

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 $k_B T (\text{MeV}) \sim \frac{1}{\sqrt{t}} (s)$

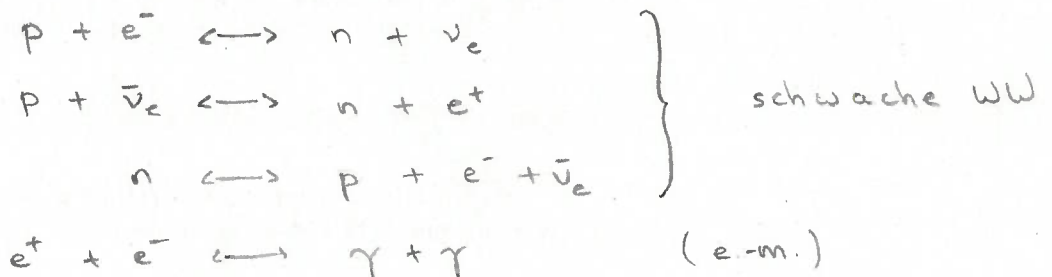
• $t \sim 10 \text{ ms}$, $T \sim 10 \text{ MeV}$ (d.h. $k_B T \sim 10 \text{ MeV}$)

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

no 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.

(2)

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

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: $T_{1/2} \sim 15 \text{ mn}$) 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 ${}^4\text{He}$ „umgewandelt“ (nur niedrige Häufigkeiten von den anderen Kernen, s. unten)

$$\leadsto \underbrace{n_{{}^4\text{He}}}_{\text{nach}} \approx \frac{n_n}{2} \text{ vor}$$

$$\rightarrow \underbrace{Y_p \equiv \frac{4 n_{{}^4\text{He}}}{n_n + n_p}}_{\text{Massenverhältnis}} = \frac{2 n_n}{n_n + n_p} = \frac{2}{1 + \frac{n_p}{n_n}} \approx \frac{2}{1 + 7} = \frac{1}{4}$$

D.h. 25% der „baryonischen“ Masse ist ${}^4\text{He}$
75% ist ${}^1\text{H}$

Messungen (im heutigen Universum) : $Y_p \sim 23\%$ ☺

Von den anderen Kernen / Elementen :

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

Bem. Die in „metallarmen“ (in Astrophysik: Metall $\equiv$ alles schwerer als ${}^4\text{He}$) Sternen gemessene Häufigkeit von ${}^7\text{Li}$ 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.