

Nukleosynthese

(1)

Primordiale Nukleosynthese (= Nukleosynthese im frühen Universum, „Big Bang“)

Standard Modell des frühen Universums basiert auf folgenden experimentellen Beobachtungen:

- 1) Hubble'sches Gesetz: $v = H r$ Geschwindigkeit \propto Abstand
- 2) Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB, Cosmic Microwave Background)
- 3) Kosmische Häufigkeit d. leichtesten Elemente
- 4) Anisotropie des CMB zur Bildung Strukturen auf großen Skalen

Extreme Temperaturen und Teilchendichten im sehr frühen Universum. Ausdehnung und Abkühlung des Universums
wenn sämtliche Elementarteilchen im thermischen Gleichgewicht
(für $kT \gg mc^2$; k : Boltzmannkonstante, m : Teilchenmasse)

Bedingung für thermisches Gleichgewicht:

Zeit zwischen Kollisionen (\Rightarrow inverse der Kollisionsrate ω)

für ein bestimmtes Teilchen muß kurz sein im Vgl. zum
Alter des Universums zu dieser Zeit $\omega \gg \frac{1}{t}$

$$\omega = \langle N \sigma v \rangle$$

N : Teilchendichte

v : Relativgeschwindigkeit

σ : Wirkungsquerschnitt

Teilchendichte ∇ können für folgende Gründe unter die
Gleichgewichtsdichte fallen:

1) kT fällt unter Schwellenenergie zur Produktion eines
bestimmten Teilchens z. Bsp $\gamma + \gamma \rightleftharpoons p + \bar{p}$
sobald $kT \ll m_p c^2$

Proton und Antiproton, die annihilieren werden nicht mehr
erneut produziert (N.B. ein klein Teil der Nukleone
annihiliert! "ES gibt uns")

Säurliche Hadronen haben eine Masse $m c^2 > 100 \text{ MeV}$.

Folglich zerfallen alle instabilen Hadronen in Leptonen u. Photonen
(Nukleone) für $kT \lesssim 100 \text{ MeV}$ ($\approx 10^{-6} \text{ sec}$)

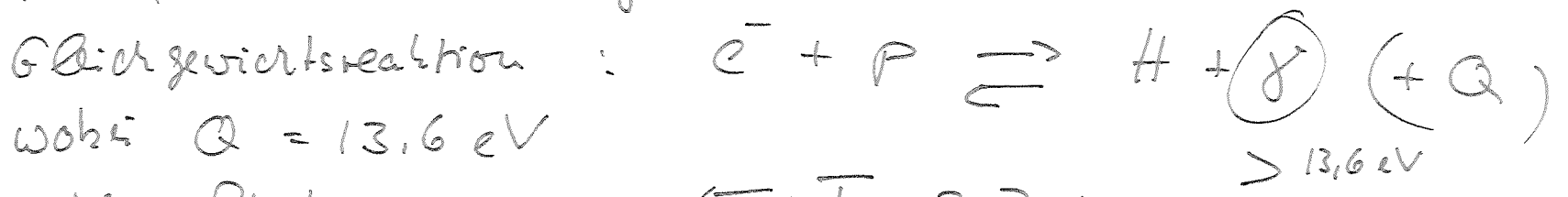
(2)

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



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

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



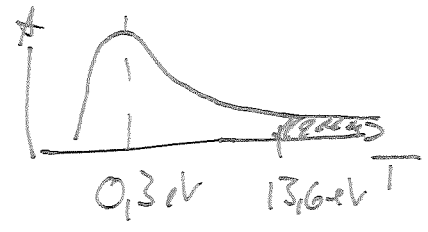
mittlere Photonenenergie bei $T = 2,7 \text{ kT}$

$kT = 5 \text{ eV}$

Photondichte $\approx 10^9 \times$ Materiedichte

$\Rightarrow kT = 0,3 \text{ eV}$ wird Materie transparent

für Strahlung: "Entkopplung" bei $10^{13} \text{ sec} = 3 \cdot 10^5 \text{ y}$

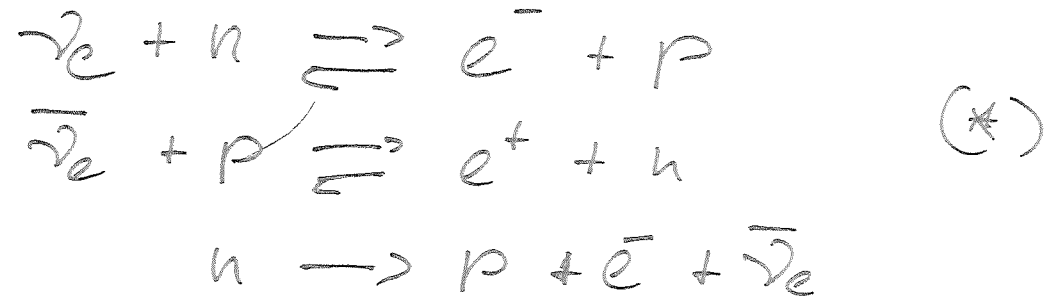


$S_m (\propto T^{-3}) \approx S_r (\propto T^{-4})$ bei $t \approx 10^6 \text{ yr}$

Seit dem: Materie dominiert Energiedichte
Erst nach d. Entkopplung von Materie und Strahlung konnten sich

Atome, Moleküle bilden

Nach ca. 1 sec sind neben Leptonen und Photonen
nur Neutronen u. Protonen übrig. Ihre relative Anzahl
ist durch die schwache Prozesse festgelegt:



Mit zunehmender Expansion und $kT < m_p c^2$, sind Nucleonen
nicht-relativistisch $E = mc^2 + \frac{p^2}{2m}$

=> Gleichgewichtsverhältnisse lassen sich durch Verhältnisse
der Boltzmann-Faktoren beschreiben

$$\frac{N_n}{N_p} = e^{-\frac{Q}{kT}} \quad , \quad Q = (m_n - m_p)c^2 = 1,293 \text{ MeV}$$

für genügend kleine kT wird ω^{-1} für für Reaktionen (*)
größer als Alter des Universums t . Genaue Rechnungen
ergeben krit. Temperatur $kT \approx 0,87 \text{ MeV}$



Bei $kT = 0,05 \text{ eV}$ ($t \approx 400 \text{ sec}$) ist Neutron-zu-Proton Verhältnis

$$\Gamma = \frac{N_N}{N_P} = 0,14$$

Sobald Neutronen zu Deuterium oder schweren Kerne gebunden sind, zerfallen sie nicht mehr!

Häufigkeit von ${}^4_2\text{He}$ wenn alle Neutronen zu ${}^4_2\text{He}$ gebunden sind, dann ist die Häufigkeit

$$N_{\text{He}} = \frac{N_N}{2} \quad (\text{abgestoßen von Neutronen zu } {}^2_1\text{H})$$

$$\frac{N_{4\text{He}}}{N_{\text{tot}}} = \frac{\frac{1}{2} N_N}{N_n + N_P} = \frac{\frac{N_N}{N_P}}{2 \left(\frac{N_N}{N_P} + 1 \right)} = \frac{\Gamma}{2(\Gamma + 1)} = 0,06$$

Zu spätere Zeit vermindert sich die Neutronenzahl
aufgrund des β -Zerfalls des freien Neutrons

$$N_n(t) = N_n(0) e^{-t/\tau}, \quad \tau = 836 \pm 10 \text{ sec}$$

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

Wäre nicht zugleich die primordiale Nukleosynthese
erzogen, wäre die Materie des frühen Universums
nur aus Protonen u. Elektronen (Neutrinos) bestehen

Nukleosynthese beginnt sofort, sobald Neutronen
vorhanden sind über Bildung ~~des~~ von Deuterium.



WQ $\sigma \sim 0,1 \text{ mb} (\approx \pi)$ bleibt in Kern. BG.

Aufgrund d. hohen Photodichte findet der „freeze out“
erst bei $Q/40 \rightarrow kT = 0,05 \text{ MeV}$

Sobald die Photo-Disintegration des Deuterons aufhört,
übernehmen folgende Reaktion, die zu He führen, etc.:

Massenverhältnis

$$m_{4\text{He}} \approx 4 m_{\text{H}}$$

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

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



Wann werden keine schweren Elemente produziert?

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

Baryon - Antibaryon Asymmetrie: (nächste Vorlesung)