

9. Nukleosynthese

①

9.1. Primordial Nukleosynthese (= NS im "Big Bang")

Einschub: Standardmodell des frühen Universums
basiert auf Exp. Befunden:

1) Hubble'sche Gesetz: $v = H r$

2) Kosmische Hintergrundstrahlung (Penzias + Wilson)

-> 3) Kosmische Häufigkeit d. leichten Elemente ←

4) Anisotropie d. Kosmische Hintergrundstrahlung

extreme Temperaturen und Teilchendichten in sehr frühen
Universum. Ausdehnung und Abkühlung des Univ.

sämtliche Teilchen waren im thermischen GG

für $kT \gg mc^2$; k : Boltzmannfaktor,

m : Teilchenmasse

Zeit zwischen Kollisionen (= inverse der Kollisionsrate ω)

für ein bestimmtes Teilchen muß kurz im Vgl. zur Alter
des Univ. zu dieser Zeit $\Rightarrow \omega \gg t^{-1}$

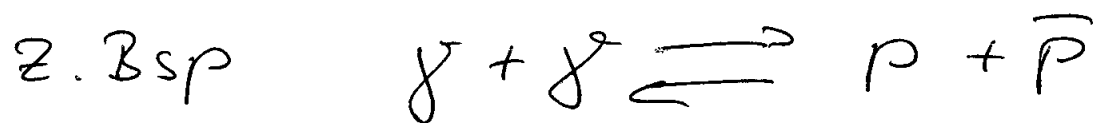
$$W = \langle N \sigma v \rangle \quad : \quad N : \text{Teilchendichtezahl} \quad (2)$$

$$v : \text{relativgeschwindigkeit}$$

$$\sigma : \text{Stoßquerschnitt}$$

Teilchendichte können für folgende Gründe unter die GG-Dichte fallen ("freeze out")

1) kT fällt unter die Schwellenenergie zur Produktion eines bestimmten Teilchens



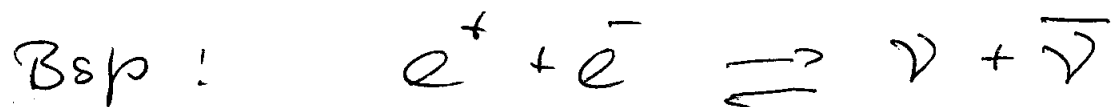
Sobald $kT_e \ll m_p c^2$

p, \bar{p} können noch annihilieren, werden nicht mehr produziert

Sämtliche Hadronen haben eine Masse $(m c^2) > 100 \text{ MeV}$.
 Folglich: alle instabile Hadronen zerfallen zu
 Leptonen, Photonen und Nukleonen für

$$kT \lesssim 100 \text{ MeV} \quad (\sim 10^{-6} \text{ sec})$$

2) Wirkungsquerschnitt wird so klein,
dass Produktionsrate nicht aufrecht erhalten
werden kann



sobald $kT \lesssim 3 \text{ keV}$ ($t > 10^{-2} \text{ sec}$)

für $\approx 10^5$ Jahre besteht das Universum
aus $p, e^-, \text{H-Atome}$ und Photonen



Q : Ionisationspotential bei $13,6 \text{ eV}$

mittlere Photonenenergie bei T $\langle T \rangle = 2,7 T$

$kT = 5 \text{ eV} \Rightarrow \langle kT \rangle \approx 13,6 \text{ eV}$

Photonendichte $\times 10^9$ Materiedichte

$kT = 0,3 \text{ eV}$: Entkopplung von Strahlung und Materie
 $t_d = 10^{13} \text{ s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ y}$

(3)

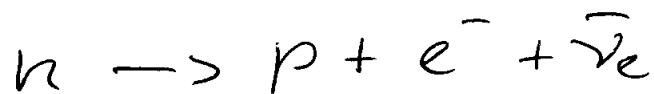
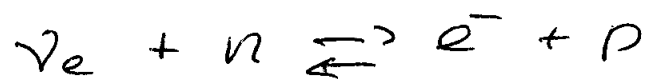
Zeitgleich $S_m \propto T^{-3} \approx S_r (\propto T^{-4})$

(4)

bei $t \approx 10^6$

Materie dominiert Energie dichte. Erst nach Entkopplung von Strahlung von Materie konnten sich Atome, Moleküle bilden

Nach ca. 1 sec sind neben Leptonen und Photonen nur Neutronen und Protonen übrig. Ihre relativen Anteile ist durch schwache Prozesse:



$kT < m_p c^2$ sind Nukleone nicht-relativistisch

Boltzmann-Faktoren beschreiben die Verteilung

$$\frac{N_n}{N_p} = e^{-\frac{Q}{kT}}, \quad Q = (m_n - m_p) c^2 = 1,29 \text{ MeV}$$

$$kT_e = \underline{0,87 \text{ MeV}}$$

zu Beginn der Entkopplung ist das Neutron-zu-Proton
Verhältnis

$$\frac{N_n(0)}{N_p(0)} = \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) = 0,23$$

zu späterer Zeit verringert sich Neutronenzahl
aufgrund des β -Zerfalls des Neutrons

$$N_n(t) = N_n(0) e^{-t/\tau}$$

$$N_p(t) = N_p(0) + N_n(0) (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\text{mit } \tau = \underline{896 \text{ sec}}$$

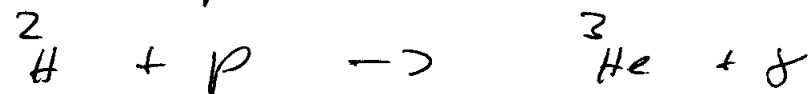
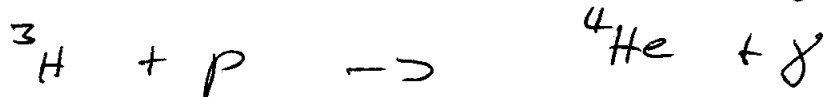
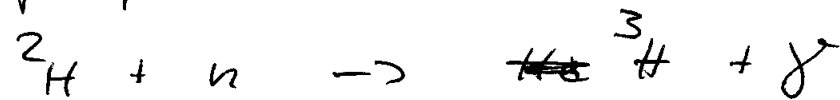
Nucleosynthese beginnt sofort über die Synthese
des Deuterons



WQ : Photodisintegration (ER) $\sigma = 0,1 \text{ mb}$

Aufgrund der hohen Photodensität findet der "freeze-out" erst bei $Q/40 \Rightarrow kT = 0,05 \text{ MeV}$

Sobald Photodisintegration des Deuterons aufhört, überwiegen folgende Reaktionen:



Bei $kT = 0,05 \text{ MeV}$ (bzw. $t \approx \underline{400 \text{ s}}$)

ist Neutron-zu-Protonverhältnis

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

N.B. Sobald Neutron in D gebunden, kann es nicht mehr zerfallen!

wenn alle Neutronen in ${}^4\text{He}$ gebunden sind,
dann ist die Häufigkeit $N_{\text{He}} = \frac{N_n}{2}$

(7)

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

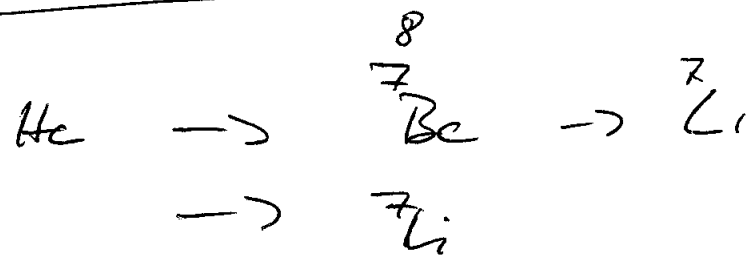
Massenverhältnis : $m_{4\text{He}} \approx 4 m_p$

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

Messung im Sonnensystem, ~~in~~ interstellare Atomosph.
Galaxienlauf

$$\boxed{Y_{4\text{He}} = 0,24 \pm 0,01}$$

Reaktion mit

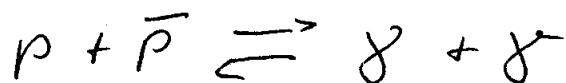


Warum werden keine schweren Elemente produziert? (8)

- Es gibt keine stabilen Elemente mit $A=5$ und 8
- keine 3α -Reaktionen wie in Sternen, da ${}^4\text{He}$ -Dichte zu klein

Baryon - Antibaryon Asymmetrie

Betrachte wir eine Population von Nucleonen im GG mit Strahlung



Man kann zeigen, daß 'freeze-out' bei $kT_c \approx 20 \text{ MeV}$

$$\frac{N_B}{N_{\bar{B}}} = \frac{N_{\bar{B}}}{N_B} \approx 10^{-18}$$

Dieses Verhältnis sollte bis heute unverändert sein.

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

$$\frac{N_{\bar{B}}}{N_B} < 10^{-4}$$

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

(9)

Unter der Annahme, dass $n_B = 0$

(N.B. $B = 10^{79}$ für die Beobachtung erklären, aber...)

Sachewov Kriterien (1966)

Unter der Annahme, daß anfänglich $B = 0$ ist,
Baryon-Asymmetrie kann sich entwickeln, falls

- 1) Baryon-Zahl verletzte WW
- 2) Nicht-Gleichgewicht situation ("freeze out")
- 3) CP and C Verletzung

9.2. Elementsynthese in Sterne

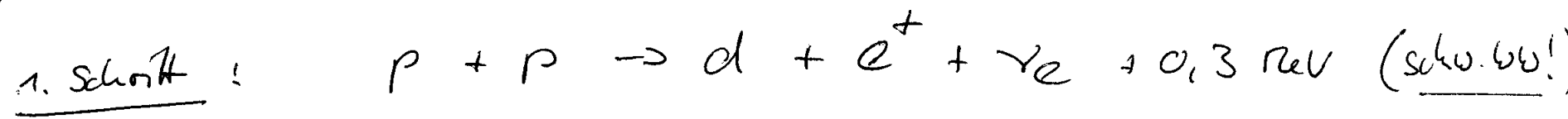
... 10^6 y später

Kontraktion von Protosternen, im wesentlichen aus H und ^4He (25%) durch Gravitation \rightarrow Kontraktion

$\rightarrow \text{He}^{-\text{ke}}$

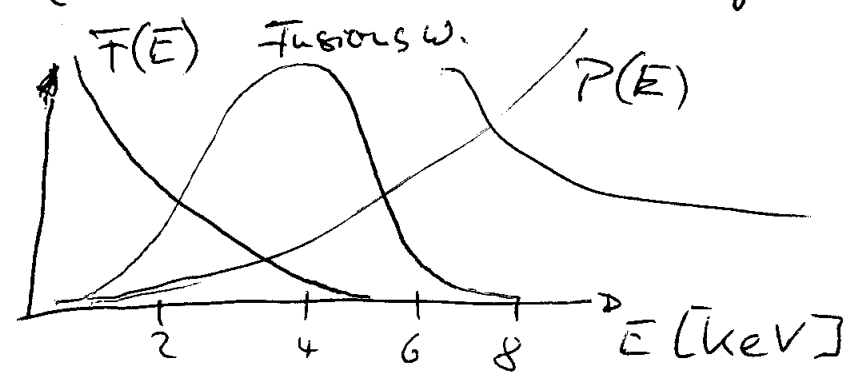
Virial Theorem: totale kin. Energie = $-\frac{1}{2}$ Gravitationsenergie

a) Wasserstoffbrennen



Bei $T = 1 \text{ keV}$ (10^7 K)

$f(E)$: Maxwellverteilung $\propto e^{-E/kT}$



$P(E)$: Tunnelwahrscheinlichkeit (Gamov)

$f(E) \cdot P(E) \cdot v_w$