

Primordiale Nukleosynthese (= Nucleosynthese im „Big Bang“) (1)

Standardmodell des frühen Universums basiert auf folgenden experimentellen Befunden:

- 1) Hubble's Gesetz : $v = H \cdot r$ (Geschwindigkeit \propto Abstand)
- 2) Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB, Cosmic microwave background)
- 3) Kosmische Häufigkeit der leichten Elemente
- 4) Anisotropie des CMB (zur Bildung von Strukturen auf großen Skalen)

Extreme Temperaturen und Teilchendichten im sehr frühen Universum.
Ausdehnung und Abkühlung des Universums.

Sämtliche Elementarteilchen waren im thermischen Gleichgewicht
(für $kT \gg mc^2$, k : Boltzmannkonstante, m : Teilchenmasse)

Bedingung für thermisches GG: Zeit zwischen Kollision (= inverse der Kollisionsrate ω) für ein bestimmtes Teilchen muß kurz sein
im Vgl. zum Alter des Universums zu dieser Zeit

$$\omega \gg t^{-1}$$

$$W = \langle N \sigma \sigma \rangle$$

mit

N : Teilchendichtenzahl

σ : relativ Geschwindigkeit

σ : Wirkungsquerschnitt

(2)

Verlassen des Gleichgewichts:

1) kT fällt unter die Schwelle eines bestimmten Teilchens



sobald $kT \ll m_p c^2$ können $p\bar{p}$ -Paare nicht mehr produziert werden

(N.B.: ein kleiner Teil der Nukleonen annihiliert nicht.
"Es gibt uns!!")

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

Folglich: alle instabilen Hadronen zerfallen in Leptonen und

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

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



; sobald $kT < 3 \text{ MeV}$
($\lesssim 10^{-2} \text{ s}$)

Boltzmannkonstante
 $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV / K}$

für kurze 10^5 Jahre besteht das Universum aus p, e^-, H -Atomen
(und dunkler Materie)

(3)



$Q = 13,6 \text{ eV}$ (Ionisationspotential des Wasserstoff)

mittlere Photonenergie bei T ist $\langle E \rangle = 2,7 kT$

für $kT = 5 \text{ eV} \Rightarrow \langle E \rangle \approx 2,7 \cdot 5 \text{ eV} = 13,5 \text{ eV} \approx Q$

Da Photondichte $\approx 10^9 \times$ Materiedichte, reicht hochenergetische Schwanz des Schwarzkörperstrahls aus um GG zu halten.

Erst bei $kT = 0,3 \text{ eV}$ wird Materie transparent für Strahlung
"Entkopplung" $t = 10^{13} \text{ s} = 3 \cdot 10^5 \text{ y}$

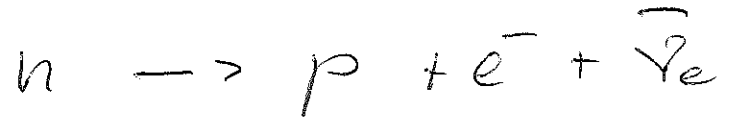
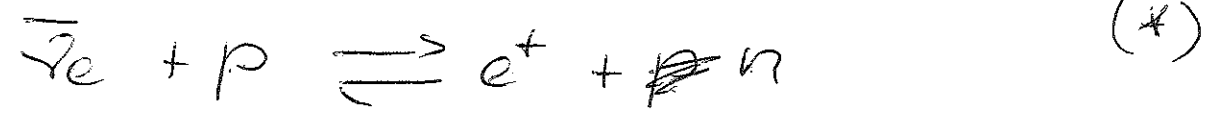
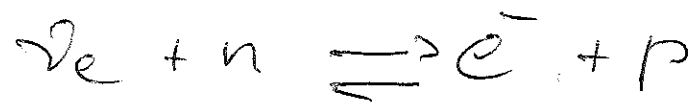
Energiedichte : $S_m \propto T^{-3}$, $S_{\text{radiation}} \propto T^{-4}$

Zeit $t \approx 10^6 \text{ y}$ $S_m \approx S_r$

Seitdem : Materie dominiert Energiedichte

Seit Entkopplung von Strahlung - Materie konnte sich Atome, Moleküle bilden

Nach ca. 1sec sind neben Leptonen u. Photonen nur Neutronen und Protonen übrig. Ihre relative Häufigkeit (N_i , Anzahl) ist durch die schwachen Prozesse gegeben:



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

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

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

für genügend kleine Temperaturen kT wird kT^{-1} für Reaktion (*) größer als Alter Universum t . Genaue Rechnung ergibt kritische Temperatur $kT = 0,87 \text{ MeV}$

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 späteren Zeitpunkt verringert sich die Neutronenzahl
aufgrund des β -Zerfalls des Neutrons

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

$$\frac{N_n(t)}{N_p(t)} = \frac{0,23 \cdot e^{-t/\tau}}{1,23 - 0,23 e^{-t/\tau}} \quad ; \quad \tau_n = 880,0 \pm 0,9 \text{ sec}$$

(PDG 2013)

Würde nicht zeitgleich die primordiale Nukleosynthese
einsetzen, würde Materie des frühen Universums nur aus
Protonen u. Elektronen bestehen. (~~Di-Proton / Di-Neutron~~)

Nukleosynthese beginnt sofort, sobald Neutronen vorhanden
sind über die Synthese von Deuteron

