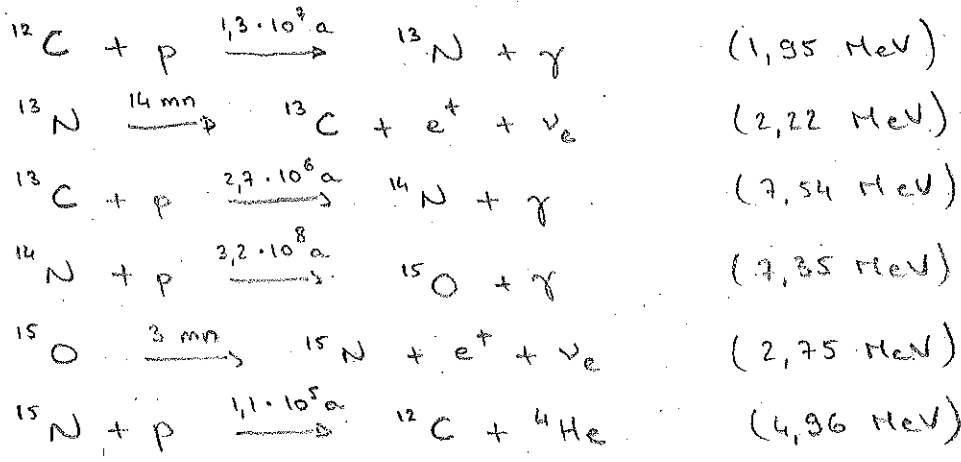


2.1.c CNO-Zyklus

auch "Bethe-Weizsäcker-Zyklus" genannt

~ 1% der Sonnenenergieproduktion

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



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

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

Aber ... woher kommt ¹²C ?

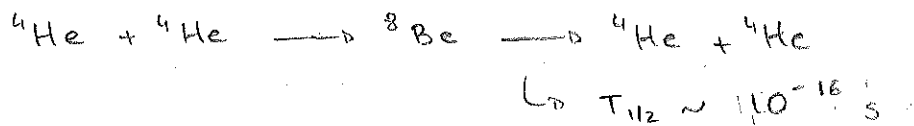
2.2 Nukleosynthese in Sternen

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.

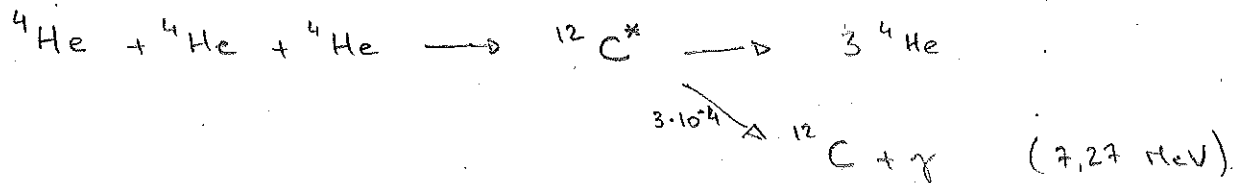
Wegen der Schwerkraft kontrahiert sich der Stern, was zu einer erneuten Temperatur- und Dichteerhöhung führt.

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“:

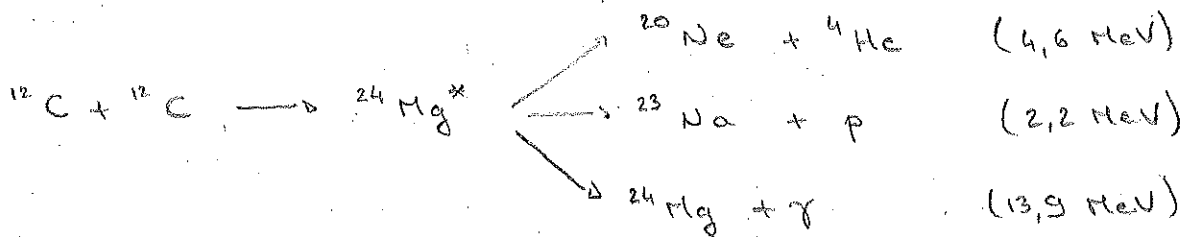


und mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit



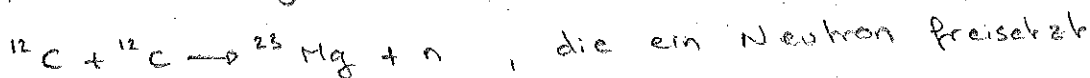
2.2.b Kohlenstoffbrennen

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



→ s. „s-Prozess“ unten

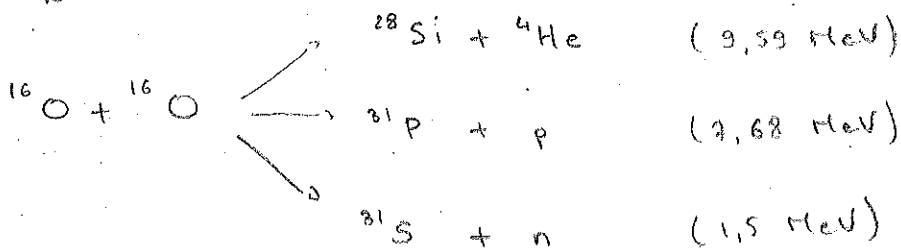
2.2.c Neonbrennen

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



2.2.d Sauerstoffbrennen

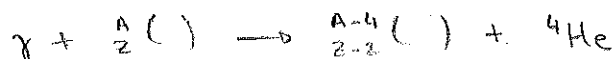
Ab $T \geq 2 \cdot 10^9$ K:



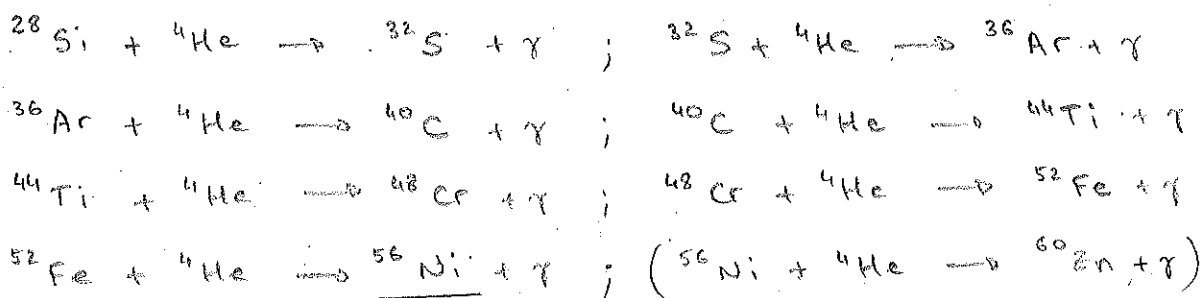
2.2.e Siliciumbrennen

Ab $T \geq 2,7 \cdot 10^9$ K:

Kernfotoeffekte setzen α -Teilchen frei:



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



theoretisch möglich, aber sehr gering

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



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

\rightarrow 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 ms!),

- Die Elektronen fusionieren mit den Protonen der Fe-Kerne ↳ Neutronenstern : $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- Die äußeren Schichten des Sterns werden durch eine auslaufende Schockwelle (n, ν_e ?) beschleunigt ↳ Supernova (Typ I)

→ sehr hoher Neutronenfluß $\Phi_n \approx 10^{27} \text{ n/m}^2/\text{s}$, der auf die Kerne der äußeren Schichten trifft: schnelle Neutroneneinfangsprozesse $n + \text{}^A_Z(\text{)} \rightarrow \text{}^{A+1}_Z(\text{)} + \gamma$
 " r-Prozesse" (r = 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 = slow) Neutroneneinfangsprozesse stattfinden.

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

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

2.3 Kollision zweier Neutronensterne

- = die Hauptquelle von r-Prozessen?
- ↳ "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 ...)