817) als elektromagnetische Signale: Gamma Ray Burst GRB170817A, 2 Sekunden nach GW170817, Röntgen, Optisch, IR...

Bem.: Endprodukt der Kollision / Verschmelzung: Schwarzes Loch.

Schlussbemerkung

Die meisten Wirkungsquerschnitte für die in diesem Kapitel erwähnten Prozesse sind in der Tat nicht gut bekannt — oder sogar unbekannt!

→ aktives Forschungsgebiet (GSI, Isolde-Experiment am CERN ...)