

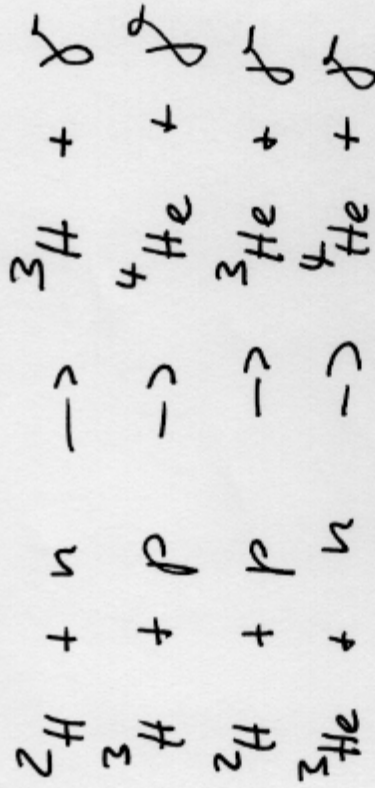
① Bildung des Deuterons im Big Bang Nucleosynthese:



• WQ: electromagn. Prozess ($\gamma + {}^2\text{H}$) $\sigma \sim 0,1 \text{ mb}$

WQ bleibt im thermischen GG aufgrund der hohen
Photonendichte. "Freeze out" findet erst bei $Q/40$
 $\Rightarrow kT = 0,05 \text{ ReV}$

Sobald die Photointegration des Deuterons aufhört,
übernehmen folgende Reaktionen:



bei $kT = 0,05 \text{ ReV}$ bzw. $t \approx 400\text{s}$ ist das

Neutron-zu-Proton Verhältnis

$$r = \frac{N_n}{N_p} \approx 0,14$$

Sobald Neutronen in Deuteron oder Schwere Kerne gebunden sind, zerfallen sie nicht weiter!

Häufigkeit von ${}^4\text{He}$:

Wenn alle Neutronen in ${}^4\text{He}$ gebunden sind, dann ist die Häufigkeit $N_{4\text{He}} = \frac{N_n}{2}$ (2 Neutronen pro He!)

$$\Rightarrow \frac{N_{4\text{He}}}{N_{\text{tot}}} = \frac{\frac{1}{2} N_n}{N_n + N_p} = \frac{\frac{1}{2} \frac{N_n}{N_p}}{\frac{N_n}{N_p} + 1} = \frac{r}{2(r+1)} = 0,06$$

Massenverhältnis: $m_{4\text{He}} \approx 4M_H$

$$\underline{Y_{4\text{He}}} := \frac{4 \cdot N_{4\text{He}}}{N_{\text{tot}}} = \frac{2r}{r+1} = \underline{\underline{0,25}}$$

Messungen im Sonnensystem, stellare Atmosphäre,
globulare Clustern $\Rightarrow Y_{\text{He}}^4 = \underline{0,24 \pm 0,01}$

Wichtige Reaktionen mit He: $\rightarrow \text{Be} \rightarrow \text{Li}$
 $\rightarrow \text{Li}$

Bilder

Häufigkeiten der leichteren Elemente über 10 Größenordnungen
niedrig für $S_B = (3,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$

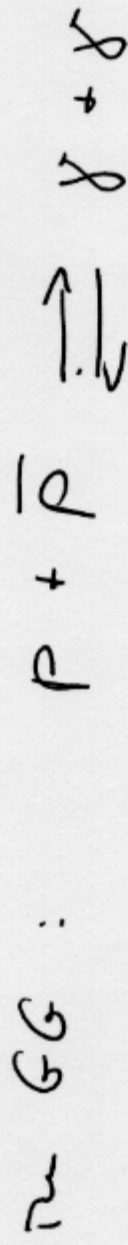
bzw. $N_B = (0,18 \pm 0,05) \text{ m}^{-3}$ (vgl. $N_Y = 411 \text{ cm}^{-3}$)

$\Rightarrow N_B / N_Y = (5,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-10}$

Warum werden keine schwerere Elemente produziert?

- keine stabilen Isotope mit $A = 5, 8$
- keine 3α -Reaktion wie in Sterne, da ${}^4\text{He}$ -Dichte zu hoch ist

Baryon - Antibaryon Asymmetrie



man kann Zyk, das "freeze out" bei $k_B T_c \approx 20 \text{ eV}$

(Anihilationsrate $<$ Expansionsrate
 \Rightarrow keine weitere Baryon - Anti-Baryon
Anihilation)

$$\text{und } \frac{N_B}{N_f} = \frac{N_B}{N_f} \approx 10^{-18}$$

Dieses Verhältnis sollte bis heute unverändert sein!

Beobachtung: $\frac{N_{\bar{B}}}{N_f} \text{ (observed)} \approx 10^{-9}$

$$\frac{N_{\bar{B}}}{N_B} \leq 10^{-4} \text{ (cosmic rays)}$$

D.h. Big Bang Modell ist um Faktor 10^9 falsch!

Sacharov Kriterien (1966)

Wurde Annahme, daß anfängliche $B = 0$ ist, Baryon - Anti-Baryon Asymmetrie sich entwickeln, falls

- 1) Baryonzahl verletzende WW
- 2) Nicht-Gleichgewicht Situation („freeze-out“)
- 3) CP und C Verletzung

(siehe Folien)

Elementarsynthese in Sternen

10^6 y später; nach Bildung von Atomen ($kT < eV$)

ca 10^3 Protonen pro Nucleon

Kontraktion von Protosternen (im wesentlichen aus H , 4He (25%))

durch Gravitation

$$\Delta E (\text{gravitativ}) = \Delta kT + \Delta (\text{Abstoßenergie})$$

Kontraktion

Aufwärmen

Virial Theorem: totale kinetische = $-\frac{1}{2}$ Gravitationsenergie

Für $M < 0,1 M_{\odot}$: Kontraktion stoppt durch

Entartungsdruck der Elektronen, ohne daß die Temperatur

für thermonukleare Reaktionen ausreicht \Rightarrow braune Zwerg

Für $M \approx M_{\odot}$

WQ / S-Faktor

$$\sigma(E) \propto E^{-1}$$

$$e^{-\frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{E}}}$$

$$\cdot S(E)$$

7

Aschrophysikalische
S-Faktor

6 7