

Nukleare Astrophysik

1

"We refer to the basic physics of energy generation and element synthesis in stars as Nuclear Astrophysics. It is a benign application of nuclear physics [...]"

G. Fowler, Nobel Lecture (1983)

Hier Entstehung der Elemente

- im frühen Universum

- in Sternen

1. Primordiale Nukleosynthese

= "Big Bang Nukleosynthese" (BBN)

Im frühen Universum, im Big Bang Modell $k_B T \text{ (MeV)} \sim \frac{1}{\sqrt{t}}$ (5)

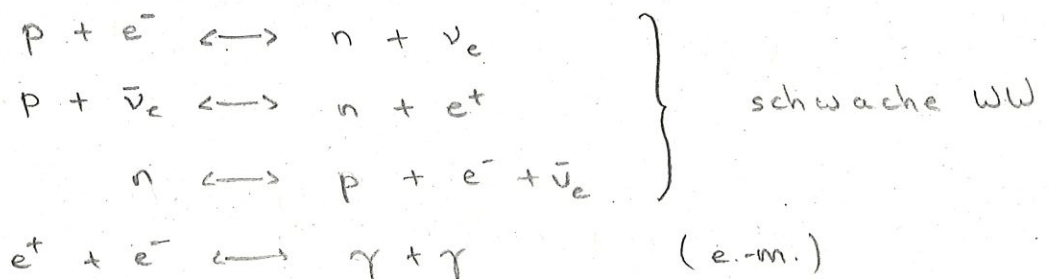
• $t \sim 10 \text{ ms}$, $T \sim 10 \text{ MeV}$ (d.h. $k_B T \sim 10 \text{ MeV}$)

Universum enthält eine "Suppe" (Plasma!) von $p, n, e^- \& e^+, \nu \text{ (& } \bar{\nu}), \gamma$ im thermischen und chemischen Gleichgewicht (dazu noch Dunkle Materie ... spielt keine Rolle hier)

\Rightarrow Teilchendichten $n \propto e^{-E/k_B T}$ (Boltzmann)

Insbesondere: $\frac{n_n}{n_p} \propto e^{-\Delta m/k_B T}$ mit $\Delta m = m_n - m_p$

Einige relevante Prozesse für das Gleichgewicht:



• $t \sim 1 \text{ s}$, $T \sim 1 \text{ MeV}$ $\frac{n_n}{n_p} \approx \frac{1}{6}$

Die Dichten sind kleiner geworden ("Expansion" des Universums) \Rightarrow die Neutrinos entkoppeln vom Rest

\Rightarrow n & p sind nicht mehr im chemischen Gleichgewicht.

Ab jetzt weicht $\frac{n_n}{n_p}$ vom Gleichgewichtswert ab. (2)

Bem.: $k_B T < B(^2\text{H})$ (Bindungsenergie), doch es gibt sehr viele Photonen pro Nukleon ($\frac{n_\gamma}{n_B} \sim 10^{10}$ mit Baryonenzahldichte n_B)

\leadsto es gibt genug γ mit Energie $> B(^2\text{H})$, so dass $^2\text{H} = d$ nicht entstehen kann: $\gamma + d \rightarrow n + p$

- $T \sim 0,5 \text{ MeV}$: $e^+ - e^-$ vernichten sich \leadsto "Erhitzung des Universums"
- $t \sim 3 \text{ mn}$, $T \sim 0,1 \text{ MeV}$

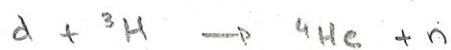
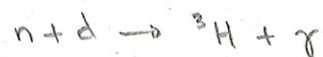
Wegen des Neutronenzerfalls (wichtig: $\tau_n \sim 15 \text{ mn}$) ist jetzt $\frac{n_n}{n_p} \sim \frac{1}{7}$.

Dazu gibt es jetzt nicht mehr genug hochenergetische Photonen, um die Entstehung von Deuteron zu verhindern.

\leadsto $p + n \rightarrow d + \gamma$ erste Reaktion

(Dichten zu klein für 3-Teilchen-Reaktionen)

Dann schnell eine Vielzahl von Reaktionen, die meistens bei ^4He enden (höchste B/A unter den leichten Kernen):



* es entsteht auch ^6Li

* es gibt kein stabiles Nuklid mit $A=5$ und $A=8$

* wegen der geringen Dichten und der Coulomb-Barriere werden praktisch keine schwere Elemente erzeugt

Nach dieser Nukleosynthese werden fast alle Neutronen in ^4He "umgewandelt" (nur niedrige Häufigkeiten von den anderen Kernen, s. unten)

$n_{4\text{He}} \approx \frac{n_n}{2}$
nach

$$Y_p \equiv \frac{4 n_{4\text{He}}}{n_n + n_p} = \frac{2 n_n}{n_n + n_p} = \frac{2}{1 + \frac{n_p}{n_n}} \approx \frac{2}{1 + 7} = \frac{1}{4}$$

Massenverhältnis

D.h. 25% der "baryonischen" Masse ist ^4He
75% ist ^1H

Messungen (im heutigen Universum) : $Y_p \approx 23\%$ 😊

Von den anderen Kernen / Elementen :

$^2\text{H}, ^3\text{He}, ^6\text{Li}, ^7\text{Li}, ^9\text{Be}$
 $\sim 10^{-4} - 10^{-5} \quad \sim 10^{-13} \quad \sim 10^{-10}$

Bem. Die in "metallarmen" (in Astrophysik: Metall \equiv alles schwerer als ^4He) Sternen gemessene Häufigkeit von ^7Li ist 3mal kleiner als die BBN-Vorhersage : "Lithium-Problem" der Kosmologie.

Kann vielleicht durch nicht-so-gut bekannte Wirkungsquerschnitte (falsche Werte in den Codes?) erklärt werden.

2. Leben und Tod von Sternen

2.1 Kernfusion in der Sonne

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

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

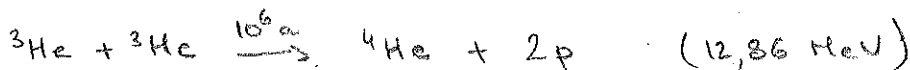
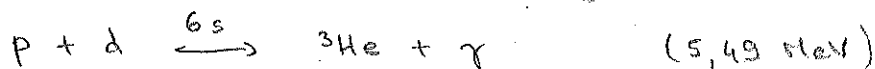
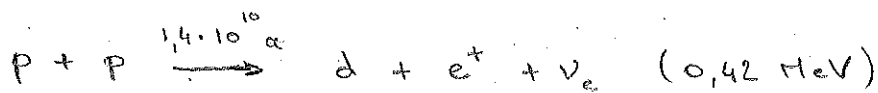
$$L_{\odot} = 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$$

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

- pp I Kette : 98% der Sonnenenergieproduktion
 $T \sim 10^7 \text{ K}$ ($\sim 1 \text{ keV} \rightsquigarrow$ 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 : $\sim 10^{-22} \text{ s}$

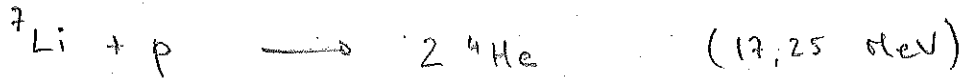
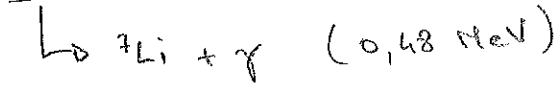
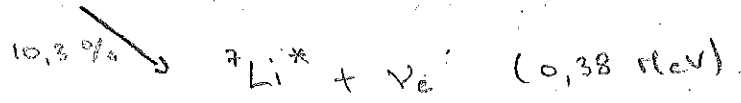
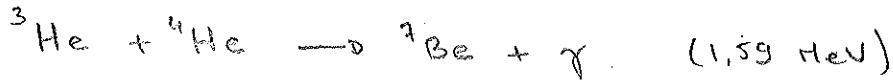
\rightsquigarrow β -Umwandlungswahrscheinlichkeit $\sim 10^{-25}$ / Stoß
(vgl $\tau_n \sim 880 \text{ s}$)

Dichte & Temperatur im Sonneninneren \rightarrow Stoßfrequenz

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

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 : $14 \cdot 10^6 \leq T \leq 23 \cdot 10^6 \text{ K}$

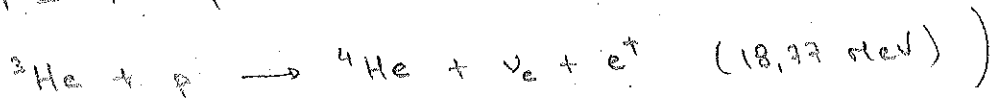


Bem.: Die letztere Reaktion verbrennt ${}^7\text{Li}$, aber zu wenig, um das „kosmologische Lithium-Problem“ zu lösen.

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



• (pp IV / Hep Reaktion



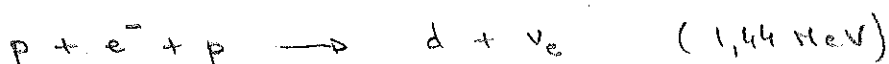
Bem.: Diese Ketten erzeugen Neutrinos, die „ungestört“ vom Inneren der Sonne bis zu Detektoren auf der Erde fliegen können und Bestätigung des Sonnenmodells.

* ν_e aus pp (pp I) und ${}^8\text{B}$ -Zerfall („ ${}^8\text{B}$ -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



3 Teilchen im Anfangszustand \leadsto deutlich seltener
als pp-Reaktion. Aber experimentell bestätigt durch
die Beobachtung des emittierten ν_e (diskretes Spektrum!) (6)